

do Nascimento Bento, José Alex; Vieira Filho, José Eustáquio Ribeiro

Working Paper

Biocombustíveis e economia de baixo carbono no Brasil

Texto para Discussão, No. 2899

Provided in Cooperation with:

Institute of Applied Economic Research (ipea), Brasília

Suggested Citation: do Nascimento Bento, José Alex; Vieira Filho, José Eustáquio Ribeiro (2023) : Biocombustíveis e economia de baixo carbono no Brasil, Texto para Discussão, No. 2899, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, <https://doi.org/10.38116/td2899-port>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/285021>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/br/>

TEXTO PARA DISCUSSÃO

2899

**BIOCOMBUSTÍVEIS E ECONOMIA
DE BAIXO CARBONO NO BRASIL**

**JOSÉ ALEX DO NASCIMENTO BENTO
JOSÉ EUSTÁQUIO RIBEIRO VIEIRA FILHO**

ipea

Instituto de Pesquisa
Econômica Aplicada

**BIOCOMBUSTÍVEIS E ECONOMIA DE
BAIXO CARBONO NO BRASIL**

JOSÉ ALEX DO NASCIMENTO BENTO¹
JOSÉ EUSTÁQUIO RIBEIRO VIEIRA FILHO²

1. Pesquisador no Núcleo de Estudos de Economia Agropecuária (NE2AGRO) na Diretoria de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Dirur/Ipea). *E-mail:* <jose.bento@ipea.gov.br>.

2. Pesquisador de estudos de políticas agropecuárias na Dirur/Ipea, coordenador do NE2AGRO e professor do Mestrado Profissional em Políticas Públicas e Desenvolvimento do Ipea. *E-mail:* <jose.vieira@ipea.gov.br>.

Governo Federal

Ministério do Planejamento e Orçamento

Ministra Simone Nassar Tebet

ipea Instituto de Pesquisa
Econômica Aplicada

Fundação pública vinculada ao Ministério do Planejamento e Orçamento, o Ipea fornece suporte técnico e institucional às ações governamentais – possibilitando a formulação de inúmeras políticas públicas e programas de desenvolvimento brasileiros – e disponibiliza, para a sociedade, pesquisas e estudos realizados por seus técnicos.

Presidenta

LUCIANA MENDES SANTOS SERVO

Diretor de Desenvolvimento Institucional

FERNANDO GAIGER SILVEIRA

**Diretora de Estudos e Políticas do Estado,
das Instituições e da Democracia**

LUSENI MARIA CORDEIRO DE AQUINO

Diretor de Estudos e Políticas Macroeconômicas

CLÁUDIO ROBERTO AMITRANO

**Diretor de Estudos e Políticas Regionais,
Urbanas e Ambientais**

ARISTIDES MONTEIRO NETO

**Diretora de Estudos e Políticas Setoriais,
de Inovação, Regulação e Infraestrutura**

FERNANDA DE NEGRI

Diretor de Estudos e Políticas Sociais

CARLOS HENRIQUE LEITE CORSEUIL

Diretor de Estudos Internacionais

FÁBIO VÉRAS SOARES

Chefe de Gabinete

ALEXANDRE DOS SANTOS CUNHA

Coordenador-Geral de Imprensa e Comunicação Social

ANTONIO LASSANCE

Ouvidoria: <http://www.ipea.gov.br/ouvidoria>

URL: <http://www.ipea.gov.br>

Texto para Discussão

Publicação seriada que divulga resultados de estudos e pesquisas em desenvolvimento pelo Ipea com o objetivo de fomentar o debate e oferecer subsídios à formulação e avaliação de políticas públicas.

© Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – **ipea** 2023

Bento, José Alex do Nascimento

Biocombustíveis e economia de baixo carbono no Brasil / José Alex do Nascimento Bento, José Eustáquio Ribeiro Vieira Filho. – Brasília, DF: IPEA, 2023.

38 p. : il., gráfs. – (Texto para Discussão ; 2899).

Inclui Bibliografia.

1. Energia Renovável. 2. Emissão de CO2. 3. Biocombustíveis. 4. Bioenergia. 5. Produtividade. I. Vieira Filho, José Eustáquio Ribeiro. II. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. II. Título.

CDD 333.794

Ficha catalográfica elaborada por Elizabeth Ferreira da Silva CRB-7/6844.

Como citar:

BENTO, José Alex do Nascimento; VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro. **Biocombustíveis e economia de baixo carbono no Brasil**. Brasília, DF: Ipea, jul. 2023. 38 p. (Texto para Discussão, n. 2899). DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td2899-port>.

JEL: Q1; Q41; Q42; Q43; Q48.

As publicações do Ipea estão disponíveis para download gratuito nos formatos PDF (todas) e EPUB (livros e periódicos).

Acesse: <http://www.ipea.gov.br/porta/publicacoes>

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou do Ministério do Planejamento e Orçamento.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

SUMÁRIO

SINOPSE

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	6
2 ENERGIA RENOVÁVEL E EMISSÃO DE GEE NO BRASIL	8
3 REVISÃO DE LITERATURA	16
4 METODOLOGIA	20
4.1 Base de dados.....	20
4.2 Abordagem empírica	23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
REFERÊNCIAS	32
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	38

SINOPSE

Este estudo descreve a relação entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e um conjunto de variáveis econômicas e ambientais do setor energético dos 27 estados brasileiros durante o período 2010 a 2020. O método de momentos generalizado-sistema (MMG-sistema) foi utilizado para verificar a influência, em específico, da energia renovável, produção e produtividade dos biocombustíveis, população, produto interno bruto *per capita* (PIBpc) e frota de carros leves sobre a emissão de gases poluentes. Os resultados indicaram que a produção de biocombustíveis e a frota de veículos leves tendem a diminuir as emissões de CO₂, enquanto a população e o PIBpc as influenciaram de maneira crescente. Vale observar que as variáveis – energia renovável e produtividade dos biocombustíveis – apresentaram efeitos estatisticamente não significantes.

Palavras-chave: energia renovável; emissão de CO₂; biocombustíveis; bioenergia; produtividade.

ABSTRACT

This study describes the relationship between GHG emissions and a set of economics and environmental variables in the energy sector of the 27 Brazilian states, during the period 2010 to 2020. The system Generalized Moments Method (system GMM) was used to verify the influence, in particular, of renewable energy, production and productivity of biofuels, population, GDP per capita and fleet of light cars on the emission of polluting gases. The results indicated that production of biofuels and the fleet of light vehicles tend to decrease CO₂ emissions, while, population and GDP per capita had an increasing influence. It is worth noting that the variables – renewable energy and biofuel productivity – showed statistically non-significant effects.

Keywords: renewable energy; CO₂ emissions; biofuels; bioenergy; productivity.

1 INTRODUÇÃO

A mudança climática se manifesta de diversas maneiras, tais como aumento da temperatura média global, elevação do nível do mar, redução da criosfera, modificações dos padrões de precipitação (inundações e secas) e aumento de ocorrência e intensidade de eventos climáticos extremos, como o El Niño e La Niña (IPCC, 2014).

Para contornar essa situação, torna-se necessário modificar os padrões de produção e consumo de energia, bem como implementar medidas de adaptação. Logo, espera-se uma mudança estrutural no desenvolvimento econômico, uma verdadeira revolução em termos sustentáveis, no intuito de economizar os recursos naturais escassos, necessários às gerações futuras.

O setor energético brasileiro é um ramo de atividade econômica com grande capacidade de mitigar os desafios impostos pelas mudanças climáticas. Por conta da dotação favorável de recursos e do investimento em ciência e tecnologia, o país se tornou líder no uso de energia renovável, a qual se mostra cada vez mais relevante na economia globalizada. Em 2020, a oferta interna brasileira de fontes de energias renováveis representou 48%. De maneira contrária, por exemplo, no nível mundial, e separadamente, considerando a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), verificou-se baixa participação desse tipo de energia, 14% e 11%, respectivamente (EPE, 2021; Vieira Filho, 2022).

Nas últimas décadas (2000-2020), a participação nacional do consumo de petróleo e seus derivados reduziu (45,6% para 33,1%). No entanto, ainda seguem como as maiores fontes de energia utilizadas. Nesse mesmo período, as fontes renováveis cresceram significativamente, apresentando em 2020 participações de 26,8% (hidráulica) e 12,6% – produtos da cana-de-açúcar e outros renováveis (EPE, 2021).

O setor de transporte foi responsável por 32,5% do consumo final de energia no Brasil (EPE, 2022a). Além disso, esse segmento emite grandes quantidades de gases de efeito estufa (GEE) pela queima de combustíveis – por exemplo, no estado de São Paulo, mais urbanizado do país, mais de 60% dos principais poluentes atmosféricos foram liberados por veículos (São Paulo, 2017). Portanto, a eficiência energética torna-se ferramenta essencial para a redução de emissões de GEE e da poluição do ar, da dependência de combustíveis fósseis, contribuindo assim para a sustentabilidade da matriz energética do país.

Nesse cenário desafiador, o Brasil reafirmou seu compromisso internacional para o enfrentamento da mudança do clima. No Acordo de Paris, a meta firmada buscava reduzir as emissões de GEE em 37%, em 2025, e 43%, em 2030, com referência ao ano

de 2005. Especificamente, o setor energético comprometeu-se com a meta de alcançar uma participação de 18% de bioenergia sustentável na matriz energética até 2030 (EPE, 2022b). Para essa finalidade, criou-se um conjunto de políticas públicas com o objetivo de fomentar a utilização de fontes renováveis. Um marco importante nessa direção ocorreu em 2017, com o estabelecimento da Política Nacional de Biocombustíveis, ou RenovaBio, focada no incentivo da produção e do consumo de biocombustíveis. Em 2021, as emissões evitadas desses últimos, em comparação aos equivalentes fósseis (gasolina e diesel), somaram 66,9 MtCO₂ (EPE, 2022b; Bento e Vieira Filho, 2023).

Esses combustíveis de baixa emissão de carbono, além de sua eficiência energética, colocam o Brasil em posição de destaque nas discussões internacionais sobre mudanças climáticas e sustentabilidade. A produção de biocombustíveis no Brasil é realizada, principalmente, a partir das culturas da cana-de-açúcar e milho (etanol hidratado e anidro) e da soja (biodiesel).

A produção global de etanol, em 2021, correspondeu a 105 bilhões de litros. O Brasil e os Estados Unidos são os dois principais responsáveis por esse mercado, com expressiva participação; juntos concentram 83% da produção mundial de etanol (REN21, 2022; Vieira Filho, 2022).¹ Especificamente o Brasil produziu 29,9 bilhões de litros – sendo 18,8 bilhões do tipo hidratado e 11,1 bilhões anidro.²

Em relação ao biodiesel, o país situa-se como terceiro maior produtor e consumidor mundial, superado apenas por Indonésia e Estados Unidos (REN21, 2022; Vieira Filho, 2022). No ano de 2021, foram consumidos 6,8 bilhões de litros internamente. Vale destacar o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), que desde sua criação, em 2005, até o ano de 2021, contribuiu para a produção de mais de 53,8 bilhões de litros (EPE, 2022b).

Nesse contexto, esta pesquisa expandiu a análise para a avaliação do setor energético, que é capaz de reduzir a emissão de GEE nos estados brasileiros. De um ponto de vista mais específico, os efeitos diretos do uso de energia quantificam-se em termos das emissões que evitam, assim como das que acumulam ao longo do tempo. Desse modo, permitiu-se identificar o seguinte problema: a energia renovável e, especificamente, os biocombustíveis contribuem para a redução da emissão de GEE na atmosfera?

