

DESENVOLVIMENTO E IMPACTO AMBIENTAL: UMA ANÁLISE DA CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS¹

Milton Biage²

Helberte João França Almeida³

Neste estudo estrutura-se um modelo de painel para estimar a Curva Ambiental de Kuznets, observando as diferenças entre os países na emissão de CO₂, em função do desenvolvimento social e econômico. A relação entre o produto interno bruto (PIB) *per capita* e a emissão de CO₂ *per capita* se comporta, segundo a previsão da Curva Ambiental de Kuznets, na forma de N. Os resultados demonstraram que o PIB *per capita* constitui a variável explanatória com menor impacto sobre a emissão de CO₂ *per capita*, e que o impacto ambiental cresce, essencialmente, pelo desenvolvimento das economias (desenvolvimento econômico, desenvolvimento social e qualidade de vida).

Palavras-chave: curva ambiental de Kuznets; efeito estufa; emissão de CO₂; modelo de dados de painel.

JEL: C23; C53; Q53; Q56.

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global tem sido um dos mais preocupantes problemas ambientais dos últimos tempos. O aumento da concentração de gases na atmosfera, oriundos do aumento nas atividades produtivas das economias mundiais e uso de tecnologias produtivas inadequadas, faz com que os pesquisadores debatam e desenvolvam estudos sobre os impactos desses gases no aquecimento global, e busquem delinear políticas econômicas que possibilitem controlar suas emissões e, em consequência, aliviar o aquecimento.

O mecanismo que produz a diferença entre a temperatura real da superfície terrestre ($\approx 14^{\circ}\text{C}$) e a temperatura efetiva idealizada ($\approx -18^{\circ}\text{C}$) é denominado de efeito estufa,⁴ devido aos gases absorvedores de ondas longas (irradiação infravermelha) presentes na atmosfera terrestre. O efeito estufa retém o calor na atmosfera terrestre, reduzindo o fluxo de ar e isolando o ar quente, de modo que o calor não seja conduzido pelo efeito de convecção térmica para regiões distantes da superfície terrestre (Stephen, 2001). Esse aprisionamento da

1. Os autores agradecem os comentários e sugestões de um parecerista anônimo. Eventuais erros remanescentes são de exclusiva responsabilidade dos autores.

2. Professor-doutor da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). E-mail: <milton.biage@ufsc.br>.

3. Doutorando em economia da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). E-mail: <helberte_cvo@yahoo.com.br>.

4. Entre os gases que produzem o efeito estufa estão os gases diatômicos (com dois átomos diferentes), e todos os gases com três ou mais. Mais de 99% da atmosfera seca é transparente à irradiação infravermelha, pois os seus principais constituintes, N₂, O₂ e Ar, não são capazes de absorver ou emitir diretamente a radiação infravermelha; contudo, a energia absorvida e emitida pelos gases do efeito estufa é compartilhada com os gases não ativos, em virtude das colisões intermoleculares.

radiação térmica de ondas longas conduz a um equilíbrio de temperatura mais elevada do que se a atmosfera apresentasse ausência do efeito estufa.

O aquecimento global, devido ao efeito estufa, foi percebido desde o século XIX. Primeiro por Fourier (1824 e 1827) e depois por Tyndall (1859 e 1861) que provou que gases como o vapor d'água, o CO_2 e o CH_4 absorviam a radiação solar infravermelha, e que o vapor d'água e o CO_2 eram os principais responsáveis pela retenção do calor. Arrhenius (1896) introduziria a teoria do efeito estufa, verificando que o aumento dos níveis de gases de CO_2 emitidos na atmosfera, levaria ao aumento de temperatura da superfície terrestre. Já no século XX, o físico Wood (1909) considerou o CO_2 como o principal gás responsável pelo efeito estufa, pelo fato de o ar quente da superfície terrestre não se misturar com as outras camadas da atmosfera. Callendar (1938) enfatizou que o aumento da temperatura da superfície terrestre é, em maior parte, decorrente da emissão de CO_2 para a atmosfera.

Conforme Kiehl e Kevin (1997), os principais gases que contribuem para o efeito estufa são: vapor de água (H_2O), com 36%-70%; o dióxido de carbono (CO_2), com 9%-26%; o metano (CH_4), com 4%-9%; e o ozônio (O_3), com 3%-7%. Contudo, o principal contribuinte não gás para o efeito estufa na Terra são as nuvens, que também absorvem e emitem radiação infravermelha, tendo efeitos importantes sobre as propriedades radiante da atmosfera.

A U.S. Information Administration⁵ publicou dados estatísticos sobre as emissões de dióxido de carbono, abrangendo mais de 200 países. Compilando os dados deste órgão e tendo como referência os dados de emissões de 2011, verifica-se a ascensão da Ásia e da Oceania à liderança da emissão de CO_2 , sendo responsáveis por 45,07% do total de emissões mundiais. Na África também ocorreram grandes aumentos nas emissões, atingindo 3,53% do total; a Europa atingiu um patamar e se estabilizou com 13,2%; a América do Norte é responsável por 19,77%; e a América do Sul e Central responsável por 4,11%. Agora, tendo como referência as emissões de 1990-2011, constata-se que o mundo emitiu 51,36% mais de CO_2 em 2011 que em 1990. A Ásia e a Oceania apresentaram um crescimento de 183,98%; a África manifestou um crescimento de 58,77%; a Europa demonstrou uma queda de 5,28%; a América do Norte se caracterizou com um crescimento de 11,91%; e finalmente, a América do Sul e Central manifestaram um crescimento de 86,89%. Ainda tendo como referência o período de 1990-2011, destacam-se com significativo crescimento a China, o maior emissor mundial de CO_2 , que aumentou suas emissões em 300,2%, a Índia em 198,25%, a Indonésia em 173,61% e o Brasil 100,31%. Destacam-se com crescimentos poucos acentuados, os Estados Unidos que aumentaram 8,93%, a Alemanha, Itália, França e Hungria que apresentaram crescimentos praticamente nulos.

5. U. S. Energy Information Administration. Disponível em: <<http://goo.gl/qJSOK8>>. Acesso em: 7 nov. 2013.

A partir desses dados constata-se de forma inegável a intensificação das emissões de CO₂, especificamente, nos países em desenvolvimento. Por estes fatos, o aquecimento global tem atraído muita atenção dos pesquisadores nos últimos anos, essencialmente, em virtude dos níveis de emissões de CO₂, principal fonte de aquecimento global.

