
Determinantes da emissão de CO₂ por uso de combustíveis fósseis para países sul-americanos: uma abordagem STIRPAT

Felipe Figueiredo Silva¹

Lora dos Anjos Rodrigues²

Roni Barbosa Moreira³

Alexandre Bragança Coelho⁴

Resumo: Neste trabalho, teve-se o objetivo de analisar os determinantes da emissão de CO₂ por uso de combustíveis fósseis nos países sul-americanos no período de 1970 a 2010. Para tanto, utilizou-se da abordagem Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology (STIRPAT) por meio da aplicação do modelo de dados em painel de efeito aleatório. Os resultados mostram que a variável de maior impacto sobre o nível de emissões é a população. A análise desagregada revelou que a camada da população de 20 a 34 anos exerce influência negativa sobre as emissões de CO₂. A emissão, também, apresentou significativa sensibilidade à urbanização, corroborando a ideia de que países em estágio inicial de desenvolvimento apresentam elevado potencial poluidor dado um nível tecnológico atrasado e ineficiente. Dentre outras, uma conclusão é que a introdução de variáveis de controle representa ganho em relação à aplicação convencional da identidade Impact = Population x Affluence x Technology (IPAT).

Palavras-Chave: STIRPAT, emissão de CO₂, América do Sul.

1 Departamento de Economia Rural. Economia Aplicada.

2 Departamento de Economia Rural. Economia Aplicada. Recursos Naturais e Ambientais e Mudanças Climáticas.

3 Departamento de Economia Rural. Economia Aplicada.

4 Departamento de Economia Rural. Economia Aplicada.

Fossil fuel CO₂ emissions Determinants for South American countries: STIRPAT approach

Abstract: *This paper aims to investigate the determinants of CO₂ emissions caused by fossil fuel use from 1970 to 2010 for countries in South America. We use the framework Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology (STIRPAT) specified with an unbalanced panel data model with Random Effects. We found that population is the factor with greatest impact on emissions' level and its disaggregated analysis revealed that the population group between the ages of 20 and 34 employ a negative effect on CO₂ emissions. Additionally, emissions are also fairly affected by urbanization, which supports the argument that countries in an early stage of development have a higher pollution potential compared to developed countries due to their outdated and inefficient technology level. Therefore, we can draw, among other conclusions, that the introduction of extra control variables represents a gain if compared to the conventional methodology used by accounting equation $Impact = Population \times Affluence \times Technology$ (IPAT).*

Key-Words: *STIRPAT, CO₂ emission, South America.*

JEL: Q55

Introdução

O aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera tem contribuído para acelerar o processo de mudanças climáticas, em que há aumento da temperatura média e irregularidade no regime de chuvas. Segundo York (2003a), a ação antropogênica modificou grande parte dos ciclos bioquímicos, acelerou a extinção de diversas espécies animais, além de alterar a cobertura vegetal que recobre a terra.

O principal gás responsável pelas mudanças climáticas é o dióxido de carbono (CO₂), emitido, principalmente, pelo uso de combustíveis fósseis, acentuadamente, nos países de intensa industrialização e urbanização. Conforme dados do *Carbon Dioxide Information Analysis Center* (CDIAC 2013), a emissão de CO₂ resultante da queima de combustíveis fósseis aumentou vertiginosamente nos países sul-americanos no período pós-industrialização, principalmente, após a década de 1970.

Os países que compõem a América do Sul apresentam matriz energética semelhante, visto que a formação geológica e a abundância de recursos hídricos possibilitam a geração de energia a partir de combustíveis fósseis e hidrelétricas, destaque para o Brasil e a Venezuela. Vale ressaltar, que este último é um grande produtor de petróleo no cenário mundial e membro da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (Opep). Destacam-se, também, por sua relevância econômica, Brasil e Argentina, membros do Mercado Comum do Sul (Mercosul), importante bloco econômico e político no cenário internacional.

Em geral, a intensificação da industrialização nestes países iniciou-se na década de 1950, impulsionada, em grande parte, pelo processo de substituição de importações, para a maioria deles. A industrialização, fortemente baseada na utilização de combustíveis fósseis, sofreu com as crises do petróleo da década de 1970, o que levou a um desaquecimento destas economias. Os efeitos das crises constituíram incentivos à busca de energias alternativas, o que pode ter modificado o padrão de emissões de CO₂ no decorrer dos anos. No caso brasileiro, a principal iniciativa foi o investimento em biocombustíveis, em especial no etanol, com a instituição do Pró-álcool (Programa Nacional do Álcool), que tinha por objetivo estimular o desenvolvimento da indústria automobilística e canavieira, diminuindo a dependência do petróleo e os custos inerentes a esta.

Neste contexto, tem-se o objetivo de analisar os determinantes da emissão de CO₂ nos países da América do Sul no período de 1970 a 2010 a partir da abordagem *Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology* (STIRPAT). A maioria dos estudos¹ que utiliza o STIRPAT não leva em consideração a heterogeneidade entre os países no tocante a aspectos socioeconômicos, políticos, localização geográfica e matriz energética, analisando-os generalizadamente. Assim, o presente trabalho pretende tratar essa questão, na medida em que considera apenas os países sul-americanos, que possuem tais características mais homogêneas.