Portanto, este artigo tem como objetivo descrever a relação entre as emissões de GEE e um conjunto de variáveis econômicas e ambientais do setor energético dos 27

1. Para mais informações, acessar os *links* a seguir: <https://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>; www.eia.gov/petroleum/data.php. Acesso em: 17 jan. 2023.

2. Disponível em: <https://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.ht>. Acesso em: 13 de fev. 2023

estados brasileiros durante o período 2010-2020. Em específico, verificam-se os efeitos da energia renovável, produção e produtividade dos biocombustíveis, população, produto interno bruto *per capita* (PIBpc) e frota de carros leves sobre a emissão de gases poluentes.

Para realizar a avaliação proposta, utilizou-se o método de regressões em painel dinâmico, em específico o método de momentos generalizado-sistema (MMG-sistema). Além disso, a diferença de publicações anteriores, tais como as de Busu e Nedelcu (2021) e Busu (2019), reside na análise específica de apenas um país por meio de um modelo dinâmico e a inclusão da variável frota de veículos. A seleção temporal foi relacionada à disponibilidade de dados. Observações socioeconômicas antes de 2010 incluídas na base de dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) permanecem limitadas.

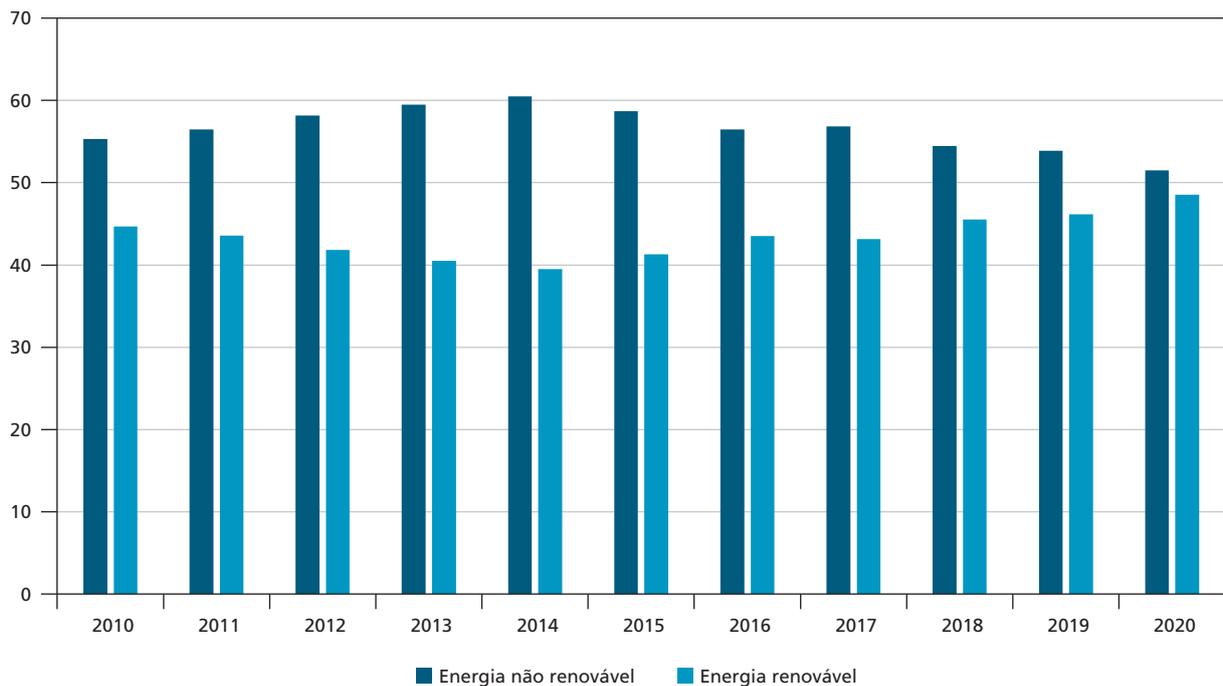
O texto está organizado em cinco seções, além desta breve introdução. A segunda seção descreve brevemente a oferta, o consumo de energia e a emissão de GEE no Brasil; e a terceira seção aborda a literatura sobre a relação da emissão de gases poluentes com o uso de energia, com ênfase no uso de combustíveis renováveis e não renováveis. A seção quatro apresenta a metodologia de estudo assim como a base de dados. A quinta seção avalia os principais resultados. Por fim, seguem as considerações finais.

2 ENERGIA RENOVÁVEL E EMISSÃO DE GEE NO BRASIL

O gráfico 1 mostra os percentuais de oferta de energia por fontes não renováveis e renováveis. No Brasil, a matriz energética renovável ficou acima dos 40% ao longo do período analisado, com destaque para o ano de 2020, com participação de 48%. Segundo Vieira Filho (2022), o Brasil tem a maior participação de energia limpa em sua matriz energética em um comparativo internacional. Segundo o mesmo autor, a maioria dos países analisados apresentaram percentuais abaixo de 20% de consumo de energia renovável – exceto Canadá, com 28,6%: especificamente, Estados Unidos e Índia, ambos com menos de 9%; Argentina (11,9%); China (13,4%); França (13%); e, por fim, Alemanha, cuja participação do consumo de energia limpa foi de 18,6%. A participação percentual média mundial foi de 11,9%.

GRÁFICO 1**Matriz energética: oferta interna de energia não renováveis e renováveis brasileira (2010-2020)**

(Em %)

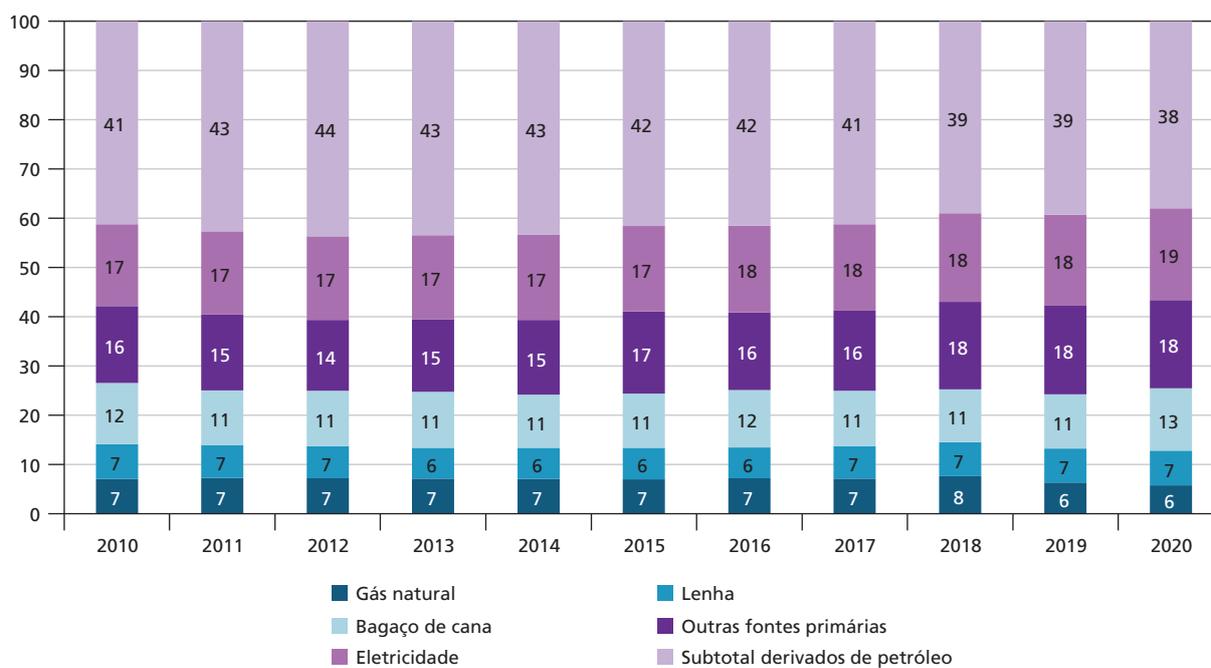


Fonte: EPE (2021).

O gráfico 2 apresenta o consumo de energia por diferentes fontes, como não renováveis (petróleo e gás natural) e renováveis (hidroeletricidade, derivados da cana e lenha), além de outras. A matriz energética brasileira ainda é baseada principalmente em petróleo, mesmo com sua redução no período analisado (41% para 38%). A hidrelétrica, segunda maior em importância, manteve praticamente constante sua participação (17% para 19%). No entanto, o Brasil tem uma grande parcela da produção de derivados da cana (13%). Além disso, outras fontes primárias apresentaram significativa participação (18%). Portanto, a produção de energia hidrelétrica e derivados da cana-de-açúcar explicam o porquê de a matriz energética brasileira ter sido considerada uma das mais limpas do mundo.

GRÁFICO 2

Participação do consumo final de energia por diferentes fontes no Brasil (2010-2020)
(Em %)

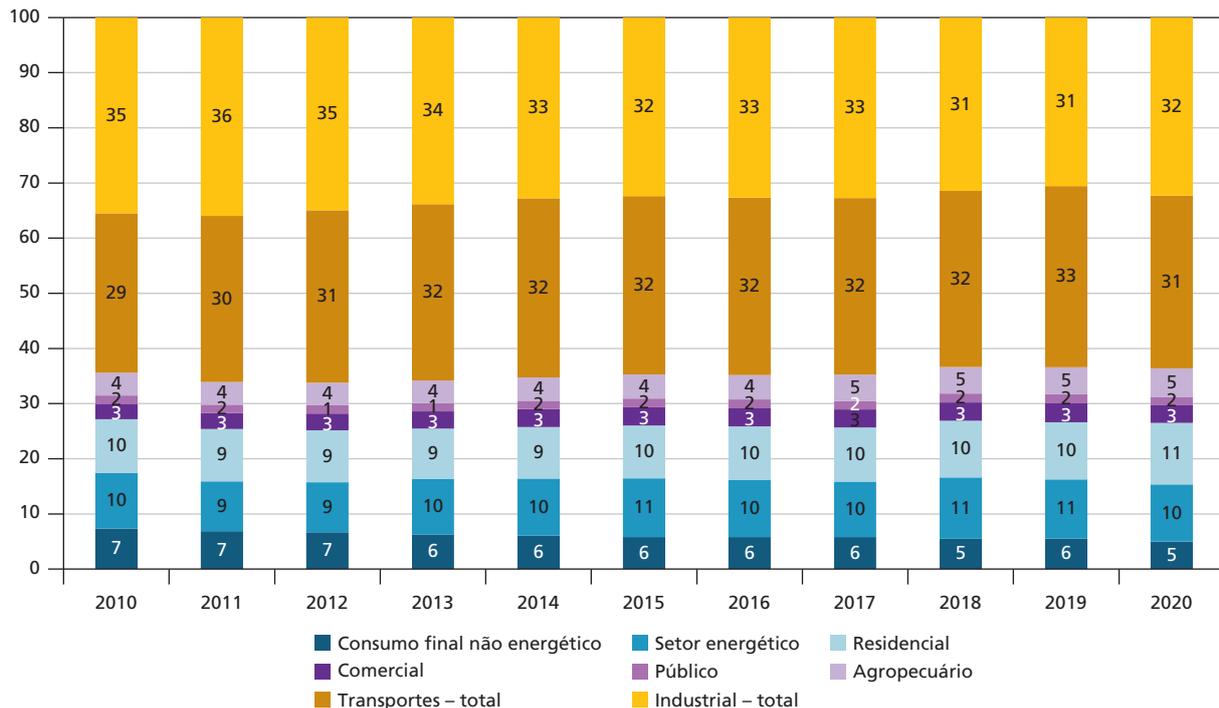


Fonte: EPE (2021).

