

A economia verde no Brasil e os fatores determinantes para a transição: uma análise por meio do método STIRPAT*

La economía verde en Brasil y los factores determinantes para la transición: un análisis por medio del método STIRPAT

The Green Economy in Brazil and the Determining Factors for the Transition: An Analysis using the STIRPAT Method

Adrian Jedyn**

Christian Luiz Da Silva***

Marilia de Souza****

Carine de Almeida Vieira*****

Sidarta Ruthes*****

Laila Del Bem Seleme Wildauer*****

Recebido: 31 de julho de 2024

Aprovado: 28 de março de 2025

<https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.14740>

Para citar este artigo

Jedyn, A., Da Silva, C. L., Souza, M. de, Vieira, C. de A., Ruthes, S., & Wildauer, L. D. B. S. (2025). A economia verde no Brasil e os fatores determinantes para a transição: uma análise por meio do método STIRPAT. *Territorios*, (53), 1-29. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.14740>

* A presente pesquisa contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do projeto intitulado Plataforma de Inteligência de Crescimento Verde Brasileiro (CNPq/MCTI/FNDCT 59/2022), ao qual agradecemos o suporte financeiro e institucional para o desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos também o suporte financeiro do CNPq nos projetos 304937/2022-3 e 407021/2023-0.

** Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail: adrianjedyn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8206-0167>

RESUMO

Palavras-chave

Tecnologia; mudanças climáticas; desenvolvimento; sustentabilidade; Brasil.

Este artigo tem como objetivo avaliar os fatores que influenciam a transição para a economia verde no Brasil por meio do modelo STIRPAT. Examinam-se as emissões (1981-2021) e o desmatamento (1991-2021) como variáveis dependentes. Os resultados mostram que o PIB *per capita* se correlaciona negativamente com as emissões devido à desindustrialização e aos avanços tecnológicos. O consumo de energia está positivamente associado às emissões por causa da expansão urbana, e há uma preferência pelo crescimento econômico em detrimento das preocupações ambientais. A expansão agrícola correlaciona-se inversamente com as emissões, sugerindo potencial sequestro de carbono em áreas rurais. A área florestal diminui com o PIB *per capita*, com o crescimento da população e com o uso de energia, o que indica perda florestal ligada ao crescimento econômico e à urbanização. O estudo destaca a necessidade de transições sociotécnicas personalizadas, promovendo setores verdes, regulamentações ambientais robustas e práticas sustentáveis para fomentar a inovação, a descarbonização e o desenvolvimento equitativo.

RESUMEN

Palabras clave

Tecnología; cambio climático; desarrollo; sostenibilidad; Brasil.

El artículo tiene como objetivo evaluar los factores que influyen en la transición hacia la economía verde en Brasil por medio del modelo STIRPAT. Se examinan las emisiones (1981-2021) y la deforestación (1991-2021) como variables dependientes. Los resultados muestran que el PIB *per capita* se correlaciona negativamente con las emisiones debido a la desindustrialización y los avances tecnológicos. El consumo de energía está positivamente asociado con las emisiones a causa de la expansión urbana, y hay una preferencia por el crecimiento económico en detrimento de las preocupaciones ambientales. La expansión agrícola se correlaciona inversamente con las emisiones, sugiriendo un potencial secuestro de carbono en áreas rurales. La superficie forestal disminuye con el PIB *per capita*, lo crecimiento de la población y el uso de energía, lo que indica pérdida forestal vinculada al crecimiento económico y la urbanización. El estudio destaca la necesidad de transiciones sociotécnicas personalizadas, promoviendo sectores verdes, regulaciones ambientales robustas y prácticas sostenibles para fomentar la innovación, la descarbonización y el desarrollo equitativo.

ABSTRACT

Keywords

Technology; climate change; development; sustainability; Brazil.

This article aims to assess the factors influencing the transition to a green economy in Brazil using the STIRPAT model. It examines emissions (1981–2021) and deforestation (1991–2021) as dependent variables. The results show that GDP per capita is negatively correlated with emissions due to deindustrialization and technological advancements. Energy consumption is positively associated with emissions because of urban expansion, reflecting a preference for economic growth over environmental concerns. Agricultural expansion is inversely correlated with emissions, suggesting potential carbon sequestration in rural areas. Forest cover decreases with GDP per capita, population growth, and energy use, indicating forest loss linked to economic growth and urbanization. The study underscores the need for tailored socio-technical transitions, promoting green sectors, robust environmental regulations, and sustainable practices to foster innovation, decarbonization, and equitable development.

As mudanças climáticas são uma preocupação importante, pois afetam diretamente economias, populações e ecossistemas (Dong *et al.*, 2019; Lin & Ullah, 2024). São causadas principalmente por atividades humanas, e as emissões de gases de efeito estufa (GEES) são o principal fator responsável por tais alterações, com o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) como os principais contribuintes para esse desequilíbrio. As emissões de GEES ocorrem tanto em áreas urbanas (Munir & Ameer, 2022) quanto rurais (Haoyan *et al.*, 2023), pois se originam principalmente da queima de combustíveis fósseis (Zhang *et al.*, 2023), no caso do CO₂, e de atividades agropecuárias, tratamento de resíduos e usos industriais, no caso do CH₄. Como o desenvolvimento econômico é um processo que se manifesta dentro das fronteiras geográficas dos países (Sassen, 2000), é imperativo buscar alternativas que não prejudiquem o meio ambiente, promovam a segurança climática e não esgotem os recursos naturais (Dasgupta, 2021).

O desenvolvimento sustentável trata de uma perspectiva holística que integra crescimento econômico, sustentabilidade ambiental e justiça social (Sachs, 2006). É relacionado a busca por tecnologias limpas, custo-efetivas, ambientalmente adequadas e a adoção de políticas públicas focadas em uma coexistência mais adequada com o meio ambiente (Li *et al.*, 2023a).

A economia verde emerge como um paradigma de desenvolvimento ao

considerar a transição do modelo econômico atual à sustentabilidade. Esse paradigma busca o bem-estar e a igualdade social, simultaneamente reduzindo riscos ambientais (United Nations Environment Programme, 2011), uma perspectiva que precisa ser adaptada ao contexto territorial em que será aplicada.

A economia verde no Brasil é caracterizada como um modelo econômico que busca integrar a conservação ambiental, a dinâmica do carbono e o uso mais eficiente dos recursos naturais na produção e no consumo de bens e serviços econômicos. Esse modelo inclui a infraestrutura básica (energia, transporte e saneamento básico), a produção e o consumo de bens e serviços, bem como os negócios verdes, com o apoio das tecnologias verdes, priorizando a redução das desigualdades e a inclusão social, com o suporte de políticas públicas e com a criação de empregos qualificados. A economia verde se relaciona com a economia circular e a bioeconomia, além de abranger iniciativas inovadoras em negócios e mercados verdes, como o mercado de crédito de carbono. Também busca transformar a economia em um modelo mais sustentável (Santeramo, 2022) e é caracterizada pelo crescimento econômico que permite proteção ambiental significativa (Trinh *et al.*, 2023). Ainda, almeja melhorar a eficiência no uso dos recursos naturais e da energia (Gasparatos *et al.*, 2017), e desacoplar as atividades produtivas das emissões de GEES (Trinh *et al.*, 2023).

*** Professor titular no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail: christian.silva76@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4074-5184>

**** Pesquisadora. Fundação Araucária. E-mail: marilia.desouza0305@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5362-439X>

***** Analista de pesquisa, desenvolvimento e inovação. Observatório Sistema Fiep (Federação das Indústrias do Estado do Paraná). E-mail: carine.a.vieira@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9400-8633>

***** Gerente do Observatório Sistema Fiep. Observatório Sistema Fiep. E-mail: sidartaruthes@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1781-9402>

***** Analista técnico sénior. Observatório Sistema Fiep. E-mail: laila-dbs@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3490-4507>

Abordagens ao desenvolvimento da economia verde dependem da tecnologia e da inovação como um elemento crucial na transição, para atingir condições de produção sem afetar adversamente o ecossistema (Nosheen *et al.*, 2021). O desenvolvimento tecnológico busca maior eficiência no uso de recursos naturais, particularmente em relação à energia. Isso leva à redução na emissão GEES, à minimização de impactos ambientais e à degradação diminuída (Haoyan *et al.*, 2023). Além disso, transicionar de uma economia baseada em carbono para uma economia verde torna necessárias mudanças institucionais significativas, como adaptações de infraestrutura e adoção de práticas de gestão para guiar esse processo (Gouveia & Montoya, 2014).

A correlação entre progresso econômico e emissões é evidente em países em desenvolvimento, onde a industrialização é tardia e, por vezes, incompleta. Chandra *et al.* (2023) ressaltam que esses países comumente priorizam o crescimento econômico com poucas restrições, em detrimento de iniciativas mais sustentáveis. Esse fenômeno, descrito por Bresser-Pereira (2007) como “cegueira coletiva”, ocorre quando tais nações buscam o crescimento acelerado com uma ótica puramente economicista, resultando na depleção de recursos naturais em benefício de uma elite restrita.