Os estudos sobre o assunto têm considerado, basicamente, três vertentes de pesquisa sobre a relação entre poluentes ambientais e crescimento econômico. A primeira incide sobre o vínculo entre os poluentes ambientais e renda, normalmente, tomando como *proxy*, o produto interno bruto (PIB). Esta vertente procura testar a validade da hipótese da Curva Ambiental de Kuznets (CAK) para as emissões de poluentes, que reivindica uma relação em forma de U-invertido entre o nível de degradação ambiental e o crescimento da renda. De acordo com esta curva, a degradação ambiental aumenta com a renda *per capita* durante os primeiros estágios de crescimento econômico e em seguida, após um limiar, diminui com a renda *per capita*. Os estudos empíricos de Grossman e Krueger (1991) e Selden e Song (1994) evidenciaram a hipótese da CAK em forma de U-invertido. No entanto, os resultados empíricos parecem ser controversos, pois outros estudos que também investigaram a hipótese CAK para as emissões de CO₂ não verificaram nenhuma evidência clara para a presença da hipótese da Curva de Kuznets em forma de U-invertido, como por exemplo, Martinez-Zarzoso e Bengochea-Morancho (2004) e Richmond e Kaufmann (2006). Em estudos mais recentes, Apergis e Payne (2009; 2010a) constataram a CAK em forma de U-invertido para as emissões de CO₂, nos casos de países da América Central e da Comunidade de Nações Independentes Britânica, enquanto que Narayan e Narayan (2010) mostraram a existência da CAK em U-invertido para as emissões de CO₂ em alguns países em desenvolvimento. Em virtude dos controversos resultados encontrados nas pesquisas sobre o comportamento da CAK, torna-se questionável generalizar as implicações políticas dessa curva que estabelecem que o crescimento econômico seja suficiente para salvaguardar a qualidade ambiental. Segundo Jaunky (2011), no nível das economias individuais, a hipótese da CAK é suportada por apenas alguns poucos países, o que induz que políticas de proteção ambiental e a exploração de tecnologias verdes acessíveis ao estímulo do crescimento poderão contribuir significativamente para o declínio das emissões de CO₂.

Uma segunda vertente da literatura trata de estudos sobre a relação entre a produção econômica e consumo de energia, uma vez que as emissões de poluentes são principalmente causadas pela queima de combustíveis fósseis. Payne (2009), utilizando dados anuais dos Estados Unidos, aplicou o teste de Granger para testar as relações de causalidade entre o consumo de energia renovável, consumo de energia não renovável e o PIB real, respectivamente. Os testes revelaram a ausência de causalidades entre as variáveis em estudo, suportando a hipótese de neutralidade.

Ozturk e Acaravci (2010) investigaram as relações causais entre o consumo de energia *per capita*, o consumo de energia elétrica *per capita* e o PIB real *per capita* para os países da Europa Oriental (Albânia, Bulgária, Hungria e Romênia). Os autores, utilizando o *vector error correction model* (VECM), constataram a presença de relações de longo prazo somente entre consumo de energia *per capita* e PIB real *per capita* e causalidade bidirecional para estas duas variáveis, no sentido dos testes de Granger, somente para os dados da Hungria. Apergis e Payne (2010b) focalizaram os seus estudos na relação entre o consumo de carvão mineral (fonte de energia intensiva em emissão de CO₂) e PIB, para quinze economias emergentes, por meio de um modelo de painel. Os resultados indicaram a presença de uma relação de equilíbrio de longo prazo entre o PIB real, o consumo de carvão, a formação bruta de capital fixo real e a força de trabalho. Foi constatado um impacto negativo do consumo de carvão sobre o PIB real. Os testes de causalidade de Granger mostraram causalidade bidirecional entre o consumo de carvão e o crescimento econômico, tanto no curto como no longo prazo.

A terceira vertente da literatura que analisou as implicações sobre a CAK considera outras variáveis explicativas além da variável renda, como a balança comercial e o consumo de energia. A crítica estabelecida por esta vertente à CAK, em termos teóricos, surge do pressuposto de que a CAK supõe causalidade unidirecional da renda para os danos ambientais. Neste caso, a renda é assumida como sendo uma variável exógena. No entanto, uma conexão causal reversa pode muito bem existir. Proteção ambiental pode promover o crescimento econômico, aumentar a eficiência e estimular o progresso técnico, impactando diretamente nos níveis de poluição (Porter e Van Der Linde, 1995). Assim, o crescimento econômico pode ocorrer na sequência de uma queda em emissões atmosféricas nocivas. Maior eficiência leva ao maior crescimento econômico e, em consequência, a renda pode muito bem ser endógena, de modo que a qualidade ambiental tenha efeitos de realimentação sobre o crescimento econômico. Alguns estudos têm sugerido que a forma da CAK é uma consequência de os países de alta renda exportarem suas poluições para os países de baixa renda, implantando indústrias poluentes nos países em desenvolvimento, com pouca regulação sobre poluição ambiental (Cole, 2004); por conseguinte, atendendo suas necessidades de consumo de produtos gerados por indústrias sujas por meio de importações. Essas externalidades (dependência espacial) contribuem na explicação do impacto do crescimento econômico sobre o meio ambiente nas economias em desenvolvimento (Anselin e Rey, 1991). Uma das possibilidades para contornar a dependência espacial seria modelar a CAK, considerando outras variáveis explanatórias, além da renda, interligadas com a qualidade ambiental e/ou com a situação socioeconômica da população do respectivo país.

Nesse contexto, alguns estudos sobre a CAK incluem como variáveis explicativas, além dos termos referentes à renda, outras variáveis explicativas exógenas,

como a densidade populacional, o consumo de energia e a abertura ao comércio. Grossman e Krueger (1991) e Shafik e Bandyopadhyay (1992) usaram como variável explanatória exógena os termos de renda e abertura comercial. Outra variável utilizada para estudar o impacto da orientação da balança comercial é o índice do dólar (taxa cambial). Esta é uma medida do grau de distorção no nível de preços em uma economia (Lucas *et al.*, 1992). Suri e Chapman (1998), Jayanthakumaran *et al.* (2012) e Alam *et al.* (2012) analisaram as implicações sobre a CAK, utilizando os termos da variável renda, a balança comercial e o consumo de energia. As características comuns destes estudos são direcionadas a detectar a orientação da política comercial na geração de poluentes, colocando em evidência a relevância do impacto do comércio sobre os níveis de poluição. O comércio internacional implica na circulação de mercadorias produzidas em um país para o consumo em outro. Isso significa que a poluição gerada na produção destes produtos está relacionada com o consumo de outro país. Ao nível global, nenhum benefício líquido pode ser obtido, a partir do movimento das atividades econômicas mais sujas para os ambientes de produção menos regulados. A implantação de indústrias poluentes nos países em desenvolvimento estabelece setores manufatureiros intensivos no uso de energia suja, que altera as estruturas de produção, com consequente aumento no crescimento econômico. No entanto, também influencia diretamente as emissões de CO₂ nesses países e ao nível global.

Em consonância com a análise apresentada, a pesquisa desenvolvida nesse estudo teve como objetivo estabelecer as relações de impactos existentes entre emissão de dióxido de carbono (CO₂), com a renda *per capita* de diversas nações e com diversos fatores exógenos, assumindo a premissa de que a qualidade ambiental depende de outros fatores além da renda. Estruturou-se um modelo para obter a CAK, utilizando a emissão de CO₂ *per capita* como variável dependente, e envolvendo um conjunto de variáveis explanatórias que integram indicadores de crescimento econômico (entre eles, o PIB *per capita*), indicadores ambientais, indicadores de desigualdade de renda, indicadores de saúde e indicadores educacionais. Em síntese, espera-se que a dinâmica desses indicadores possa impactar diretamente sobre as emissões de CO₂, assim como sobre o crescimento econômico. Estima-se a Curva Ambiental de Kuznets, utilizando dados de painéis com efeitos fixos, para um conjunto de 37 países representativos da economia mundial, no período de 1991-2006. Como base de dados, foram selecionados países representativos de todos continentes, com padrões de desenvolvimento econômico diversos, além de diferentes padrões culturais e religiosos.

Na sequência, a seção 2 estabelece o conceito da CAK e uma breve revisão sobre a literatura afim. A seção 3 apresenta a metodologia do estudo empírico, evidenciando os procedimentos de testes para a escolha do modelo, as características da base de dados e os fatores que nortearam a escolha das variáveis inclusas no modelo. A seção 4 apresenta os resultados que indicaram a escolha do modelo

mais apropriado para estimar os dados. A seção 5 apresenta os resultados e as respectivas análises. E, por fim, a seção 6 destaca as considerações finais.