Além desta introdução, o artigo está dividido em mais quatro seções. Na primeira seção, é apresentada a revisão de literatura, que contextualiza o trabalho. Na segunda, apresenta-se a metodologia aplicada ao STIRPAT, na terceira, são discutidos os resultados. Por fim, na quarta seção, expõe-se as considerações finais.

1. Revisão de Literatura

A literatura sobre o tema de mudanças climáticas e ações antropogênicas

¹ Podem-se citar: York (2007), Fan et. al. (2006), Cole and Neumayer (2004), York et. al. (2003b), York et. al. (2003a), Shi (2003).

aponta diversas formas de se investigar os determinantes do impacto ambiental decorrente da atividade econômica. Um dos modelos utilizados apresenta o tamanho da população e o Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* como principais fatores determinantes. Este modelo consiste na identidade IPAT, descrita a seguir:

$$I = P \times A \times T$$

em que, I representa o impacto ambiental proporcionado pelos fatores apresentados no lado direito da identidade; P representa o tamanho da população; A , a afluência mensurada em unidades monetárias correntes; e T , indica o nível tecnológico. Essa identidade matemática foi introduzida, inicialmente, a partir do estudo de Ehrlich e John Holdrin (1971) originado do debate sobre os principais determinantes dos impactos ambientais.

O IPAT permite identificar a relação existente entre cada componente e o impacto ambiental, bem como a interação estabelecida entre todos eles e o impacto ambiental. Entretanto, essa abordagem apresenta algumas limitações: é baseada em informações de nível agregado; não capta a inter-relação entre os componentes; a utilização desta equação é inviável para estudos de longos períodos devido às alterações de preços; não considera características sociopolíticas; e, por fim, não permite a realização de testes de hipóteses por constituir uma identidade matemática.

Diante de tais limitações, Rosa e Dietz (1998) inovaram em modelar o IPAT a partir de uma regressão estocástica, denominada STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology*), cuja equação é definida por:

$$I = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i$$

em que, i representa as unidades de corte transversal; e_i é o termo de erro aleatório; a é a constante; os expoentes b , c e d representam as elasticidades a serem estimadas. O STIRPAT diferencia-se do IPAT na medida em que, ao possibilitar a realização de testes de hipóteses, permite verificar a significância estatística dos parâmetros estimados. Além disso, sua estrutura permite captar o efeito não proporcional dos seus componentes sobre o impacto ambiental.

Dentre os vários trabalhos que analisam os determinantes do impacto ambiental utilizando a abordagem STIRPAT, podem-se enumerar York *et al.* (2003a) e Liddle e Lung (2010). Estes últimos autores estudaram 17 países desenvolvidos no período de 1960-2005 a partir de diferentes medidas de impacto, quais sejam, emissões totais de CO₂, emissões provenientes do transporte, do

consumo de energia e do consumo de eletricidade residencial. Enquanto os primeiros autores, ao expandirem o modelo STIRPAT por meio da inclusão de maior diversidade de variáveis, que não poderiam ser incorporadas pelo IPAT, analisaram as emissões de CO₂ e concluíram que países em regimes não tropicais são responsáveis por maior impacto, relativamente aos países tropicais. Além disso, estimaram as elasticidades para seus componentes e verificaram, como a maioria dos estudos, que a população é a variável que exerce maior influência.

Dentre outros estudos, York *et al.* (2003a) utilizam a variável população em sua totalidade para averiguar o impacto total do padrão de consumo individual sobre o ambiente, ou seja, investiga o efeito do tamanho da população. Porém, há estudos que indicam a desagregação da população como forte contribuição para a análise dos determinantes do impacto ambiental. Liddle e Lung (2010)², por exemplo, esperavam que quanto maior fosse a participação da faixa etária de 20 a 34 anos na população, maior seria o nível de emissões de CO₂ devido ao maior nível de atividade com potencial nível poluidor. Contrariamente, para a faixa etária de 50 a 64, o impacto seria negativo devido ao menor nível de atividade. Enquanto para as faixas etárias 35-49 e 65-79, esperava-se que o impacto em termos de consumo de energia fosse negativo e positivo, respectivamente. Pois, para a primeira, pressupõe-se residências com mais membros na família, o que resulta em consumo *per capita* menor e, para a segunda, espera-se consumo maior pelo fato de constituir idade de indivíduos que permanecem em casa por mais tempo.

Assim como estes trabalhos, em que a população total e a população desagregada foram relevantes dadas as suas especificidades, pretende-se investigar se estas duas variáveis são, também, determinantes para explicar o nível de emissão de CO₂ nos países sul-americanos. A desagregação da população, dada a evidência empírica analisada, justifica-se pela existência de um padrão de consumo com potencial poluidor distinto em cada faixa etária. Alguns países sul-americanos passaram pela expansão populacional, em parte, devido aos avanços obtidos na área da saúde. Embora o Brasil esteja experimentando transição demográfica desde as últimas décadas do século XX, com a diminuição da fecundidade, segundo (Alves *et al.* 2010), o crescimento da população ocorre, mesmo que a taxas decrescentes.

