

Emissões de Carbono e Crescimento Econômico: Quanto Mais Poluição, Pior?

Yuri Cesar de Lima e Silva*

Departamento de Economia

Universidade Federal de Roraima (UFRR)

Marcelo Eduardo Alves da Silva

Departamento de Economia / PIMES

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Resumo

Estimamos um vetor autorregressivo para dados em painel (PVAR) para analisar as relações entre crescimento econômico, consumo total de energia, consumo de combustíveis fósseis, emissões domésticas de carbono, emissões de carbono do resto do mundo e abertura comercial. Analisamos como os choques nas emissões, de natureza local e global, afetam o crescimento econômico dos trinta países que mais emitem carbono no planeta. Utilizamos dados com periodicidade anual entre os anos de 1996 e 2014. Além disso, testamos a hipótese de que países que possuem níveis elevados de emissões de carbono são mais afetados pelos choques nas emissões. Os resultados mostram que os choques nas emissões reduzem o crescimento econômico e, quando restringimos a amostra aos dez países mais emissores, a queda na atividade econômica é ainda mais intensa. Por outro lado, os choques na atividade produtiva e no consumo energético geram aumentos nas emissões domésticas e estrangeiras de carbono e os choques na abertura comercial reduzem as emissões estrangeiras.

Palavras-Chaves: PVAR. Crescimento Econômico. Emissões de Carbono.

Classificação JEL: O44, C33, Q50.

Abstract

We estimate a panel vector autoregressive (PVAR) to analyze the relationship between economic growth, total energy consumption, fossil fuel consumption, carbon domestic emissions, rest of the world carbon emissions and trade openness. We analyzed how domestic and foreign carbon emissions shocks affect the economic growth in thirty highest emitter carbon countries on the world. We use annual data between 1996 and 2014. In addition, we tested the hypothesis that countries that have high levels of carbon emissions are most affected by the emissions shocks. The results show that emissions shocks reduce economic growth and when we restrict the sample to the ten most emitting countries, the fall in economic activity is even more intense. On the other hand, shocks in productive activity and energy consumption generate increases in domestic and foreign carbon emissions and shocks in trade openness reduce foreign emissions.

Keywords: PVAR. Economic Growth. Carbon Emissions.

JEL Code: O44, C33, Q50.

Área 6 - Crescimento, Desenvolvimento Econômico e Instituições

*O autor gostaria de agradecer ao Instituto Escolhas pelo apoio e contribuição útil neste estudo.

1 Introdução

Desde o final da década de 1980, os cientistas climáticos passaram a alertar os líderes mundiais sobre as ameaças do aquecimento global e das consequentes mudanças climáticas que poderiam afetar o mundo nos próximos anos. Entretanto, foi apenas em meados da década de 1990 que os relatórios científicos das principais Conferência Climáticas Internacionais passaram a sugerir que os problemas climáticos poderiam estar ligados diretamente à ação humana (IPCC, 1995)¹. Atualmente, já é bem aceito que uma das principais causas do aquecimento global é a crescente concentração dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera terrestre e que as principais fontes de emissões antropogênicas desses gases são a atividade econômica e o uso de energia (IPCC, 2014).

Por outro lado, os níveis de emissões de CO₂ no mundo estão bastante concentrados em uma pequena quantidade de países. Dados do Banco Mundial mostram que o grupo dos trinta países que mais poluíram a atmosfera mundial em 2014 foram responsáveis por cerca de 83% das emissões antropogênicas do planeta. Entretanto, nem todos esses países iniciaram grandes esforços para solucionar o problema das suas emissões domésticas e os dados não demonstram uma reversão na direção da tendência das emissões mundiais. Alguns estudos já começam a relacionar o aumento das emissões de carbono com problemas relacionados a saúde humana e a segurança alimentar (IPCC, 2018; Smith & Myers, 2019).

Este artigo examina como os aumentos nas emissões de carbono impactam o crescimento econômico nos trinta países que mais emitem CO₂ no mundo². Para isso, estimamos um vetor autorregressivo para dados em painel (PVAR), que foi desenvolvido originalmente por Holtz-Eakin et al. (1988), e analisamos as relações entre crescimento econômico, consumo total de energia, consumo de combustíveis fósseis, emissões domésticas de CO₂, emissões estrangeiras de CO₂ e abertura comercial. Além disso, testamos se os países que possuem maiores níveis de emissões são mais ou menos afetados por choques nas emissões de carbono. Para isso, examinamos, além da amostra completa com os trinta países, mais duas sub-amostras que restringe a quantidade de países aos vinte e aos dez maiores emissores de CO₂ do planeta.

Existem poucos estudos na área que utilizam a metodologia PVAR e esta possui certas vantagens em relação a outros métodos utilizados em estudos relacionados. As principais vantagens desse método foram sumarizadas por Antonakakis et al. (2017) e estão, em primeiro lugar, no fato de tratar todas as variáveis como potencialmente endógenas, podendo explicitar assim todos os efeitos de *feedback* entre as variáveis utilizadas. Em segundo lugar, é bastante útil utilizar uma estrutura mais flexível como o PVAR quando existem poucas informações teóricas sobre as relações entre as variáveis para ajudar no processo de especificação do modelo. Em terceiro lugar, a utilização das funções de impulso-resposta e da análise da decomposição da variância ajudam a captar defasagem nos efeitos que não poderiam ser captados em metodologias que não considerassem o processo dinâmico. E, por fim, o PVAR tem a excelente vantagem de poder ser empregada com séries de dados mais curtas, em decorrência do ganho de eficiência obtida pela dimensão transversal.

Nossos resultados mostram que, em todos os casos analisados e independente de serem domésticos ou globais, os choques nas emissões de carbono são responsáveis por queda na atividade econômica. Além disso, quando restringimos a amostra para os dez maiores emissores de CO₂ percebemos que esses efeitos se intensificam. Por outro lado, os choques na atividade produtiva e no consumo energético geram aumentos nas emissões domésticas e estrangeiras de CO₂ e os choques na abertura comercial reduzem as emissões estrangeiras.

¹A investigação científica sobre os processos climáticos não é tão recente. Em 1896, o químico sueco Svante Arrhenius apontou que a queima de combustíveis fósseis produziria dióxido de carbono e, além disso, mostrou uma relação entre o aumento de CO₂ na atmosfera e o aumento da temperatura da terra.

²Nordhaus (2007) mostrou que o aumento das emissões de carbono afetam as possibilidades de produção da economia. Os modelos E-DSGE já utilizam essa informação e inserem uma função de dano à produção vinculada ao aumento da poluição nas funções de produção das firmas (Heutel, 2012).

A literatura econômica e ambiental que vem estudando os vínculos causais entre o crescimento econômico, o consumo de energia e as emissões de carbono sempre esteve mais focada na compreensão dos determinantes das emissões do que no exame de como as emissões podem impactar o crescimento econômico. Estes estudos, em sua grande maioria, objetivam propor políticas de mitigação das emissões sem prejudicar intensamente o crescimento dos países. Entretanto, o tempo para que essas ações sejam colocadas em prática pode estar se esgotando e considerar como os choques nas emissões de CO₂ afetam o crescimento econômico pode ajudar a apontar novos caminhos para as políticas públicas ambientais.

Os estudos aplicados nessa área podem ser divididos em basicamente quatro grandes grupos. O primeiro deles teve início com o trabalho de Kraft & Kraft (1978) e a preocupação era estudar as relações causais entre o crescimento econômico e o consumo de energia. São exemplos recentes de estudos nessa área: Ozcan & Ozturk (2019), Aydin (2019) e Benkraiem et al. (2019). O segundo grupo tem Grossman & Krueger (1991) como ponto de partida e se concentrou no entendimento da relação entre a atividade econômica e as emissões de CO₂, podemos citar Chen et al. (2019), Destec & Sarkodie (2019) e Lau et al. (2019) como estudos recentes que seguiram esse caminho. O estudo de Antweiler et al. (2001) constrói as bases para o terceiro grupo, que se dedica a estudar as relações entre a abertura comercial e as emissões de CO₂, são exemplos de estudos recentes nessa área Kim et al. (2019) e Kolcava et al. (2019). Por fim, e só mais recentemente, um quarto grupo passou a buscar entender essas relações através de estruturas metodológicas unificadas (Antonakakis et al., 2017; Acheampong, 2018; Kahia et al., 2019; Ozcan et al., 2019; Koengkan et al., 2019; Charfeddine & Kahia, 2019).

Entretanto, o principal fato que liga esses grupos são os resultados conflitantes. As possíveis causas dessa falta de homogeneidade repousam no fato dos estudos contemplarem amostras com diferentes países, períodos de tempo distintos e metodologias variadas. Além disso, são constatados problemas de viés de variáveis omitidas e utilização de metodologias estáticas para analisar um problema com característica estritamente dinâmica (Antonakakis et al., 2017)

Este estudo, contribui com essa literatura ao estimar PVAR com o intuito de analisar como os choques nas emissões de carbono, de natureza local e global, podem afetar as economias dos países estudados. Para isso, consideramos, pela primeira vez na literatura da área, uma amostra composta com os trinta maiores emissores mundiais de CO₂, permitindo que pudéssemos concentrar nossa análise nos países que possuem níveis elevados de emissões e que, por essa razão, devem possuir um maior estoque de poluição ambiental. A periodicidade dos dados é anual e compreende o período entre 1996 e 2014. Este recorte temporal foi escolhido pois é o período onde temos informações completas sobre todos os trinta países que compõem a amostra na base de dados utilizada no estudo³.

Uma outra contribuição importante do nosso estudo é a introdução dos choques das emissões dos outros países nas economias domésticas, através da variável emissões do resto do mundo. Isto é compatível com o fato de que as mudanças climáticas são essencialmente um problema de natureza global, já que são consequência da concentração mundial de GEE. Entretanto, o que percebemos é que a literatura aplicada vem esquecendo de considerar que a qualidade do meio ambiente de um país é determinada não apenas pelas suas emissões domésticas, mas também, pelas emissões dos outros países do mundo, mesmo que os trabalhos que utilizam modelos teóricos E-DSGE⁴ já considerem esse fato nas suas análises (Heutel, 2012; Annicchiarico & Dio, 2015; Leal et al., 2015; Silva & Silva, 2019). A ideia por trás disso é que se apenas um país decidir reduzir seu fluxo de emissões, terá um impacto possivelmente pequeno na concentração global de GEE. Por outro lado, o que este artigo vem propor é que os impactos econômicos domésticos proveniente de choques nas emissões do resto do mundo podem ser significativos, principalmente em uma amostra de países que já estão no topo

³Utilizamos a *World Development Indicators*, base de dados mantida pelo Banco Mundial. Disponível em: <https://data.worldbank.org>.