2 A CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS (CAK) E O PROBLEMA AMBIENTAL

Um dos principais instrumentos de análise de impactos do crescimento econômico sobre o meio ambiente é o modelo da Cak, que passou a ser referência para explicar a relação de como a poluição ambiental evolui em virtude do crescimento econômico.

O conceito da Cak surgiu na década de 1990 para descrever a trajetória de evolução no tempo da poluição de um país, como resultado do desenvolvimento econômico. Grossman e Krueger (1991), buscando evidenciar a relação entre emissão de poluentes – material particulado em suspensão (SPM) e dióxido sulfúrico (SO_2) – e o PIB *per capita* para os Estados Unidos, encontraram uma curva em formato de U-invertido, denominada Curva Ambiental de Kuznets (CAK). Conforme esses autores e, ainda, Selden e Song (1994) e Grossman e Krueger (1995), a evolução de uma economia passa por um processo de transição, a partir de um estágio inicial primário (agricultura tradicional), evoluindo para um estágio mais avançado, de uma economia industrializada, com fortes impactos de poluição. Com o crescimento econômico surge a maturação da consciência da sociedade em relação às consequências da degradação ambiental. Por fim, em um estágio final ocorreria o desacoplamento entre o crescimento econômico e a pressão sobre o meio ambiente, pois o crescimento econômico não mais implicaria no aumento dos níveis de degradação ambiental. Esse processo evolucionário de impacto ambiental é representado por uma função da renda *per capita*, na forma de U-invertido, a Cak. Especificamente, o que se encontra intrinsecamente incorporado no conceito da Cak em forma de U-invertido é o pressuposto de que, a partir do momento em que o país atinge certo nível de crescimento, aumenta-se a preocupação com a degradação ambiental (Deacon e Norman, 2004a; 2004b). Os defensores da Cak postulam que o crescimento econômico, por si só, é a chave para contornar os problemas de degradação ambiental. A proteção ambiental dar-se-á em consonância entre o crescimento econômico e as políticas adequadas para proteger o meio ambiente, à medida que a população atinge uma renda alta, exigindo, a partir de então, maior proteção ambiental. No entanto, existem opiniões contrárias às dos defensores da hipótese da Cak. Coondoo e Dinda (2002) argumentam que uma mudança no nível de atividade econômica provoca uma mudança na qualidade ambiental e vice-versa. A direção da causalidade entre o nível de renda e qualidade ambiental nem sempre é uma causalidade unidirecional, do nível de renda para a qualidade ambiental. Além disso, quando a degradação ambiental mostra irreversibilidade, os níveis mais elevados de crescimento econômico não podem ser sustentados (Arrow *et al.*, 1995).

Alguns autores como De Bruyn (1997) e De Bruyn *et al.* (1998) acreditam que a CAK não se sustenta no longo prazo. Assim, o formato de U-invertido seria apenas um estágio inicial da relação entre crescimento econômico e pressão ambiental. Após certo nível de renda, haveria um novo ponto de inflexão que tornaria a trajetória novamente ascendente, e o formato da CAK seria similar ao de um “N”, sugerindo que a degradação ambiental voltaria a aumentar em altos níveis de crescimento.

Assim, nos estudos empíricos sobre a CAK propõe-se como modelo geral, uma relação não linear entre o produto *per capita* e uma variável representativa da degradação ambiental. Essa relação forma uma função polinomial, como a seguinte:

$$Y_{it} = \beta_i + \beta_{1i}X_{it} + \beta_{2i}X_{it}^2 + \beta_{3i}X_{it}^3 + \gamma_{ni}Z_{nit} + \epsilon_{it}, \text{ com } n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

em que Y_{it} é a variável dependente que representa uma medida da condição ambiental; X_{it} a variável explanatória renda; e Z_{nit} é um vetor de fatores explanatórios que influenciam a variável dependente – no caso de um modelo de painel, todas as variáveis evoluem no país (i) e/ou no tempo (t). Os parâmetros β_i são os termos intercepto (no caso mais geral, países com características distintas apresentam interceptos distintos); os β_{1i} , β_{2i} e β_{3i} são os coeficientes de inclinação das variáveis explanatórias caracterizadas pela renda; γ_{ni} é o vetor de coeficiente dos fatores exógenos Z_{nit} ; ϵ_{it} o termo de erro estocástico; i é o subscrito que indica um país específico; e, finalmente, t o subscrito que indica o ano.

Os sinais dos parâmetros β_{1i} , β_{2i} e β_{3i} na equação (1) determinam a relação entre degradação da qualidade ambiental e renda, possibilitando determinar a forma da relação da CAK, que pode apresentar vários possíveis resultados, dependendo do desempenho de cada economia. Conforme Li *et al.* (2007), a CAK pode ser categorizada, nos seguintes tipos: *i*) crescimento monotônico, com β_{1i} positivo, e β_{2i} e β_{3i} estatisticamente iguais a zero; *ii*) decréscimo monotônico, com β_{1i} negativo, e β_{2i} e β_{3i} estatisticamente iguais a zero; *iii*) curva-U invertida, com β_{1i} positivo, β_{2i} negativo e β_{3i} estatisticamente igual a zero; *iv*) curva-U, com β_{1i} negativo, β_{2i} positivo e β_{3i} estatisticamente igual a zero; e *v*) curva N, com β_{1i} positivo, β_{2i} negativo e β_{3i} positivo.

O entendimento do comportamento da CAK é complexo, tendo em vista que os efeitos que fazem com que a renda interfira nos níveis de poluição podem ser decompostos em efeitos de escala, de composição (*mix* produtivo) e de níveis tecnológicos (efeito de redução ou técnico), usados no processo produtivo. Esses efeitos interagem nas relações entre o crescimento econômico e qualidade ambiental (Grossman e Krueger, 1991).

O efeito escala encontra-se relacionado com o incremento no uso de *inputs*, sob a forma de materiais e recursos naturais, no sistema produtivo. Ao mesmo tempo,

uma maior produção implica em mais degradação ambiental. Essencialmente, o efeito escala encapsula dois tipos de pressão ambiental: uma decorrente de aumento do uso de recursos, que tem um efeito exaustão; e outra, decorrente do aumento de desperdício, associado com um efeito de poluição (Orubu e Omotor, 2011). Também é verdade que o efeito de escala pode induzir a redução da degradação ambiental ou poluição em níveis mais elevados de rendas, aplicando algumas medidas de controle de poluição, pois nesse estágio, os produtores possuem mais recursos financeiros disponíveis para adotar medidas e tecnologias de redução da poluição.