O gráfico 3 apresenta a evolução do consumo energético por setor de 2010 a 2020. Observou-se uma retração da participação da indústria (35% para 32%). De modo contrário, houve avanço no consumo do setor de transporte (29% para 31%). Os setores de energia e residencial apresentaram trajetórias constantes, com participação em volta dos 10%.

GRÁFICO 3**Participação do consumo final de energia pelos diferentes setores no Brasil (2010-2020)**

(Em %)



Fonte: EPE (2021).

A tabela 1 apresenta o consumo de energia em toneladas equivalente de petróleo (tep), especificamente do setor de transporte, por diferentes fontes. O consumo energético brasileiro ainda é baseado em derivados do petróleo, tais como o óleo diesel e a gasolina. Todas as fontes listadas apresentaram crescimento, exceto as fontes da categoria outras. No entanto, observou-se a importância da participação dos biocombustíveis álcool etílico e biodiesel. Segundo a EPE (2021), o consumo energético do setor de transporte teve um crescimento anual de 2,9% nas últimas décadas (2000-2020).

TABELA 1**Consumo de energia do setor de transporte, por fontes – Brasil (2010-2020)**

(Em 1 milhão de toneladas equivalente de petróleo)

Fontes	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Óleo diesel	32,4	34,2	36,1	38,5	38,7	36,7	35,5	35,3	34,9	35,6	35,2
Biodiesel	1,5	1,6	1,7	1,8	2,1	2,5	2,5	2,7	3,5	3,8	4,1
Gasolina automotiva	17,5	20,8	24,4	24,4	25,7	23,3	24,2	24,8	21,6	21,4	20,1
Álcool etílico total	12,0	10,7	9,9	11,9	13,0	15,4	13,9	13,8	15,7	17,5	15,3
Álcool etílico anidro	3,8	4,5	4,1	5,2	5,9	5,8	5,9	6,4	5,4	5,6	5,2
Álcool etílico hidratado	8,2	6,2	5,8	6,7	7,1	9,6	7,9	7,4	10,3	11,9	10,1
Outras ¹	6,1	6,5	6,6	6,4	6,5	6,3	5,9	6,2	6,5	6,3	4,6
Total	69,6	73,9	78,9	83,0	86,0	84,2	81,9	82,9	82,2	84,7	79,4

Fonte: EPE (2021).

Nota: ¹ Foram consideradas as seguintes fontes: gás natural, óleo combustível, gasolina de aviação, querosene e eletricidade.

As tabelas 2 e 3 mostram o fluxo energético dos biocombustíveis. Observou-se que, ao longo do período analisado, biodiesel e álcool etílico apresentaram trajetórias de crescimento na produção e no consumo. Além disso, o setor de transporte é o grande demandante dessa fonte energética. Em 2010, produziu-se, aproximadamente, 2,4 milhões de metros cúbicos de biodiesel. Em 2020, o Brasil produziu 6,4 milhões de metros cúbicos. Nesse período, a produção mais que dobrou. Quanto à produção de etanol, observou-se também significativo crescimento na produção e no consumo.

TABELA 2**Fluxo energético do biodiesel no Brasil (2010-2020)**

(Em 1 milhão de metros cúbicos)

Fluxo	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Produção	2.386	2.673	2.717	2.917	3.420	3.937	3.801	4.291	5.350	5.924	6.432
Varição de estoques, perdas e ajustes	-1	-125	36	-32	-29	8	-7	-42	33	-18	-2
Consumo total	2.386	2.547	2.754	2.885	3.391	3.946	3.794	4.250	5.383	5.906	6.430
Transformação	114	108	142	143	202	177	76	66	112	143	150
Consumo final energético	2.272	2.439	2.612	2.742	3.189	3.769	3.719	4.183	5.270	5.762	6.280
Comercial	2	1	1	0	0	0	1	1	3	4	4
Público	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Agropecuário	337	334	347	347	413	522	510	611	763	834	929
Transportes	1.889	2.045	2.202	2.326	2.694	3.154	3.120	3.477	4.386	4.796	5.200
Industrial	42	59	62	68	81	92	88	94	118	128	147

Fonte: EPE (2021).

TABELA 3**Fluxo energético do álcool etílico no Brasil (2010-2020)**

(Em 1 milhão de metros cúbicos)

Fluxo	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Produção álcool total	27.924	22.916	23.477	27.608	28.526	30.249	28.276	27.694	33.198	35.156	32.599
Produção álcool anidro	8.357	9.050	9.564	12.005	12.230	11.565	11.727	11.695	9.505	10.608	10.412
Produção álcool hidratado	19.567	13.866	13.913	15.603	16.296	18.685	16.549	15.999	23.693	24.548	22.187
Importação	75	1.137	554	132	984	828	835	1.826	1.775	1.437	958
Exportação	-1.900	-1.964	-3.050	-2.940	-1.469	-2.121	-1.789	-1.380	-1.682	-1.933	-2.026
Varição de estoques, perdas e ajustes	-1.685	-360	-723	-629	-1.898	1.750	249	-581	-1.857	255	-470
Consumo final	24.414	21.729	20.258	24.171	26.142	30.705	27.572	27.559	31.434	34.915	31.061
Consumo final não energético	1.138	1.059	1.179	1.294	1.132	952	860	956	1.079	1.097	1.430
Consumo final energético	23.276	20.669	19.079	22.877	25.010	29.754	26.711	26.603	30.355	33.817	29.630
Agropecuário	16	18	20	21	22	25	17	17	17	17	18
Transportes	23.260	20.652	19.059	22.856	24.988	29.729	26.694	26.586	30.338	33.800	29.613

Fonte: EPE (2021).

Segundo Vieira Filho (2022), a história brasileira da produção de biocombustíveis remonta ao início do século passado, no entanto, foi somente com a crise global em 1970 que o governo brasileiro iniciou a implementação em larga escala de etanol, com o Pro-Álcool, cujo objetivo era reduzir a dependência do petróleo importado. Os Estados Unidos e o Brasil são os principais produtores de etanol. Esses dois mercados representaram, aproximadamente, 75,6% da produção mundial em 2021. Os principais fatores de sucesso do Brasil nesse mercado são as condições ambientais favoráveis, inovações e políticas públicas acertadas.

No que se refere ao biodiesel, sua introdução energética deu-se a partir de 2004, com a criação do Programa Nacional de Produção de Biodiesel. Desde então, sua produção e seu consumo foram crescentes, grande parte favorecida pela política de adição desse combustível no diesel fóssil. Além disso, o Brasil situa-se entre os maiores produtores do mundo desse biocombustível. A matéria-prima mais utilizada para sua fabricação nacional é o óleo de soja (Vieira Filho, 2022; EPE, 2022a).

A tabela 4 apresenta as emissões de GEE por setores no Brasil de 2010 a 2016. Observou-se que todos os setores apresentaram aumento das emissões, passando da totalidade emitida de 1.229 para 1.467,3 TgCO₂e – variação de 19,4%. Destacaram-se, em 2016, agropecuária (33,2%), energia (28,9%) e uso da terra (27,1%) como as principais causas das emissões de CO₂ no país. Entretanto, a participação das emissões do setor agropecuário aumentou bastante no período, uma vez que houve uma redução drástica do desmatamento, reduzindo as emissões do setor de uso da terra. Deve-se ressaltar que o setor agropecuário mais contribuiu do que prejudicou com a redução das emissões, via aumento da produção e adoção de novas tecnologias (Fishlow e Vieira Filho, 2020; Vieira Filho, 2022).

De modo diferente do Brasil, na esfera internacional, a maior fonte de emissões de GEE é decorrente da produção de energia, seguida pelo setor de transporte. Nacionalmente, o setor de energia é o segundo maior emissor de gases poluentes.

Nesse sentido, a tabela 5 apresenta especificamente a emissão de GEE do setor de energia brasileira de 2010 a 2016. Em 2016, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 423,6 GgCO₂e 13% de aumento em relação às emissões do setor em 2010. A maior parte dessas emissões (206,2 GgCO₂e) foi gerada no setor de transportes. Desse modo, essa categoria foi a mais representativa, em razão da prevalência dessa atividade no país, contribuindo com aproximadamente 50% das emissões de CO₂ desse setor.

Ao incentivar o consumo de biocombustíveis, contribui para a descarbonização da economia. Esse processo pode ser caracterizado pela substituição de combustíveis fósseis por outros alternativos menos poluentes. Ao comparar a gasolina (nosso *benchmark* para combustíveis fósseis) com diferentes biocombustíveis (tais como etanol, biodiesel e biometano), a gasolina é o combustível mais poluente, emitindo 87,4 gramas de CO₂e por megajoule (gCO₂e/MJ). Os biocombustíveis emitem menos de 30 gCO₂e/MJ (gráfico 4).

TABELA 4
Participação das emissões setoriais de GEE no Brasil (2010-2016)

Emissões	2010 (TgCO ₂ e)	Percentual	2011 (TgCO ₂ e)	Percentual	2012 (TgCO ₂ e)	Percentual	2013 (TgCO ₂ e)	Percentual	2014 (TgCO ₂ e)	Percentual	2015 (TgCO ₂ e)	Percentual	2016 (TgCO ₂ e)	Percentual
Energia	374,7	30,5	389,7	29,2	422,6	34,7	453,9	31,0	481,3	35,6	455,9	31,3	423,6	28,9
Processos industriais e uso de produtos (Ippu)	87,1	7,1	94,2	7,1	95,4	7,8	96,8	6,6	94,7	7,0	94,8	6,5	93,4	6,4
Agropecuária	458,1	37,3	462,8	34,7	461,8	37,9	467,2	31,9	472,6	35,0	476,0	32,7	487,0	33,2
Uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (LULUCF)	252,5	20,5	328,9	24,7	178,9	14,7	384,6	26,2	240,1	17,8	365,0	25,1	397,4	27,1
Resíduos	56,7	4,6	57,8	4,3	58,7	4,8	62,9	4,3	62,9	4,7	64,2	4,4	66,0	4,5
Total	1.229,0	100	1.333,5	100	1.217,4	100	1.465,4	100	1.351,7	100	1.456,0	100	1.467,3	100

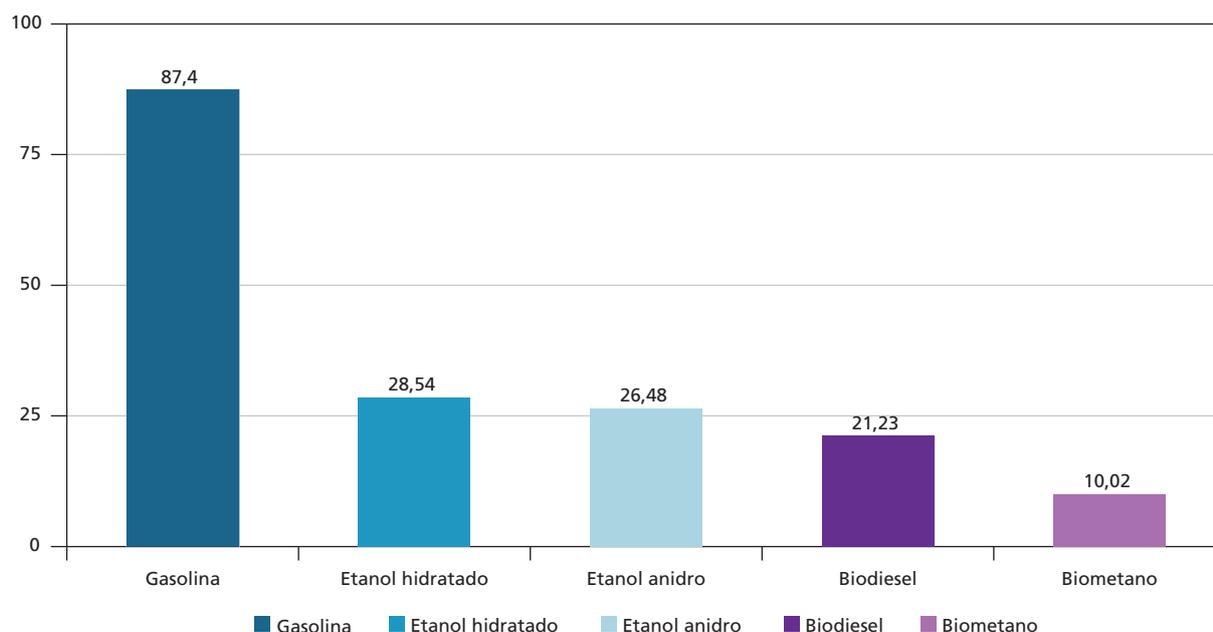
Fonte: Brasil (2021).