⁴Modelos Ambientais de Equilíbrio Geral, Dinâmicos e Estocásticos, no inglês: *Environmental-Dynamic Stochastic General Equilibrium Models*.

da lista dos grandes poluidores mundiais a algum tempo.

Além das emissões do resto do mundo, introduzimos no nosso modelo a abertura comercial e o consumo de combustíveis fósseis como fazem alguns estudos recentes (Acheampong, 2018; Antonakakis et al., 2017; Kahia et al., 2019). A incorporação dessas três variáveis no nosso modelo busca reduzir o problema de viés de variáveis omitidas encontrado em estudos anteriores, que utilizam apenas o crescimento econômico, o consumo total de energia e as emissões domésticas para estimar os modelos.

A introdução do consumo de combustíveis fósseis no modelo busca captar o efeito que essas fontes energéticas podem ter tanto na atividade econômica quanto nas questões ambientais. Por outro lado, a introdução da abertura comercial busca captar os efeitos que o comércio internacional pode ter sobre as emissões de CO₂. Dois canais são discutidos na literatura, o primeiro deles explica como aumentos na produção provenientes da abertura comercial geram aumentos nas emissões domésticas. O segundo está relacionado aos efeitos provenientes de regulamentos ambientais mais rigorosos no ambiente internacional (que nos mercados domésticos), que impulsionam o emprego de métodos de produção mais respeitadores do meio ambiente e que são implementados à medida que a demanda por um ambiente melhor é exigido pelos agentes econômicos (Managi et al., 2009).

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma: Na segunda seção, a amostra será caracterizada e será realizada uma análise preliminar dos dados. Na terceira seção, serão apresentados os aspectos metodológicos do trabalho. Já na quarta seção, expomos e discutimos os resultados. E, por fim, a última seção apresenta as conclusões do artigo.

2 Descrição e Análise Preliminar dos Dados

Os dados utilizados neste estudo foram coletados no *World Development Indicators*, base de dados mantida pelo Banco Mundial⁵. Selecionamos e ranqueamos os trinta países que mais emitiram CO₂ no planeta em 2014, como pode ser visualizado na Tabela 1. Neste período, esses países foram responsáveis por cerca de 83% de todas as emissões de CO₂ do mundo. Porém, é importante observar que os três países mais poluentes foram responsáveis por quase 50% das emissões de CO₂ do planeta, demonstrando que o problema das emissões está bastante concentrado em uma pequena quantidade de países.

Tabela 1: Países da amostra, ranqueados pelo nível das emissões de CO₂ em 2014.

Rank	Países	Emissões (Gt)	% emissões no mundo	% acumul.	Rank	Países	Emissões (Gt)	% emissões no mundo	% acumul.
1	China	10.2919	28.48	28.48	16	Austrália	0.3613	1.00	73.45
2	Estados Unidos	5.2543	14.54	43.02	17	Turquia	0.3460	0.96	74.41
3	Índia	2.2384	6.19	49.21	18	Itália	0.3204	0.89	75.29
4	Rússia	1.7053	4.72	53.93	19	Tailândia	0.3162	0.88	76.17
5	Japão	1.2140	3.36	57.29	20	França	0.3033	0.84	77.01
6	Alemanha	0.7199	1.99	59.28	21	Polônia	0.2857	0.79	77.80
7	Irã	0.6495	1.80	61.08	22	Cazaquistão	0.2483	0.69	78.49
8	Arabia Saudita	0.6010	1.66	62.74	23	Malásia	0.2428	0.67	79.16
9	Coreia do Sul	0.5872	1.62	64.37	24	Espanha	0.2340	0.65	79.81
10	Canadá	0.5372	1.49	65.85	25	Ucrânia	0.2273	0.63	80.44
11	Brasil	0.5298	1.47	67.32	26	Argentina	0.2040	0.56	81.00
12	África do Sul	0.4898	1.36	68.68	27	Egito	0.2019	0.56	81.56
13	México	0.4803	1.33	70.00	28	Venezuela	0.1852	0.51	82.07
14	Indonésia	0.4642	1.28	71.29	29	Iraque	0.1684	0.47	82.54
15	Reino Unido	0.4198	1.16	72.45	30	Holanda	0.1673	0.46	83.00

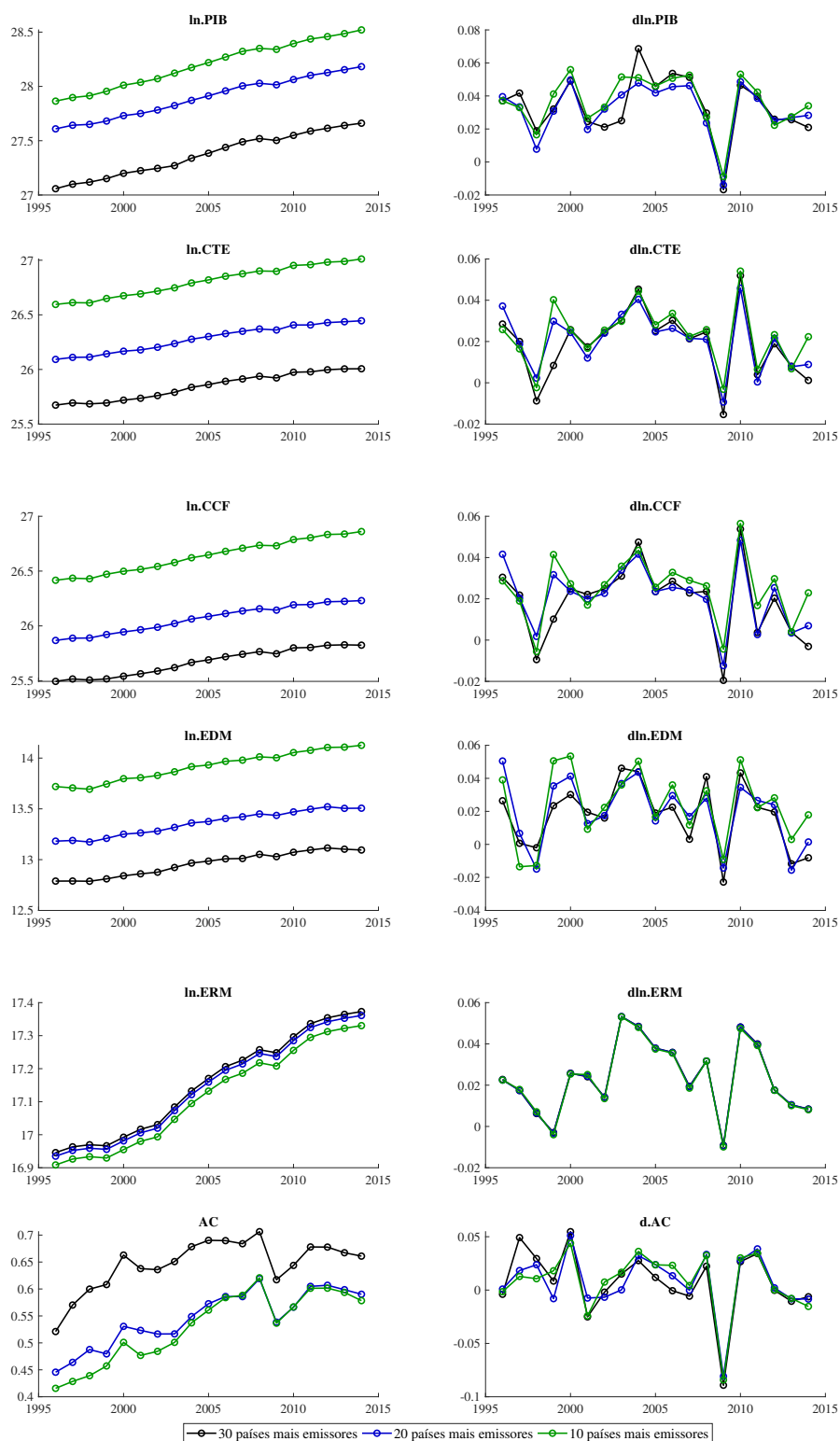
Nota: Para a formulação do Ranque das emissões foram usados apenas os dados de 2014.

Os dados utilizados possuem periodicidade anual e abrangem o período entre 1996 e 2014. A seleção do período se deve à disponibilidade dos dados para todos os trinta países estudados. As variáveis utilizadas foram: o produto interno bruto real (PIB), o consumo total de energia (CTE), o consumo de combustíveis fósseis (CCF), as emissões de CO₂ domésticas (EDM), as emissões de

⁵Disponível em: <https://data.worldbank.org>.

CO₂ do resto do mundo⁶ (ERM) e um indicador de abertura comercial⁷ (AC), os dados podem ser visualizados na Figura 1.

Figura 1: Dados usados nas estimações.



Nota: A coluna da esquerda contém os gráficos das variáveis em nível.
A coluna da direita apresenta as variáveis em primeira diferença.

⁶Emissões do mundo menos as emissões domésticas de cada um dos países.

⁷Exportações mais importações como percentual do PIB.

3 Metodologia

3.1 Testes de Raiz Unitária para Dados em Paineis

Analizamos a estacionariedade dos nossos dados utilizando os testes de raiz unitária para dados em painéis de [Levin et al. \(2002\)](#), [Harris & Tzavalis \(1999\)](#), [Breitung \(2000\)](#), [Im et al. \(2003\)](#) e [Hadri \(2000\)](#). Para a discussão destes testes, considere a seguinte especificação, descrita em [Baltagi \(2008\)](#):

$$\Delta Y_{i,t} = \rho_i Y_{i,t-1} + \sum_{L=1}^{p_i} \phi_{i,L} \Delta Y_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

onde, Δ é o operador de diferença, $Y_{i,t}$ é um vetor que contém as variáveis que serão testadas e ρ_i é o parâmetro de persistência do modelo. Assumimos que quando $\rho_i = 0$ o processo $\{Y_{i,t}\}$ tem uma raiz unitária em i e, alternativamente, quando $\rho_i < 0$ o processo $\{Y_{i,t}\}$ é estacionário.