No contexto brasileiro, a correlação entre atividades econômicas e emissões de GEES também se observa (Silva *et al.*,

2015). Fatores como as mudanças no uso da terra, as práticas agrícolas (Fontana *et al.*, 2021) e a influência do setor energético, este último impulsionado pelo transporte (Gouveia & Montoya, 2014), e a rápida urbanização, que leva ao aumento da demanda energética (Ou *et al.*, 2024), são identificados como contribuintes significativos para as emissões de GEES (Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa [SEEG], 2022).

Dadas a crescente fragilidade dos ecossistemas e a busca por sistemas produtivos sensíveis às questões ambientais, este trabalho busca responder à seguinte questão: como fatores determinantes ambientais e econômicos podem auxiliar na transição do atual modelo econômico para a economia verde no Brasil? Espera-se que, ao entender tais determinantes, seja possível propor medidas adequadas para a transição. Assim, o objetivo deste artigo é avaliar os fatores que influenciam a transição à economia verde no Brasil.

Além disso, o artigo discute subsídios para a proposição de políticas, estratégias de gestão e prioridades de investimento em infraestrutura. Está estruturado da seguinte forma: esta introdução, que apresenta o contexto, o problema e os objetivos; uma revisão da literatura, que discute os conceitos de economia verde, a transição para esse modelo, o método STIRPAT, suas aplicações e variáveis; uma seção de metodologia; os resultados e a

discussão; e, por fim, as considerações finais.

Revisão da literatura

Na abordagem econômica convencional, demandas sociais são alcançadas pelo desenvolvimento econômico, que inevitavelmente causa degradação de recursos naturais. Nesse contexto, a recuperação das condições ambientais ocasiona a desaceleração do desenvolvimento econômico e do crescimento populacional (Satheedevi *et al.*, 2022). Assim, a economia verde pode ser um caminho para mudar esse paradigma a favor da transição ecológica.

Economia verde

A economia verde busca se alinhar ao desenvolvimento sustentável e promover uma estratégia para fomentar uma economia de baixo carbono (Valle & Climaco, 2015). Surge em resposta às crises sociais, ambientais e econômicas, que se correlacionam aos impactos ecológicos do desenvolvimento convencional (Chabán-García & Hidalgo-Capitán, 2023), e almeja usar recursos naturais de forma mais eficiente (Valle & Climaco, 2015; Vukovic *et al.*, 2019), a fim de reduzir as emissões de GEES e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Santeramo, 2022).

Para possibilitar a transição entre modelos econômicos, é necessária a participação estatal, por meio de políticas públicas, e a ação do setor privado, por

novas perspectivas de negócios (Newton *et al.*, 2014). Apesar do ceticismo quanto à integridade ambiental, a aplicabilidade da economia verde é interessante para estados e empresas por ter uma perspectiva operacionalizável (Merino-Saum *et al.*, 2020), diferentemente da sustentabilidade propriamente dita, entendida como um objetivo utópico sem um fim tangível (Loiseau *et al.*, 2016).

As propostas implicam mudanças sistêmicas, profundas e de longo prazo, envolvendo políticas, tecnologia, infraestrutura, ciência e fatores socioculturais orientados à sustentabilidade (Newell & Mulvaney, 2013). Essa transição é não linear, devido aos contextos ambientais, sociais e estruturais das diversas economias, o que a torna complexa e incerta. Além disso, enfrenta vulnerabilidades, como o *greenwashing* (De Freitas Netto *et al.*, 2020), a maldição dos recursos (Cheng *et al.*, 2021), a externalização de impactos ambientais (Brand, 2016) e a dependência de soluções tecnológicas.

A tecnologia almeja otimizar o uso de recursos naturais (Cheng *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2017), mas essa dependência pode ser problemática se não acompanhada de mudanças estruturais e políticas (Trinh *et al.*, 2023). A inovação frequentemente prioriza lucro, o que pode não se alinhar às necessidades ambientais (Shah *et al.*, 2023); a adoção de tecnologias, por sua vez, nem sempre reduz o impacto ecológico ou os níveis de GEES (Li *et al.*, 2023a). Embora possa melhorar as

respostas aos objetivos da economia verde, é essencial reconhecer que a tecnologia não é uma solução universal (Velho, 2011) e as dimensões políticas e sociais dela não podem ser ignoradas (Winner, 2017).

Adicionalmente, a adoção de políticas ambientais é fundamental para orientar iniciativas e atitudes mais adequadas ambientalmente (D'Amato & Korhonen, 2021), influenciando a transição à economia verde (Guo *et al.*, 2017). A observância aos limites de resiliência do ecossistema à exploração e a adoção de sistemas de inovação voltados à sustentabilidade são essenciais, assim como colocar a ética em um papel central nas decisões sobre o uso de materiais energéticos e na organização do trabalho (Abramovay, 2012). Postas tais condições, é fundamental entender os fatores e pontos de controle determinantes para traçar estratégias adequadas a cada contexto.

O modelo STIRPAT

Existem duas estruturas que analisam o impacto econômico no ambiente: a Teoria da Curva de Kuznets Ambiental, que explora o relacionamento entre crescimento econômico e impacto ambiental, e o modelo Impactos Estocásticos por Regressão sobre População, Riqueza e Tecnologia (*Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology* [STIRPAT]). O STIRPAT é uma adaptação do modelo IPAT (impacto = população x

afluência x tecnologia), que correlaciona população, afluência e tecnologia com impacto ambiental, oferecendo uma abordagem não linear que incorpora incerteza e análise estocástica (Huang *et al.*, 2023).

Devido a isso, permite análises mais robustas sobre como fatores afetam o ambiente de forma não linear (Li *et al.*, 2023b; Zhang *et al.*, 2020) e admite a integração de diversas variáveis em análises abrangentes, desde que se mantenha a especificação multiplicativa do modelo, como a pegada ecológica, a eficiência de inovação verde e o desenvolvimento de infraestrutura urbana (Satheedevi *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2023). Pode contemplar análises regionais, como demonstrado por Satheedevi *et al.* (2022), e frequentemente contempla várias perspectivas analíticas e análises preditivas, associando variáveis como população, renda e emissões (Shi *et al.*, 2023).

O modelo foi usado em vários estudos para analisar a interrelação entre fatores econômicos e impactos ambientais, subsidiando iniciativas para a transição à economia verde. Silva *et al.* (2015) encontraram uma correlação positiva entre PIB e emissões de CO₂ em países latino-americanos, validando a hipótese do IPAT sobre a correlação entre população, afluência (PIB) e tecnologia (urbanização e intensidade energética) influenciando a emissão de GEES. No entanto, não exploraram perspectivas da economia verde, variações regionais nos países ou implicações políticas.

Polloni-Silva *et al.* (2021) aplicaram o modelo STIRPAT para analisar as emissões relacionadas à energia no Brasil, destacando a população e o PIB como fatores significativos. O PIB desempenha um papel crítico no crescimento das emissões em estados mais pobres, enquanto a intensidade energética predomina em estados mais ricos, sugerindo que a tecnologia por si só pode não ser suficiente para reduzir as emissões. Discutem-se abordagens políticas potenciais para a transição à sustentabilidade, sem aprofundar em setores econômicos específicos.

Nosheen *et al.* (2023) usaram o STIRPAT para analisar o impacto da inovação em fatores ambientais em 18 países europeus. Revelam descobertas inesperadas, como o impacto negativo de algumas tecnologias amigáveis ao clima.

Haoyan *et al.* (2023) investigaram o relacionamento entre renda, emissões e pobreza na China, por meio do modelo STIRPAT, enfatizando as interações complexas entre redução das emissões e alívio da pobreza. Além disso, sugerem que investimentos verdes podem facilitar a obtenção desses objetivos.

Munir e Ameer (2022) aplicaram o STIRPAT para entender fatores, como abertura comercial, urbanização, crescimento econômico e tecnologia, afetam o impacto ambiental em países africanos e asiáticos emergentes. A urbanização, o crescimento econômico e a tecnologia inicialmente aumentam a degradação ambiental, mas depois ajudam a reduzi-la,

enquanto a abertura comercial tem o efeito inverso.

Zhang *et al.* (2023) investigaram as emissões na indústria de energia elétrica, enfatizando fatores como escala (consumo energético, PIB e população), estruturais energéticos (produção e transmissão) e tecnologia (fatores de emissão e intensidade energética). Observou-se que a escala, a urbanização, o PIB *per capita* e o consumo energético impulsionam emissões, enquanto abertura comercial e transmissão energética reduzem.