Obs.: Ippu – industrial processes and product use; e LULUCF – land use, land-use change, and forestry.

TABELA 5
Participação das emissões de GEE do setor energético brasileiro (2010-2016)

Emissão	2010 (GgCO ₂ e)	Percentual	2011 (GgCO ₂ e)	Percentual	2012 (GgCO ₂ e)	Percentual	2013 (GgCO ₂ e)	Percentual	2014 (GgCO ₂ e)	Percentual	2015 (GgCO ₂ e)	Percentual	2016 (GgCO ₂ e)	Percentual
Atividades de queima de combustíveis (abordagem setorial)	357,5	95,4	373,5	95,8	405,2	95,9	436,1	96,1	461,6	95,9	436,5	95,7	403,8	95,3
Indústrias de energia	58,6	15,6	53,3	13,7	68,2	16,1	91,5	20,2	109,3	22,7	103,9	22,8	78,9	18,6
Indústrias de transformação e construção	78,3	20,9	84,3	21,6	83,0	19,7	83,5	18,4	84,3	17,5	80,2	17,6	75,1	17,7
Transporte	174,1	46,5	190,4	48,9	207,6	49,1	215,1	47,4	220,7	45,9	205,4	45,0	206,2	48,7
Outros setores	45,3	12,1	44,6	11,4	45,1	10,7	44,8	9,9	46,1	9,6	46,3	10,2	43,0	10,2
Não especificado	1,2	0,3	0,9	0,2	1,2	0,3	1,1	0,2	1,2	0,3	0,7	0,2	0,7	0,2
Emissões fugitivas a partir da produção de combustíveis	17,2	4,6	16,3	4,2	17,4	4,1	17,9	3,9	19,6	4,1	19,4	4,3	19,8	4,7
Sector de energia total	374,7	100	389,7	100	422,6	100	453,9	100	481,3	100	455,9	100	423,6	100

Fonte: Brasil (2021).

GRÁFICO 4**Intensidade de emissões por combustíveis**(Em gCO₂eq/MJ)

Fonte: ANP (2022).

Elaboração dos autores.

3 REVISÃO DE LITERATURA

O objetivo desta seção é sintetizar o modo como os principais expoentes da temática exploram os impactos da energia sustentável no nível de emissão de gases poluentes.

Há vasta literatura que abordou a relação da produção de diferentes tipos de energia sustentável com a redução das emissões de CO₂.

Em estudos realizados na União Europeia (UE), verificou-se a existência de uma forte ligação entre as emissões de CO₂, energia sustentável e nível de urbanização (Porter e Linde, 1995; Busu e Trica, 2019). Além disso, a bioenergia apresentou impacto positivo e significativo na redução de emissões de CO₂ (Demirbas, 2005; Frondel *et al.*, 2010), bem como o uso de biocombustíveis (Tugcu, Ozturk e Aslan, 2012; Gomiero, 2015; Decicco, 2018). Ao considerar o aumento do investimento em energia renovável, Kök, Shang e Yücel (2016) encontraram uma redução consistente das emissões de CO₂, enquanto Azretbergenova *et al.* (2021) mostraram que a geração de energia renovável tem efeito positivo na absorção de mão de obra a longo prazo.

TEXTO para DISCUSSÃO

A população e o nível de urbanização estão fortemente correlacionados com energia sustentável e a quantidade de emissão de CO₂ (Salman *et al.*, 2019; Hou *et al.*, 2019; Hsiao *et al.*, 2019; Banga e Menolascina, 2019). Já para os biocombustíveis e o nível de urbanização, verificou-se forte impacto nos níveis de emissão de CO₂ (Cucchiella, D'Adamo e Gastaldi, 2018; Lage *et al.*, 2018; Al-Esawi, Al Qubeissi e Kolodnytska, 2019). Ademais, Surugiu *et al.* (2012) comprovaram que investir em bioenergia, com ênfase nos biocombustíveis, seria um fator determinante para uma sociedade de baixo carbono. O quadro 1 apresenta as principais referências sobre o tema.

QUADRO 1

Resumo dos trabalhos empíricos recentes sobre energia e poluição

Autores	Período	Região	Métodos analíticos	Resultados
Fan e Hao (2020)	2000- 2015	31 províncias chinesas	Vetorial de correção de erros (VEC)	Consumo de energia renovável por taxa de crescimento <i>per capita</i> não causa crescimento econômico nem a curto nem longo prazo.
Kahouli (2019)	1990- 2015	34 países da OCDE	Mínimos quadrados ordinários (MQO), <i>within groups</i> , mínimos quadrados generalizados (MQG) e MMG	Ao aumentar o consumo de energia em 1%, acarreta uma elevação no crescimento econômico em 0,12%.
Mohamed, Ben Jebli e Ben Youssef (2019)	1980-2015	França	<i>Autoregressive distributed lag</i> (ARDL)	Causalidade unidirecional do consumo de energia renovável para o PIB no curto prazo e causalidade bidirecional no longo prazo.
Ozcan e Ozturk (2019)	1990-2016	Dezesseis países emergentes	Bootstrap panel causality	Nenhuma relação significativa entre o consumo de energia de fontes renováveis e o crescimento da economia em dezesseis países.
Kurniadi, Aimon e Amar (2021)	2007-2020	Seis países selecionados da Ásia-Pacífico	Equações simultâneas com dados em painel	Os biocombustíveis têm grande potencial, ao apoiar o desenvolvimento de energia renovável, para aumentar o crescimento econômico verde e reduzir a degradação ambiental.

(Continua)

(Continuação)

Autores	Período	Região	Métodos analíticos	Resultados
Alsaleh e Abdul-Rahim (2019)	2005-2013	Europa continental	MMG	O consumo final de bioenergia tem impacto positivo na intensidade de bioenergia. Sendo esta última ação influenciada pelo crescimento anual do PIB, seguido do investimento em bioenergia.
Busu e Nedelcu (2021)	2000-2019	UE	Regressão com dados em painel (<i>within groups</i>)	O nível de urbanização tem impacto negativo, aumentando as emissões de CO ₂ . De modo contrário, os biocombustíveis, a produção de bioenergia e o consumo de energia renovável apresentaram impactos positivos e diretos.
Armeanu, Gherghina e Pasman-giu (2019)	2000-2016	Onze países selecionados da Europa Central e Oriental	Regressão com dados em painel (<i>within groups</i>)	Relação não linear entre energia renovável e crescimento do PIBpc. No entanto, essa influência foi estatisticamente não significativa. Além disso, as emissões de GEE exibiram impacto positivo no crescimento econômico.
Busu (2019)	2008-2017	27 países selecionados da UE	Regressão com dados em painel (<i>within groups</i>)	As energias renováveis têm influência direta e positiva na redução dos níveis de emissão de CO ₂ , em oposição ao crescimento populacional e à urbanização.

Elaboração dos autores.

Outro aspecto importante relacionado à emissão de GEE é o crescimento econômico. A energia é vital para o crescimento; no entanto, essa relação é bastante contraditória, com quatro hipóteses conhecidas: *feedback*, crescimento, conservação e neutra (Payne, 2011; Bulut e Muratoglu, 2018; Luqman, Ahmad e Bakhsh, 2019; Eren, Taspinar e Gokmenoglu, 2019). A primeira hipótese mostra uma relação causal entre o consumo de energia e o crescimento econômico (Tugcu, Ozturk e Aslan, 2012; Destek e Aslan, 2017; Kocak e Sarkgunesi, 2017; Narayan e Doytch, 2017; Akadiri *et al.*, 2019; Aydin, 2019a; 2019b; Eren, Taspinar e Gokmenoglu, 2019; Zafar *et al.*, 2019; Kahouli, 2019). A segunda hipótese aponta o movimento do crescimento para o consumo de energia (Tugcu, Ozturk e Aslan, 2012; Ocal e Aslan, 2013; Hu *et al.*, 2015; Destek e Aslan, 2017; Narayan e Doytch, 2017; Aydin, 2019b; Tuna e Tuna, 2019). A terceira hipótese assume uma relação causal unidirecional movendo-se da energia ao crescimento econômico

(Payne, 2011; Tugcu, Ozturk e Aslan, 2012; Hu *et al.*, 2015; Destek e Aslan, 2017; Kocak e Sarkgunesi, 2017; Narayan e Doytch, 2017; Aydin, 2019b; Ozcan e Ozturk, 2019). A última hipótese traduz-se em uma falta de relação causal entre consumo de energia e crescimento econômico (Menegaki, 2011; Tugcu, Ozturk e Aslan, 2012; Destek e Aslan, 2017; Kocak e Sarkgunesi, 2017; Aydin, 2019a; Tuna e Tuna, 2019; Ozcan e Ozturk, 2019).

Outra abordagem na literatura sobre o meio ambiente relacionando produção e poluentes é chamada de curva ambiental de Kuznets (CAK), que estuda a associação em formato de “U” invertido entre poluição e desenvolvimento econômico. Essa teoria surgiu a partir de Grossman e Krueger (1991) e Grossman (1995), que, por meio do estudo de desigualdade de renda e crescimento econômico, para a temática do meio ambiente, sugeriram um padrão semelhante ao encontrado na relação entre crescimento econômico e degradação ambiental.

Nesse contexto, não foi encontrada uma referência-padrão sobre o impacto do uso de fontes de energia renováveis ou não renováveis no crescimento econômico. De fato, essa não concordância deve-se a variações nas abordagens metodológicas adotadas nos diferentes modelos utilizados, no número e tipo de variáveis selecionadas, nas técnicas quantitativas e na base de dados construída (Ozturk, 2010; Ocal e Aslan, 2013; Kang, Islam e Tiwari, 2019).

A abordagem de regressão em dados em painel é bastante aplicada nesses estudos. No entanto, é necessário justificar com mais detalhes o tipo de modelo econômico mais apropriado e aplicável. Por exemplo, Sulaiman *et al.* (2017a) aplicaram o MMG-diferença. Sulaiman *et al.* (2017b) implementaram o MMG-sistema, usando os estimadores de Arellano Bond.

Diante dessa temática, este estudo acrescentou variáveis relacionadas aos biocombustíveis, como foco de pesquisa, em especial, a frota de veículos leves. Posto isso, com uma abordagem inovadora, substituiu-se a ideia de crescimento econômico para a concepção da economia de baixo carbono. Nesse contexto, as energias renováveis tornam-se recursos extremamente relevantes para a sociedade de baixo carbono (Dogan e Seker, 2016; Li e Su, 2017).

De fato, essa análise da transição de crescimento econômico para o desenvolvimento sustentável é muito importante no direcionamento das políticas públicas no incentivo da energia renovável em substituição às não renováveis. Finalmente, utilizaram-se indicadores consistentes para determinar o papel da energia renovável, fundamentada na produção e produtividade dos biocombustíveis, em substituição aos combustíveis fósseis, para manutenção da qualidade ambiental, mensurada pela emissão de gases poluentes.