A inserção da variável *afluência* no modelo, aqui representada pelo PIB *per capita*, tem por objetivo captar o efeito do nível da renda sobre o impacto ambiental. O nível tecnológico, que capta o padrão no consumo de energia, se faz importante visto que, em economias de industrialização recente, 90% da energia utilizada é proveniente de combustível fóssil (Perman *et al.* 2004).

² Neste ponto, cabe observar que a ênfase da abordagem STIRPAT para captar os determinantes de impactos ambientais está sobre a influência da população e seu nível de atividade e padrão de consumo, que muda conforme faixa etária. Abordagens alternativas estão disponíveis conforme o enfoque do estudo. Nesses estudos preocupados em captar, mais detalhadamente, a influência da renda sobre o meio ambiente, por exemplo, a abordagem da Curva de Kuznets Ambiental (CKA) é amplamente utilizada na literatura.

2. Modelo Analítico

Os dados utilizados neste estudo referem-se a 12 países da América do Sul no período de 1970 a 2010, com periodicidade de cinco anos, totalizando 9 pontos temporais. A utilização de dados em painel beneficia a estimação devido à maior variabilidade e menor colinearidade entre as variáveis utilizadas, além de aumentar, significativamente, o número de observações e representatividade da amostra.

A equação de um modelo com dados em painel pode ser especificada como segue:

$$y_{it} = x'_{it}\beta + (\eta_i + \varepsilon_{it})$$

em que x_{it} , representa o vetor de variáveis explicativas, β é o vetor de coeficientes a ser estimado, η_i é a heterogeneidade não observada de cada país i constante no tempo (t) e, ε_{it} representa o termo de erro aleatório (GREENE 2008).

Considerando os efeitos específicos de cada país, η_i , componente do erro geral da equação u_{it} , pode-se escrever:

$$(\eta_i + \varepsilon_{it}) = u_{it}$$

em que, pressupõe-se $\eta_i \sim \text{IID}(0, \sigma_\eta^2)$ e $\varepsilon_{it} \sim \text{IID}(0, \sigma_\varepsilon^2)$.

Quando a heterogeneidade não observada η_i é correlacionada com pelo menos uma variável explicativa, tem-se a violação do pressuposto de exogeneidade estrita e a aplicação do estimador de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) produz estimativas tendenciosas devido à omissão de variável relevante (Wooldridge 2006). Neste caso, a estimação do modelo de efeitos fixos é necessária para eliminar a heterogeneidade não observada:

$$\ddot{y}_{it} = \ddot{X}'_{it}\ddot{\beta} + \ddot{\varepsilon}_{it}$$

em que, os dados foram reduzidos temporalmente, ou seja, subtrai-se a média de cada observação para todas as variáveis. Na medida em que $\eta_i - \bar{\eta}_i = 0$, elimina-se a fonte do viés. Este estimador será não viesado quando $\ddot{\varepsilon}_{it}$ for não-correlacionado com as variáveis explicativas.

No caso em que a heterogeneidade não observada é não correlacionada com as variáveis explicativas, ou seja, $cov(X_{it}, \eta_i) = 0$, tem-se um modelo de efeitos aleatórios (Greene 2008). Este modelo apresenta correlação serial no termo de erro u_{it} , pois a eliminação de η_i resultaria em estimativas ineficientes. Neste caso, torna-se necessária a utilização do estimador de Mínimos Quadrados Generalizados (MQG) que elimina a correlação serial ao subtrair uma fração λ da média das variáveis:

$$y_{it} - \lambda \bar{y}_i = (x'_{it} - \bar{x}'_i \lambda) \beta + (u_{it} - \lambda \bar{u}_i)$$

em que, $\lambda = 1 - [\sigma_u^2 / \sigma_u^2 + T \sigma_\eta^2]^{-1/2}$. Na prática, como λ é não conhecido, o estimador MQG factível utiliza $\hat{\lambda} = 1 - \{1 / [1 + T(\hat{\sigma}_\eta^2 / \hat{\sigma}_u^2)]\}^{1/2}$ no lugar de λ .

Para prosseguir com a estimação do modelo apropriado, serão aplicados os testes de Hausman, LM de Breusch Pagan e Wooldridge para verificar as propriedades estatísticas de η_i .