Li *et al.* (2023a) analisaram países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), de 2000 a 2018, por meio de modelos estatísticos (IPAT, STIRPAT e *Pooled Mean Group* [PMG]), ressaltando que inovações produtivas reduzem emissões mais efetivamente que tecnologias energéticas. Incluem energias renováveis, emissões da demanda e produção, precificação do carbono e tecnologias de mitigação em vários setores.

Zhang *et al.* (2022) exploraram o impacto da energia nuclear nas emissões e na economia verde. Focam em políticas de controle populacional, investimento em infraestrutura e conservação de energia. Consideraram emissões de CO₂, população, PIB *per capita*, intensidade de carbono e consumo de energia nuclear e renovável.

Trinh *et al.* (2023) examinaram o relacionamento entre infraestrutura, economia e emissões, pelo uso de variáveis

como tendências de investimento em infraestrutura, emissões de CO₂ da demanda e produção, métricas de produtividade, exposição a PM2.5 e desenvolvimento de tecnologias ambientais.

Esses estudos ressaltam a versatilidade do modelo em analisar dinâmicas econômicas e ambientais, o que possibilita percepções valiosas para o desenvolvimento sustentável global e para a formulação de políticas.

As variáveis do STIRPAT

A mensuração do impacto ambiental, a variável dependente I no *framework* IPAT (1), é um processo que depende da adoção de métricas pertinentes — como desflorestamento, geração de resíduos, emissões de GEES — que visa analisar um sistema complexo de interrelações bióticas (Li *et al.*, 2023b; Ofori *et al.*, 2023).

$$I = P \times A \times T \quad (1)$$

Enquanto as emissões de GEES continuam centrais à discussão das mudanças climáticas, fatores como a sensibilidade ecológica, a fragmentação de ecossistemas (Saunders *et al.*, 1991) e as mudanças nos padrões de uso da terra são igualmente vitais para a sobrevivência da biota e para a provisão de serviços ecossistêmicos (Lambin & Meyfroidt, 2011). A degradação da terra —provocada pela expansão urbana, pelo desflorestamento e por usos inadequados— é exacerbada

pelo desenvolvimento econômico (Huang *et al.*, 2023).

A população —variável-chave ao modelo IPAT— influí tanto sobre a economia quanto sobre o meio ambiente. O crescimento demográfico aumenta as necessidades produtivas, o consumo de recursos naturais, as demandas energéticas e a atividade econômica, ocasionando, em geral, maiores quantidades de emissões de GEES (Chandra *et al.*, 2023). Métricas demográficas são comuns nesses estudos, mas elas não capturam plenamente os impactos ambientais das dinâmicas populacionais (Li *et al.*, 2023b). Compreender como diferentes grupos populacionais participam dessas dinâmicas é crucial, principalmente as mais vulneráveis, que enfrentam maiores riscos diante dos impactos climáticos (Suryanto & Aboyitungiye, 2021).

O aumento da demanda energética impulsiona a emissão de GEES, especialmente em países de renda média a baixa (Usman, 2022). A Teoria da Curva de Kuznets Ambiental sugere que, em economias tecnologicamente mais avançadas, o aumento da renda pode se desacoplar do impacto ambiental. Conforme o PIB aumenta, o impacto ambiental também cresce; no entanto, após certo ponto, esse impacto começa a diminuir, enquanto a renda continua a aumentar (Zhang *et al.*, 2020).

Sobre os fatores técnicos no modelo IPAT, a eficiência energética tem papel crucial em contextos territoriais (Li *et al.*,

2023a). Sua melhoria leva a menor consumo energético, maior crescimento econômico e redução das emissões de CO₂ (Ahmed *et al.*, 2022). Existe, no entanto, um fator paradoxal, em que a melhoria das condições de intensidade energética pode resultar em maior demanda energética devido à melhoria da eficiência produtiva —um conceito chamado de postulado de Khazoom-Brookes (Zhou *et al.*, 2013), o que deve ser ponderado na proposição de políticas.

Assim, tecnologia, ciência e investimentos em infraestrutura são fundamentais para guiar o desenvolvimento e identificar oportunidades de mercado (Fouquet, 2010; Li *et al.*, 2023a). Subvenções também exercem função significativa, oferecendo assistência oficial para o desenvolvimento econômico de várias instituições, países e organizações (World Bank, 2024). A eficiência econômica é um fator multifacetado e complexo de mensurar de forma abrangente; a produção total de fatores (PTF) é uma forma de avaliar quão eficientemente os fatores de produção —como trabalho e capital— são combinados para gerar resultados.

Contexto territorial

Localizado na América do Sul, o Brasil é conhecido por sua biodiversidade e reservas significativas de recursos naturais. Tem uma economia diversificada, com PIB (2022, ajustado a valores em R\$ de 2010) de R\$ 3.786 trilhões e PIB *per capita* de

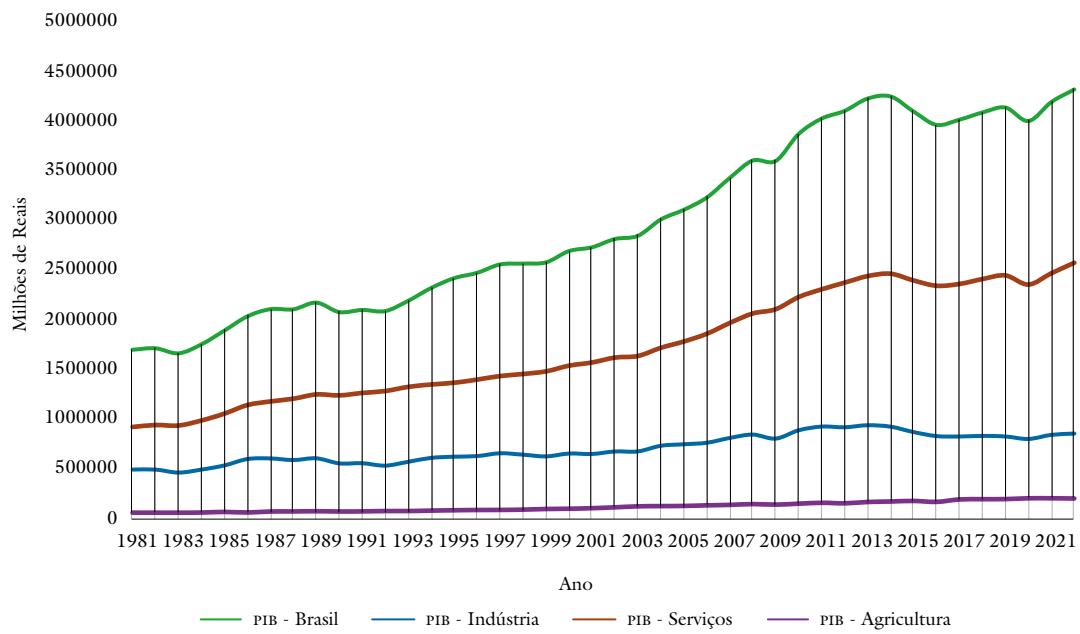
R\$ 49.630 (valores de 2022). Os setores de serviços, industrial e agricultura computam 67.02 %, 26.33 % e 6.65 %, respectivamente, do PIB em 2022 (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada [Ipea], 2024). Apesar de o setor agrícola contribuir com uma parte menor do PIB (Figura 1) em comparação a outros setores, é fundamental para as cadeias produtivas nacionais, por fornecer insumos para a indústria e para outros setores.

Em 2022, emissões de toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂eq) foram distribuídas da seguinte forma (Figura 2): o setor agrícola totalizou 617.204.370,77 t; geração de energia gerou 412.486.072 t; mudança de uso da terra emitiu 1.119.668.385 t; processos industriais por 78.082.746 t; e geração de resíduos para 91.333.389 t CO₂eq (SEEG, 2022). Mudanças no uso da terra computaram a maior parte das emissões de GEES, seguida da agricultura e da geração de energia (SEEG, 2022). As emissões da geração de energia são sobretudo causadas pelo transporte, dependente dos combustíveis fósseis.

O desflorestamento (Figura 3) é uma preocupação significativa para a sociedade, pois representa um dos principais fatores de liberação de carbono na atmosfera. Isso se deve à perda de cobertura florestal e à mobilização do carbono armazenado na vegetação e nos solos.