Este artigo segue os trabalhos de Busu e Nedelcu (2021) e Busu (2019). Buscou-se incorporar todas as variáveis que esses trabalhos utilizaram, sendo detalhadas na próxima seção. Além disso, incorporou-se a frota de veículos leves, na qual se mostrou ser uma variável importante omitida na literatura. De modo diferente, o estudo avança ao estimar o modelo MMG, comparando-se seus resultados aos modelos de regressão linear com dados em painel. Com isso, reportou-se a uma estatística para a variável emissão de CO_2 com defasagem no tempo, em que o comportamento passado interfere no presente. Ao fazer isso, separaram-se, independentemente, os efeitos positivos e/ou negativos do nível de emissão de CO_2 ao longo do tempo. Isso permite que os efeitos não lineares de sua variabilidade sejam efetivamente investigados.

4 METODOLOGIA

A breve revisão de literatura apontou que, embora alguns indicadores – como população, crescimento econômico e taxa de urbanização – possam aumentar os níveis de emissão de CO_2 , a produtividade energética e os diferentes recursos renováveis são eficientes fatores de descarbonização da economia. As pesquisas acima apresentadas são as bases do conjunto de variáveis selecionadas descritas nesta seção, bem como os métodos analíticos empregados.

4.1 Base de dados

Nesta análise foi empregada regressão em painel dinâmico, com a emissão de CO_2 pela queima de combustíveis do setor de energia como variável dependente, os indicadores econômicos e ambientais como variáveis independentes, com vistas a diagnosticar os efeitos ambientais no contexto nacional, decorrentes dessas interações.

O período considerado foi de onze anos, de 2010 a 2020, para todos os 27 estados brasileiros, com as variáveis utilizadas em séries anuais. As principais considerações que levaram a essa seleção temporal foram relacionadas à disponibilidade de dados. Observações sobre biocombustíveis antes de 2010, incluídas na base de dados da ANP, no nível estadual, permanecem limitadas.

O quadro 2 contém a base de dados utilizada na pesquisa e a comparação das variáveis utilizadas nas principais referências empíricas da literatura sobre o tema desenvolvido.

QUADRO 2**Base de dados: socioeconômicos e ambientais; e principais referências nos trabalhos empíricos**

Tipos de dados	Variáveis	Fonte dos dados utilizados	Principais referências/variáveis		
			Busu e Nedelcu (2021)	Busu (2019)	Kurniadi, Aimon e Amar (2021)
Ambientais	Emissão CO ₂ Energia renovável Produtividade biocombustíveis	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases (SEEG): https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/energia . Acesso em: 23 fev. 2023. ANP: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos . Acesso em: 23 fev. 2023. ANP: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos . Acesso em: 23 fev. 2023.	Emissão CO ₂ Energia renovável Bioenergia Produtividade	Emissão CO ₂ Energia renovável Recursos Bioenergia	Emissão CO ₂ Energia renovável Crescimento econômico verde
Socioeconômicos	Biocombustíveis População PIBpc Frota renovável	ANP: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos . Acesso em: 23 fev. 2023. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): https://sidra.ibge.gov.br/home/pna-dcm . Acesso em: 23 fev. 2023. IBGE: https://sidra.ibge.gov.br/home/pna-dcm . Acesso em: 23 fev. 2023. Secretaria Nacional de Trânsito (Senatran): https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran . Acesso em: 3 mar. 2023.	Biocombustíveis População Urbanização PIBpc	Biocombustíveis População Urbanização	Produção e consumo de biocombustíveis População Urbanização PIBpc Pobreza Investimento direto estrangeiro Militarização Inovação tecnológica

Fontes: Busu e Nedelcu (2021); Busu (2019); Kurniadi, Aimon e Amar (2021).

Elaboração dos autores.

A variável dependente refere-se à emissão de CO₂ pela queima de combustíveis e emissões fugitivas do setor de transporte em milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂). Observou-se que a poluição ambiental é causada pelo consumo de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo, gás natural etc. Por exemplo, ao se basearem na teoria CAK, Jalil e Mahmud (2009) encontraram uma relação positiva e significativa entre o consumo de energia e os níveis de poluição. Especificamente esse setor, mesmo com frota de veículos emitindo menos poluentes, ainda sim, tem as principais fontes de poluição em áreas urbanas (IAT, 2022).³

Os indicadores ambientais são, além da emissão de CO₂, a energia renovável (EnergiaR) e a produtividade dos biocombustíveis (ProdBioC). Cabe destacar que o uso de recursos não renováveis causa danos consideráveis à atmosfera, incentivando cada vez mais a utilização de fontes energéticas mais limpas (Usman *et al.*, 2022). Nesse sentido, as alternativas de energia de baixa emissão de carbono, como solar, geotérmica, biomassa, hidrelétrica e eólica, são consideradas as fontes de energia renováveis mais importantes, que apresentam a capacidade de serem utilizadas na economia com o menor impacto ao meio ambiente (Baloch, Mahmood e Zhang, 2019; Huang *et al.*, 2022).

A EnergiaR na literatura empírica é mensurada pela sua participação no total energético consumido de determinada região. No entanto, pela não disponibilidade de dados sobre o consumo estadual brasileiro de energia renovável ou não, essa variável consiste na participação percentual do consumo de etanol e biodiesel dividido pelo total consumido dos seguintes combustíveis: etanol hidratado, biodiesel, gasolina comum e de aviação, gás liquefeito de petróleo (GLP), óleo combustível, óleo diesel, querosene de aviação e iluminante.

Finalmente, para o segundo indicador ambiental, ProdBioC, em reais/m³, representa o PIB real dividido pelo consumo dos biocombustíveis.

Os indicadores econômicos utilizados foram:

- produção de biocombustíveis em metros cúbicos (biocombustíveis), que compreendem a produção de etanol e biodiesel. Adicionalmente, o uso de bioenergia, em especial os biocombustíveis, é fortemente correlacionado à redução das emissões de dióxido de carbono (Tugcu, Ozturk e Aslan, 2012; Gomiero, 2015; Decicco, 2018);

3. Mais informações disponíveis em: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2019>. Acesso em: 9 dez. 2019.

- população residente (Pop), que são estimativas do número de habitantes. Por exemplo, Salman *et al.* (2019), Hou *et al.* (2019) e Hsiao *et al.* (2019) argumentaram que o nível populacional, a energia renovável e os níveis de emissão de CO₂ estariam fortemente correlacionados. Também se observou que os biocombustíveis e o nível de urbanização apresentaram impactos significativos nos níveis de emissão de CO₂ (Cucchiella, D'Adamo e Gastaldi, 2018; Lage *et al.*, 2018; Al-Esawi, Al Qubeissi e Kolodnytska, 2019);
- PIBpc real em reais, cuja utilização é mais adequada ao comparar diferenças generalizadas nos padrões de vida de determinados territórios (World Bank, 2020);⁴ e
- frota de veículos que utilizam combustíveis renováveis (FrotaR), que consiste em veículos que podem utilizar combustível com menor teor de carbono, compreendendo álcool, gás natural, metano e energia elétrica. Estima-se que, em 2021, a frota brasileira de veículos leves com a tecnologia *flex fuel* totalizou 37,5 milhões de unidades, representando 81,5% do total da frota de veículos. No entanto, sua demanda por combustíveis tem em sua maior participação a gasolina (55%); em seguida, o etanol hidratado (25%); e, por fim, o etanol anidro (21%). Esse quadro nacional permitiu que os biocombustíveis evitassem a emissão de 66,9 MtCO₂ no referido ano (EPE, 2022b), comparativamente aos equivalentes fósseis (gasolina e diesel).

Todos os indicadores econômicos e ambientais foram transformados em logaritmo, exceto energia renovável em percentual, o que reduz o grau de assimetria de todas as variáveis consideradas, e tende-se a estabilizar sua variância amostral e a curtose da amostra. Todos os valores monetários, incluindo PIB e PIBpc foram deflacionados pelo Índice Geral de Preços/Disponibilidade Interna (IGP-DI) ano-base 2010.⁵

4.2 Abordagem empírica

É cada vez maior a utilização, no meio científico, de séries de dados que envolvam informações *cross-section* observadas ao longo do tempo. Essas formas peculiares de base de dados são chamadas de dados em painel ou dados empilhados. As vantagens em seu uso referem-se ao controle da heterocedasticidade individual e da capacidade de se avaliar a evolução para um dado indivíduo à extensão temporal (Fávero *et al.*, 2014).

4. WORLD BANK. World Development Indicators. 2020. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/408121468149372828/pdf/806610PUB0Beyo00Box379809B00PULBIC0.pdf>.

5. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/>. Acesso em: 17 fev. 2023.

Desse modo, esta pesquisa utilizou regressão com dados em painel com os estimadores obtidos por meio do MMG, desenvolvido nos trabalhos de Arellano e Bond (1991), Arellano e Bover (1995) e Blundell e Bond (1998).

O modelo supõe que a emissão de CO₂ corrente tende a se perpetuar ou influenciar o seu desempenho futuro. Utilizaram-se 27 estados brasileiros. Desse modo, a relação entre a emissão de CO₂ e seus determinantes socioeconômicos e ambientais foi investigada, especificada no seguinte modelo dinâmico de regressão para dados em painel:

$$\ln Emissao_{it} = \alpha_i + \alpha_t + \beta_1 \ln(Emissao_{it-1}) + \beta_2 \ln Biocombustiveis_{it} + \beta_3 \ln Pop_{it} + \beta_4 \ln PIBpc_{it} + \beta_5 \ln ProdBioC_{it} + \beta_6 \ln FrotaR_{it} + \beta_7 \ln EnergiaR_{it} + e_{it} \quad (1)$$

em que $Emissao_{it}$ corresponde a emissão de CO₂ como a variável dependente; $Emissao_{it-1}$ a variável dependente defasada; $Biocombustiveis$ é a produção de etanol e biodiesel; Pop representa a população residente; $PIBpc$ denota o PIBpc real; $ProdBioC$ denota a produtividades dos biocombustíveis; $FrotaR$ é a frota renovável; e $EnergiaR$ representa a energia renovável. Por sua vez, α_i é o termo de efeito fixo que representa a heterogeneidade não observada, invariante no tempo devido às diferenças geográficas e ambientais dos indivíduos; α_t é o efeito fixo de tempo ou período que representa a heterogeneidade não observada gerada por políticas nacionais e/ou internacionais, que podem impactar no nível de emissão; e_{it} é o termo de erro; o subscrito i se refere ao estado; e o subscrito t , ao período.

A equação (1) foi baseada nos trabalhos de Busu e Nedelcu (2021) e Busu (2019). As diferenças, para ambos, foram o incremento da variável frota de veículos leves e a estimação em painel dinâmico, diferentemente da estimação com efeitos fixos.

Conforme Ahn e Schmidt (1995), esse modelo possui as seguintes hipóteses: $E[\alpha_t] = E[e_{it}] = E[\alpha_t e_{it}] = 0$ e $E[e_{it} e_{is}] = 0$ para $i = 1, 2, \dots, N$ e $\forall t \neq s$. Como também a hipótese-padrão das condições iniciais: $E[Y_{it-1} e_{it}] = 0$ para $i = 1, 2, \dots, N$ e $t = 1, 2, \dots, T$.