São estimadas duas equações a partir da abordagem STIRPAT, em que a segunda considera o impacto da diferença etária da população economicamente ativa, discriminando os intervalos por nível de atividade e padrão de consumo, conforme sugerido em Liddle e Lung (2010):

$$ECO2_{it} = f(Ppc_{it}, Poptot_{it}, Urb_{it}, IntEn_{it}, t) \quad (1)$$

$$ECO2_{it} = f(Ppc_{it}, Poptot_{it}, Urb_{it}, IntEn_{it}, t, Pop2034_{it}, Pop3549_{it}, Pop5064_{it}) \quad (2)$$

em que $ECO2_{it}$, é a emissão de dióxido de carbono (CO₂) do país i no ano t , que representa o impacto ambiental; Ppc_{it} corresponde ao PIB *per capita*. $Poptot_{it}$, $Pop2034_{it}$, $Pop3549_{it}$ e $Pop5064_{it}$ representam, respectivamente, a população total e a participação na população total da população na faixa de 20 a 34 anos, 35 a 49 anos e 50 a 64 anos. A taxa de urbanização, Urb_{it} , e a intensidade energética, $IntEn_{it}$, representam a tecnologia; e, por fim, t é a tendência temporal, que capta as características comuns nos países que mudam com o passar dos anos.

O impacto ambiental é mensurado a partir do nível de emissões de CO₂ proveniente da queima de combustíveis fósseis. Para captar a influência da tecnologia e seu padrão de consumo de combustíveis fósseis, foi utilizada a taxa de urbanização. Quanto maior ela for, espera-se que maior seja o nível de atividade econômica com potencial poluidor e maior o nível de emissões de CO₂. Dentre as principais atividades responsáveis pelo nível de emissões derivadas da queima de CO₂ encontram-se o setor de transportes e a Indústria

(*International Energy Agency – IEA 2012*). Para ilustrar, na Bolívia, Chile, Paraguai, Peru, e Venezuela o número de automóvel por habitante aumentou consideravelmente nos primeiros anos da década de 2000, conforme dados da Comissão Econômica para América Latina e o Caribe (CEPAL 2011). E, segundo o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2015), a Indústria constituiu-se, em 2010, no maior setor responsável por emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo 21% de forma direta e 11% indiretamente.

Espera-se que o coeficiente de t seja negativo, ou seja, que o nível de poluição decresça ao longo do tempo devido à adaptação energética dos países ao uso de tecnologias mais “limpas”, como encontrado em Liddle e Lung (2010). Espera-se que o impacto da renda seja positivo, na medida em que estes países são economias em desenvolvimento e encontram-se na fase em que o aumento de renda representa aumento no consumo que busca maximizar bem-estar sem contabilizar os custos ao meio-ambiente.

Já, em relação à variável $Poptot_{it}$, espera-se que o impacto agregado seja positivo, pois, quanto maior a população maior o nível de atividade econômica e consumo *per capita*. Para $Pop2034_{it}$, $Pop3549_{it}$ e $Pop5064_{it}$ tomando o perfil brasileiro como referência, espera-se que o primeiro grupo apresente nível de atividade poluidora, relativamente, baixo, dado que as pessoas desta faixa não possuem poder aquisitivo elevado, ao constituir-se, majoritariamente, de jovens estudantes ou trabalhadores no início da carreira profissional. Para a faixa intermediária, cujo o poder aquisitivo é maior, espera-se um nível de atividade poluidora maior. Para a terceira faixa, espera-se um impacto negativo sobre a emissão, na medida em que o nível de atividade é menor. Deve-se notar que as hipóteses deste artigo diferem daquelas de Liddle e Lung (2010) para o primeiro e segundo grupo, em que Os autores exploram a questão do tamanho das famílias para justificar o nível de consumo e impacto *per capita*.

As variáveis Urb_{it} e $IntEn_{it}$ representam o nível tecnológico das nações, na medida em que captam o consumo de energia. Para a primeira, espera-se um coeficiente de sinal positivo porque o aumento na urbanização leva ao aumento no padrão de emissão de CO₂ devido, principalmente, ao aumento do número de automóveis no setor de transportes e à atividade industrial. Para a segunda, que representa o consumo de energia por unidade do PIB, espera-se um sinal positivo para seu coeficiente, visto que um aumento do consumo de energia eleva a emissão de CO₂, mais diretamente, quanto proveniente de combustíveis fósseis.

2.1. Fonte de Dados

No presente estudo analisam-se os determinantes das emissões de CO₂ nos países sul-americanos: Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Equador, Guyana, Paraguai, Peru, Suriname, Uruguai e Venezuela entre os anos de 1970 e 2010 (com periodicidade de cinco anos). A seguir, a descrição das variáveis, unidade de medida e fonte de dados são expostos na Tabela 1.