No Brasil, uma parcela substancial da energia é gerada por fontes renováveis, principalmente hidrelétricas, com

Figura 1. Gráfico do PIB nacional (base de 2010) e do PIB setorial



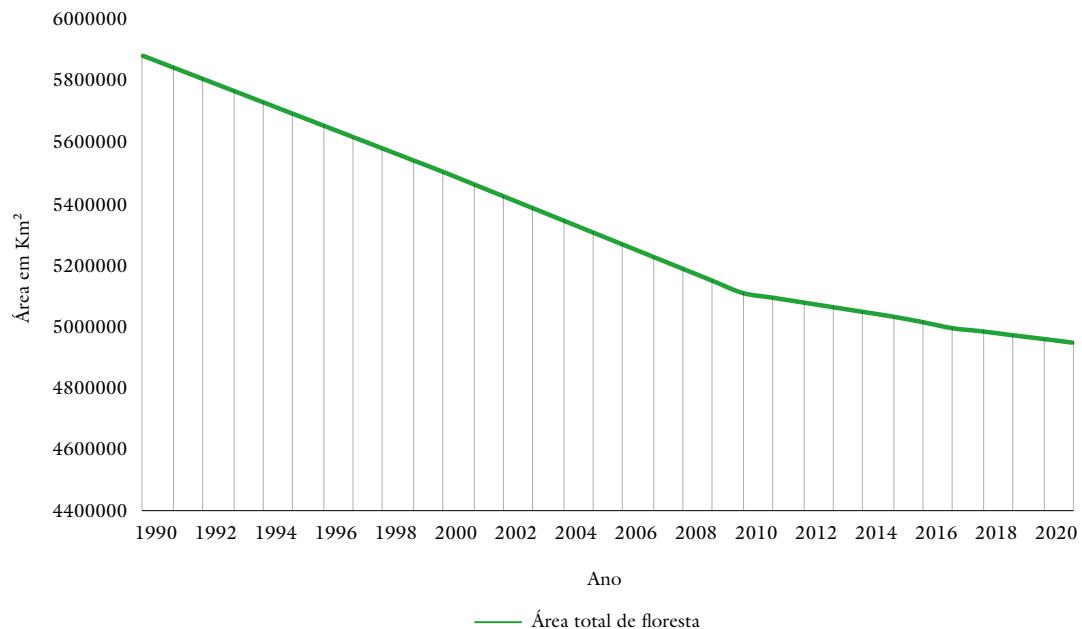
Fonte: adaptado do Ipea (2024).

Figura 2. Emissões de GEES



Fonte: adaptado do SEEG (2022).

Figura 3. Gráfico de perda de área de floresta



Fonte: adaptado do WorldBank (2024).

contribuições menores — porém em crescimento — de fontes eólica e solar. Entre 2013 e 2022, a capacidade instalada de centrais eólicas aumentou de 2.202 MW para 23.761 MW, e a das centrais solares aumentou de 5 MW para 24.453 MW (Empresa de Pesquisa Energética [EPE], 2023). Em relação à mobilidade, predominam combustíveis fósseis, embora também estejam presentes veículos que utilizam etanol anidro, biodiesel e energia elétrica — esta última com crescimento notável a partir de 2001 (Figura 4).

O país é dividido em 27 unidades federativas, cada uma com distintas vocações produtivas e, consequentemente, impactos ambientais. Nota-se que o estado de São Paulo é o mais populoso e com maior PIB (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2021), mas os maiores impactos ambientais, em termos de emissões (SEEG, 2022) e desflorestamento (MapBiomas, 2022), são correspondentes ao estado do Pará (Tabela 1), consolidando as alterações de uso da terra como um dos maiores problemas ambientais nacionais.

territórios 53

Figura 4. Gráfico de consumo de energia total



Fonte: EPE (2023).

Tabela 1. Características das Unidades da Federação

Nome da Unidade da Federação	PIB, R\$ 1.000 (preços de 2021)	População (Censo 2021)	PIB <i>per capita</i> R\$ 1.000, preços de 2021	Emissões 2022	Desflorestamento (ha) (2022)
Acre	162824274,5	830018	196,17	74012850	103782
Alagoas	573230042,3	3127683	183,28	9291422,57	2583
Amapá	171487830,4	733759	233,71	10929418	38290
Amazonas	1098262762	3941613	278,63	205311118	326462
Bahia	2942294593	14141626	208,06	120289306	396316
Ceará	1599349301	8794957	181,85	31469280,3	114132
Distrito Federal	2613280365	2817381	927,56	7210608,47	347
Espírito Santo	1496373633	3833712	390,32	31014781,5	3556
Goiás	2128588705	7056495	301,65	91769903,7	62938

Nome da Unidade da Federação	PIB, R\$ 1.000 (preços de 2021)	População (Censo 2021)	PIB <i>per capita</i> R\$ 1.000, preços de 2021	Emissões 2022	Desflorestamento (ha) (2022)
Maranhão	984225053,6	6776699	145,24	153841142	311491
Mato Grosso	1445617201	3658649	395,12	336848300,0	485155
Mato Grosso do Sul	1062685508	2757013	385,45	70305990,4	72976
Minas Gerais	6645814882	20539989	323,55	165199757	105794
Pará	1777092518	8120131	218,85	439050428	637488
Paraíba	670199241,1	3974687	168,62	13331963,7	32690
Paraná	4594098019	11444380	401,43	74715814,7	15750
Pernambuco	1935877656	9058931	213,70	26134179,2	66315
Piauí	495366211,5	3271199	151,43	42550145,5	233757
Rio de Janeiro	8049871164	16055174	501,39	66719762,9	30561
Rio Grande do Norte	700429108,9	3302729	212,08	12145694,6	89716
Rio Grande do Sul	4690037584	10882965	430,95	95125934,6	2199
Rondônia	468061706,7	1581196	296,02	154964540	208482
Roraima	135659106	636707	213,06	28133594,9	46185
Santa Catarina	3159095993	7610361	415,10	49057046,1	17360
São Paulo	23619547698	44411238	531,84	152431309	1520
Sergipe	463298736,2	2210004	209,64	8168576,28	9947
Tocantins	370496843,7	1511460	245,13	65002932,9	180089

Fonte: adaptado de IBGE (2021), SEEG (2022) e MapBiomass (2022).

Procedimentos metodológicos

O estudo utilizou análise de regressão para investigar determinantes econômicos, sociais e tecnológicos do impacto ambiental, por meio do STIRPAT. Esse modelo integra variáveis cruciais à perspectiva da economia verde, com ênfase

nos aspectos sociais e no desenvolvimento tecnológico voltado para a mitigação das emissões de CO₂.

As emissões de GEES têm centralidade nas discussões da economia verde (Munir & Ameer, 2022), o que, no contexto brasileiro, torna importante também compreender as mudanças nos padrões de

territórios 53

uso e cobertura da terra (Biedemariam *et al.*, 2022; Lambin & Meyfroidt, 2011). Assim, as emissões de GEES e a área de cobertura florestal foram adotadas como variáveis dependentes. O PIB *per capita* (base 2010) e as abordagens setoriais foram adotados como mensuração da afluência. A tecnologia foi abordada pelo consumo energético total, pelas subvenções financeiras e pela PTF, refletindo a eficiência técnica da economia. Além da

disponibilidade na literatura científica consultada, as variáveis em questão foram selecionadas com base na disponibilidade de dados e na existência de uma série temporal entre 1981 e 2021 (Tabela 2).

É importante ressaltar que a variável “emissões” não inclui as emissões das mudanças de uso da terra, apesar de se tratar da fonte primária de emissões de GEES no Brasil. Essa métrica passou a ser considerada apenas a partir de 1990, o

Tabela 2. Variáveis utilizadas no estudo

Variável	Descrição	Fonte
Impacto — Emissões (EMI)	Emissões de GEES	SEEG (2022)
Impacto — Perda de área florestal (DES)	Área de floresta nativa, em km ²	World Bank (2024)
População (POP)	População brasileira	IBGE (2022)
Afluência — PIB (AF)	PIB <i>per capita</i> (base 2010), PIB agricultura, PIB indústria, PIB serviços (valores reais, base 2010 = 100)	Ipeadata (2024) IBGE (2022)
Tecnologia — Área de agropecuária (AG)	Área de produção agropecuária, em km ²	World Bank (2024)
Tecnologia — Consumo energético (CEN)	Consumo de energia, em total equivalente de petróleo (TEP)	World Bank (2024)
Tecnologia — Subvenções de cooperação (excluindo transferência tecnológica [SC])	Subvenções de cooperação para projetos em educação, saúde, infraestrutura e crescimento econômico (R\$ — Base 2010)	World Bank (2024)
Tecnologia—Subvenções de cooperação tecnológicas (ST)	Subvenções de cooperação, incluindo transferência de tecnologia (R\$ — Base 2010)	World Bank (2024)
Tecnologia — PTF	PTF — Brasil	Observatório da Produtividade — Fundação Getúlio Vargas (2024)

que restringiria o recorte temporal do estudo. Para contemplar essa problemática, o desflorestamento foi selecionado como variável dependente, separadamente, para abordar as mudanças no uso da terra.

Foram utilizados quatro modelos distintos: modelo 1 —analisa as emissões de GEES utilizando o PIB *per capita* (2); modelo 2 —analisa a perda de área florestal com o PIB *per capita* na afluência (3); modelo 3 —analisa as emissões de GEES utilizando o PIB setorial para avaliar a afluência (2); e modelo 4 —analisa a perda de área florestal com o PIB setorial na análise de afluência (3).

regressão; de β_{0i} a β_{7i} são os coeficientes das variáveis; e ϵ_{1i} e ϵ_{2i} são os termos de erro estocástico.