Ao considerar um painel dinâmico, no qual inclui a variável dependente defasada como uma das variáveis explicativas, Arellano e Bond (1991) observaram a ocorrência de dois problemas na estimação dos modelos de regressão linear com dados em painel. O primeiro é a presença dos efeitos não observáveis dos indivíduos, α_t , com a variável dependente defasada juntamente, Y_{it-1} no lado direito da equação (1). Nesse caso, omitir os efeitos fixos individuais no modelo dinâmico em painel pode causar estimadores viesados e inconsistentes na regressão linear. Os estimadores dos modelos de regressão com dados em painel, entretanto, que corrigem os efeitos fixos, geram uma estimativa de β_j viesada para baixo em painéis com a dimensão temporal pequena. O segundo, em virtude da provável endogeneidade das variáveis explicativas, no lado

direito da equação, caracteriza-se como um problema de simultaneidade, no qual deve ser tratada para evitar um possível viés nos estimadores.

Uma maneira de estimar parâmetros nessas condições está no método denominado MMG-diferença. Tal método consiste na eliminação dos efeitos fixos por via da primeira diferença e com a utilização de variáveis defasadas como instrumentos. Conforme Arellano e Bover (1995) e Blundell e Bond (1998), os instrumentos são fracos quando as variáveis dependentes e explicativas denotam fraca correlação com a variável endógena, ou quando a variância relativa da heterogeneidade individual torna-se muito grande. Isso produz um estimador MMG-diferença não consistente e enviesado para painéis com T pequeno.

Para reduzir esse problema do estimador MMG-diferença, Arellano e Bover (1995) e Blundell e Bond (1998) desenvolveram um sistema que combina o conjunto de equações em diferença com o conjunto de equações em nível. Desse sistema, surge o modelo denominado MMG-sistema. Para as equações em diferenças, o conjunto de instrumentos é o mesmo descrito acima. Para regressão em nível, os instrumentos apropriados são as diferenças defasadas das respectivas variáveis.

As estimativas do MMG-sistema, segundo Arellano e Bond (1991), são encontradas em dois estágios. Na primeira etapa, supõe-se que os termos de erro são independentes e homocedásticos nos indivíduos e ao longo do tempo. No segundo estágio, os resíduos obtidos na primeira etapa são utilizados para construir uma estimativa consistente da matriz de variância-covariância, relaxando, assim, as hipóteses de independência e homocedasticidade.

Portanto, o objetivo da utilização do MMG foi o de encontrar um estimador consistente com um mínimo de restrições sobre os momentos. Assim, o método de estimação desenvolvido por Arellano e Bover (1995) e Blundell e Bond (1998), denominado de MMG-sistema, foi escolhido, pois se mostrou mais adequado para a amostra da pesquisa. Ao mesmo tempo, este método permite reduzir o possível problema de viés do estimador MMG-diferença.

Por fim, como forma de testar a robustez e a consistência do modelo, Arellano e Bond (1991) sugerem dois tipos de testes: i) Sargan e ii) autocorrelação AR (1) e AR (2). O primeiro teste é utilizado para a escolha mais adequada dos instrumentos. A falha em rejeitar a hipótese nula indicará que os instrumentos são robustos. Para o segundo teste, como se supõe inicialmente que o erro ε_{it} não seja autocorrelacionado, são realizados um teste de correlação serial de primeira ordem e outro de segunda ordem sobre os resíduos em primeira diferença, $\Delta\varepsilon_{it}$. Espera-se que esses erros sejam correlacionados em primeira ordem e não autocorrelacionados em segunda ordem.

Portanto, foram realizados os testes para autocorrelação AR (1) e AR (2) para investigar se o termo de erro exibe evidência de correlação serial e o Sargan.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção discute os resultados da pesquisa. As estatísticas descritivas, as estimativas e suas implicações relacionadas à literatura empírica foram realizadas para tentar identificar se existem evidências de alterações no uso de combustíveis afetarem o nível de emissão de CO₂ do setor de energia brasileiro.

A tabela 6 fornece os dados de média, desvio-padrão, valores mínimo e máximo ao longo do tempo das variáveis estudadas para o Brasil. Quanto à emissão de CO₂, o valor médio registrado foi de 15,16 MtCO₂e. Por um lado, Roraima indicou o menor valor em 2011, de 20,01 MtCO₂e. Por outro lado, São Paulo registrou o maior valor dessa variável (97,90 MtCO₂e) para o ano de 2013.

TABELA 6

Estatística descritiva das variáveis – Brasil (2010-2020)

Variáveis	Observações	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo
Emissão CO ₂ (MtCO ₂ e)	297	15,60	18,30	20,01	97,90
Biocombustíveis (1 milhão de metros cúbico)	297	1,21	2,80	0	16,50
População (1 milhão)	297	7,51	8,78	0,45	46,30
PIBpc (1 milhão)	297	5,60	6,80	0,09	27,20
Produtividade BioC. (R\$ 1 milhão/m ³)	297	2,01	5,09	0,11	49,8
Frota renovável (1 milhão)	297	1,34	2,15	0,05	14,01
Energia renovável (%)	297	8,25	6,73	0,12	32,39

Elaboração dos autores.

Obs.: A tabela foi elaborada com base nos dados citados na subseção 4.1.

No que tange aos dados referentes à produção de biocombustíveis, tem-se que o valor médio registrado foi de 1,2 milhão de metros cúbicos de etanol e biodiesel. O menor valor dessa série foi zero nos estados de Roraima e Santa Catarina durante todo o período analisado, enquanto o maior valor pertence a São Paulo (16,5 milhões de metros cúbicos), no ano de 2019.

Em relação à população, o valor médio observado foi de 7,51 milhões de habitantes, e Roraima exibiu o menor valor, de 450.479 habitantes, em 2010. Em sentido oposto, o maior valor foi em São Paulo, no ano de 2020, com 46,3 milhões de habitantes.

Quanto ao PIBpc real, São Paulo registrou o maior valor, R\$ 27,2 milhões, em 2015. Enquanto o Distrito Federal indicou o menor valor em 2020, de R\$ 87.016,00. O valor médio observado foi de R\$ 5,6 milhões.

Para a produtividade dos biocombustíveis, o valor médio foi de R\$ 2,01 milhões/m³. Goiás indicou o menor valor em 2019, de R\$ 113 mil/m³, enquanto Amapá registrou o maior valor dessa variável (R\$ 49,8 milhões/m³) para o ano de 2020.

No que tange à frota renovável, tem-se que o valor médio registrado foi de 1,34 milhão de veículos leves. O menor valor dessa série foi de 48 mil veículos, em Roraima, em 2010, enquanto o maior pertence a São Paulo, com 14 milhões de veículos no ano de 2020.

Por fim, a participação percentual da energia renovável apresentou valor médio de 8,25. Em um sentido mínimo, Amapá expressou valor de 0,12 em 2020. Em sentido oposto, com maior valor, de 32,39, ocorreu em São Paulo em 2019.

A tabela 7 mostra os resultados dos modelos MQO, *within groups* e MMG-sistema, estimados com base na equação (1). A significância estatística é indicada com asterisco. Além disso, descrevem-se os efeitos da energia renovável como indicador ambiental e demais variáveis econômicas sobre a emissão de CO₂ para os estados brasileiros.

TABELA 7

Resultados das regressões em painel dinâmico para emissão CO₂ como variável dependente, utilizando indicadores econômicos e ambientais como variáveis explicativas para o Brasil (2010-2020)

	Variável dependente: InEmissao CO ₂		
	MQO (a)	Within groups (b)	MMG-sistema (c)
LnEmissao _{it-1}	0,9616*** (0,0198)	0,6373*** (0,0400)	0,9301*** (0,0351)
LnBiocombustíveis	-0,0025 (0,0016)	0,0050 (0,050)	-0,0047* (0,0027)
LnPop	0,0708*** (0,0247)	1,0827*** (0,2712)	0,1049** (0,0485)
LnPIBpc	0,0155 (0,0118)	0,2611*** (0,0641)	0,0335** (0,0160)
LnProdBioC	-0,0058 (0,0161)	-0,0480 (0,0310)	0,0093 (0,0254)
LnFrotaR	-0,0504** (0,0252)	-0,2671*** (0,0524)	-0,0665** (0,0333)
EnergiaR	-0,0005 (0,0012)	-0,0096*** (0,0026)	0,0027 (0,0029)
Constante	0,978 (0,3289)	-10,3585 (4,1367)	-0,1705 (0,5854)
	Wald chi ² (7)=56.004,7 Prob>F=0,0000 R ² =0,9913	F(7,26)=76,99 Prob>F=0,0000 R ² =0,9290	
Observações	270	270	270
Número de grupos	27	27	27
Instrumentos	-	-	45
Teste de Sargan	-	-	[0,9043]
Teste de Hansen	-	-	[0,8865]
Teste AR (1)	-	-	[0,0002]
Teste AR (2)	-	-	[0,8017]

Elaboração dos autores.

Obs.: 1. Tabela elaborada com base nos dados citados na subseção 4.1.

2. *** significativa ao nível de 1%; ** significativa ao nível de 5%; e * significativa ao nível de 10%.

3. Erro-padrão robusto entre parênteses e P-valor entre colchetes.

TEXTO para DISCUSSÃO

Na coluna (a), o modelo foi estimado por MQO, obtido para um total de 270 observações, englobando os estados brasileiros. Os coeficientes significantes foram a Emissão CO₂ defasada, população e frota renovável; contudo, esses estimadores são viesados e inconsistentes, como já discutido. De fato, observou-se que o coeficiente foi maior do que o valor estimado na coluna (b) para a variável defasada por *within groups*.

A maneira de analisar o desempenho dos estimadores MMG-sistema baseia-se na comparação das estimativas para o coeficiente da variável defasada, $Emissao_{it-1}$ obtidas por meio desse método, com aquelas encontradas por métodos alternativos, cujas propriedades são conhecidas em modelos de painel dinâmico. Como discutido na metodologia, as estimativas de MQO e *within groups* são viesadas para cima e para baixo, respectivamente, fornecendo limites aproximados, superior e inferior, para o coeficiente β_1 . O valor encontrado por MMG-sistema para essa variável na coluna (c), na tabela 7, indica que essa condição foi atendida. Isso implica que o viés causado pelas variáveis endógenas no lado direito da regressão e efeitos fixos não observáveis foram corrigidos.

Na coluna (c), no modelo MMG-sistema estimado, tem-se que todos os coeficientes das variáveis explicativas foram estatisticamente significativos, exceto energia renovável e produtividade dos biocombustíveis. O primeiro resultado diz respeito ao coeficiente da variável dependente defasada (Emissão de CO₂, no ano anterior), que foi significativa e positivo. Apresentou-se elevada elasticidade, confirmando a importância da emissão ao longo do tempo.

Em relação às variáveis socioeconômicas que influenciam a emissão de CO₂, a produção de biocombustíveis afeta negativamente. Assim, um aumento de 1% em sua produção reduz em aproximadamente 0,005% a emissão de CO₂. Observou-se que os efeitos dessa variável não são uniformes. No entanto, o efeito de reduzir a emissão de poluentes foi encontrado em Surugiu *et al.* (2012), Tugcu, Ozturk e Aslan (2012), Shafiei e Salim (2014), Gomiero (2015), Ozturk (2016), Cucchiella, D'Adamo e Gastaldi (2018), Decicco (2018), Lage *et al.* (2018), Al-Esawi, Al Qubeissi e Kolodnytska (2019), Busu (2019), Salman *et al.* (2019), Busu e Nedelcu (2021) e Kurniadi, Aimon e Amar (2021).

Em conformidade, também se encontrou de maneira negativa, a relação entre a frota de veículos leves (do tipo *flex*) e a emissão de CO₂. Nesse sentido, com um aumento de 1% na frota renovável, reduz-se a emissão de CO₂ em 0,07%. Os demais fatores socioeconômicos considerados, população e PIBpc, diferentemente, denotaram efeitos positivos, como potenciais motores de emissão de gases poluentes no modelo de regressão.