Os testes de [Levin et al. \(2002\)](#), [Harris & Tzavalis \(1999\)](#) e [Breitung \(2000\)](#) assumem como hipótese nula que os parâmetros de persistência são idênticos e iguais a zero ($\rho_i = 0$) e, como hipótese alternativa, que $\rho_i < 0$ e iguais para todo i . A diferença entre estes testes é que [Harris & Tzavalis \(1999\)](#) consideram o número de períodos (T) fixo, sendo ideal para testar séries mais curtas em T e [Breitung \(2000\)](#) pode ser utilizado para séries com tamanho mais modestos tanto em T quanto em N.

Entretanto, uma limitação destes testes é a suposição de que todos os painéis possuem o mesmo valor para ρ_i . O teste [Im et al. \(2003\)](#) soluciona este problema ao relaxar esse pressuposto e assumir que cada painel tenha seu próprio ρ_i . Portanto, o teste assume como hipótese nula que todos os painéis possuem raiz unitária ($\rho_i = 0, \forall i$) e, como hipótese alternativa, que existe algum painel estacionário ($\rho_i < 0$).

Além disso, os testes anteriores necessitam de evidências contrárias muito fortes para a rejeição da hipótese nula (não estacionariedade). Portanto, para ajudar na tomada de decisão iremos utilizar o teste LM de [Hadri \(2000\)](#), que inverte as hipóteses discutidas anteriormente e assume, como hipótese nula, que todos os painéis são estacionários ($\rho_i < 0, \forall i$) e, como hipótese alternativa, que pelo menos um painel contém raiz unitária ($\rho_i = 0$).

Os testes de raiz unitária foram executados tanto em nível como em primeira diferença dos logaritmos naturais⁸. Os resultados dos modelos sem tendência foram reportados na Tabela A1 e os modelos com tendência na Tabela A2, ambos no Apêndice. Temos indicações que os processos são estacionários em primeira diferença e possuem raiz unitária em nível.

Além disso, uma inspeção visual das variáveis, mostradas na Figura 1, sugere que os dados possuem uma tendência temporal que é eliminada quando os dados estão em primeira diferença.

3.2 Abordagem PVAR-GMM

Construímos um PVAR seguindo o desenvolvimento original de [Holtz-Eakin et al. \(1988\)](#). Para a escolha do número de defasagens do modelo, seguimos as escolhas ótimas sugeridas pelo procedimento de [Andrews & Lu \(2001\)](#), que podem ser observadas na Tabela A3. Portanto, podemos representar nosso modelo de acordo com o seguinte processo dinâmico de primeira ordem:

$$Y_{i,t} = A_1 Y_{i,t-1} + \delta_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

com $i = 1, \dots, 30$ e $t = 1996, \dots, 2014$, onde A_1 é o vetor de coeficientes autorregressivos e $Y_{i,t}$ é o vetor que contém as primeiras diferenças (d) do logaritmo natural (ln) das seguintes variáveis: produto

⁸Com exceção da abertura comercial, que preferimos não utilizar o logaritmo natural por ser uma variável que expressa um valor percentual.

interno bruto ($\ln.PIB_{i,t}$), consumo total de energia ($\ln.CTE_{i,t}$), consumo de combustíveis fósseis ($\ln.CCF_{i,t}$), emissões domésticas ($\ln.EDM_{i,t}$), emissões do resto do mundo ($\ln.ERM_{i,t}$) e abertura comercial ($\ln.AC_{i,t}$). Por outro lado, δ_i representa o vetor de efeitos fixos não observáveis que são invariantes no tempo⁹, μ_t representa os efeitos não observáveis do tempo e $\varepsilon_{i,t}$ é o vetor de erros aleatórios que possui as seguintes características: $E(\varepsilon_{i,t}) = 0$, $E(\varepsilon_{i,t}\varepsilon_{i,t}) = \Sigma_\varepsilon$ (sendo Σ_ε uma matriz não singular) e $E(\varepsilon_{i,s}\varepsilon_{i,t}) = 0$ para todo $t \neq s$.

Entretanto, como em qualquer modelo que inclua defasagens nas variáveis dependentes, os efeitos fixos são correlacionados com os regressores e a correção pelo processo de diferenciação da média em uma estimação por mínimos quadrados ordinários (MQO) levaria a coeficientes inconsistentes e tendenciosos (Love & Zicchino, 2006). Para solucionar esse problema, utilizamos o “procedimento de Helmet” sugerido por Arellano & Bover (1995), que consiste em realizar a seguinte transformação para eliminar os efeitos fixos individuais:

$$y_{i,t}^* = (y_{i,t} - \bar{y}_{i,t}) \sqrt{\frac{T_{i,t}}{T_{i,t} + 1}} \quad (3)$$

onde, $T_{i,t}$ é o número de observações futuras disponíveis do país i no tempo t e $\bar{y}_{i,t}$ é a média de $y_{i,t}$. Após a transformação podemos utilizar as variáveis defasadas originais como instrumento para estimar o modelo pelo método generalizado dos momentos (GMM), uma vez que as variáveis originais são ortogonais às variáveis transformadas. No nosso caso, utilizamos o número de instrumentos igual ao número de regressores, o que torna nosso modelo “exatamente identificado”. Assim, podemos considerar que nosso PVAR-GMM é numericamente equivalente a um sistema de equações simultâneas de mínimos quadrados em dois estágios (MQ2E) (Love & Zicchino, 2006).

O processo de identificação do modelo foi baseado na decomposição de Cholesky, que impõe uma restrição à estrutura de variância-covariância dos resíduos para que Σ_ε assuma a forma de uma matriz triangular inferior, garantindo que os choques sejam ortogonais. Portanto, as variáveis deverão ser ordenadas por grau de exogeneidade, uma vez que as variáveis incluídas no início do vetor irão afetar as próximas variáveis contemporaneamente e com defasagens, mas só serão afetadas pelas defasagens das variáveis seguintes, e assim sucessivamente, fazendo com que a última variável seja a mais endógena do sistema e afete as demais apenas com defasagens.

Considerando a relação entre as três variáveis clássicas do modelo (crescimento econômico, consumo de energia e emissões de CO_2), assumimos que o crescimento econômico só é afetado contemporaneamente por si próprio, enquanto o consumo de energia é afetado contemporaneamente pelo crescimento econômico e por ele mesmo e as emissões de CO_2 pelas duas variáveis anteriores e por si própria, como sugerido pela literatura (Antonakakis et al., 2017; Acheampong, 2018; Ozcan & Ozturk, 2019; Koengkan et al., 2019). Essa ordenação parece ser plausível uma vez que a poluição ambiental e o consumo de energia atuais não afetam o crescimento econômico atual, mas afetam o crescimento econômico futuro. Por outro lado, faz sentido considerar que o consumo de energia atual afete as emissões atuais, mas que a poluição atual não afete o consumo de energia atual.

Entretanto, nós não utilizamos exatamente essas três variáveis no nosso modelo. Em primeiro lugar, dividimos o consumo de energia em consumo total de energia (CTE) e consumo de combustíveis fósseis (CCF) e consideramos a última variável mais endógena, pois o consumo de combustíveis fósseis afeta necessariamente o consumo total de energia, mas o contrário não é sempre verdadeiro, uma vez que o aumento no consumo total de energia pode ser causado pelo aumento do consumo de energias renováveis, por exemplo. Essa divisão busca captar o efeito que as fontes energéticas mais poluentes podem ter tanto na atividade econômica quanto nas questões ambientais. Em segundo lugar, dividimos as emissões de CO_2 em emissões domésticas (EDM) e emissões do resto do mundo (ERM) e consideramos a última variável mais endógena, uma vez que é mais aceitável que as emissões

⁹Os efeitos fixos capturam quaisquer diferenças entre países que são invariantes no tempo (por exemplo, clima, tamanho territorial, tamanho da população, etc.)

domésticas afetem contemporaneamente as emissões globais do que o contrário. Por fim, inserimos a abertura comercial (AC) como a variável mais endógena do modelo, seguindo (Acheampong, 2018), dessa forma, restringimos os efeitos contemporâneos dessa variável apenas a si própria e deixamos que os choques nas demais variáveis lhes afetem contemporaneamente. Assim, utilizamos a seguinte ordenação para o nosso vetor de variáveis: $Y_{i,t} = [\text{dln.PIB}_{i,t}, \text{dln.CTE}_{i,t}, \text{dln.CCF}_{i,t}, \text{dln.EDM}_{i,t}, \text{dln.ERM}_{i,t}, \text{d.AC}_{i,t}]'$.

A rotina de estimação do modelo, a geração das funções de impulso-resposta e a decomposição da variância seguem Holtz-Eakin et al. (1988) e Love & Zicchino (2006)¹⁰.

4 Resultados

Nesta seção, reportamos os resultados das funções de impulso-resposta e da análise da decomposição da variância relativos ao modelo PVAR-GMM. Como relatado anteriormente, estimamos modelos para os trinta, vinte e dez países mais emissores do mundo¹¹. Em todos os casos, utilizamos apenas uma ordem de defasagem, seguindo os critérios de seleção disponíveis na Tabela A3. Além disso, utilizamos todas as variáveis em primeira diferença, considerando os testes de raiz unitária disponíveis no Apêndice na Tabela A1 e testamos as condições de estabilidade dos modelos, de acordo com o apresentado no Apêndice na Figura A1.

4.1 Funções de Impulso-Resposta

Nesta seção, reportamos os resultados das funções de impulso-resposta para os três modelos estimados. O modelo com trinta países será o modelo base e será utilizado como ponto de comparação para os outros modelos. No caso das figuras que mostram apenas o modelo base, realizamos simulações de Monte Carlo com 1.000 iterações para gerar os intervalos de confiança de 95% para as funções de impulso-resposta. Por outro lado, as figuras em que comparamos os modelos, mostram apenas as respostas aos choques sem intervalo de confiança, para que os gráficos não fiquem visualmente poluídos. Além disso, discutiremos apenas aos resultados vinculados aos três objetivos que seguem: i) analisar como os choques nas emissões de carbono afetam as demais variáveis do modelo; ii) analisar como as emissões de CO₂ são afetadas pelos choques de cada uma das demais variáveis do modelo; e, iii) analisar como os choques no crescimento econômico afetam o consumo total de energia, o consumo de combustíveis fósseis, a abertura comercial e vice-versa.