Foi realizada uma análise exploratória dos dados para identificar *outliers* e anomalias. Os valores foram convertidos para seu logaritmo natural, assim como Li et al. (2023a), para reduzir o impacto de valores extremos e estabilizar a variação dos erros. A diferença numérica entre observações foi calculada para tornar a série temporal mais estacionária e menos suscetível à influência de valores extremos. O teste de Johansen-Fisher foi utilizado para verificar a cointegração das variáveis,

$$\ln(\text{EMI}) = b_{0i} + \beta_{1i} \ln(\text{AF}) + \beta_{2i} \ln(\text{POP}) + \beta_{3i} \ln(\text{CEN}) + \beta_{4i} \ln(\text{AG}) + \beta_{5i} \ln(\text{SG}) + \beta_{6i} \ln(\text{ST}) + \beta_{7i} \ln(\text{PTF}) + \epsilon_{1i} \quad (2)$$

$$\ln(\text{DES}) = b_{0i} + \beta_{1i} \ln(\text{AF}) + \beta_{2i} \ln(\text{POP}) + \beta_{3i} \ln(\text{CEN}) + \beta_{4i} \ln(\text{AG}) + \beta_{5i} \ln(\text{SG}) + \beta_{6i} \ln(\text{ST}) + \beta_{7i} \ln(\text{PTF}) + \epsilon_{2i} \quad (3)$$

em que:

EMI e DES são o impacto ambiental; AF se trata da afluência, expressa pelo PIB nacional e pelo PIB setorial; POP é a população brasileira no período analisado; CEN é o consumo energético setorial; AG é a área ocupada por atividades agrícolas no Brasil; SG representa as subvenções para o desenvolvimento (exceto tecnologia); ST, as subvenções, incluindo tecnologia; e PTF se refere à produtividade total de fatores na economia brasileira. Sobre as fórmulas dos modelos, b_0 se refere à constante de

confirmando as relações de longo prazo necessárias para a análise de regressão (Munir & Ameer, 2022).

Devido à sensibilidade do STIRPAT à multicolinearidade e aos dados extremos (York et al., 2003), recomenda-se tratar tais situações para almejar uma análise mais robusta. Isso ocorre quando duas ou mais variáveis independentes estão altamente correlacionadas, o que pode comprometer a interpretação dos resultados e a validade do modelo, ocasionando o aumento excessivo na variância das estimativas dos coeficientes. Medidas como

o fator de inflação de variância (*variance inflation factor* [VIF]) (3) são empregadas para aferir a presença e magnitude desse fenômeno.

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (3)$$

em que:

R_i^2 é o coeficiente de determinação da regressão da i -ésima variável independente em relação às outras variáveis independentes. Esse índice foi aplicado para cada variável independente; se exceder o valor 10, há multicolinearidade significativa (Shi *et al.*, 2023).

Os coeficientes de β_{1i} a β_{7i} são estimados pelo método dos mínimos quadrados ordinários (*ordinary least squares*), que minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre as observações reais e as previstas pelo modelo. Esse método visa identificar a relação linear ótima entre as variáveis independentes e dependentes, contribuindo para a robustez analítica dos padrões subjacentes (Shi *et al.*, 2021).

Os resultados foram comparados com a literatura existente para identificar determinantes para a transição da economia brasileira para uma economia verde. Os coeficientes foram avaliados considerando os efeitos ambientais, a importância relativa de cada variável e as implicações práticas dos resultados.

Resultados

O teste de Johanssen-Fisher foi aplicado as variáveis utilizadas nos quatro modelos (Tabela 3), indicando que o modelo 1 exibe cointegração até duas conexões; o modelo 2, até três conexões; o modelo 3, até quatro conexões; e o modelo 4, até três conexões. Isso sugere que os modelos propostos exibem relações de longo prazo entre as variáveis selecionadas, adequado para a análise de séries temporais.

Posteriormente, foi calculado o fator de inflação da variância (VIF) para cada modelo e, como cada modelo apresentou resultados abaixo de 10, a hipótese de multicolinearidade foi descartada. Adicionalmente, a heterocedasticidade foi refutada por meio do teste de Breusch-Pagan para cada modelo.

Com a robustez estatística do modelo estabelecida, os coeficientes de regressão foram analisados quanto à sua significância na compreensão dos fatores que afetam as emissões de GEES e o desmatamento (Tabela 4).

Os valores de erro residual são considerados baixos, mas maiores para os modelos 1 e 3 (0,0158 e 0,0161), enquanto os modelos 2 e 4 são menores (0,00053 e 0,00051). Ao se considerar em conjunto com o resultado do R^2 , menor nos modelos 1 e 3 (0,5791 e 0,5920) e maior nos modelos 2 e 4 (0,7392 e 0,7755, nota-se que o modelo que trata de desflorestamento explica melhor a variabilidade dos dados e implica maior precisão.

Tabela 3. Resultados do teste de Johanssen-Fisher

	Modelo 1 — Emissões — PIB <i>per capita</i>					Modelo 2 — Emissões — PIB setorial			
R <= 5	1.17	7.52	9.24	12.97	R <= 7	1.54	7.52	9.24	12.97
R <= 4	12.32	13.75	15.67	20.20	R <= 6	7.82	13.75	15.67	20.20
R <= 3	17.68	19.77	22.00	26.81	R <= 5	14.81	19.77	22.00	26.81
R <= 2	23.68	25.56	28.14	33.24	R <= 4	21.17	25.56	28.14	33.24
R <= 1	40.84	31.66	34.40	39.79	R <= 3	27.98	31.66	34.40	39.79
R = 0	65.20	37.45	40.30	46.82	R <= 2	50.96	37.45	40.30	46.84
					R <= 1	54.71	43.25	46.45	51.91
					R = 0	94.16	48.91	52.00	57.95
	Modelo 3 — Área florestal — PIB <i>per capita</i>				Modelo 4 — Área florestal — PIB setorial				
R <= 5	1.56	7.52	9.24	12.97	R <= 7	1.96	7.52	9.24	12.97
R <= 4	9.32	13.75	15.67	20.20	R <= 6	5.95	13.75	15.67	20.20
R <= 3	23.88	19.77	22.00	26.81	R <= 5	11.16	19.77	22.00	26.81
R <= 2	31.43	25.56	28.14	33.24	R <= 4	25.09	25.56	28.14	33.24
R <= 1	37.61	31.66	34.40	39.79	R <= 3	31.09	31.66	34.40	39.79
R = 0	65.94	37.45	40.30	46.82	R <= 2	59.96	37.45	40.30	46.82
					R <= 1	69.52	43.25	46.45	51.91
					R = 0	95.37	48.91	52.00	57.95

Tabela 4. Resultados da regressão

	Modelo 1 — Emissões de GEES		Modelo 2 — Cobertura florestal		Modelo 3 — Emissões de GEES		Modelo 4 — Cobertura florestal	
	Coeficiente	.p	Coeficiente	.p	Coeficiente	.p	Coeficiente	.p
Intercesto	0.00214	0.73515	-0.00097	0.00157**	0.00270	0.69079	-0.00119	0.00016***
PIB <i>per capita</i> (r\$ 2010)	-0.45822	0.03903*	-0.02303	0.02695*	-	-	-	-

territórios 53

	Modelo 1 — Emissões de GEES		Modelo 2 — Cobertura florestal		Modelo 3 — Emissões de GEES		Modelo 4 — Cobertura florestal	
	Coeficiente	.p	Coeficiente	.p	Coeficiente	.p	Coeficiente	.p
PIB Agricultura (R\$ 2010)	-	-	-	-	0.11976	0.44256	0.00735	0.29545
PIB Indústria (R\$ 2010)	-	-	-	-	0.39814	0.15873	0.01279	0.23581
PIB Serviços (R\$ 2010)	-	-	-	-	-1.08463	0.04365*	-0.04523	0.02452*
População	-0.54944	0.59602	-0.23414	0.00009***	0.65030	0.56613	-0.15544	0.00750**
Consumo energético (total)	0.56583	0.00073***	-0.01684	0.01289*	0.42496	0.01878*	-0.01979	0.00835**
PTF	-0.89674	0.00502**	0.00016	0.98930	-1.12720	0.00186**	-0.01443	0.25844
Subvenções — atraso de dois anos	0.03328	0.03104*	-0.00030	0.64349	0.03331	0.03530*	-0.00063	0.46343
Subvenções com tecnologia	0.15650	0.02447*	-0.00140	0.60713	0.15289	0.02858*	-0.00196	0.46343
Área de agro- pecuária	-5.45178	0.00229**	0.06652	0.46533	-5.49663	0.00246**	0.18445	0.06690
Erro-padrão residual	0.0158	df = 32	0.00053	df = 22	0.0161	df = 30	0.00051	df = 20
R ²	0.5791		0.7392		0.5920		0.7755	
R ² ajustado	0.4870		0.6562		0.4696		0.6745	
Estatística teste F	6.29	df = 32	8.91	df = 22	4.84		7.68	
Valor de P	0.00011		0.00003		0.00049		0.00008	

Impacto

Os modelos apresentaram variáveis com coeficientes estatisticamente

significativos, indicando a aderência das métricas à evolução dos valores das variáveis dependentes —o impacto ambiental analisado pelo STIRPAT. No modelo 1,

sobre emissões de GEES, as variáveis que se mostraram estatisticamente relevantes foram PIB *per capita* (-0,45822), consumo total energético (0,56584), produtividade total dos fatores (-0,89674), subvenções (0,03328), subvenções com tecnologia (0,15650) e área agropecuária (-5,45178).