TABELA 1 – DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS, UNIDADE DE MEDIDA E FONTE DOS DADOS

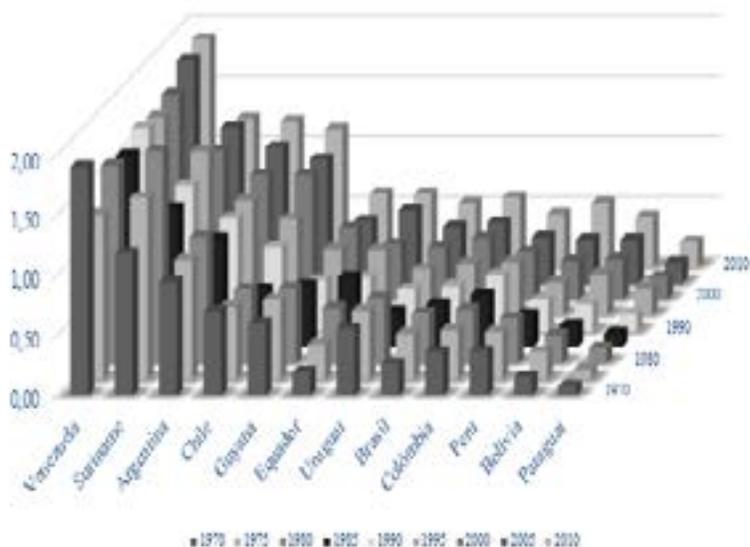
Variável (em logarítmo)	Unidade	Fonte
Emissão de C _o 2	em toneladas métricas	<i>Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC)</i>
PIB <i>per capita</i>	Produto Interno Bruto dividido pela população (em dólares)	<i>University of Pennsylvania</i>
PIB	em milhões de dólares	<i>University of Pennsylvania</i>
População total	por 1000 habitantes	<i>United Nations</i>
População desagregada	Participação de três faixas etárias de 15 em 15 anos, começando em 20 anos de idade (por 1000 habitantes)	<i>United Nations</i>
(%) População urbana	Razão entre a população urbana e a total multiplicado por 100	<i>United Nations</i>
Consumo total de energia	Consumo total de energia (em milhões de barris equivalentes de petróleo-bep)	Comisión Económica para America Latina Y el Caribe (CEPALSTAT)

Fonte: Elaborada pelos autores.

3. Resultados

Inicialmente, é realizada uma análise descritiva dos dados. Seguindo a tendência mundial das últimas décadas, os países sul-americanos desempenharam aumento das emissões *per capita* de CO₂ pelo uso de combustíveis fósseis para o período de 1970 a 2010, conforme destacado no Gráfico 1. Esse comportamento ascendente deve-se, em parte, ao recente processo de industrialização e crescente aumento da frota de automóveis com que os países se deparam. A Venezuela apresenta a maior média na emissão *per capita* de CO₂ no período (acima de 1,7 toneladas), liderança que se justifica pela maior dependência, relativamente, do petróleo dada sua posição entre os principais países produtores mundiais. Enquanto o Uruguai, diferentemente, apresentou queda superior a 3% em suas emissões. Tal desempenho pode ser atribuído ao esforço de “limpeza” de sua matriz energética, com o governo destinando 3% do PIB³ para investimento em fontes renováveis desde 2008 (Cdiac 2013).

GRÁFICO 1 – EMISSÃO *PER CAPITA* DE CO₂ (TON) PELO USO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS DOS PAÍSES DA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1970 A 2010



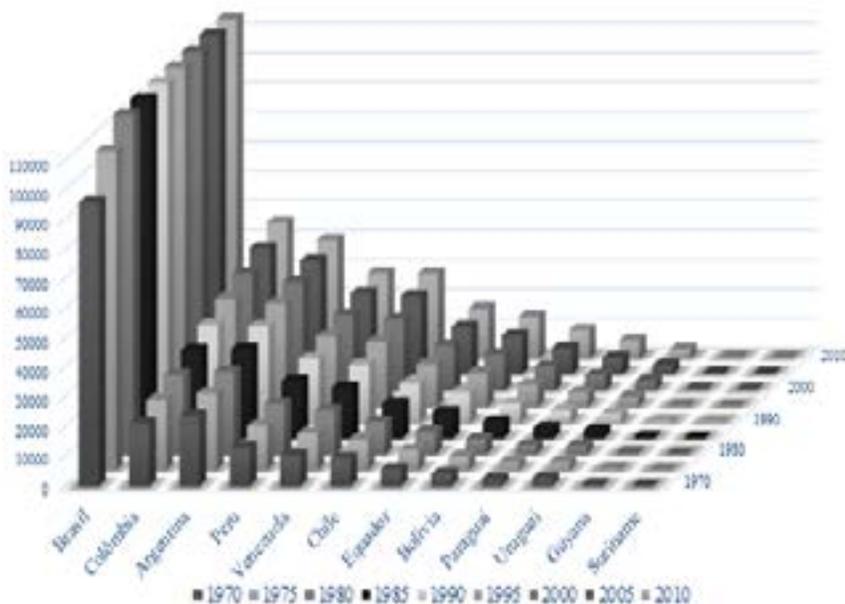
Fonte: Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), 2013.

Neste mesmo período, conforme o Gráfico 2, a população da América do Sul apresenta tendência de crescimento, comportamento característico de países

³ El País, 2014.

em desenvolvimento. Destacam-se o Brasil com sua dimensão continental e população superior a 190 milhões de habitantes e o Paraguai, cuja população aumentou em 160%, aproximadamente.