4.1.1 Modelo Base: Os Trinta Países Mais Emissores do Mundo

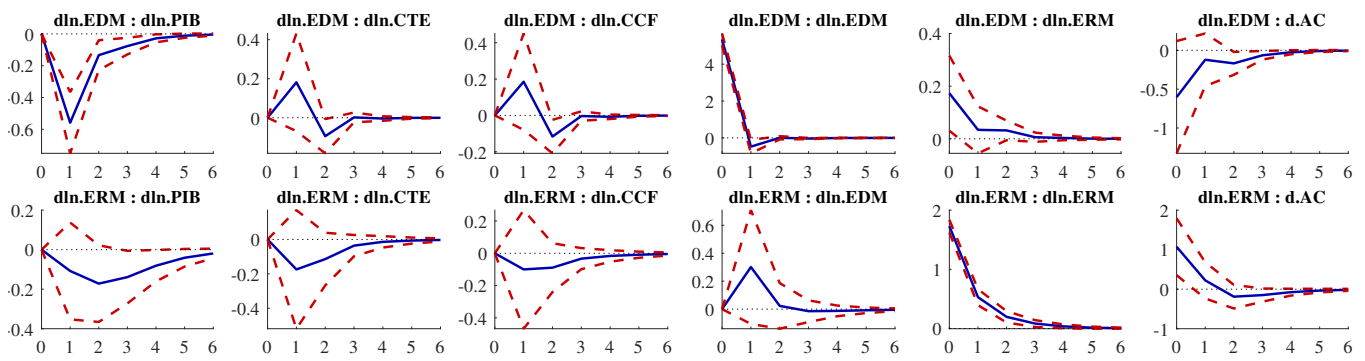
A Figura 2 mostra os resultados vinculados ao primeiro objetivo relatado anteriormente. Observamos que os choques nas emissões de carbono, independentemente se domésticos ou do resto do mundo, são responsáveis por efeitos negativos e estatisticamente significativos no crescimento econômico. Entretanto, o choque nas emissões do resto do mundo possui um efeito defasado no crescimento econômico que só passa a ser estatisticamente significativos três anos após o choque. Isto parece fazer sentido pois as emissões de outros países vão para a atmosfera e demora um certo tempo até exercer seus efeitos em outros países.

Por outro lado, o choque nas emissões domésticas de carbono não afetam no curto prazo, com significância estatística, o consumo de energia total, o consumo de combustíveis fósseis e a abertura comercial, mas fazem as emissões de CO₂ do resto do mundo subirem. Além disso, os resultados mostram que o choque nas emissões de carbono do resto do mundo, além de afetar o crescimento

¹⁰Os intervalos de confiança das funções de impulso-resposta foram calculados através de 1.000 simulações de Monte Carlo.

¹¹Como exercício de robustez, estimamos o modelo com as variáveis em nível. Os resultados não satisfizeram as condições de estabilidade e por isso não serão apresentados.

Figura 2: Respostas do modelo com 30 países aos choques nas emissões de CO₂ domésticas e do resto do mundo.



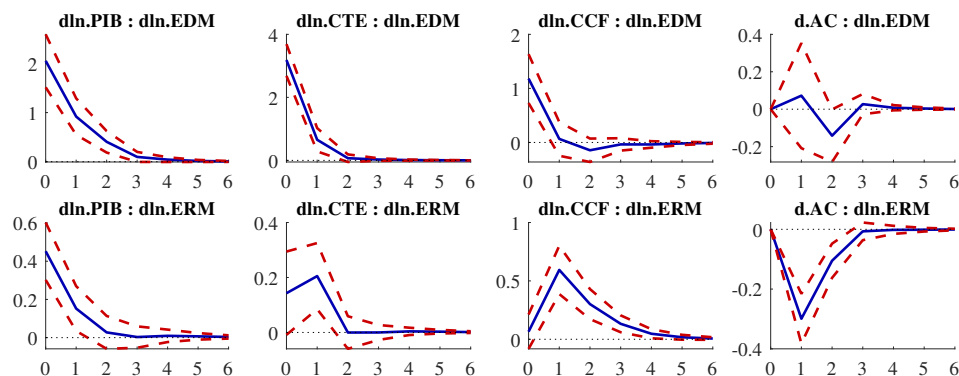
Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas do crescimento econômico, do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis, das emissões de CO₂ domésticas, das emissões de CO₂ do resto do mundo e da abertura comercial a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ domésticas. A segunda linha são as respostas das mesmas variáveis a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ do resto do mundo. As linhas em azul são as respostas das variáveis ao referido choque e as linhas tracejadas em vermelho são o intervalo de confiança de 95%.

econômico, gera aumento no indicador de abertura comercial. Uma possível explicação para esse fato é que como os problemas ambientais geram queda no crescimento econômico, a manutenção dos níveis de consumo dos países afetados passam a estar mais dependentes do comércio com outros países, uma vez que os desastres ambientais não prejudicam os países de forma homogênea.

A Figura 3 mostra os resultados para o segundo objetivo discutido anteriormente, que são os efeitos das emissões domésticas e do resto do mundo aos choques no crescimento econômico, no consumo total de energia, no consumo de combustíveis fósseis e na abertura comercial.

Nossos resultados mostram que tanto o choque no crescimento econômico quanto os dois choques energéticos geram aumentos nas emissões de carbono domésticas e do resto do mundo, como esperado. Além disso, percebemos que os choques afetam as emissões domésticas com muito mais intensidade do que as emissões do resto do mundo, o que também parece fazer sentido. Por outro lado, o choque na abertura comercial não possui efeito estatisticamente significativo nas emissões domésticas, mas reduzem as emissões do resto do mundo. Esse último efeito pode ser explicado por possíveis regulamentos ambientais mais rigorosos no ambiente internacional após um aumento nas emissões de carbono global, fazendo com que sejam considerados o emprego de métodos de produção mais respeitadores do meio ambiente. De acordo com [Managi et al. \(2009\)](#), essas medidas são implementadas quando a demanda por um ambiente melhor passa a ser exigido pelos agentes econômicos.

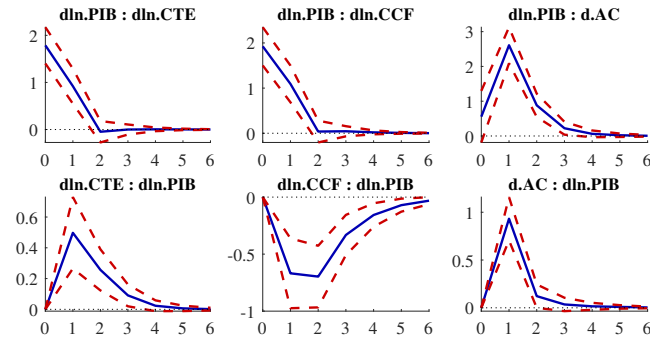
Figura 3: Respostas das emissões de carbono aos choques no crescimento econômico, no consumo energético e na abertura comercial no modelo com 30 países.



Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas das emissões de CO₂ domésticas aos choques no crescimento econômico, no consumo total de energia, no consumo de combustíveis fósseis, nas emissões de CO₂ domésticas, nas emissões de CO₂ do resto do mundo e na abertura comercial. A segunda linha são as respostas das emissões de CO₂ do resto do mundo aos choques listados acima. As linhas em azul são as respostas das variáveis ao referido choque e as linhas tracejadas em vermelho são o intervalo de confiança de 95%.

Por fim, a Figura 4 mostra os resultados relativos ao terceiro objetivo discutido anteriormente, que se refere a relação entre o crescimento econômico, o consumo energético e a abertura comercial. Assim, na primeira linha da figura, mostramos como o choque no crescimento econômico afeta o consumo energético e a abertura comercial e, na segunda linha, mostramos como os choques dessas variáveis afetam o crescimento econômico.

Figura 4: Funções de impulso-resposta das relações entre o crescimento econômico, o consumo energético e a abertura comercial no modelo de 30 países.



Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas das emissões de CO₂ domésticas aos choques no crescimento econômico, no consumo total de energia, no consumo de combustíveis fósseis, nas emissões de CO₂ domésticas, nas emissões de CO₂ do resto do mundo e na abertura comercial. A segunda linha são as respostas das emissões de CO₂ do resto do mundo aos choques listados acima. As linhas em azul são as respostas das variáveis ao referido choque e as linhas tracejadas em vermelho são o intervalo de confiança de 95%.

Os resultados mostram que um choque no crescimento econômico exige um aumento no consumo de energia. Além disso, percebemos que praticamente todo o aumento energético necessário é suprido com combustíveis fósseis, uma vez que o consumo total de energia sobe na mesma magnitude do crescimento no consumo de combustíveis fósseis. Por outro lado, percebemos que um aumento no crescimento econômico também gera um aumento na abertura comercial, mostrando que um choque no crescimento econômico gera um crescimento no comércio internacional maior que o aumento no crescimento do PIB.

Por fim, mostramos que enquanto um choque no consumo total de energia gera um aumento no crescimento econômico, um choque no consumo de combustíveis fósseis, ao fazer com que a matriz energética seja mais dependente de fontes sujas, reduz o crescimento econômico possivelmente por gerar mais emissões de carbono. Por outro lado, como já esperado, o aumento do comércio internacional gera aumento no crescimento econômico.