O efeito composição tem a ver com a proporção de cada tipo de atividade produtiva no volume de produção da economia. Como observado por Stagl (1999), a trajetória comum de desenvolvimento tem sido de que as sociedades progridem da agricultura de subsistência (pouco poluente), para a produção agroindustrial (com baixo nível de poluição) e, em seguida, para o estágio industrial pesado, no qual os níveis de poluição crescem intensamente. Na sequência, as sociedades podem evoluir para um estágio no qual os níveis de poluição diminuem à medida que a economia se desloca em direção ao uso de alta tecnologia, conhecimento e indústrias de serviços. Dentro desta contínua evolução de composição, a poluição tenderá a aumentar à medida que a economia avançar na escada do desenvolvimento, mas cai quando mudanças estruturais ocorrem ao longo do tempo. Em consequência, o efeito de composição tende a reforçar as pressões ambientais decorrentes do aumento da escala de produção, e combatê-las em níveis mais elevados de desenvolvimento. Nesse último estágio, o efeito de composição possibilita reduzir a degradação ambiental, por meio da redução do tamanho relativo dos setores da economia que produzem altos níveis de poluição, e expandindo os que produzem menos resíduos, por unidade de produto, isso, em virtude de ratificações de rígidas normas ambientais, inibidoras à poluição, devido às pressões da sociedade (HE, 2007). Esse processo altera as estruturas de produção das economias ricas, aumentando a participação de serviços no *mix* da composição e diminuindo a de indústrias sujas. No entanto, as estruturas de consumo dos países ricos permanecem inalteradas. Para que eles mantenham as suas estruturas de consumo, as suas indústrias sujas migram para as economias em desenvolvimento, onde as regulamentações ambientais são mais fracas, e passam a fornecer, por intermédio do comércio internacional, os insumos e produtos necessários aos consumos das economias ricas. Nesse processo, as economias em desenvolvimento especializam-se na produção de produtos altamente poluentes, o que reduz os seus efeitos de composição, impulsionando o crescimento econômico. Essa estrutura de crescimento econômico nos países em desenvolvimento tem alto impacto sobre os níveis de poluição interna, e não se constitui em uma condição suficiente para a melhoria do meio ambiente, em nível global.

O efeito de redução decorre do impacto de melhorias no estado da tecnologia. Geralmente, as melhorias na tecnologia de processamento reduzem a poluição, indiretamente pela redução do consumo de insumos materiais, e diretamente pelo avanço tecnológico, por meio da adoção de melhores técnicas de controle de poluição. Assim, o efeito tecnológico funciona por intermédio de melhorias na produtividade e vantagens relacionadas com as emissões (Orubu e Omotor, 2011). Com esses meios, é possível uma indústria altamente poluente registrar declínio nas emissões, mesmo com o aumento de produção, desde que o crescimento na produção seja produzido pelas fábricas que utilizam processos de produção menos poluentes. Em princípio, o efeito de redução possibilita melhorar a qualidade ambiental, quando o crescimento econômico se dá com redução da produção de resíduos, em virtude de invenções e adoção de novas tecnologias e novos padrões produtivos, bem como pelas mudanças na composição de *inputs*, substituindo os insumos mais prejudiciais ao meio ambiente.

Conforme convincentemente argumentam Barrett e Graddy (2000), não existe uma resposta política induzida por trás das forças da CAK. Os níveis observados de qualidade ambiental não dependem apenas de renda, mas também,

sobre os cidadãos serem capazes de adquirir informações sobre a qualidade do seu ambiente, para montar e organizar, e para dar voz às suas preferências para a qualidade ambiental, e os governos terem um incentivo para satisfazer essas preferências, alterando a política, talvez o mais poderoso incentivo sendo o desejo de ser eleito ou reeleito (...) (Barrett e Graddy, 2000).

Maiores níveis de democracia levam a níveis de poluição inferiores. Os países com baixos níveis de democracia estão propensos a experimentar um nível de emissão mais elevado no longo prazo, apesar de um aumento na renda.

Em geral, deve-se ressaltar que a forma da CAK depende de um conjunto de fatores e se está tratando da questão da qualidade ambiental no âmbito de economias específicas, ou em nível global. Em qualquer situação, o processo de industrialização é susceptível de ser acompanhada por problemas ambientais. No entanto, o que se constata é que a forma da CAK para poluentes ao nível global (ou, para uma economia específica) resulta de efeitos de escala, de composição, e dos níveis de tecnologias empregados na produção, podendo desenvolver uma CAK em forma de U-invertido, ou na forma de N, dependendo das circunstâncias do setor produtivo.

Munasinghe (2008) afirma que para um país em desenvolvimento alcançar um crescimento econômico alvo, além do *threshold*, com queda nos níveis de emissões de poluição com o crescimento da renda *per capita* (CAK na forma de U-invertido), este deve utilizar tecnologias limpas e programar políticas de desenvolvimento sustentável. Todavia, deve-se ter consciência das dificuldades que

os países podem encontrar, tanto do ponto de vista tecnológico como do ponto de vista financeiro, para implementar mecanismos para que a poluição doméstica siga um caminho com menor nível relativo de poluição. No entanto, outros autores, como Opschoor (1990) e De Bruyn *et al.* (1998), descartam relações de U invertido para a CAK no longo prazo, predominando uma relação na forma de N. Esta CAK exhibe, num primeiro estágio, o padrão da curva U invertido, mas, além de certo nível de renda, a relação entre renda e pressão ambiental torna-se novamente positiva, caracterizando o segundo estágio da curva em forma de N. O desenvolvimento U invertido no primeiro estágio da curva em N é considerado como um fenômeno temporário. Opschoor (1990) justifica a correlação positiva no último estágio da curva em forma de N, como sendo função do esgotamento de avanços na melhoria da eficiência dos recursos tecnológicos ou devido a estas inovações tornarem-se demasiadamente onerosas para aplicá-las, inviabilizando, do ponto de vista financeiro, a apropriação de novas tecnologias não poluentes. Estes aspectos impossibilitam metas mais rigorosas de diminuição de níveis de emissão de poluentes após o estágio U Invertido. Por isso, neste último estágio da curva em N, o crescimento da renda para um conjunto de países (ou para uma determinada economia)⁶ irá resultar numa líquida degradação ambiental.

3 METODOLOGIA

3.1 A escolha do modelo econométrico

Um passo importante ao formular um modelo de painel é a identificação da formulação mais apropriada para descrever o comportamento dos dados do estudo. Identificam-se as heterogeneidades presentes no modelo, devido às variáveis exógenas explicativas e variáveis não observáveis, residindo, respectivamente, nas inclinações e nos interceptos. Em virtude dessas heterogeneidades, os modelos de painéis podem apresentar uma gama de especificações, como heterogeneidades evoluindo ao longo dos indivíduos ou ao longo do tempo ou nas duas dimensões. Esses aspectos não serão discutidos nesse estudo, contudo, detalhes podem ser encontrados em Hsiao (2003).

A identificação do modelo é obtida, testando, primeiro, a homogeneidade dos coeficientes de inclinação dos regressores; e, segundo, a homogeneidade dos coeficientes de interceptos da regressão. O procedimento de teste tem três maiores etapas que não serão detalhadas nesse estudo (Hsiao, 2003, p. 15-19). Após proceder sistematicamente os testes propostos, encontrou-se para o estudo aqui desenvolvido,

6. De Bruyn *et al.* (1998) afirmam que o padrão de emissão de poluentes de países individuais pode ser melhor descrita por uma curva em forma de N, o que induz a conclusão de que o crescimento econômico encontra-se dissociado da pressão ambiental em países individuais. Contudo, muitos outros pesquisadores têm encontrado curvas ambientais na forma de N para um conjunto de países, como por exemplo, Fujii e Managi (2013).

que a formulação do modelo de dados de painel de efeitos fixos por meio dos indivíduos mostrou ser a mais apropriada para os dados em estudo, conforme testes apresentados na seção 4.

Para estimar o modelo de efeitos fixos, foi preciso implementar uma técnica que possibilitasse obter um intercepto para cada país i . Uma das técnicas utilizadas para este fim foi a técnica de variáveis binárias de intercepto diferencial: variáveis *dummies*. Esse método de estimação é também chamado de LSDV (*least square dummy variable*).