Para o indicador população, seus efeitos positivos foram esperados e bastante recorrentes na literatura empírica. Assim, com um aumento de 1% na população, eleva-se a emissão de CO₂ em aproximadamente 0,11%. Diversos trabalhos apontam sua importância para o crescimento econômico e sua relação com o consumo de energia (Porter e Linde, 1995; Demirbas, 2005; Varga, 2013; Destek e Aslan, 2017; Cucchiella, D'Adamo e Gastaldi, 2018; Lage *et al.*, 2018; Hou *et al.*, 2019; Hsiao *et al.*, 2019; Al-Esawi, Al Qubeissi e Kolodnytska, 2019; Banga e Menolascina, 2019; Busu, 2019; Salman *et al.*, 2019; Busu e Nedelcu, 2021; Kurniadi, Aimon e Amar, 2021).

Em relação ao PIBpc, uma elevação de 1% faz crescer a emissão de CO₂ em aproximadamente 0,03%. Na literatura, há casos em que o efeito é positivo e outros em que são negativos, sendo uma relação bastante estudada, com destaque para a teoria CAK (Hamit-Hagggar, 2012; Lu, 2017; Yao, Zhang e Zhang, 2019). Por fim, essa relação positiva foi vista em Varga (2013), Destek e Aslan (2017) e Alsaleh e Abdul-Rahim (2019).

Para os indicadores climáticos, ambos foram não significantes, no qual concordam com a hipótese de efeito neutro, investigada na literatura (Menegaki, 2011; Tugcu, Ozturk e Aslan, 2012; Destek e Aslan, 2017; Kocak e Sarkgunesi, 2017; Armeanu, Gherghina e Pasmangiu, 2019; Aydin, 2019a; Ozcan e Ozturk, 2019; Tuna e Tuna, 2019). Cabe destacar que a energia renovável utilizada aqui mensura apenas o consumo de combustíveis renováveis, desconsiderando totalmente a participação da energia elétrica e de outras fontes energéticas brasileiras.

Essa análise dos efeitos da atividade econômica no contexto do setor de energia e de mudança do clima contribui para o debate no estudo de políticas e instrumentos de uma economia de baixo carbono. Os resultados encontrados estão de acordo com outros artigos da literatura, em especial corroboram os estudos de Busu e Nedelcu (2021) e Busu (2019), apoiando-se fortemente na hipótese de que os biocombustíveis contribuem para reduzir a emissão de CO₂. Isso implica a importância da energia renovável, isto é, o incentivo a fontes renováveis, torna-se um caminho para gerar desenvolvimento sustentável com uma economia de baixa emissão de carbono.

Observou-se, também, que as mudanças climáticas, ancoradas na emissão de CO₂ vão fazer com que a eficiência energética seja uma condição necessária para o crescimento da economia. Assim, os impactos encontrados sugerem o incentivo à energia renovável e uma maior atenção ao crescimento populacional. Especificamente, os setores de energia e transporte serão fatores significativos para uma descarbonização nacional.

Por fim, os resultados dos testes de restrição de sobreidentificação, teste de Sargan (com $Prob > = 0,9043$) e teste de Hansen (com $Prob > = 0,8865$), do modelo MMG-sistema, asseguram a escolha dessa especificação. De igual maneira, em relação aos testes de autocorrelação de primeira e segunda ordem, de Arellano e Bond (1991), que confirmam a rejeição da autocorrelação de primeira ordem ($Prob > z = 0,0002$), mas não se rejeita a autocorrelação de segunda ordem ($Prob > z = 0,8017$), denota-se que as estimativas são consistentes. Além disso, esse modelo foi estimado em um estágio (*one step*), para tornar as estimativas mais consistentes, e, ao mesmo tempo, utilizou-se erros-padrão robustos e procedeu-se à opção de colapsar os instrumentos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de energia é um dos pilares do processo de produção de qualquer atividade econômica, tornando-se, assim, indispensável para o desenvolvimento das nações. Alianhado a isso, a energia renovável é de fundamental importância por seu reduzido impacto ambiental. Como externalidade desse processo, a poluição gerada pelo uso das diversas fontes energéticas situa-se, mundialmente, em um dos mais conhecidos e discutidos problemas do século XXI.

Nesse contexto, as nações são desafiadas a implementar e estabelecer políticas que lhes permitirão alcançar a sustentabilidade ambiental sem restringir seu crescimento econômico. Esse desafio, para os países em desenvolvimento, é ainda maior, pois se espera que essas economias aumentem significativamente sua produção e, conseqüentemente, possam fornecer grande volume de emissão de GEE.

Internacionalmente, como acordos regulatórios, têm-se a conferência das partes do Acordo de Paris (COP-26) e o Protocolo de Quioto, que abrangem grande parte das nações do mundo com o objetivo de mitigar a poluição global por meio de diversas políticas sustentáveis, baseadas em tecnologias limpas, como incentivo ao uso de energia renovável e à criação e precificação de carbono.

Junto a essas considerações, este artigo analisou a relação entre as emissões de CO_2 com um conjunto de variáveis econômicas e ambientais do setor energético dos 27 estados brasileiros durante o período 2010-2020. Tendo em vista esse objetivo, com o uso de dados em painel, recorreu-se ao modelo de regressão dinâmica, em especial a estimação pelo MMG-sistema. Os resultados revelaram que as emissões de CO_2 são negativamente correlacionadas com a produção de biocombustíveis e a frota de veículos leves. Enquanto a população e o PIBpc estão correlacionados com níveis crescentes da emissão de CO_2 . Porém, no caso da energia renovável e produtividade dos biocombustíveis, seus impactos não foram estatisticamente significativos.

Considerando a análise empírica, podem-se avaliar os benefícios alcançados pelo uso de energias renováveis, em especial os biocombustíveis, para uma economia de baixa emissão de carbono. Além disso, fornecem-se bases para implementação de futuras políticas econômicas, ambientais e energéticas, não exclusivamente ao Brasil, como também se destaca o desempenho exitoso das políticas energéticas nacionais implementadas, como o PNPB e a RenovaBio.

Os resultados encontrados podem ser úteis no melhor entendimento da relação entre as variáveis utilizadas. Principalmente a produção e o consumo de biocombustíveis, sua relação com a emissão de CO₂ e o desenvolvimento sustentável. Assim, pode-se afirmar que desempenham papel importante para superar a crise energética, na qual os processos produtivos tornam-se cada vez mais complexos.

O Brasil se comprometeu em aumentar seu percentual de fontes renováveis em sua matriz energética, que corresponde a 48%, e descarbonizar sua economia, com o incentivo aos biocombustíveis e às medidas para reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Por fim, existe elevado potencial no estabelecimento de tecnologias renováveis, para distintas fontes, apesar de a análise ter se limitado aos biocombustíveis, os quais contribuem para o país cumprir os acordos internacionais, sendo destaque nos principais mercados de energia renovável.

A variável energia renovável empregada pode ser revelada como a principal limitação deste estudo. Outras dificuldades encontram-se no curto período da amostra (2010-2020) e nos métodos econométricos, devido à baixa disponibilidade de dados. No geral, os impactos dos controles deram-se como esperado e de modo consistente com a literatura. Assim, recomendam-se como pontos importantes para trabalhos futuros a utilização de outras variáveis *proxys* para a energia renovável, tais como a intensidade de bioenergia e a inclusão de vários outros fatores para investigar essa questão, como pobreza, capital humano, investimento e governança. Além disso, utilizar uma série mais longa de dados e, alternativamente ao modelo de dados em painel dinâmico-sistema, empregar o modelo de painel dinâmico em diferenças.

REFERÊNCIAS

AHN, S. C.; SCHMIDT, P. Efficient estimation of models for dynamic panel data. **Journal of Econometrics**, v. 68, n. 1, p. 5-27, 1995.

AKADIRI, S. S. *et al.* Renewable energy consumption in EU-28 countries: policy toward pollution mitigation and economic sustainability. **Energy Policy**, v. 132, p. 803-810, 2019.

AL-ESAWI, N.; AL QUBEISSI, M.; KOLODNYTSKA, R. The impact of biodiesel fuel on ethanol/diesel blends. **Energies**, v. 1804, n. 12, 2019.

ALSALEH, M.; ABDUL-RAHIM, A. S. Bioenergy intensity and its determinants in European continental countries: evidence using GMM estimation. **Resources**, v. 43, n. 8, 2019.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Painel dinâmico de certificações de biocombustíveis RenovaBio**: 2022. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiMzIzYzE5OWltZWMyOC00ZD-MzLWI5MzctM2U1NGNjNzYxNTAwliwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTtytNGI0Mi1iN2VmL-TEyNGFmY2FkYzIxMyJ9>. Acesso em: 17 jul. 2023.

ARELLANO, M.; BOND, S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. **The Review of Economic Studies**, v. 58, n. 2, p. 277-297, 1991.

ARELLANO, M.; BOVER, O. Another look at the instrumental-variable estimation of error components model. **Journal of Econometrics**, v. 68, p. 29-52, 1995.

ARMEANU, D. S.; GHERGHINA, S. C.; PASMANGIU, G. Exploring the causal nexus between energy consumption, environmental pollution and economic growth: empirical evidence from central and eastern Europe. **Energies**, v. 3704, n. 12, 2019.

AYDIN, M. Renewable and non-renewable electricity consumption-economic growth nexus: evidence from OECD countries. **Renew. Energy**, v. 136, p. 599-606, 2019a.

AYDIN, M. The effect of biomass energy consumption on economic growth in BRICS countries: a country-specific panel data analysis. **Renew. Energy**, v. 138, p. 620-627, 2019b.

AZRETBERGENOVA, G. *et al.* The relationship between renewable energy production and employment in European Union countries: panel data analysis. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 11, n. 3, p. 20-26, 2021.

BALOCH, M. A.; MAHMOOD, N.; ZHANG, J. W. Effect of natural resources, renewable energy and economic development on CO₂ emissions in BRICS countries. **Sci. Total Environ.**, v. 678, p. 632-638, 2019.

BANGA, J. R.; MENOLASCINA, F. Computational methods enabling next-generation bioprocesses. **Processes**, v. 214, n. 7, 2019.

BENTO, J. A. N.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Biocombustíveis, crédito de descarbonização (CBIO) e mercado de carbono. *In*: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. **Agropecuária brasileira: evolução, resiliência e oportunidades**. Brasília: Ipea, 2023. No prelo.

BLUNDELL, R.; BOND, S. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. **Journal of Econometrics**, v. 87, p. 115-143, 1998.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta comunicação nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: MCTI, 2021. 620 p.

BULUT, U.; MURATOGLU, G. Renewable energy in Turkey: great potential, low but increasing utilization, and an empirical analysis on renewable energy-growth nexus. **Energy Policy**, v. 123, p. 240-250, 2018.

BUSU, M. The role of renewables in a low-carbon society: evidence from a multivariate panel data analysis at the EU level. **Sustainability**, v. 5260, n. 11, 2019.

BUSU, M.; NEDELCO, A. C. Analyzing the renewable energy and CO₂ emission levels nexus at an EU level: a panel data regression approach. **Processes**, v. 130, n. 9, 2021.

BUSU, M.; TRICA, C. L. Sustainability of circular economy indicators and their impact on economic growth of the European Union. **Sustainability**, v. 5481, n. 11, 2019.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M. Future trajectories of renewable energy consumption in the European Union. **Resources**, v. 10, n. 7, 2018.

DECICCO, J. M. Methodological issues regarding biofuels and carbon uptake. **Sustainability**, v. 1581, n. 10, 2018.

DEMIRBAS, A. Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. **Prog. Energy Combust. Sci.**, v. 31, p. 466-487, 2005.