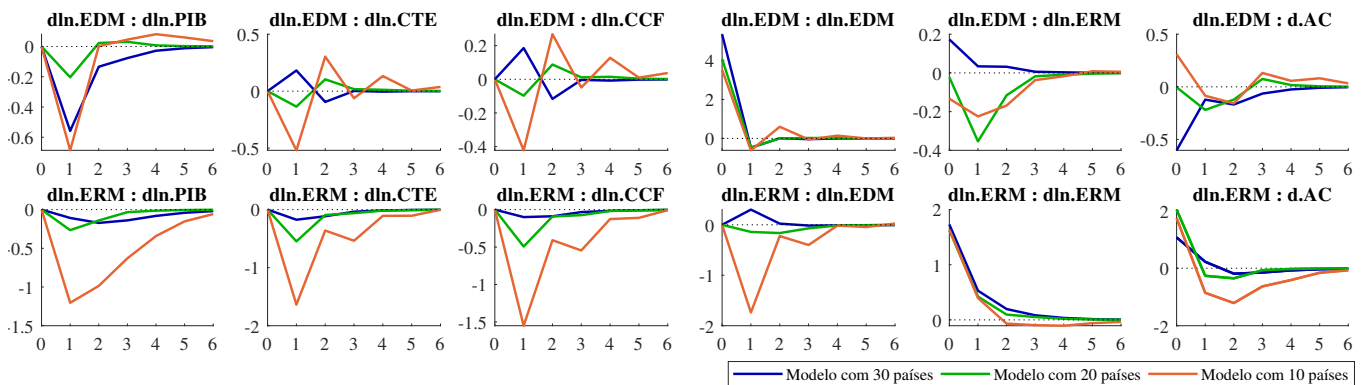
4.1.2 Modelos com Amostras Restritas

Nesta seção, analisaremos de forma comparativa os resultados dos modelos com trinta, vinte e dez países. Neste exercício buscamos observar, principalmente, se ao restringir a amostra para um grupo de países que possuem maiores níveis de emissão de carbono teríamos maior impacto na redução do crescimento econômico. Isso mostraria que quanto mais poluição, mais os choques de emissões afetariam as economias domésticas desses países. Como explicado anteriormente, para que os gráficos não fiquem muito poluídos, não mostraremos os intervalos de confiança das funções de impulso-resposta.

Na Figura 5 mostramos os efeitos dos choques nas emissões de carbono domésticas e do resto do mundo nos modelos com trinta, vinte e dez países. Com relação ao choque nas emissões domésticas, percebemos que os efeitos negativos sobre o crescimento econômico são consistentes em todos os modelos, mas um pouco mais intensos no caso do modelo com dez países. Por outro lado, os demais efeitos são bastante inconsistentes. Em todos esses casos, as respostas mudam entre o positivo e o negativo para pelo menos um dos modelos. Observamos que, mesmo no caso da resposta das emissões do resto do mundo, ocorreu uma inversão nos resultados dos modelos que são estimados com as amostras mais restritas. Mas, neste caso, a queda nas emissões do resto do mundo pode estar

vinculada ao efeito recessivo da economia, uma vez que o efeito é mais fortes um ano após o choque acontecer, quando a queda no crescimento econômico também é mais intensa.

Figura 5: Funções de impulso-resposta dos choques nas emissões de CO₂ domésticas e do resto do mundo nos modelos com 30, 20 e 10 países.



Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas do crescimento econômico, do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis e da abertura comercial a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ domésticas. A segunda linha são as respostas das mesmas variáveis a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ do resto do mundo. As linhas em azul são as respostas para o modelo com 30 países, as linhas em verde são as respostas para o modelo com 20 países e as linhas laranjas são as respostas para o modelo com 10 países.

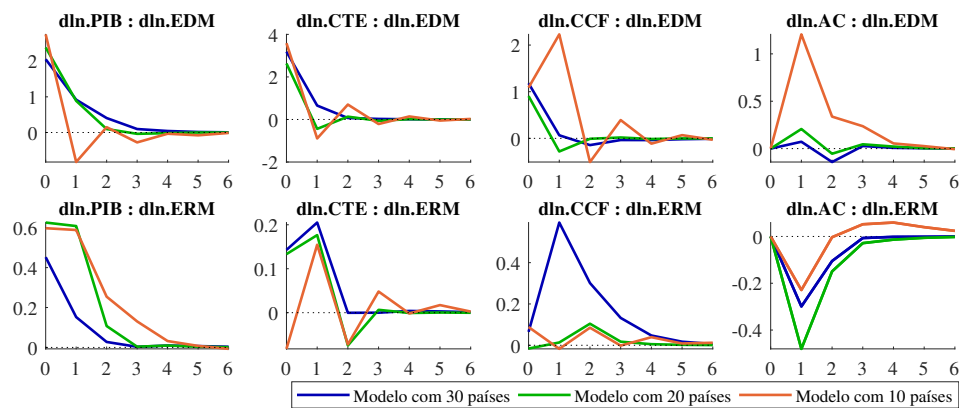
Por outro lado, quando os choques são provenientes das emissões do resto do mundo, as respostas são bastante intensificadas para os modelos com amostras mais restritas, principalmente no modelo com apenas dez países. Neste último, os resultados mostram que os efeitos recessivos são grandes o suficiente para que o consumo energético seja reduzido, assim como as emissões domésticas. Duas lições importantes podem ser tiradas desse resultado, a primeira é que quanto mais poluição, maior a recessão. E, a segunda é que os efeitos provenientes das emissões do resto do mundo são importantes e devem passar a ser considerados nos modelos que estudam a relação entre crescimento econômico, consumo de energia e emissões de carbono. Além disso, percebemos que o efeito sobre a abertura comercial é consistente em todos os modelos, corroborando com a análise feita na seção anterior.

Por sua vez, a Figura 6 mostra as respostas das emissões de carbono domésticas e do resto do mundo aos choques no crescimento econômico, no consumo total de energia, no consumo de combustíveis fósseis e na abertura comercial nos modelos com trinta, vinte e dez países. Observamos que, independente do modelo, os choques no crescimento econômico e nos consumos de energia (total e de combustíveis fósseis) geram efeitos positivos nas emissões de CO₂ domésticas e do resto do mundo. Além disso, observamos que o choque na abertura comercial também gera um aumento nas emissões de carbono domésticas apenas no modelo com a amostra de dez países, nos outros casos parecem não ser estatisticamente diferentes de zero. Este resultado mostra que um aumento na abertura comercial pode deslocar a produção para países que utilizam técnicas produtivas mais sujas, aumentando o crescimento das emissões domésticas. Por outro lado, os choques na abertura comercial foram responsáveis por efeitos consistentemente negativos nas emissões do resto do mundo, corroborando com o resultado analisado anteriormente.

Por fim, a Figura 7 mostra a relação entre o crescimento econômico, o consumo de energia (total e de combustíveis fósseis) e a abertura comercial para os modelos com trinta, vinte e dez países. A primeira linha da figura mostra as respostas do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis e da abertura comercial aos choques no crescimento econômico e a segunda linha mostra as respostas do crescimento econômico aos choques nessas variáveis.

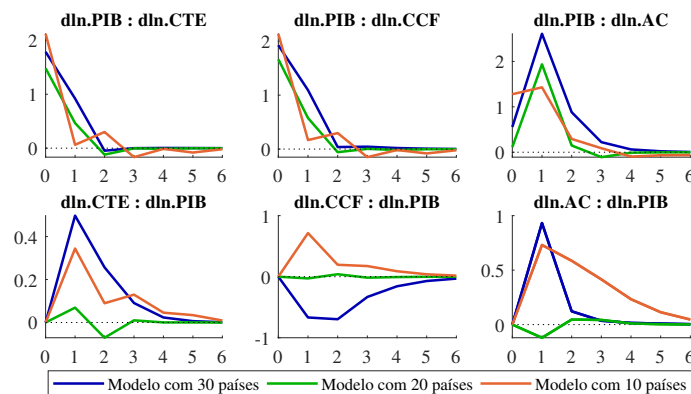
Os resultados são bastante consistentes com relação ao choque do crescimento econômico. Em todos os casos, os aumentos possuem valores bem próximos do modelo com trinta países. Por outro lado, quando observamos como o crescimento econômico responde aos choques, percebemos uma certa inconsistência, principalmente no caso do modelo com vinte países, onde tanto os choques energéticos quanto o choque na abertura comercial praticamente não afetam o crescimento econômico. Por outro

Figura 6: Respostas das emissões de carbono aos choques no crescimento econômico, no consumo energético e na abertura comercial nos modelos com 30, 20 e 10 países.



Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas das emissões de CO₂ domésticas aos choques de um desvio padrão do crescimento econômico, do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis e da abertura comercial. A segunda linha são as respostas das emissões de CO₂ do resto do mundo aos choques de um desvio padrão das mesmas variáveis anteriores. As linhas em azul são as respostas para o modelo com 30 países, as linhas em verde são as respostas para o modelo com 20 países e as linhas laranjas são as respostas para o modelo com 10 países.

Figura 7: Funções de impulso-resposta das relações entre o crescimento econômico, o consumo energético e a abertura comercial nos modelos com 30, 20 e 10 países



Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis e da abertura comercial a um choque de um desvio padrão do crescimento econômico. A segunda linha são as respostas do crescimento econômico aos choques de um desvio padrão do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis e da abertura comercial. As linhas em azul são as respostas para o modelo com 30 países, as linhas em verde são as respostas para o modelo com 20 países e as linhas laranjas são as respostas para o modelo com 10 países.

lado, quando observamos o modelo com dez países, percebemos que os choques no consumo total de energia e na abertura comercial são consistentes com os apresentados no modelo com trinta países, mas possui efeito contrário ao modelo base quando o choque é proveniente do consumo de combustíveis fósseis. Portanto, os dez países mais emissores do mundo parecem possuir certo incentivo a utilização de energia suja.

4.2 Análise da Decomposição da Variância

Nesta seção, apresentamos a decomposição da variância para os três modelos estimados anteriormente. Os resultados são apresentados na Tabela 2, com estimativas separadas em intervalos de dois períodos e abrangendo um horizonte de previsão total de seis períodos.