A formulação do modelo de efeitos fixos implementado pode ser escrita como:

$$Y_i = \alpha^* + X_i\beta + D_i\rho_i + u_i \quad (2)$$

em que

$$[Y_i]_{1 \times N}^{tr} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N], \ [y_i]_{1 \times T}^{tr} = [y_{i1} \ y_{i2} \ \dots \ y_{iT}], \quad (3 \text{ e } 4)$$

$$[u_i]_{1 \times N}^{tr} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N], \ [u_i]_{1 \times T}^{tr} = [u_{i1} \ u_{i2} \ \dots \ u_{iT}], \quad (5 \text{ e } 6)$$

$$[\beta_i]_{1 \times K}^{tr} = [\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_K], \ [\rho_i]_{1 \times N}^{tr} = [\rho_1 \ \rho_2 \ \dots \ \rho_N], \quad (7 \text{ e } 8)$$

$$[X_i]_{T \times K} = \begin{bmatrix} x_{1i1} & x_{2i1} & \dots & x_{Ki1} \\ x_{1i2} & x_{2i2} & \dots & x_{Ki2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1iT} & x_{2iT} & \dots & x_{KiT} \end{bmatrix}, \text{ e } [D_i]_{N \times N} = \begin{bmatrix} e_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & e_{N-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \text{Zero}_N \end{bmatrix}, \quad (9 \text{ e } 10)$$

com $[e_j]_{1 \times T}^{tr} = (1, 1, \dots, 1)$, e $[Zero]_{1 \times T}^{tr} = (0, 0, \dots, 0)$. O superescrito *tr* representa o transposto dos respectivos vetores.

Nas equações supracitadas, i representa a i -ésima unidade de indivíduos (o país), t o t -ésimo período de tempo e K o número de variáveis explanatórias exógenas, X_k , que diferem em seus valores no tempo para cada país. Supondo N o número de unidades de observação de indivíduos e T o período total de observação no tempo, então, o número de observações do modelo é $N \times T$. $[Y_i]_{N \times 1}$ e $[u_i]_{N \times 1}$ são, respectivamente, o vetor de valores para a variável dependente para o i -ésimo país, no t -ésimo período de tempo e o vetor de valores para o termo de erro estocástico para o i -ésimo país, no t -ésimo período de tempo; u_{it} é uma variável randômica, independente e identicamente distribuída com $E(u_{it}) \approx 0$ e $E[(u_{it})^2] = \sigma_{u_{it}}^2$. Os vetores α^* , $[\beta]_{K \times 1}$ e $[\rho_i]_{N \times 1}$ são vetores de constantes, respectivamente, de

dimensão $[1 \times 1]$, $[K \times 1]$ e $[N \times 1]$, representando os efeitos das variáveis peculiares ao país i , de forma similar, ao longo do tempo. D_i representa uma matriz de variáveis binárias, com uma variável para cada um dos $N - 1$ indivíduos e equivale a um quando $i=j$ e zero, quando do contrário. Observa-se na equação (10) que, para eliminar o problema de multicolinearidade perfeita, eliminou-se uma variável binária (Gujarati, 2006). Portanto, nesse caso, quando $i=N$, o intercepto é dado por α^* e, para $i < N$, o intercepto é dado por $\alpha_i = \alpha^* + \rho_i$.

A técnica a ser utilizada para a solução do modelo (2) depende da presença ou não de heterocedasticidade nas variáveis explanatórias, o que será discutido em detalhes na seção (4).

A seleção de um modelo econométrico, apropriado para estimar os dados do estudo, constitui um passo importante para obter, sem viés, a CAK. Conforme Stern (2004), as características da CAK dependem do modelo empírico, e é fortemente influenciada pelo viés das variáveis omitidas. Também deve ser caracterizado que não é menos importante, para obter uma CAK com precisão, a seleção de um conjunto de variáveis explanatórias apropriadas, o que será feito na próxima seção.

3.2 A escolha da base de dados

Neste estudo executa-se um modelo de dados de painel para verificar a viabilidade da CAK. A base de dados foi retirada de dois catálogos de indicadores mundiais: *i*) os indicadores de desenvolvimento mundial, compilados pelo Banco Mundial (WDI, 2013); e *ii*) os indicadores de Metas para o Desenvolvimento do Milênio, compilados pela Divisão de Estatísticas das Nações Unidas do Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais, da Organização das Nações Unidas – ONU (2013a; 2013b).⁷

Foram selecionados 37 países representativos de todos continentes, com padrões de desenvolvimento econômico diversos, além de diferentes padrões culturais e religiosos. Os países escolhidos apresentaram um maior número de informações disponíveis, a fim de não limitar ou enviesar a inferência e análise do modelo. Porém, para alguns países ocorreram faltas de informações para alguns anos, o que foi corrigido, executando interpolações levando em conta o ajuste do padrão de evolução e o conjunto de valores conhecidos próximos da lacuna, inseridos na região de interpolação. A técnica utilizada foi a interpolação de Lagrange, utilizando três pontos (Nakamura, 1992).

O modelo clássico da CAK compara impactos ambientais em virtude do crescimento da renda. O modelo proposto inclui na análise outros fatores que não a renda, que podem influenciar o aumento da degradação ambiental.

7. Os dados utilizados nesse estudo foram de 1991-2006, pois 1991 foi ano da consolidação das estimativas dos indicadores no catálogo do MDGI. O último ano da base de dados foi 2006, devido à falta sistemática de informações para alguns países, após este ano.

Em 2000, a ONU, ao analisar os maiores problemas mundiais, estabeleceu oito metas do milênio. Essas metas representam as necessidades humanas e os direitos básicos que todos os indivíduos do planeta deveriam poder desfrutar. Essas metas encontram-se relacionadas com a sustentabilidade do meio ambiente, desigualdade social, fatores de desempenho econômico, saúde e educação (WDI, 2013). Portanto, os indicadores de desenvolvimento utilizados enquadram-se em uma visão abrangente, medindo de forma integrada o progresso do desenvolvimento. Os indicadores selecionados na estruturação do modelo de painel foram agrupados em cinco áreas de análise: ambiental; econômica; desigualdade de renda; saúde; e educação, com a finalidade de avaliar quais variáveis impactam, bem como a intensidade dos impactos na degradação ambiental. Como justificado na seção 1, a variável dependente é a emissão de CO₂.

Entre as variáveis que medem a emissão de CO₂, utilizou-se a variável emissão em toneladas de CO₂ *per capita*, pois o uso de uma variável *per capita* faz com que os dados sejam comparados adequadamente entre os países, devido à grande variabilidade populacional e de produção entre eles. O próprio Kuznets, em seu trabalho original, demonstrou a CAK utilizando dados *per capita* (Kuznets, 1955). Com relação à escolha da melhor medição do crescimento econômico entre os países, utilizou-se o produto interno *per capita* em valores correntes, em dólares americanos.

As variáveis explanatórias de emissão de CO₂ *per capita* incluídas no vetor exógeno, Z_{nit} , foram selecionadas por meio de filtragem, primeiramente, aquelas variáveis contendo menos lacunas de informação e, segundo, aquelas que em testes previamente elaborados para o modelo de painel demonstraram não possuir colinearidade perfeita (testes na tabela A.1, anexo A) e se apresentaram como significantes (tabela 1).