DESTEK, M. A.; ASLAN, A. Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth in emerging economies: evidence from bootstrap panel causality. **Renew. Energy**, v. 111, p. 757-763, 2017.

DOGAN, E.; SEKER, F. Determinants of CO₂ emissions in the European Union: the role of renewable and non-renewable energy. **Renew. Energy**, v. 94, p. 429-439, 2016.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Atlas da eficiência energética: relatório de indicadores**. Brasília: MME, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-651/Atlas2021_PT_2022_02_04.pdf. Acesso em: 8 fev. 2023.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório síntese do balanço energético nacional: ano base 2021**. Brasília: MME, 2022a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 8 fev. 2023.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise de conjuntura dos biocombustíveis**: ano 2021. Brasília: MME, 2022b. (Nota Técnica, n. 2). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-688/NT-EPE-DPG-SDB-2022-02_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_2021.pdf. Acesso em: 8 fev. 2023.

EREN, B. M.; TASPINAR, N.; GOKMENOGLU, K. K. The impact of financial development and economic growth on renewable energy consumption: empirical analysis of India. **Sci. Total Environ.**, v. 663, p. 189-197, 2019.

FAN, W.; HAO, Y. An empirical research on the relationship amongst renewable energy consumption, economic growth and foreign direct investment in China. **Renew. Energy**, v. 146, p. 598-609, 2020.

FÁVERO, L. P. **Métodos quantitativos com o Stata**. Rio de Janeiro: Campus, 2014. 248 p.

FISHLOW, A.; VIEIRA FILHO, J. E. R. **Agriculture and industry in Brazil**: innovation and competitiveness. New York: Columbia Press, 2020. 244 p.

FRONDEL, M. *et al.* Economic impacts from the promotion of renewable energy technologies: the German experience. **Energy Policy**, v. 38, p. 4048-4056, 2010.

GOMIERO, T. Are biofuels an effective and viable energy strategy for industrialized societies? A reasoned overview of potentials and limits. **Sustainability**, v. 7, p. 8491-8521, 2015.

GROSSMAN, G. M. Pollution and growth. What do we know? *In*: GOLDIN, I.; WINTERS, A. (Ed.). **The Economics of Sustainable Development**. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1995. p. 19-47.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. Environmental impacts of a North American free trade agreement. *In*: GARBER, P. M. (Ed.). **The Mexico-US Free Trade Agreement**. Cambridge, United States: The MIT Press, 1991. p. 13-57.

HAMIT-HAGGAR, M. Greenhouse gas emissions, energy consumption and economic growth: a panel cointegration analysis from Canadian industrial sector perspective. **Energy Econ.**, v. 34, p. 358-364, 2012.

HOU, Y. *et al.* Measuring energy efficiency and environmental performance: a case of South Asia. **Processes**, v. 325, n. 7, 2019.

HSIAO, W. L. *et al.* Energy efficiency of the Baltic Sea countries: an application of stochastic frontier analysis. **Energies**, v. 104, n. 12, 2019.

HU, Y. *et al.* The relationship between energy consumption and economic growth: evidence from China's industrial sectors. **Energies**, v. 8, p. 9392-9406, 2015.

HUANG, Y. *et al.* Dynamic association between ICT, renewable energy, economic complexity and ecological footprint: is there any difference between E-7 (developing) and G-7 (developed) countries? **Technol. Soc.**, v. 68, 2022.

IAT – INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Plano de Controle de Poluição Veicular – PCPV**. Paraná: IAT, 2022. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2023-03/pcpv_pr_2022_final.pdf.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **AR5 Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability**. IPCC, 2014. p. 1757-1776.

JALIL, A.; MAHMUD, S. F. Environment Kuznets curve for CO₂ emissions: a cointegration analysis for China. **Energy Policy**, v. 37, p. 5167-5172, 2009.

KAHOULI, B. Does static and dynamic relationship between economic growth and energy consumption exist in OECD countries? **Energy Rep.**, v. 5, p. 104-116, 2019.

KANG, S. H.; ISLAM, F.; TIWARI, A. K. The dynamic relationships among CO₂ emissions, renewable and non-renewable energy sources, and economic growth in India: evidence from time-varying Bayesian VAR model. **Struct. Chang. Econ. D.**, v. 50, p. 90-101, 2019.

KOCAK, E.; SARKGUNESI, A. The renewable energy and economic growth nexus in Black Sea and Balkan countries. **Energy Policy**, v. 100, p. 51-57, 2017.

KÖK, A. G.; SHANG, K.; YÜCEL, S. Impact of electricity pricing policies on renewable energy investments and carbon emissions. **Manag. Sci.**, v. 64, p. 131-148, 2016.

KURNIADI, A. P.; AIMON, H.; AMAR, S. Determinants of biofuels production and consumption, green economic growth and environmental degradation in 6 Asia Pacific countries: a simultaneous panel model approach. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 11, n. 5, p. 460-471, 2021.

LAGE, S. *et al.* Algal biomass from wastewater and flue gases as a source of bioenergy. **Energies**, v. 664, n. 11, 2018.

LI, R.; SU, M. The role of natural gas and renewable energy in curbing carbon emission: case study of the United States. **Sustainability**, v. 600, n. 9, 2017.

LU, W. C. Greenhouse gas emissions, energy consumption and economic growth: a panel cointegration analysis for 16 Asian countries. **Int. J. Environ. Res. Publ. Health**, v. 14, 2017.

LUQMAN, M.; AHMAD, N.; BAKHSH, K. Nuclear energy, renewable energy and economic growth in Pakistan: evidence from non-linear autoregressive distributed lag model. **Renew. Energy**, v. 139, p. 1299-1309, 2019.

MENEGAKI, A. N. Growth and renewable energy in Europe: a random effect model with evidence for neutrality hypothesis. **Energy Econ.**, v. 33, p. 257-263, 2011.

MOHAMED, H.; BEN JEBLI, M.; BEN YOUSSEF, S. Renewable and fossil energy, terrorism, economic growth, and trade: evidence from France. **Renew. Energy**, v. 139, p. 459-467, 2019.

NARAYAN, S.; DOYTCH, N. An investigation of renewable and non-renewable energy consumption and economic growth nexus using industrial and residential energy consumption. **Energy Econ.**, v. 68, p. 160-176, 2017.

OCAL, O.; ASLAN, A. Renewable energy consumption-economic growth nexus in Turkey. **Renew. Sust. Energy Rev.**, v. 28, p. 494-499, 2013.

OZCAN, B.; OZTURK, I. Renewable energy consumption-economic growth nexus in emerging countries: a bootstrap panel causality test. **Renew. Sust. Energy Rev.**, v. 104, p. 30-37, 2019.

OZTURK, I. A literature survey on energy-growth nexus. **Energy Policy**, v. 38, p. 340-349, 2010.

PAYNE, J. E. On biomass energy consumption and real output in the US. **Energy Source Part B**, v. 6, p. 47-52, 2011.

PORTER, M. E.; LINDE, C. Van der Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. **J. Econ. Perspect.**, v. 9, p. 97-118, 1995.

REN21. **Renewable 2022 Global Status Report**. Paris: REN21, 2022. Disponível em: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>. Acesso em: 10 fev. 2023.

SALMAN, B. *et al.* Thermal analysis of nigerian oil palm biomass with sachet-water plastic wastes for sustainable production of biofuel. **Processes**, v. 475, n. 7, 2019.

SÃO PAULO. **Guia do programa de incentivo à renovação da frota de caminhões**. Desenvolve SP, 2017. Disponível em: http://www.desenvolvesp.com.br/wp-content/uploads/old/page/uploads/files/cartilha_final2.pdf. Acesso em: 8 fev. 2023.

SHAFIEI, S.; SALIM, R. A. Non-renewable and renewable energy consumption and CO₂ emissions in OECD countries: a comparative analysis. **Energy Policy**, v. 66, p. 547-556, 2014.

SULAIMAN, C. *et al.* Wood fuel consumption and mortality rates in Sub-Saharan Africa: evidence from a dynamic panel study. **Chemosphere**, v. 177, p. 224-231, 2017a.

SULAIMAN, C. *et al.* Wood fuel consumption, institutional quality, and forest degradation in sub-Saharan Africa: evidence from a dynamic panel framework. **Ecol. Indic.**, v. 74, p. 414-419, 2017b.

SURUGIU, C. *et al.* An input-output approach of CO₂ emissions in tourism sector in post-communist Romania. **Procedia Econ. Financ.**, v. 3, p. 987-992, 2012.

TUGCU, C. T.; OZTURK, I.; ASLAN, A. Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth relationship revisited: evidence from G7 countries. **Energy Econ.**, v. 34, p. 1942-1950, 2012.

TUNA, G.; TUNA, V. E. The asymmetric causal relationship between renewable and non-renewable energy consumption and economic growth in the ASEAN-5 countries. **Resour. Policy**, v. 62, p. 114-124, 2019.

USMAN, M. *et al.* Do nuclear energy, renewable energy, and environmental-related technologies asymmetrically reduce ecological footprint? Evidence from Pakistan. **Energies**, v. 15, n. 9, 2022.

VARGA, B. O. Electric vehicles, primary energy sources and CO₂ emissions: Romanian case study. **Energy**, v. 49, p. 61-70, 2013.

VIEIRA FILHO, J. E. R. **Agricultura e pecuária, energia e o efeito poupa-florestas: um comparativo internacional.** Brasília: Ipea, jun. 2022. (Texto para Discussão, n. 30).

YAO, S.; ZHANG, S.; ZHANG, X. Renewable energy, carbon emission and economic growth: a revised environmental Kuznets curve perspective. **J. Clean. Prod.**, v. 235, p. 1338-1352, 2019.

ZAFAR, M. W. *et al.* From nonrenewable to renewable energy and its impact on economic growth: the role of research & development expenditures in Asia-Pacific Economic Cooperation countries. **J. Clean. Prod.**, v. 212, p. 1166-1178, 2019.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

OZTURK, I. Utilizing biofuels for sustainable development in the panel of 17 developed and developing countries. **GCB Bioenergy**, v. 8, p. 826-836, 2016.

Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

EDITORIAL

Coordenação

Aeromilson Trajano de Mesquita

Assistentes da Coordenação

Rafael Augusto Ferreira Cardoso

Samuel Elias de Souza

Supervisão

Ana Clara Escórcio Xavier

Everson da Silva Moura

Revisão

Alice Souza Lopes

Amanda Ramos Marques Honorio

Barbara de Castro

Brena Rolim Peixoto da Silva

Cayo César Freire Feliciano

Cláudio Passos de Oliveira

Clícia Silveira Rodrigues

Olavo Mesquita de Carvalho

Regina Marta de Aguiar

Reginaldo da Silva Domingos

Editoração

Anderson Silva Reis

Augusto Lopes dos Santos Borges

Cristiano Ferreira de Araújo

Daniel Alves Tavares

Danielle de Oliveira Ayres

Leonardo Hideki Higa

Natália de Oliveira Ayres

Capa

Aline Cristine Torres da Silva Martins

Projeto Gráfico

Aline Cristine Torres da Silva Martins

The manuscripts in languages other than Portuguese published herein have not been proofread.

Ipea – Brasília

Setor de Edifícios Públicos Sul 702/902, Bloco C

Centro Empresarial Brasília 50, Torre B

CEP: 70390-025, Asa Sul, Brasília-DF

Missão do Ipea
Aprimorar as políticas públicas essenciais ao desenvolvimento brasileiro
por meio da produção e disseminação de conhecimentos e da assessoria
ao Estado nas suas decisões estratégicas.



ipea Instituto de Pesquisa
Econômica Aplicada

MINISTÉRIO DO
PLANEJAMENTO
E ORÇAMENTO