No modelo 2, que trata da perda de área florestal com o PIB *per capita*, a afluência se mostrou relevante (-0,02302), assim como a população (-0,23414) e o consumo total de energia (-0,01684). Os modelos 3 e 4 mostraram distribuições semelhantes de variáveis com relevância estatística, com a distinção de que o único PIB setorial relevante foi o do setor de serviços.

População

A população afeta a perda florestal, pois existe uma correlação negativa, ou seja, quanto maior o crescimento populacional, menor se torna a cobertura florestal. Isso ocorre pelo aumento do consumo e pela expansão territorial em áreas naturais ou manejadas, levando à redução das áreas florestadas (Li *et al.*, 2023b). As atividades humanas impulsionam tais mudanças, sobretudo em países em desenvolvimento com índices de desenvolvimento humano mais baixos (Jha & Bawa, 2006). Cenários de alta pressão, perto de expansões urbanas ou mineração predatória na Amazônia, exacerbam esses impactos (Van Vliet, 2019; Sonter *et al.*, 2016). Isso urge neutralizar a degradação da terra para

salvaguardar ecossistemas críticos para o bem-estar da sociedade (Huang *et al.*, 2023). No cenário regional, estados como Pará, Mato Grosso e Amazonas, pontos importantes de perda florestal e emissões de GEES têm população relativamente reduzida, o que pode indicar a existência do efeito de deslocamento ambiental.

Afluência

Tanto nas análises de emissões de GEES quanto na perda de área florestal, a expansão do PIB *per capita* brasileiro exibiu coeficiente significativo inversamente relacionado ao crescimento da variável independente. Na análise de emissões, um aumento de 10% no PIB *per capita* correlacionou-se com uma diminuição de 4,5%, ao contrário das tendências mais amplas observadas em outros estudos que ligam o PIB às emissões (Satheedevi *et al.*, 2022). Isso reflete a estrutura de produção brasileira, influenciada por vários fatores externos, como políticas, efeitos sazonais e mudanças na estrutura econômica.

Essa descoberta contrasta com Silva *et al.* (2015) e Polloni-Silva (2021), que encontraram relações positivas significativas entre emissões e afluência. Silva *et al.* (2015), em uma análise de painel em vários países, incluindo o Brasil, relataram que um aumento de 10% no PIB *per capita* correspondia a um aumento de 6% nas emissões, enquanto Polloni-Silva (2021) observou que um aumento de 1%

no PIB *per capita* se correlacionava com um aumento de 1.19-1.23% nas emissões de GEES.

Os resultados divergentes podem resultar de variações nas metodologias de análise de séries temporais; Silva *et al.* (2015) consideraram dados de 1970 a 2010, um período em que foi observado um aumento acentuado nas emissões de GEES (SEEG, 2022), enquanto Polloni-Silva *et al.* (2021) analisaram dados de 2006 a 2015, um período de aumento do consumo de energia (EPE, 2024). Além disso, nos últimos 40 anos, a economia brasileira mudou significativamente em termos de produção e postura ambiental, influenciada pelo desenvolvimento tecnológico, políticas públicas e variações na produtividade.

Estados como São Paulo, Rio de Janeiro, Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul, juntamente com o Distrito Federal, apresentam uma relação superior entre unidade de PIB *per capita* e emissões, o que indica que economias mais desenvolvidas tecnologicamente têm uma relação superior entre impacto e produção.

Tecnologia

O consumo e as transições energéticas são impulsionados pela demanda da sociedade por serviços energéticos, determinada pela renda disponível dos consumidores (Fouquet, 2010). O consumo de energia mostrou correlação positiva com as

emissões (0.57 e 0.42) e correlação negativa com a perda de área florestal (-0.01684 e -0.01979). A expansão dos assentamentos humanos inicialmente resulta em maior consumo de energia devido à expansão da infraestrutura e ao aumento do consumo (Ou *et al.*, 2024), assim a urbanização, o consumo e o uso dos combustíveis fósseis estão associadas às emissões de GEES no Brasil. A correlação positiva do PIB *per capita* com o consumo de energia pode indicar uma tendência ao uso de serviços com maior eficiência energética.

A PTF indica uma relação inversa com as emissões, o que está alinhado ao princípio da economia verde. Nos modelos 1 e 3, um aumento de 10% na PTF resulta em 8.9%, considerando PIB *per capita*, e 11.2%, no modelo com PIB setorial. Desse modo, a PTF refletiria a eficiência da produção, o que se pode indicar redução nas emissões e na degradação ambiental. Esse resultado contrasta com as descobertas de Zhou *et al.* (2013), que, ao analisarem indústrias em várias regiões chinesas, descobriram que a PTF acompanhava as emissões, com maior produtividade associada a um impacto ambiental maior. Tal resultado é congruente em termos regionais, visto que, em estados com economias mais intensivas em conhecimento como São Paulo, Distrito Federal e Rio de Janeiro, correspondem a menos emissões.

Ambas as subvenções têm um coeficiente positivo em relação às emissões de GEES, indicando que esses fundos são

usados em infraestrutura e atividades com potencial de degradação ambiental. Considerando que o Brasil é um país em desenvolvimento, entende-se que há uma priorização de investimentos em setores da economia e da infraestrutura que podem aumentar a competitividade rapidamente, muitas vezes ignorando as externalidades ambientais (Munir & Ameer, 2020).

Como exemplo, Huang *et al.* (2023) identificaram os efeitos adversos dos investimentos em tecnologia e estrutura industrial como efeitos de transbordamento ambiental. O efeito técnico pode melhorar a eficiência onde é aplicado, mas os resultados podem prejudicar o ambiente circundante. Dadas as particularidades econômicas, ambientais e sociais nas regiões nacionais, o transbordamento e o deslocamento ambiental são hipóteses válidas de se verificar, sobretudo nas distinções entre estados com viés industrial, como São Paulo, e com viés agrícola, como o estado do Pará.

A área de desenvolvimento agrícola mostrou os coeficientes mais significativos em relação às variações nos efeitos dos GEES. Nos modelos 1 e 3, um aumento de 10% nas áreas de desenvolvimento agrícola resultou em uma redução de 54.5% e 54.9% nas emissões, respectivamente, o que significaria que o uso de áreas agrícolas está fortemente correlacionado com a redução de emissões — excluindo as emissões das mudanças no uso da terra. Esse resultado indica tendências positivas na

redução das emissões de GEES relacionadas à adoção de práticas agrícolas de conservação do solo, quando não associadas a alterações de uso da terra.

Modelos convencionais de atividades agrícolas têm influências ambientalmente prejudiciais. Segundo Crippa *et al.* (2021), cerca de 75% das emissões globais estão relacionadas ao setor, tanto por meio de práticas agrícolas convencionais quanto por mudanças no uso da terra, que estão entre os fatores mais críticos nas mudanças ambientais e nas emissões de GEES relacionadas à decomposição do carbono fixado nos solos e à perda de vários outros serviços ecossistêmicos (Harris *et al.*, 2015).

En quanto a mudança no uso da terra aponta para a conversão de áreas naturais em alteradas, o indicador de expansão da área de agropecuária corresponde à percentagem da área do país ocupada pelo setor, incluindo recém-incorporadas e áreas consolidadas e manejadas (World Bank, 2024). A agricultura tem o potencial de captura e fixação de carbono, especialmente quando se usam sistemas como o plantio direto, com potencial para mitigar o impacto negativo das emissões (Machado, 2005; Nicoloso & Rice, 2021). Considera-se que os sistemas de plantio direto, combinados com outras práticas de agricultura conservacionista, têm crescido no país, especialmente na Região Sul, com a área agrícola total crescendo de 68.5% para 78.9% sob sistemas de plantio direto de 2006 a 2017

(Mantovani *et al.*, 2024). Essa condição pode indicar o impacto da transição tecnológica na produção rural de um sistema convencional e ambientalmente disruptivo para padrões agrícolas mais sustentáveis.