De acordo com as estimativas, quanto mais restrita a amostra, maior o percentual de explicação das emissões nas variações do crescimento econômico. Os resultados mostram que, no modelo com trinta países, as emissões domésticas são responsáveis por aproximadamente 1,3% das variações no crescimento econômico e as emissões estrangeiras por menos de 1%, enquanto que no modelo com dez países esses percentuais sobem, respectivamente, para 2,8% e para 17% no horizonte de seis

Tabela 2: Decomposição da variância

Resposta da variável	Horizonte de previsão	Variáveis impulsionadas					
		dln.PIB	dln.CTE	dln.CCF	dln.EDM	dln.ERM	d.AC
Modelo com os 30 países mais emissores							
dln.PIB	2	0.9245	0.0099	0.0179	0.0125	0.0005	0.0348
	4	0.9003	0.0121	0.0393	0.0126	0.0023	0.0334
	6	0.8990	0.0121	0.0403	0.0127	0.0026	0.0333
dln.CTE	2	0.1606	0.7663	0.0184	0.0013	0.0012	0.0522
	4	0.1605	0.7653	0.0185	0.0017	0.0018	0.0522
	6	0.1605	0.7653	0.0186	0.0017	0.0018	0.0522
dln.CCF	2	0.1640	0.7346	0.0609	0.0012	0.0003	0.0390
	4	0.1638	0.7336	0.0610	0.0016	0.0006	0.0393
	6	0.1638	0.7335	0.0611	0.0016	0.0006	0.0393
dln.EDM	2	0.1102	0.2302	0.0305	0.6270	0.0020	0.0001
	4	0.1135	0.2292	0.0308	0.6239	0.0020	0.0006
	6	0.1135	0.2292	0.0308	0.6239	0.0020	0.0006
dln.ERM	2	0.0564	0.0154	0.0884	0.0077	0.8100	0.0222
	4	0.0543	0.0148	0.1106	0.0076	0.7887	0.0239
	6	0.0543	0.0148	0.1111	0.0076	0.7883	0.0239
d.AC	2	0.0818	0.0328	0.0494	0.0043	0.0138	0.8179
	4	0.0896	0.0334	0.0547	0.0046	0.0142	0.8035
	6	0.0896	0.0334	0.0549	0.0046	0.0143	0.8032
Modelo com os 20 países mais emissores							
dln.PIB	2	0.9845	0.0006	0.0001	0.0049	0.0083	0.0017
	4	0.9807	0.0012	0.0003	0.0050	0.0106	0.0022
	6	0.9807	0.0012	0.0003	0.0050	0.0107	0.0022
dln.CTE	2	0.1951	0.7716	0.0075	0.0015	0.0242	0.0002
	4	0.1947	0.7683	0.0080	0.0024	0.0250	0.0016
	6	0.1947	0.7682	0.0081	0.0024	0.0251	0.0016
dln.CCF	2	0.1890	0.6850	0.1087	0.0006	0.0148	0.0018
	4	0.1880	0.6840	0.1089	0.0010	0.0156	0.0025
	6	0.1880	0.6840	0.1089	0.0011	0.0156	0.0025
dln.EDM	2	0.2061	0.2270	0.0287	0.5362	0.0006	0.0014
	4	0.2060	0.2272	0.0286	0.5350	0.0016	0.0015
	6	0.2060	0.2272	0.0286	0.5350	0.0016	0.0015
dln.ERM	2	0.1910	0.0123	0.0001	0.0315	0.7072	0.0579
	4	0.1902	0.0134	0.0029	0.0343	0.6967	0.0625
	6	0.1902	0.0134	0.0029	0.0343	0.6967	0.0625
d.AC	2	0.1034	0.0236	0.0078	0.0013	0.1162	0.7477
	4	0.1033	0.0265	0.0085	0.0019	0.1186	0.7411
	6	0.1033	0.0265	0.0085	0.0019	0.1186	0.7411
Modelo com os 10 países mais emissores							
dln.PIB	2	0.7934	0.0079	0.0342	0.0316	0.0971	0.0358
	4	0.7032	0.0084	0.0339	0.0278	0.1651	0.0615
	6	0.6940	0.0085	0.0340	0.0280	0.1709	0.0646
dln.CTE	2	0.1894	0.5893	0.0744	0.0113	0.1125	0.0231
	4	0.1803	0.5740	0.0805	0.0143	0.1206	0.0304
	6	0.1797	0.5728	0.0808	0.0149	0.1209	0.0309
dln.CCF	2	0.1898	0.5535	0.1255	0.0074	0.0993	0.0244
	4	0.1811	0.5403	0.1258	0.0097	0.1104	0.0326
	6	0.1806	0.5391	0.1257	0.0103	0.1110	0.0333
dln.EDM	2	0.1821	0.3014	0.1357	0.2820	0.0667	0.0321
	4	0.1773	0.3014	0.1393	0.2789	0.0686	0.0345
	6	0.1771	0.3014	0.1395	0.2789	0.0685	0.0345
dln.ERM	2	0.1899	0.0083	0.0022	0.0184	0.7671	0.0141
	4	0.2040	0.0099	0.0040	0.0255	0.7422	0.0143
	6	0.2031	0.0099	0.0044	0.0254	0.7416	0.0156
d.AC	2	0.1339	0.0488	0.0109	0.0037	0.1373	0.6653
	4	0.1231	0.0463	0.0216	0.0047	0.1841	0.6202
	6	0.1222	0.0459	0.0222	0.0050	0.1884	0.6163

Nota: Percentual (em valores unitários) de variação nas variáveis da primeira coluna que são explicadas pelas variáveis da linha superior da tabela para 2, 4 e 6 períodos a frente.

anos. Além disso, descobrimos que a abertura comercial é responsável por 3% e 6% da variação do crescimento econômico e que o consumo de combustíveis fósseis por 4% e 3%, nos modelos com trinta e dez países respectivamente. No modelo com vinte países apenas as emissões do resto do mundo contribui com mais de 1% da das variações no crescimento econômico.

Com relação as variações no consumo de energia, observamos que o crescimento econômico é responsável por 16%, 19% e 18% das variações tanto do consumo total de energia quanto do consumo de combustíveis fósseis. Também percebemos que, no modelo com trinta países, a abertura comercial

foi uma importante variável na explicação da variação energética, sendo responsável por 5% da variação do consumo total de energia e por 3% da variação do consumo de combustíveis fósseis. Além disso, chama a atenção o fato de que, no modelo com vinte países, as emissões do resto do mundo foram responsáveis por aproximadamente 2% das variações do consumo total de energia e por aproximadamente 1% das variações do consumo de combustíveis fósseis e que, no modelo com dez países, esses valores subiram dez pontos percentuais.

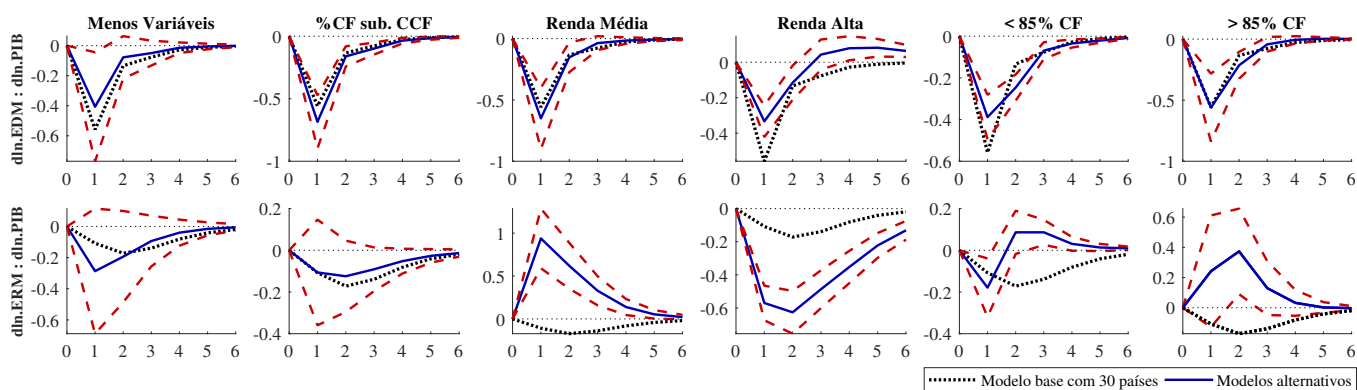
Já no que diz respeito as variações nas emissões, observamos que o crescimento econômico foi responsável por explicar aproximadamente 11%, 21% e 17% das variações das emissões domésticas e aproximadamente 5%, 19% e 20% das emissões do resto do mundo, nos modelos com trinta, vinte e dez países respectivamente. Além disso, observamos que a abertura comercial explica 2%, 6% e 2% das variações nas emissões do resto do mundo, que o consumo total de energia explica 22%, 23% e 30% das variações das emissões domésticas e que o consumo de combustíveis fósseis explica 3%, 3% e 13% dessas últimas variações, nos modelos com trinta, vinte e dez países, respectivamente.

Por fim, constatamos que o crescimento econômico explica 8%, 10% e 12% das variações na abertura comercial, que o consumo de energia (total e combustíveis fósseis) explica 9%, 3% e 7% dessa variação e que as emissões do resto do mundo são responsáveis por explicar 1%, 11% e 18%, nos modelos com trinta, vinte e dez países respectivamente.

4.3 Verificação de Robustez

Nesta seção, utilizamos funções de impulso-resposta para mostrar como o crescimento econômico é afetado pelos choques das emissões domésticas e do resto do mundo para seis diferentes especificações do nosso modelo, com o objetivo de analisar a robustez dos nossos resultados. No primeiro, estimamos o modelo apenas quatro variáveis: Crescimento econômico, Consumo total de energia, emissões domésticas e emissões do resto do mundo. No segundo, substituímos a variáveis consumo de combustíveis fósseis pela variável percentual de combustíveis fósseis na composição da matriz energética. No terceiro e quarto caso, separamos nossa amostra entre os países com renda média e renda alta, respectivamente. Por fim, nos dois últimos casos, separamos os países entre os que possuem menos de 85% de combustíveis fósseis na matriz energética e os que possuem mais que esse valor. Os resultados são mostrados na Figura 8.

Figura 8: Respostas do crescimento econômico aos choques nas emissões de CO₂ domésticas e do resto do mundo em modelos alternativos.



Nota: A primeira linha contém os gráficos das respostas do crescimento econômico a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ domésticas. A segunda linha são as respostas do crescimento econômico a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ do resto do mundo. A primeira coluna corresponde ao modelo que contém apenas as seguintes variáveis: [PIB, CTE, EDM, ERM]. A segunda coluna corresponde ao modelo que substitui a variável CCF pelo percentual de combustíveis fósseis na matriz energética do país (% CF). As duas próximas colunas mostram modelos que utilizam países de renda média e alta, respectivamente. A quinta coluna mostra o modelo que utiliza apenas os países que possuem menos de 85% de combustíveis fósseis na composição da matriz energética e, a sexta coluna, os países que contêm mais de 85% de combustíveis fósseis na matriz energética. As linhas em azul são as respostas das variáveis ao referido choque e as linhas tracejadas em vermelho são o intervalo de confiança de 95%.

Observamos que os resultados são bastante robustos para os choques nas emissões domésticas. Em todos os modelos estimados os resultados mostram uma queda do crescimento econômico próxima

de 0,5%. Esses resultados se aproximam muito dos resultados encontrados no modelo básico com os trinta países.