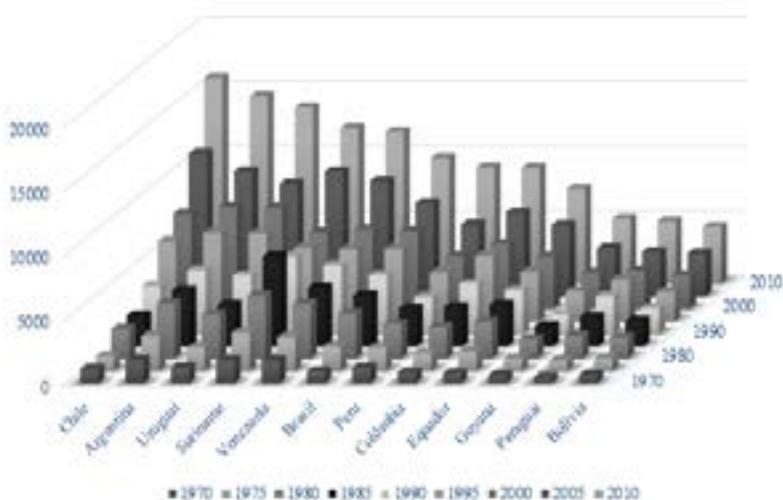
GRÁFICO 2 – POPULAÇÃO TOTAL (MIL) PARA OS PAÍSES DA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1970 A 2010



Fonte: United Nations – Demographic Statistics, 2013.

No Gráfico 3, apresenta-se o comportamento do PIB *per capita*, que é uma tradicional medida de desenvolvimento econômico, embora haja corrente contrária que o considere uma medida de disponibilidade de renda, ou seja, apenas uma das dimensões do desenvolvimento. Em destaque, no ano de 2010, o PIB *per capita* do Chile ultrapassa US\$ 15.000. Este país, também, teve sua renda aumentada em mais de 13 vezes no período. O Brasil ocupa a última posição da primeira metade com maior renda *per capita*.

GRÁFICO 3 – PIB *PER CAPITA* (US\$) PARA OS PAÍSES DA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1970 A 2010



Fonte: University of Pennsylvania, dados sobre o PIB per capita, 2012.

A seguir, na Tabela 2, são apresentados os resultados referentes aos pré-testes, necessários para verificar as características estatísticas dos dados em painel, e os resultados dos modelos (1) e (2), estimados com as variáveis logaritimizadas. Inicialmente, pode-se verificar que o modelo de dados em painel de efeitos aleatórios foi determinado pelos tradicionais testes de Hausman e de Breusch-Pagan, na medida que têm suas hipóteses nulas (H₀) não rejeitada e rejeitada, respectivamente. Em seguida, atestou-se a presença de autocorrelação pelo teste de Wooldridge, ratificando a escolha por um modelo de efeito aleatório.

Partindo para a análise dos modelos estimados, relembra-se que o primeiro modelo é semelhante à estrutura do IPAT, inserindo variável para afluência, população e tecnologia⁴. Como esperado, a renda apresenta um efeito positivo sobre a emissão de CO₂, ou seja, o aumento de 10% na renda *per capita* é acompanhado por um aumento de cerca de 6% na emissão de CO₂. Quanto à população total, a variação de 10% em seu valor é acompanhada de uma variação no mesmo sentido de quase 8% nas emissões. A intensidade energética apresenta comportamento semelhante, visto que o aumento do consumo de energia ocasiona maiores emissões. O coeficiente do percentual de população urbana é o mais elevado, indicando efeito positivo e comportamento elástico sobre o nível de emissões. Assim, o aumento de 10% no percentual de população urbana é acompanhado por aumento de mais de 14% no nível de emissões

4 No entanto, o uso de regressão permite a realização de testes de hipóteses.

de CO₂ proveniente da queima de combustíveis fósseis⁵.

TABELA 2 – RESULTADOS DA ESTIMAÇÃO A PARTIR DO MODELO DE EFEITO ALEATÓRIO

Variável	Modelo 1	Modelo 2
PIB per capita	0,6094*** (0,0946)	0,6703*** (0,0833)
População Total	0,7787*** (0,0277)	1,8484*** (0,4148)
Pop2034	-	-1,2452*** (0,2475)
Pop3549	-	0,3707 ^{NS} (0,2710)
Pop5064	-	-0,1722 ^{NS} (0,2047)
Taxa de Urbanização	1,4132*** (0,2245)	0,9727*** (0,2227)
Intensidade Energética	0,0980* (0,0558)	0,1294*** (0,0438)
Tendência	-0,0550*** (0,0092)	-0,0469*** (0,0110)
constante	-3,7453*** (0,3264)	-3,9420*** (0,6220)
Pré-testes	Estatística	H ₀
Hausman	Chi2 = 3,62 ^{NS}	Diferença entre o coeficiente de Efeito Fixo e Efeito Aleatório é não sistemática
Breusch-Pagan Lagrange Multiplier	Chi2 = 200,73***	Var(u _{it}) = 0
Wooldridge	F = 35,630***	Ausência de auto-correlação de primeira ordem

Nota: Lembrar: 1) As variáveis estão em logaritmo. 2) A variável dependente é o nível absoluto de emissão de CO₂. ***Significativo a 1%. *Significativo a 10%. ^{NS}Não significativo. Os valores em parênteses representam o desvio-padrão das variáveis.