Diretrizes de políticas sugeridas

Entre todos os fatores avaliados, a tecnologia é um ponto crítico para definir diretrizes de políticas públicas voltadas à transição do modelo atual para uma economia verde. Como argumenta Fouquet (2010), a transição para a sustentabilidade é sociotécnica, pois deve considerar atributos como eficiência, aceitação social e acessibilidade, e se apresentar como alternativa superior aos métodos convencionais. Além disso, é essencial que tais iniciativas estejam relacionadas aos contextos locais (Sachs, 2006), otimizando sua operação e promovendo a aceitação e adoção dessas tecnologias por seus habitantes.

Isso é um contraponto essencial à ideia convencional de tecnologia (como tecnociência), que se apresenta como uma panaceia, mas pode ter efeitos prejudiciais dependendo de sua aplicação (Vello, 2011). As subvenções, por exemplo, correlacionam-se com o aumento dos impactos ambientais, distintamente do que observam Lin e Ullah (2024), que destacam a possibilidade do uso de subvenções tecnológicas para estimular a inovação e redução da dependência de

combustíveis fósseis na geração de energia paquistanesa. Por isso, a participação da sociedade na definição de metas, objetivos, aplicação e desenvolvimento dessas tecnologias prova ser um passo correto rumo à transição para uma economia verde, que valoriza fundamentalmente a inclusão (Loiseau *et al.*, 2016).

Embora a economia brasileira não esteja desacoplada das emissões de GEES, a relação inversa entre emissões e PIB indica um potencial a ser explorado. A predominância do setor de serviços no PIB sugere a possibilidade de desenvolver uma economia de baixo carbono, dependendo dos esforços para reduzir as emissões no setor energético, particularmente na mobilidade. Fica evidente o papel da otimização tecnológica, juntamente com o potencial de adoção de diferentes práticas, como a expansão do transporte público ou diretrizes de planejamento urbano que otimizem os fluxos logísticos, sobretudo nos estados com grande densidade populacional e renda mais alta, como São Paulo.

Consonante com a hipótese de Porter, é crucial criar políticas que incentivem setores verdes e iniciativas para mitigar setores não verdes (Loiseau *et al.*, 2016). A regulamentação ambiental desempenha um papel sinérgico na inovação, permitindo novas tecnologias, inovações e mercados. Segundo Li *et al.* (2023a), a adoção de políticas regulatórias, como impostos sobre carbono, também pode reduzir externalidades negativas enquanto

promove o desenvolvimento econômico e potencialmente melhora as condições de distribuição de renda (Suryanto & Aboyitungiye, 2021).

Haoyan *et al.* (2023) destacam que, no contexto chinês, investimentos em infraestrutura de transporte têm impacto significativo na redução da pobreza e na revitalização rural, embora seus efeitos sejam mais perceptíveis em longo prazo. O desenvolvimento da infraestrutura rural no Brasil pode ser uma estratégia além da melhoria da renda nos estados com predominância agrícola, pois traria maior eficiência no uso de recursos, além de possibilitar investimentos em inovação.

Dada a importância espacial e produtiva da cadeia de práticas agrícolas, incentivos para a agricultura de baixo carbono, sistemas de plantio direto e outras práticas agrícolas sustentáveis são essenciais para maximizar os aspectos ambientais positivos da agricultura nacional (Mantovani *et al.*, 2024). Isso deve ser feito em conjunto com o fortalecimento de iniciativas de conservação da natureza em áreas públicas e mecanismos baseados no mercado, bem como um melhor monitoramento dos remanescentes florestais.

Como o consumo de energia está relacionado ao impacto ambiental, é fundamental reduzir o uso de combustíveis fósseis, sobretudo na mobilidade. Nosheen *et al.* (2021) apontam que, na Europa, embora muitos países tenham adotado veículos elétricos, o alto consumo de eletricidade para recarregá-los

pode aumentar as emissões de carbono. No Leste Europeu, os biocombustíveis, considerados CO₂-neutral, ajudaram a reduzir as emissões, um efeito semelhante ao observado na China.

Finalmente, após o processo de desindustrialização precoce do país, é crucial fomentar o desenvolvimento industrial devido à sua importância na inovação, no desenvolvimento científico e na geração de renda por meio da criação de empregos decentes, além de possibilitar o *catching-up* (Bresser-Pereira, 2018), sobretudo naquelas intensivas em conhecimento. Diante do potencial poluidor das indústrias, é fundamental fortalecer a supervisão ambiental por agências reguladoras e promover o desenvolvimento competitivo de indústrias verdes no mercado.

Considerações finais

O método STIRPAT permitiu a identificação dos determinantes que afetam o componente ambiental do território nacional, alguns bastante distintos dos modelos clássicos, como a relação entre riqueza e impacto ambiental. Observou-se que o PIB *per capita* tem uma relação inversa com as emissões e com a perda de área florestal, indicando que os padrões de produção e consumo brasileiros estão tendendo a formas menos impactantes. O consumo de energia e as subvenções foram identificados como pontos positivamente correlacionados com as emissões, indicando que a busca pelo desenvolvimento

econômico levou ao aumento do consumo de combustíveis fósseis.

A tecnologia foi identificada como central para o desenvolvimento de políticas de transição voltadas para a otimização do uso de recursos e para a criação de tecnologias nativas adequadas a contextos que promovam a participação da sociedade e sua apropriação. Isso ficou evidente com o indicador de produtividade total dos fatores, que destacou a relação negativa entre a eficiência da produtividade setorial e a redução das emissões.

Outro ponto crítico foi a correlação negativa significativa identificada entre as áreas de produção agrícola, devido à sua importância espacial e ao potencial para a captura de dióxido de carbono pelas culturas. Torna-se, assim, crucial buscar iniciativas voltadas para a agricultura de baixo carbono e práticas como o plantio direto e os sistemas agroflorestais, além de fortalecer os esforços de conservação da natureza, sobretudo nas regiões mais afetadas pelo desflorestamento e com maior volume de emissões.

Apesar do processo de desindustrialização, a indústria continua sendo uma oportunidade essencial para investimento e desenvolvimento, especialmente no que se refere às tecnologias verdes, aos empregos verdes e aos centros de inovação.

Finalmente, são evidentes as lacunas de conhecimento sobre o setor agrícola brasileiro no contexto da economia verde. Estudos futuros devem analisar as influências da tecnologia, das políticas públicas

e dos aspectos econômicos da agricultura brasileira nas emissões de GEES e nas mudanças climáticas, pois esses fatores são fundamentais para a economia nacional.

Referências

- Ahmed, N., Haque, M., Uddin, G. & Ullah, M. (2022). Green Finance and Green Energy Nexus in ASEAN Countries: A Bootstrap Panel Causality Test. *Energies*, 15(14), 5068. <https://doi.org/10.3390/en15145068>
- Biedemariam, M., Yirga, C., Teketay, D., & Abebe, T. (2022). Ecosystem service values as related to land use and land cover changes in Ethiopia: A review. *Land*, 11(12), 2212. <https://doi.org/10.3390/land11122212>
- Bresser-Pereira, L. (2007). *Macroeconomia da estagnação: Crítica da ortodoxia convencional no Brasil pós-1994*. Ed. 34.
- Bresser-Pereira, L. (2018). *Em busca do desenvolvimento perdido: Um projeto novo-desenvolvimentista para o Brasil*. Editora FGV.
- Chabán-García, O., & Hidalgo-Capitán, A. L. (2023). Green economy and green jobs: A multisectoral analysis by means of Spain's social accounting matrix. *Brazilian Journal of Political Economy*, 43, 380-397.
- Chandra Voumik, L., & Ridwan, M. (2023). Impact of FDI, industrialization, and education on the environment in Argentina: ARDL approach.