Por outro lado, os resultados provenientes dos choques nas emissões do resto do mundo não são tão consistentes. Observamos que nos dois primeiros casos, apesar da resposta ser próxima do modelo padrão, não são estatisticamente significativas. Além disso, nos casos dos modelos com países de renda média e com países que possuem mais que 85% de combustíveis fósseis na matriz energética, existe uma inversão no efeito.

5 Conclusão

Neste artigo, investigamos a relação dinâmica entre crescimento econômico, consumo total de energia, consumo de combustíveis fósseis, emissões de CO₂ (domésticas e do resto do mundo) e abertura comercial. Para isso, utilizamos um vetor autorregressivo para dados em painel (PVAR), estimado pelo método generalizado dos momentos (GMM), para uma amostra com os trinta países que mais emitiram carbono no mundo em 2014. Analisamos, pela primeira vez na literatura, como choques ambientais, de natureza local e global, podem afetar as economias dos países estudados. Além disso, analisamos as questões clássicas pertinentes as relações entre o crescimento econômico e o consumo de energia e entre o crescimento econômico e as emissões de CO₂, que são recorrentes na literatura.

Nossos resultados mostram que, em todos os casos analisados, os choques nas emissões de CO₂ reduzem o crescimento econômico. Além disso, quando restringimos nossa amostra aos dez países mais emissores, a queda na atividade econômica é mais intensa que nos demais casos, mostrando que maiores níveis de emissões podem estar associados a uma pior qualidade do meio ambiente e, conseqüentemente, a uma maior vulnerabilidade econômica a esse tipo de choque. Por outro lado, observamos que os impactos na atividade econômica são maiores e/ou mais prolongados quando os choques ambientais são provenientes de um aumento nas emissões do resto do mundo, em comparação aos resultados provenientes dos choques ambientais domésticos, mostrando a importância de considerar essa variável nesse tipo de análise, o que não vem ocorrendo na literatura até o momento.

Além disso, as funções de impulso-resposta mostraram, de forma consistente, que os choques no crescimento econômico e no consumo de energia aumentam as emissões, como já era esperado, e que os choques na abertura comercial reduzem as emissões do resto do mundo, mostrando que os países com maior abertura comercial podem estar mais engajados em fazer com que o mundo reduza suas emissões de carbono.

Portanto, este estudo contribui com a literatura ao propor uma análise dos choques ambientais domésticos e estrangeiros em uma amostra com os trinta maiores emissores de carbono do mundo, o que ainda não tinha sido realizado até o momento. Além disso, somos os primeiros a considerar os efeitos das emissões do resto do mundo na análise dos impactos econômicos e energéticos domésticos em um modelo PVAR-GMM. Por fim, contribuimos com mais evidências sobre as questões clássicas recorrentemente discutidas na literatura que analisa as relações entre o crescimento econômico, o consumo energético e a degradação ambiental.

Apêndices

Tabela A1: Testes de raiz unitária para dados em painel - modelos sem tendência

Variáveis em nível		ln.PIB	ln.CTE	ln.CCF	ln.EDM	ln.ERM	AC
30 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-2.9786	-0.0694	-0.3028	-0.4731	0.0472	-4.4125
	p-valor	0.0014	0.4723	0.3810	0.3181	0.5188	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.9737	0.9700	0.9687	0.9497	0.9996	0.7655
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	0.9998	1.0000	0.0014
Breitung	lambda	11.8064	7.5097	7.1332	5.3493	14.4929	-0.1163
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.4537
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-1.1477	-0.8714	-0.7960	-0.9622	-0.0379	-1.5313
	p-valor	0.9967	1.0000	1.0000	0.9998	1.0000	0.3861
Hadri LM	z	57.7582	55.1500	54.6686	53.3571	60.5162	30.2067
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-2.0121	0.3770	0.0476	0.0611	-0.0294	-3.8427
	p-valor	0.0221	0.6469	0.5190	0.5244	0.4883	0.0001
Harris-Tzavalis	rho	0.9921	0.9871	0.9853	0.9650	0.9997	0.8100
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	0.9995	1.0000	0.1243
Breitung	lambda	10.2459	7.2533	6.8354	5.1890	11.7754	-0.2469
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.4025
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-1.0099	-0.7237	-0.6601	-0.8712	-0.0501	-1.5425
	p-valor	0.9981	1.0000	1.0000	0.9998	1.0000	0.3600
Hadri LM	z	48.4152	47.8598	47.3470	45.8486	49.4026	34.3117
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-0.9260	0.1736	-1.2873	-1.6128	-0.2081	-2.2094
	p-valor	0.1772	0.5689	0.3436	0.2981	0.4176	0.0136
Harris-Tzavalis	rho	0.9903	0.9969	0.9948	0.9833	0.9990	0.8860
	p-valor	0.9979	0.9986	0.9984	0.9967	0.9988	0.7684
Breitung	lambda	7.3443	5.4252	4.9905	3.8202	8.2079	0.2959
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	1.0000	0.6163
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-0.8870	-0.5588	-0.8491	-1.0546	-0.1122	-1.1306
	p-valor	0.9916	0.9998	0.9941	0.9577	1.0000	0.8669
Hadri LM	z	34.5045	34.2765	34.2665	33.3972	34.9173	26.6134
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Primeira diferença		dln.PIB	dln.CTE	dln.CCF	dln.EDM	dln.ERM	d.AC
30 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-8.7839	-8.9941	-8.7067	-9.2291	-5.7654	-12.276
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.0839	-0.0145	-0.0236	-0.0476	0.1843	-0.0031
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-9.6378	-9.7604	-10.1735	-10.1514	-14.1567	-13.1333
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.4321	-4.8203	-4.7694	-4.4319	-3.3850	-4.4696
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	-0.1864	3.0096	2.9623	-0.5123	-0.3667	1.6153
	p-valor	0.5739	0.0013	0.0015	0.6958	0.6431	0.0531
20 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-7.9890	-7.6444	-7.2534	-7.0896	-4.6830	-9.7884
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.1286	-0.1377	-0.1111	-0.0795	0.1818	-0.1937
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-8.9797	-7.6747	-8.2737	-8.1996	-11.5519	-10.9681
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.6059	-4.8675	-4.8283	-4.4914	-3.4141	-4.6152
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	1.7052	0.5755	0.9829	-0.8236	-0.2411	-2.4442
	p-valor	0.0441	0.2825	0.1628	0.7949	0.5952	0.9927
10 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-6.1795	-9.4922	-9.6757	-9.7292	-3.3425	-5.7836
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.1205	-0.2049	-0.1727	-0.0872	0.1756	0.0086
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-6.1562	-6.1402	-6.3696	-6.8365	-8.1591	-7.4584
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.6473	-5.0960	-5.0862	-4.5083	-3.4950	-4.1074
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	0.5446	-0.1124	-0.5392	-1.0859	-0.1137	-0.8548
	p-valor	0.2930	0.5448	0.7051	0.8612	0.5453	0.8037

Nota: No teste Hadri LM: hipótese nula: painéis são estacionários; hipótese alternativa: painéis contêm raiz unitária. Em todos os demais testes: hipótese nula: painéis contêm raiz unitária; hipótese alternativa: painéis são estacionários

Tabela A2: Testes de raiz unitária para dados em painel - modelos com tendência

Variáveis em nível		ln.PIB	ln.CTE	ln.CCF	ln.EDM	ln.ERM	AC
30 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-6.3350	-2.7610	-2.2099	-3.6658	-4.3403	-8.7299
	p-valor	0.0000	0.0029	0.0136	0.0001	0.0000	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.9944	0.9967	0.9972	0.9969	1.0008	0.9680
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Breitung	lambda	2.4242	1.6426	1.9499	1.8166	-0.9919	-1.9937
	p-valor	0.9923	0.9498	0.9744	0.9654	0.1606	0.0231
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-1.7110	-2.0995	-2.0524	-2.0788	-1.8424	-2.3087
	p-valor	0.1361	0.0019	0.0044	0.0013	0.0030	0.0000
Hadri LM	z	19.2209	27.8178	28.3066	17.6637	12.2458	18.3080
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-5.5443	-2.4940	-1.9713	-2.8747	-3.4817	-5.8187
	p-valor	0.0000	0.0063	0.0243	0.0020	0.0002	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.9965	0.9963	0.9971	0.9980	1.0013	0.9825
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Breitung	lambda	1.3802	0.9902	1.3521	1.8831	-0.8142	-2.0854
	p-valor	0.9162	0.8390	0.9118	0.9702	0.2078	0.0185
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-1.7857	-2.1168	-2.0663	-2.0110	-1.8492	-2.4204
	p-valor	0.1069	0.0045	0.0103	0.0186	0.0118	0.0000
Hadri LM	z	20.1195	19.4237	20.3259	14.6326	10.1331	13.2073
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-3.5516	-3.3111	-3.6064	-4.3743	-2.3548	-3.0197
	p-valor	0.0002	0.0005	0.0002	0.0000	0.0093	0.0013
Harris-Tzavalis	rho	0.9967	0.9950	0.9962	0.9977	1.0017	0.9789
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Breitung	lambda	0.2618	-0.5936	-0.9111	-0.7691	-0.5591	-0.3213
	p-valor	0.6032	0.2764	0.1811	0.2209	0.2880	0.3740
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-1.9097	-2.5214	-2.6325	-2.5898	-1.8483	-1.9674
	p-valor	0.0786	0.0012	0.0004	0.0006	0.0561	0.0445
Hadri LM	z	14.3121	12.0041	10.8173	9.0680	7.4344	12.6738
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Primeira diferença		dln.PIB	dln.CTE	dln.CCF	dln.EDM	dln.ERM	d.AC
30 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-8.8194	-8.7143	-8.8467	-9.3953	-3.7696	-11.0791
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.2174	0.1346	0.1392	0.0574	0.1965	0.0207
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-8.1782	-9.6744	-9.4218	-9.0077	-9.8891	-11.6760
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.6020	-5.2464	-5.2030	-4.7229	-3.2725	-4.4141
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	2.8455	1.0569	1.0438	-0.0332	9.0516	1.4257
	p-valor	0.0022	0.0015	0.1483	0.5132	0.0000	0.0770
20 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-7.8023	-7.0481	-7.1883	-7.6241	-3.0431	-8.6422
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0012	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.3818	0.1549	0.1655	0.0642	0.1997	-0.1664
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-7.9919	-7.7789	-7.6302	-7.3425	-8.0557	-9.2971
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.8282	-5.3870	-5.3685	-4.8913	-3.3057	-4.5190
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	1.8908	-0.4683	-0.0554	-0.5259	7.4264	-1.8980
	p-valor	0.0293	0.6802	0.5221	0.7005	0.0000	0.9711
10 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-5.4063	-4.1735	-10.3153	-4.5827	-7.9438	-5.2241
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0148	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.4631	0.1551	0.1726	0.0835	0.2098	0.0458
	p-valor	0.0049	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-5.2022	-4.8793	-4.7081	-4.3458	-5.6985	-5.6787
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.7306	-5.3883	-5.2543	-4.5745	-3.3970	-4.0213
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	2.1178	0.5695	0.8931	0.1806	5.2272	1.0922
	p-valor	0.0171	0.2845	0.1859	0.4283	0.0000	0.1374