Por fim, no segundo modelo, apresenta-se a incorporação das variáveis que desagregam a população em três faixas etárias como diferencial. Neste caso, a população passa a constituir no principal determinante das emissões, da

5 Quanto ao intercepto, ao aplicar exponencial no mesmo [exp(-3,7453) = 0,02], retorna-se ao modelo estrutural, encontrando um valor de “a” (p.3) próximo de zero. Desta forma, quando o nível de todas as variáveis analisadas é igual a zero, o nível (absoluto) de emissões de CO₂ é zero, aproximadamente.

mesma forma que na maioria dos estudos, incluindo Liddle e Lung (2010) e York (2003a). Em contrapartida, o grau de urbanização perde peso na explicação das emissões, evidenciando, assim, a necessidade de uma análise mais desagregada, a fim de captar, de forma mais precisa, a influência de cada fator.

Espera-se que um aumento de 10% no total da população seja acompanhado, em média, por um aumento de mais de 18% nas emissões de CO₂. Na medida em que a população apresenta-se como principal fator determinante das emissões, pode-se inferir que, a tendência crescente a taxas decrescentes em termos populacionais, poderá ser verificada no nível de emissões nos próximos anos, *coeteris paribus*.

Ao desagregar a população em faixas etárias, é possível verificar que tal comportamento é não homogêneo. Como esperado, quanto maior a participação do grupo etário 20-34 no total da população, menor será o impacto ambiental. Dentre os principais responsáveis pela emissão de CO₂, destaca-se o uso do transporte pela queima de combustível fóssil como força motriz. Na medida em que os jovens desta faixa etária apresentam renda relativamente inferior, espera-se predomínio do uso de transporte coletivo, reduzindo seu consumo *per capita* de combustível. Para as demais faixas, não houve impacto estatisticamente significativo. Este resultado não deve surpreender, pois, Liddle e Lung (2010), alertavam sobre tal possibilidade quando se utiliza o nível de emissões totais de CO₂, visto que, este pode ser mais significativamente influenciado pela atividade na indústria que pela soma do comportamento individual.

Semelhante ao trabalho de Cole e Neumayer (2004), que também desagrega a população, a emissão de CO₂ responde positivamente ao aumento na taxa de urbanização, visto que a urbanização faz parte do processo de desenvolvimento. Isso acontece pelo fato da urbanização, em seu estágio inicial, não ser acompanhada pelo uso de transporte coletivo eficiente e pela normatização do modo de eliminação de resíduos na indústria.

A intensidade energética, que corresponde ao consumo de energia (bep) em relação ao PIB, apresenta relação inelástica em relação às emissões. Considerando uma variação de 10% nesta variável, as emissões aumentariam 1,2% apenas. Magnitude que pode ser justificada pela alta participação de fontes renováveis na matriz energética da maioria dos países estudados⁶.

Em relação ao PIB *per capita*, pode-se dizer que o aumento de 10% em tal variável é acompanhado, em média, por um aumento de 6,7% nas emissões de CO₂, *coeteris paribus*. Este comportamento, também, é evidenciado no trabalho de Liddle e Lung (2010), indicando que estes países, de fato, encontram-se na fase de desenvolvimento em que o crescimento da economia

6 Utilizar o consumo de energia por unidade do PIB como intensidade energética em detrimento da participação relativa dos combustíveis fósseis na matriz energética capta de forma mais ampla o efeito do setor de geração de eletricidade e calor, maior emissor de CO₂ (IEA 2012), pois, mesmo na produção de energia a partir de fonte renovável, há impacto (mesmos que indiretos) sobre o nível de emissão de GEE.

é acompanhado pelo crescimento do nível de emissões de GEE.

Como esperado, o coeficiente da tendência temporal apresenta-se negativo, corroborando a ideia de que os países têm buscado energias alternativas mais “limpas”. Entre 2002 e 2012, a produção mundial de biocombustíveis quadruplicou (BP 2013).

Em síntese, os resultados corroboram a ideia proposta, inicialmente, pela abordagem IPAT, em que população, afluência e tecnologia afetam positivamente o padrão de emissões de CO₂.

Considerações Finais

Os objetivos propostos foram alcançados e os resultados se apresentam em conformidade com a literatura. Dessa forma, a aplicação da abordagem STIRPAT mostrou-se robusta ao identificar significância estatística dos determinantes da emissão de CO₂ nos países sul-americanos, em grande parte, devido à menor heterogeneidade entre estes relativamente ao grupo de países que são analisados em outros estudos. A inclusão de variáveis de controle no modelo representa ganho em relação à aplicação convencional do IPAT.

Como principais resultados, podem-se apontar que a população exerce efeito maior sobre a emissão de CO₂ em detrimento das variáveis de afluência e de tecnologia. Da mesma forma, a emissão, também, apresentou significativa sensibilidade à urbanização, corroborando a ideia de que países em estágio inicial de desenvolvimento apresentam elevado potencial poluidor dado um nível tecnológico atrasado e ineficiente.