- Heliyon*, 9(1), e12872. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12872>
- Cheng, Z., Li, X., & Wang, M. (2021). Resource Curse and Green Economic Growth. *Resources Policy*, 74, 102325. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102325>
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), 198-209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00242-2>
- D'Amato, D., & Korhonen, J. (2021). Integrating the Green Economy, Circular Economy and Bioeconomy in a Strategic Sustainability Framework. *Ecological Economics*, 188, 107143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107143>
- Dong, K., Dong, X., & Dong, C. (2019). Determinants of the global and regional CO2 emissions: What causes what and where? *Applied Economics*, 51(46), 5031-5044. <https://doi.org/10.1080/00036846.2019.1580237>
- Empresa de Pesquisa Energética. (2023). *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>
- Fontana, A., Pires, A., Venturieri, A., Jesus, A., Paula, A. J. de, Medeiros, A. de S., Vargas, A. de G., Berndt, A., Ferreira, A. L., Luiz, A. J. B., Alves, A. E., Pereira, A. C., Freitas, A. F. de, Packer, A. P., Cavalcante, A., Frasca, A. V. da L., Fernandes, A., Zimbres, B., Rudorff, B. F. T.,... & Holler, W. (2021). Quarto inventário nacional de emissões e remoções antrópicas de gases do efeito estufa. In Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (Brasil), *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima* (pp. 80-181). Embrapa Solos (CNPS).
- Fouquet, R. (2010). The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service. *Energy Policy*, 38(11), 6586-6596. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.004>
- Fundação Getúlio Vargas. (2024). *Observatório da Produtividade*. <https://ibre.fgv.br/observatorio-produtividade>
- Gouvea, R., & Montoya, M. (2014). Building an equitable green economy: A Brazilian perspective. *International Journal of Environmental Studies*, 71(2), 182-199. <https://doi.org/10.1080/00207233.2014.893053>
- Guo, L. L., Qu, Y., & Tseng, M.-L. (2017). The interaction effects of environmental regulation and technological innovation on regional green growth performance. *Journal of Cleaner Production*, 162, 894-902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.137>
- Haoyan, L., Jiang, H., & Zhongqi, W. (2023). Are poverty alleviation and carbon reduction parallel

- paths? Empirical research on the interaction between poverty alleviation and carbon emissions. *The Journal of Environment & Development*, 32(3), 274-301. <https://doi.org/10.1177/10704965211063711>
- Harris, Z. M., Spake, R., & Taylor, G. (2015). Land use change to bioenergy: A meta-analysis of soil carbon and GHG emissions. *Biomass and Bioenergy*, 82, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.06.002>
- Huang, J., Zhang, D., Zhang, Z., Kong, W., Yan, J., & Xia, F. (2023). Trapped in dilemma: Inverted N-shaped EKC evidence of economic growth and ecological land in a spatial spillover perspective. *Applied Geography*, 161, 103145. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.103145>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *SIDRA — Sistema de Recuperação de Dados Contínuos*.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2024). *IPEADATA — Base de dados macroeconómicos, regionais e sociais [Banco de dados]*. <http://www.ipeadata.gov.br>
- Jha, S., & Bawa, K. S. (2006). Population growth, human development, and deforestation in biodiversity hotspots. *Conservation Biology*, 20(3), 906-912. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00336.x>
- Lambin, E. F., & Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(9), 3465-3472. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100480108>
- Li, X., Li, S., Li, C., Shi, J., & Wang, N. (2023b). The impact of high-quality development on ecological footprint: An empirical research based on STIRPAT model. *Ecological Indicators*, 154, 110881. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107143>
- Li, Z., Khurshid, A., Qayyum, S., Calin, A. C., Iancu, L. A., & Wang, X. (2023a). Climate change and the UN-2030 agenda: Do mitigation technologies represent a driving factor? New evidence from OECD economies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(1), 195-209. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02337-w>
- Lin, B., & Ullah, S. (2024). Effectiveness of energy depletion, green growth, and technological cooperation grants on CO2 emissions in Pakistan's perspective. *Science of The Total Environment*, 906, 167536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.167536>
- Loiseau, E., Saikku, L., Antikainen, R., Droste, N., Hansjürgens, B., Pitkänen, K., Leskinen, P., Kuikman, P., & Thomsen, M. (2016). Green economy and related concepts: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 139, 361-371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.141>
- Machado, P. (2005). Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, 28, 329-334.

- <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000200024>
- MapBiomas. (2022). *Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil*. <https://brasil.mapbiomas.org/>
- Merino-Saum, A., Clement, J., Wyss, R., & Baldi, M.G. (2020). Unpacking the Green Economy Concept: A Quantitative Analysis of 140 Definitions. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118339. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118339>
- Moreira, S., Vasconcelos, L., & Santos, C. S. (2017). Sustainability of green jobs in Portugal: A methodological approach using occupational health indicators. *Journal of Occupational Health*, 59(5), 374-384. <https://doi.org/10.1539/joh.16-0291-OA>
- Munir, K., & Ameer, A. (2022). Assessing nonlinear impact of urbanization, economic growth, technology, and trade on environment: Evidence from African and Asian emerging economies. *GeoJournal*, 87(3), 2195-2208. <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10409-0>
- Nicoloso, R. S., & Rice, C. W. (2021). Intensification of no-till agricultural systems: An opportunity for carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, 85(5), 1395-1409. <https://doi.org/10.1002/saj2.20203>
- Nosheen, M., Iqbal, J., & Abbasi, M. A. (2021). Do technological innovations promote green growth in the European Union? *Environmental Science and Pollution Research*, 28(17), 21717-21729. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11660-1>
- Ofori, E. K., Li, J., Gyamfi, B. A., Opoku-Mensah, E. & Zhang, J. (2023). Green industrial transition: Leveraging environmental innovation and environmental tax to achieve carbon neutrality. Expanding on STIRPAT model. *Journal of Environmental Management*, 343, 118121. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.118121>
- Ou, Y., Bao, Z., Ng, S. T., Song, W., & Chen, K. (2024). Land-use carbon emissions and built environment characteristics: A city-level quantitative analysis in emerging economies. *Land Use Policy*, 137, 107019. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107019>
- Polloni-Silva, E., Silveira, N., Ferraz, D., de Mello, D., & Morales, H. F. (2021). The drivers of energy-related CO₂ emissions in Brazil: A regional application of the STIRPAT model. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 51745-51762. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13961-1>
- Satheedevi, A. G., Sharma, A., & Dhar, M. (2022). How do the anthropogenic factors affect the environment in India? Evidence from the urban provinces. *Technological Forecasting and Social Change*, 183, 121950.
- Shi, C., Zhi, J., Yao, X., Zhang, H., Yu, Y., Zeng, Q., Li, Z., & Zhang, Y.

- (2023). How can China achieve the 2030 carbon peak goal—A crossover analysis based on low-carbon economics and deep learning. *Energy*, 269, 126776. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126776>
- Silva, F. F., Rodrigues, L. A., Moreira, R. B., & Coelho, A. B. (2015). Determinantes da emissão de CO₂ por uso de combustíveis fosseis para países sul-americano, a partir da abordagem STIRPAT. *Revista de Economia*, 41(1). Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37904338017>
- Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. (2022). *Observatório do Clima*. <https://plataforma.seeg.eco.br/>
- Suryanto, N. A., & Aboyitunjiye, J. B. (2021). Vulnerability of sub-Saharan Africa and Southeast Asian countries due to the carbon dioxide emissions: An assessment based on the STIRPAT model. *International Journal of Environment and Pollution*, 69(1/2), 99. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2021.117531>
- Trinh, H. H., McCord, M., Lo, D., & Squires, G. (2023). Do green growth and technological innovation matter to infrastructure investments in the era of climate change? Global evidence. *Applied Economics*, 55(35), 4108-4129. <https://doi.org/10.1080/00036846.2022.2027997>
- United Nations Environment Programme. (2011). *Towards a green economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication*. <http://www.unep.org/greenconomy>
- Usman, O. (2022). Renewable energy and CO₂ emissions in G7 countries: Does the level of expenditure on green energy technologies matter? *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 26050-26062. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19627-7>
- Valle, R., & Climaco, J. (2015). A new tool to facilitate quantitative assessment of green activities — A trial application for Rio de Janeiro. *Technological Forecasting and Social Change*, 98, 336-344. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.05.009>
- Velho, L. (2011). Conceitos de ciência e a política científica, tecnológica e de inovação. *Sociologias*, 13, 128-153. <https://doi.org/10.1590/S1517-45222011000100006>
- Vukovic, N., Pobedinsky, V., Mityagin, S., Drozhzhin, A., & Mingaleva, Z. (2019). A study on green economy indicators and modeling: Russian context. *Sustainability (Switzerland)*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/su11174739>
- World Bank. (2024). *World Bank Open Data*. <https://data.worldbank.org>
- Yan, Y., Ibrahim, R. L., Al-Faryan, M. A. S., & Oke, D. M. (2023). Embracing Eco-Digitalization and Green Finance Policies for Sustainable Environment: Do the Engagements of Multinational Corporations Make or Mar the Target

- for Selected MENA Countries? *Sustainability*, 15(15), 12046. <https://doi.org/10.3390/su151512046>
- York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT and IMPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 46(3), 351-365.
- Zhang, C., Ma, T., Shi, C., & Chiu, Y. H. (2023). Carbon emission from the electric power industry in Jiangsu province, China: Historical evolution and future prediction. *Energy & Environment*, 34(6), 1910-1936. <https://doi.org/10.1177/0958305X20936350>
- Zhang, S., Liu, J., & Liu, X. (2022). Comparing the environmental impacts of nuclear and renewable energy in top 10 nuclear-generating countries: *Evidence from STIRPAT model. Environmental Science and Pollution Research*, 30(11), 31791-31805. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20189-2>
- Zhang, Z., Ma, X., Lian, X., Guo, Y., Song, Y., Chang, B., & Luo, L. (2020). Research on the relationship between China's greenhouse gas emissions and industrial structure and economic growth from the perspective of energy consumption. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33), 41839-41855. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10027-8>