As justificativas para a inclusão do conjunto de variáveis exógenas são baseadas nos estudos de Suri e Chapman (1998), Jaunky (2011), e Jayanthakumaran *et al.* (2012), que argumentaram que o crescimento econômico, por si só, não é a chave para resolver os problemas de degradação ambiental. Esses autores citam que a adoção de uma política de conservação ambiental não pode ser seguida somente em virtude do forte contragolpe na tendência de poluição, devido à desaceleração do impacto do crescimento econômico sobre os níveis de poluição. A proteção ambiental não se dará automaticamente, mas como consequência de políticas pró-crescimento com fontes limpas de energia, associadas a políticas adequadas para proteger o meio ambiente.

Uma crítica fundamental à CAK, em termos teóricos, surge a partir do pressuposto de causalidade unidirecional, da renda para os danos ambientais, em que a renda é assumida como sendo exógena. No entanto, uma conexão causal

reversa pode muito bem existir, já que a proteção ambiental pode promover o crescimento econômico, aumentando a eficiência e estimulando o progresso técnico (Porter e Van Der Linde, 1995). Em síntese, o crescimento econômico pode ocorrer na sequência de uma queda em emissões atmosféricas nocivas. Portanto, a qualidade ambiental pode impactar diretamente o nível de atividade econômica, mas também pode impactar diretamente o nível de poluição. Esses dois efeitos podem ser capitados simultaneamente em um modelo econométrico.

Consideram-se como variáveis explicativas a variável FLORPC (a proporção de área coberta por florestas em relação ao território total, em termos percentuais) e a variável PROT (a proporção de áreas protegidas em relação ao território total, em termos percentuais). A inclusão dessas variáveis no modelo se justifica considerando que florestas incorporam atributos ambientais importantes, devido ao seu impacto sobre o sequestro de carbono, com consequente redução das emissões de gases de efeito estufa e a enorme quantidade de recursos da biodiversidade encontrada nos ecossistemas florestais tropicais (Bhattarai e Hammig, 2001). A conversão de florestas para outros usos da terra tem crescido de forma significativa e, neste contexto, as proteções de florestas fornecem *inputs* empíricos valiosos para recomendações de políticas ligadas às questões ambientais globais. O desmatamento é visto como um grande problema ambiental e vários fatores afetam o nível atual de desmatamento tropical. Entre eles estão a queima praticada na atividade agrícola, a extração de madeira, o aumento da demanda de lenha para a geração de energia e pastagem, entre outras, denotando atividades que não são inibidas, de maneira eficaz, pelas instituições de proteção da floresta (Gillis, 1997; Brown e Pearce, 1994). Portanto, este estudo permite avaliar, por intermédio da variável FLORPC, as implicações sobre o meio ambiente pelas destruições florestais e a proteção da biodiversidade, bem como, por meio da variável PROT. Espera-se um sinal positivo do coeficiente da variável FLORPC, pois quanto maiores forem as áreas florestais, maiores serão as ações de destruição do sequestro de carbono, e espera-se um sinal negativo do coeficiente da variável PROT, pois quanto maiores forem as áreas florestais protegidas, maiores serão os sequestros de carbono. Com isso, constata-se que a variável FLORPC causa um efeito na escala de produção de resíduos e a variável PROT impacta sobre o efeito de redução.

Utilizaram-se as variáveis explicativas PIB *per capita* em US\$ corrente (PIBPC), taxa da população empregada em ambos os sexos e em termos percentuais, (EMPR) e consumo de energia equivalente ao quilo de óleo, por US\$1 mil de PIB, a preços constantes de 2005, com paridade do poder de compra em US\$ (ENER). Apesar de entender que emprego e consumo de energia são insumos utilizados na produção industrial, consequentemente, determinantes dos níveis de renda *per capita* de uma economia, entende-se também que as participações marginais de energia e emprego nas rendas *per capita* das economias são diferentes. Primeiro, porque as economias possuem efetividades do trabalho e níveis de tecnologias diferentes.

Duas economias com a mesma renda *per capita* podem empregar números de empregados diferentes, com níveis de escolaridades diferentes para produzir uma mesma unidade de renda *per capita*, em atividades com graus diferentes de poluição (setor de serviços ou setor manufatureiro). Segundo, as economias possuem composições de produção diferentes, algumas com maior peso para o setor manufatureiro, intensivas em consumo de energia e outras com maior peso no setor de serviços, menos intensivas no uso de energia. Portanto, as inclusões das variáveis EMPR e ENER como variáveis explicativas exógenas no modelo manifestam, em nível individual das economias, efeitos distintos do uso de energia e emprego sobre os níveis de emissão de CO₂ *per capita*. As características destas variáveis capacitam-nas como explanatórias diretas do nível de CO₂ *per capita*, apesar de estas serem insumos que determinam o nível de renda, e ser uma variável também incluída no modelo como explicativa, na forma clássica para obter a CAK.

O crescimento econômico das economias acontece de maneiras diferentes. As indústrias sujas estão migrando das economias ricas em direção às economias em desenvolvimento. Esse deslocamento induz o efeito de composição nos países em desenvolvimento, em que as exportações e a intensificação do consumo interno tendem a impulsionar os seus crescimentos econômicos. Os países em desenvolvimento têm sofrido um processo de rápida industrialização, com crescimento acentuado dos setores manufatureiros e com consequente aumento no uso de energia. Nos países desenvolvidos, a participação do setor manufatureiro no *mix* produtivo tem se estabilizado ou está em declínio, em detrimento ao aumento do setor de serviços não intensivo em energia. Nessa nova estrutura, as economias em desenvolvimento distribuem as suas produções totais de manufaturados para o mercado interno e exportações. Já as economias desenvolvidas importam os produtos oriundos das indústrias sujas dos países em desenvolvimento para atender as suas necessidades de consumo. Nota-se, assim, que as economias em desenvolvimento estão utilizando maior quantidade de energia e maior número de empregados na produção de bens industriais do que as economias desenvolvidas, intensificando em serviços que empregam mão de obra com maior nível de conhecimento (maior efetividade). Em consequência, a produção de uma unidade de renda nas economias envolve quantidades de energia e número de trabalhadores diferentes, com consequentes impactos distintos diretos sobre as emissões de CO₂ *per capita* (Suri e Chapman, 1998; Jayanthakumaran *et al.*, 2012).

Por conseguinte, é esperado um sinal positivo para o coeficiente da variável ENER, o que induz um efeito escala de consumo de energia sobre o meio ambiente, distinto para cada economia, independente da sua participação marginal sobre o produto. Da mesma forma, pressupõe-se que esses fundamentos também prevaleçam para a variável EMPR, supondo que esta encontra-se correlacionada diretamente ao nível de poluição, e com impacto positivo direto sobre tal nível.

Ainda foram introduzidos ao modelo – como variáveis explicativas exógenas – os indicadores educacionais: a taxa de alfabetização de adultos em percentual de pessoas com 15 anos ou mais (AFDT) e percentual de matrículas no ensino médio (MATSEC). Estas representam os determinantes do grau de escolaridade da força de trabalho que impactam na produtividade das atividades econômicas, em forma de progresso tecnológico, e influenciam sobre o efeito de escala na produção.