Em relação à inclusão da tendência para identificar o efeito do tempo, pode-se inferir que houve mudança no padrão de emissões de CO₂ ao longo do período analisado, indicando uma adaptação da matriz energética na busca por energias alternativas “mais limpas”. Assim, pode-se inferir que, diante de adversidades, como ocorre nos processos de mudanças climáticas e aquecimento global, as nações são capazes de alterar o seu comportamento a fim de adaptar-se ao novo cenário.

Referências

- Alves, J. E. D. & Vasconcelos, D. S. & Carvalho, A. A. (2010). “Estrutura etária, bônus demográfico e população economicamente ativa no Brasil: cenários de longo prazo e suas implicações para o mercado de trabalho.” Textos para Discussão CEPAL-IPEA, número 10. URL [on line]: http://www.cepal.org/publicaciones/xml/1/42471/CEPAL_10_MIOLO.pdf. Acesso em: 30 de maio de 2011.
- Bp (2013). British Petroleum: “*Statistical Review of World Energy June 2013*.” URL [on line]: <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Acesso em 2014.
- Carbon Dioxide Information Analysis Center – CDIAC (2013). *Dados sobre emissão de dióxido de carbono*. URL [on line]: http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/overview_2007.html. Acesso em 2014.
- Comisión Económica Para América Latina Y El Caribe – CEPAL. Dados sobre o setor de transportes. Disponível em: <http://interwp.cepal.org/sisgen/ConsultaIntegrada.asp?idIndicador=462&idioma=e>. Acesso em: 30 de maio de 2011.
- Cole, M. & Neumayer, E. (2004). “Examining the impact of demographic factors on air pollution.” *Population and Environment* 26 (1): 5–21.
- Dietz, T. & Rosa, E. (1997). “Effects of population and affluence on CO₂ emissions.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 94: 175–179.
- Ehrlich, P. & Holdren, J. (1971). “The impact of population growth.” *Science* 171: 1212–1217.
- El País (2014). Internacional: A renovação renovável uruguaia. http://brasil.elpais.com/brasil/2014/07/10/internacional/1405027005_646202.html
- Estadísticas De América Latina Y El Caribe – CEPALSTAT. Dados sobre intensidade energética e produção de energia primária. URL [on line]: <http://websie.eclac.cl/sisgen/ConsultaIntegrada.asp>. Acesso em 2014.
- Fan, Y. & Liu, L.c. & Wu, G. & Wei, Y.m. (2006). “Analyzing impact factors of CO₂ emissions using the STIRPAT model.” *Environmental Impact Assessment Review* 26: 377–395.
- Greene, William H. (2008). *Econometric analysis*, 6^a ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- Iea. (2012). CO₂ Emissions from Fuel Combustion: Highlights. *International Energy Agency, Paris, France*.
- Ippc. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland*.
- Liddle, B. & Lung, S. (2010). “Age –structure, urbanization, and climate change in developed countries: revisiting STIRPAT for disaggregated population and consumption-related environmental impacts.” *Popul Environ* 31: 317 – 343.
- Perman, R. & Ma, Y. & Mcgilvray, J. & Common, M. (2004). *Natural Resource and Environmental Economics*, 3^a ed.: Pearson Addison Wesley.
- Rosa, E. A. & Dietz, T. (1998). “Climate change and society: speculation, construction

- and scientific investigation.” *International Sociology* 13: 421 – 455.
- Shi, Anqing. (2003). “The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975–1996: Evidence from pooled cross-country data.” *Ecological Economics* 44: 29–42.
- United Nations – Demographic Statistics. Dados sobre população total. URL [on line]: <http://esa.un.org/wup2009/unup/index.asp>. Acesso em 2014.
- United Nations – Population Division Of The Department Of Economic And Social Affairs. “World Population Prospects: The 2012 Revision.” Dados sobre população desagregada. URL [on line]: http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_indicators.htm. Acesso em 2014.
- United Nations – Population Division Of The Department Of Economic And Social Affairs. “World Urbanization Prospects: The 2012 Revision.” Dados sobre população urbana. URL [on line]: <http://esa.un.org/unpd/wup/>. Acesso em 2014.
- University Of Pennsylvania. (2012). “Penn World Table – PWT versão 7.1.” Dados sobre o PIB e PIB per capita. Disponível em: <https://pwt.sas.upenn.edu/php_site/pwt71/pwt71_form.php>. Acesso em 2014.
- Wooldridge, J. M. (2006). Introdução à Econometria: Uma Abordagem Moderna. São Paulo: Thomson.
- York, Richard. (2007). “Demographic trends and energy consumption in European Union Nations, 1960–2025.” *Social Science Research* 36: 855–872.
- York, R. & Rosa, E. & Dietz, T. (2003a). “STIRPAT, IPAT, and IMPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts.” *Ecological Economics* 46: 351–365.
- York, R. & Rosa, E. & Dietz, T. (2003b). “A rift in modernity? Assessing the anthropogenic sources of global climate change with the STIRPAT model.” *International Journal of Sociology and Social Policy* 23 (10): 31–51.