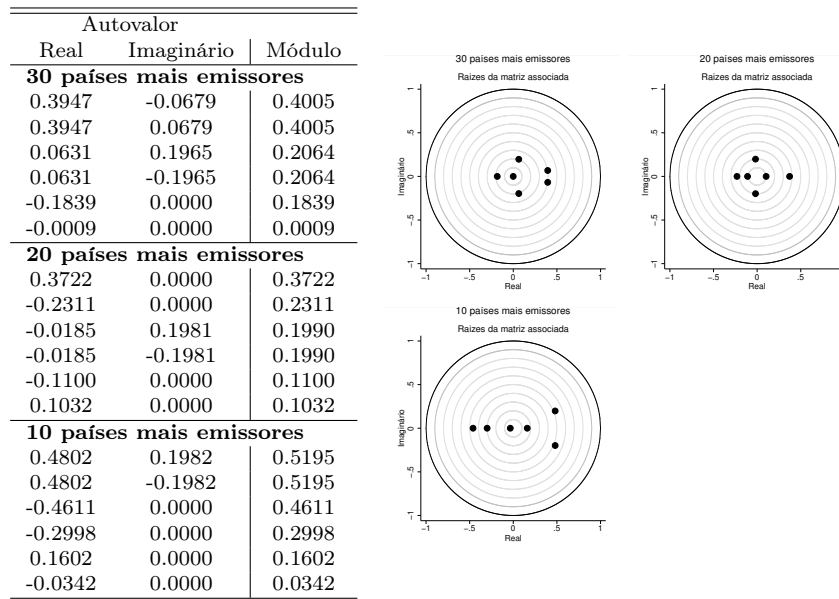
Nota: No teste Hadri LM: hipótese nula: painéis são estacionários; hipótese alternativa: painéis contêm raiz unitária. Em todos os demais testes: hipótese nula: painéis contêm raiz unitária; hipótese alternativa: painéis são estacionários

Tabela A3: Critério de seleção das defasagens.

Defasagens	CD	J	J p-valor	MBIC	MAIC	MQIC
30 países mais emissores						
1	1.0000	277.3718	0.0000	-849.35*	-82.62	-382.90*
2	1.0000	202.2661	0.0010	-699.11	-85.73*	-325.95
3	-0.3891	149.5923	0.0050	-526.44	-66.4	-246.57
20 países mais emissores						
1	1.0000	220.2148	0.0220	-836.76*	-139.78*	-417.06*
2	1.0000	183.1158	0.0153	-662.46	-104.88	-326.7
3	0.6311	155.4550	0.0019	-478.73	-60.54	-226.91
10 países mais emissores						
1	1.0000	149.5695	0.9524	-780.09*	-210.43*	-441.50*
2	1.0000	109.7903	0.9847	-633.93	-178.2	-363.06
3	-0.2696	70.0716	0.9982	-487.72	-145.92	-284.57

Nota: * indica as defasagens selecionadas pelos critérios adotados.

Figura A1: Condição de estabilidade do PVAR-GMM.



Nota: Todos os autovalores estão dentro do círculo unitário. Portanto, todos os modelos PVAR-GMM satisfazem a condição de estabilidade.

Referências

- Acheampong, A. (2018). Economic growth, CO₂ emissions and energy consumption: What causes what and where? *Energy Economics*, 74, 677–692.
- Andrews, D. & Lu, B. (2001). Consistent model and moment selection procedures for GMM estimation with application to dynamic panel data models. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 101, 123–164.
- Annicchiarico, B. & Dio, F. (2015). Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new keynesian model. *Journal of Environmental Economics and Management*, 69, 1–21.
- Antonakakis, N., Chatziantoniou, I., & Filis, G. (2017). Energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth: An ethical dilemma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 808–824.
- Antweiler, W., Copeland, B., & Taylor, M. (2001). Is free trade good for the environment? *The American Economic Review*, 91, 877–908.
- Arellano, M. & Bover, O. (1995). Another look at the instrumental variable estimation of error-components model. *Journal of Econometrics*, 68, 29–51.

- Aydin, M. (2019). Renewable and non-renewable electricity consumption–economic growth nexus: Evidence from OECD countries. *Renewable Energy*, 136, 599–606.
- Baltagi, B. (2008). *Econometric Analysis of Panel Data*. New York: Wiley.
- Benkraiem, R., Lahiani, A., Miloudi, A., & Shahbaz, M. (2019). The asymmetric role of shadow economy in the energy-growth nexus in Bolivia. *Energy Policy*, 125, 405–417.
- Breitung, J. (2000). The local power of some unit root tests for panel data. In B. Baltagi (Ed.), *Advances in Econometrics, Volume 15: Nonstationary Panels, Panel Cointegration, and Dynamic Panels* (pp. 161–178). Amsterdam: JAI Press.
- Charfeddine, L. & Kahia, M. (2019). Impact of renewable energy consumption and financial development on CO₂ emissions and economic growth in the MENA region: A panel vector autoregressive (PVAR) analysis. *Renewable Energy*, 139, 198–213.
- Chen, X., Huang, B., & Lin, C. (2019). Environmental awareness and environmental Kuznets curve. *Economic Modelling*, 77, 2–11.
- Destec, M. & Sarkodie, S. (2019). Investigation of environmental Kuznets curve for ecological footprint: The role of energy and financial development. *Science of The Total Environment*, 650, 2483–2489.
- Grossman, G. & Krueger, A. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement. *National Bureau of Economic Research - NBER*, N° 3914.
- Hadri, K. (2000). Testing for stationarity in heterogeneous panel data. *Econometrics Journal*, 3, 148–161.
- Harris, R. & Tzavalis, E. (1999). Inference for unit roots in dynamic panels where the time dimension is fixed. *Journal of Econometrics*, 91, 201–226.
- Heutel, G. (2012). How should environmental policy respond to business cycle? optimal policy under persistent productivity shocks. *Review of Economic Dynamics*, 15, 244–264.
- Holtz-Eakin, D., Newey, W., & Rosen, H. (1988). Estimating vector autoregressions with panel data. *Econometrica*, 56, 1371–1395.
- Im, K., Pesaran, M., & Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. *Journal of Econometrics*, 115, 53–74.
- IPCC (1995). Ipcc second assessment – climate change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ipcc-second-assessment-full-report/>>. Acessado em: 10 de novembro de 2019.
- IPCC (2014). Climate change 2014, synthesis report, summary for policymakers. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf>. Acessado em: 10 de novembro de 2019.
- IPCC (2018). Global warming of 1.5c. an ipcc special report on the impacts of global warming of 1.5c above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/download/>>. Acessado em: 05 de setembro de 2019.

- Kahia, M., Jebli, M., & Belloumi, M. (2019). Analysis of the impact of renewable energy consumption and economic growth on carbon dioxide emissions in 12 MENA countries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *21*, 871–885.
- Kim, D., Suen, Y., & Lin, S. (2019). Carbon dioxide emissions and trade: Evidence from disaggregate trade data. *Energy Economics*, *78*, 13–28.
- Koengkan, M., Losekann, L., & Fuinhas, J. (2019). The relationship between economic growth, consumption of energy, and environmental degradation: renewed evidence from Andean community nations. *Environment Systems and Decisions*, *39*, 95–107.
- Kolcava, D., Nguyen, Q., & Bernauer, T. (2019). Does trade liberalization lead to environmental burden shifting in the global economy? *Ecological Economics*, *163*, 98–112.
- Kraft, J. & Kraft, A. (1978). On the relationship between energy and GNP. *The Journal of Energy and Development*, *3*, 401–403.
- Lau, L., Choong, C., NG, C., Liew, F., & Ching, C. (2019). Is nuclear energy clean? revisit of environmental Kuznets curve hypothesis in OECD countries. *Economic Modelling*, *77*, 12–20.
- Leal, R., Ely, R., Uhr, J., & Uhr, D. (2015). Ciclos econômicos e emissão de CO₂ no Brasil: uma análise dinâmica para políticas ambientais ótimas. *Revista Brasileira de Economia*, *69*, 53–73.
- Levin, A., Lin, C., & Chu, C. (2002). Unit root tests in panel data: Asymptotic and finite-sample properties. *Journal of Econometrics*, *108*, 1–24.
- Love, I. & Zicchino, L. (2006). Financial development and dynamic investment behavior: Evidence from panel VAR. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, *46*, 190–210.
- Managi, S., Hibiki, A., & Tsurumi, T. (2009). Does trade openness improve environmental quality? *Journal of Environmental Economics and Management*, *58*, 346–363.
- Nordhaus, W. D. (2007). A review of the Stern review on the economics of climate change. *Journal of Economic Literature*, *45*, 686–702.
- Ozcan, B. & Ozturk, I. (2019). Renewable energy consumption-economic growth nexus in emerging countries: A bootstrap panel causality test. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *104*, 30–37.
- Ozcan, B., Tzeremes, P., & Tzeremes, N. (2019). Energy consumption, economic growth and environmental degradation in OECD countries. *Economic Modelling*, *In Press*.
- Silva, Y. & Silva, M. (2019). Optimal environmental policy and business cycles: An analysis using an E-DSGE model. *Working Paper. Encontro Brasileiro de Econometria*, *41*^o.
- Smith, M. & Myers, S. (2019). Global health implications of nutrient changes in rice under high atmospheric carbon dioxide. *GeoHealth*, *3*, 190–200.