No processo de evolução das sociedades tem-se intensificado a importância conferida à educação/formação no processo de empregabilidade. As corporações transnacionais determinam os indicadores tecnológicos que impõem parâmetros à empregabilidade. A ampliação dos sistemas escolares funciona como uma entidade integradora (Gentili, 1998), pois os sistemas produtivos, cada vez mais complexos e competitivos, incrementam a incorporação de ciência e tecnologia como fatores de competitividade. As tecnologias de informação e comunicação garantem, genericamente, maiores níveis de produtividade, desde que coadjuvados de mão de obra, possuam perfis de qualificações adequados (Kovács, 2002). A educação afirma-se como variável fundamental no funcionamento dos mercados de trabalho, fator de mobilização para os empregadores que buscam as qualificações escolares de que necessitam para que os seus sistemas de trabalho funcionem eficazmente. De acordo com essas considerações, o crescimento do grau de escolaridade da força de trabalho é defendido como uma forma de abrandar o desemprego e aumentar a produtividade (Dupas, 1999, p. 199). Assim, de acordo com a teoria de capital humano, entende-se que trabalhadores com maior grau de escolaridade representam um potencial de capacidade de produtividade.

Entende-se, assim, que o aumento do grau de escolaridade da força de trabalho, caracterizado pelas variáveis educacionais AFDT e MATSEC, aumenta a inserção da força de trabalho no mercado de trabalho, impactando positivamente sobre a massa salarial, sobre o consumo e sobre o nível de produção industrial, com consequente aumento dos níveis de emissões de CO₂ *per capita*; assim, atuando como efeito de escala na produção. As direções de causalidade das variáveis AFDT e MATSEC ocorrem de forma que os seus respectivos coeficientes sejam positivos.

Introduziu-se também no modelo como variável explicativa exógena, o índice de Gini, que é uma medida comumente utilizada para calcular a concentração da renda, que aponta a diferença entre os rendimentos dos mais pobres e dos mais ricos. Numericamente, o índice de Gini varia de 0 a 1, em que 0 corresponde à completa igualdade de renda, e 1 corresponde à completa desigualdade. Uma má distribuição de renda reduz o uso do potencial existente no mercado interno. Autores como Carneiro (2012) e Bastos (2012) entendem que o crescimento econômico deve ser dinamizado pelo consumo de bens (consumo de massa), essencialmente, estimulado pela distribuição de renda. A desconcentração de

renda reestrutura o perfil da demanda que condiciona o processo produtivo. Conforme Wells (1976), o cerne da explicação reside no fato de que a concentração de renda impede o desenvolvimento de novas estruturas produtivas e novos padrões de consumo. O grande paradoxo de economias com forte concentração de renda é que somente uma minoria da população exerce demanda sobre os produtos de indústrias dinâmicas, sem qualquer concomitância que modifique as técnicas de produção. A composição da demanda impele a economia a uma conformação industrial e comanda a acumulação do capital. Na ótica descrita em Wells (1976), a composição de renda e as rearticulações da demanda detêm o papel fundamental na dinâmica da economia, cujos perfis dependem da distribuição da renda. Uma economia com alta distribuição de renda se estrutura como um processo industrial forte, centrado em diversos setores produtivos. Esses argumentos suportam que a variável Gini impacta negativamente sobre o nível de emissão de CO₂ emitido. Entende-se, assim, que a melhoria da distribuição de renda (menores índice de Gini) constitui uma âncora para o crescimento e articula, sustentavelmente, uma relação de sinergia entre consumo e investimentos, com consequente crescimento do PIB e impactos diretos sobre os níveis de emissões de resíduos poluentes.

Finalmente, destacam-se as variáveis explicativas exógenas como indicadores de saúde: os coeficientes VIDA e AGUA, respectivamente, a expectativa de vida e o percentual da população que possui acesso à água potável. A inclusão dessas variáveis explicativas baseia-se no fato de que o meio ambiente fornece os insumos materiais naturais para a produção de bens e serviços, e capta resíduos provenientes de atividades econômicas – incluindo produção e consumo –, podendo garantir ou desestabilizar o desenvolvimento sustentável. Assim, em virtude dos impactos das atividades econômicas sobre o meio ambiente deve-se estabelecer políticas que preservem o meio ambiente e, conseqüentemente, garantam a saúde de seus cidadãos (Smulders, 2000).

As fontes mais comuns de contaminação da água são materiais particulados em suspensão, emitidos por indústrias poluentes (Orubu e Omotor, 2011), e as práticas sanitárias sem higiene e pobres são fatores que afetam a saúde humana e destroem os recursos hídricos terrestres. É importante notar que os efeitos de poluição sobre o ar e água advêm dos mesmos efeitos de produção e consumo industrial que se intensificam à medida que as economias se movem para a indústria pesada. Assim, a intensidade da poluição é susceptível de ser cada vez maior em países menos desenvolvidos ou em estágio intermediário de desenvolvimento. A poluição da água é responsável por uma série de doenças transmissíveis, com efeitos que reduzem a produtividade da força humana, de diversas maneiras. Doenças advindas da falta de água potável se manifestam muito mais rapidamente que os efeitos de doenças advindas de poluição do ar atmosférico, o que atina a consciência ambiental de um país (Khanna, 2002). Assim, tem-se em mente que o impacto de águas poluídas (não potável)

sobre doenças na população aumenta a conscientização dessa sobre as necessidades de estabelecimento de políticas públicas ambientais, aumentando a pressão por mais rigorosa regulamentação ambiental, melhorando o nível de saúde no longo prazo. Mais saúde para a população implica que mais poluição será gerada, pois o consumo e a produção industrial se intensificam. Assim, doenças advindas da falta de água potável podem ser entendidas como uma variável *proxy* para o estabelecimento de leis de regulamentação ambiental, com impactos sobre o efeito de escala da produção. Espera-se, portanto, um coeficiente positivo para a variável AGUA.

Também se imagina que, com a melhoria nas condições ambientais e econômicas, as pessoas passam a ter mais saúde e, por conseguinte, isso aumenta a expectativa de vida da população, gerando mais poluição, pois o consumo se intensifica. Entende-se, portanto, que a variável VIDA se caracteriza como um fator com impacto sobre o efeito de escala, resultando em um coeficiente positivo para esta variável.

Estruturou-se um modelo original para obter a CAK, utilizando como variável dependente a variável emissão de CO₂ *per capita*, e envolvendo um conjunto de variáveis explanatórias que integram indicadores de desenvolvimento. As inclusões dessas variáveis explanatórias exógenas (outras além do PIB *per capita*) se justificam com base na argumentação apresentada ao longo desta seção, baseada em conceitos e questionamentos destacados na literatura afim, conforme se relata ao longo das descrições deste estudo. O período selecionado para a base de dados anual foi de 1991-2006.

O grupo de países selecionados compõe-se de uma amostra de 37 países em diferentes posições geográficas, dispersos nos cinco continentes. Para se ter uma amostra representativa, foram selecionados países subdesenvolvidos, em desenvolvimento e países desenvolvidos. Além disso, a língua falada, as religiões oficiais, as formas de governo, as culturas e raízes étnicas são das mais diversas, objetivando compor a pesquisa com parcela significativa da diversidade existente no mundo. Algumas regiões tiveram menos países que outras, como a África em relação à Europa, porque nos países africanos as bases de dados, na maioria, são mais incompletas que nos europeus, o que poderia produzir um resultado enviesado no modelo proposto.

Essa amostra de países representa 21% dos países do mundo (considerando 192 países, no total), 58% da superfície territorial do globo e 68% da população mundial. (ONU, 2013b). A tabela 2 mostra todo o grupo amostral de países, juntamente aos interceptos estimados.

4 ROBUSTEZ DO MODELO DE PAINEL ESTIMADO

Para caracterizar a robustez (eficiência e consistência do estimador) do modelo de painel estimado, apresentam-se os resultados dos testes realizados de multicolinearidade

e heterocedasticidade, assim como os testes de identificação do modelo de painel que melhor se adequou ao ajuste dos dados. O modelo da CAK caracteriza-se pela determinação da causalidade de impacto sobre a variável ambiental, Y_{it} , envolvendo o conjunto de variáveis explanatórias que compõem o modelo, detalhadas na seção 3.2: renda *per capita* (X_{it} , X_{it}^2 , X_{it}^3) e as demais variáveis explanatórias exógenas incluídas no vetor Z_{it} da equação (1), equação básica utilizada para a verificação empírica da CAK. Para que o modelo de painel esquematizado para a CAK se caracterizasse de forma robusta, aplicaram-se os testes de adequação especificados.

Na determinação de quais variáveis explanatórias seriam adequadamente utilizadas em Z_{it} (outras além do PIB *per capita*, conforme equação 1), analisou-se a dependência linear entre as variáveis explanatórias (multicolinearidade), fonte de introdução de vieses nas estimativas dos parâmetros do modelo de regressão. Determinou-se o grau de colinearidade entre as variáveis, utilizando duas técnicas básicas de análise: o *fator de inflação de variância* (FIV) e o índice condicional – IC (Gujarati, 2006, p. 282-292). Deve ser observado que quando as colinearidades entre as variáveis explanatórias forem grandes, aquelas com maior dependência devem ser eliminadas do conjunto, pois não existe correção para esta dependência. Assim, considerando os indicadores de Metas para Desenvolvimento do Milênio, da ONU (2013b, p. 3), estimaram-se os valores da FIV e do IC. Tendo como regra prática que todas as variáveis que apresentassem valores da FIV maior que dez e/ou índice IC maior que trinta seriam consideradas altamente colineares, devendo ser retiradas do modelo. Esse processo foi repetido até que o conjunto de variáveis analisadas atingisse os níveis de colinearidades aceitáveis, com $VIF < 10$ (média da $VIF < 10$) e $IC < 30$. Na tabela A.1, do anexo A, verifica-se que a maior VIF individual ocorreu para a variável AFDT, sendo de 2,83 e a VIF média foi 2,13, e que o IC máximo foi de 29,43; logo, atendendo ao critério prático. Em consequência deste teste, introduziu-se ao modelo as variáveis destacadas na seção 3.2, as mesmas constantes na tabela A.1.

Utilizando-se no estudo um modelo de dados de painel estruturado com as variáveis PIBCAPC, PIBCAPC² e PIBCAPC³, e o conjunto das demais variáveis explanatórias exógenas destacadas na seção 3.2, estabeleceu-se o teste de heterocedasticidade dos dados das variáveis do modelo. A análise de heterocedasticidade foi realizada aplicando a função *hettest* do STATA 11, elaborada conforme o estudo Cook e Weinberg (1983). As estatísticas estimadas com esta técnica constituem em testes padrões da presença de heterocedasticidade em uma regressão OLS. Os testes de significância de heterocedasticidade foram estabelecidos para cada variável do modelo, com a hipótese nula de homocedasticidade nos resíduos da variável em análise. Aplicou-se como critério para rejeição da hipótese nula a condição $p - \text{valor} < 0,05$ e constatou-se a evidente presença de heterocedasticidade nas variáveis do modelo e no score global do teste, conforme se pode observar

na tabela A.2 do anexo A – exceções se fazem para as variáveis FLORPC e PROT. Diante do fato de os dados serem heterocedásticos, utilizou-se, para soluções dos modelos de painéis, a técnica de mínimos quadrados generalizado (*feasible generalized least square*, FGLS), por meio da função *xtgls* do STATA,⁸ uma técnica mais robusta que o OLS clássico para estes tipos de dados.

Ainda foram estabelecidos os testes para a escolha do modelo de regressão de dados de painel que melhor descrevessem o comportamento dos dados, chegando à conclusão de que o modelo de painel de efeitos fixos foi o que se destacou como o melhor. Uma vez selecionadas as variáveis e verificada a existência de heterocedasticidade, foram testados os modelos de painéis possíveis, conforme Hsiao (2003, p. 15-19).

Conforme a tabela A.3 do anexo A, os modelos executados e testados foram os seguintes: *i*) o modelo com heterogeneidade nos interceptos e nos coeficientes de inclinação, modelo destacado pela equação M_1 ; *ii*) o modelo de coeficientes constantes ou de dados agrupados, que não faz distinção entre as diferenças por grupo e no tempo, modelo destacado pela equação M_2 ; e *iii*) modelos com heterogeneidade nos interceptos e homogeneidade nas inclinações: o modelo de efeitos fixos por unidade individual, modelo destacado pela equação M_3 . Todos estes modelos econométricos foram determinados usando o método de estimação FGLS, devido à presença de heterocedasticidade. Aplicando os procedimentos de testes exposto em Hsiao (2003, p. 15-19), encontrou-se o modelo adequado para descrever o comportamento da base de dados do estudo. A escolha de um modelo não invalida as estimativas obtidas pelos outros modelos, mas simplesmente indica o modelo de melhor desempenho, aquele que apresente uma menor variância residual. Para tanto, foi desenvolvido um programa na plataforma STATA 12, com a finalidade de executar os cálculos e análises propostas.

O primeiro teste aplicado, denominado de TESTE 1 (tabela A.3), envolve o modelo irrestrito M_1 , com interceptos e inclinações distintos para cada unidade individual e o modelo restrito M_2 , de coeficientes constantes (dados agrupados). Conforme destacado na tabela A.1, no TESTE 1, a hipótese H_0 é a de que o modelo com melhor desempenho é o modelo M_2 ; e sob a hipótese H_1 , o modelo de melhor desempenho é o modelo M_1 . De acordo com estatística F estimada para o TESTE 1 e o respectivo p -valor (resultados na tabela A.3), o modelo com interceptos e inclinações distintas para cada unidade individual (M_1) destaca-se como melhor modelo que o de dados agrupados (M_2).

Portanto, rejeitando-se M_2 (modelo de dados agrupados) e aceitando o modelo M_1 (modelo com heterogeneidades nas inclinações e nos interceptos), este pode agora se contrapor ao modelo restrito M_3 (modelo de interceptos

8. Para mais detalhes sobre o método de solução, consulte Hsiao (2003), Gujarati (2006) e Green (2003).

heterogêneos, mas inclinações homogêneas – efeitos fixos, LSDV). Conforme o TESTE 2, destacado na tabela A.3, a estatística F e o p -valor resultante do teste permite aceitar como melhor modelo, sob a hipótese H_0 , o modelo de efeitos fixos nas unidades, LSDV.

Na sequência dos testes de seleção do modelo adequado, tendo em vista a aceitação do modelo M_3 (modelo de efeitos fixos, LSDV nas unidades individuais), pode-se determinar a extensão da não homogeneidade que aparece nos interceptos, aplicando um teste condicional para interceptos homogêneos. Conforme caracterizado na tabela A.3, o TESTE 3 contrapõe o modelo restrito M_2 , de coeficientes constantes com o modelo M_3 , agora irrestrito, o modelo de efeitos fixos, LSDV, nas unidades individuais. Os resultados do TESTE 3 (tabela A.3) estabelece a aceitação da hipótese H_1 , sob a qual prevalece o modelo LSDV de efeitos fixos nas unidades individuais.

De acordo com os testes, o modelo que melhor descreve o comportamento global da emissão de CO_2 *per capita*, com menor nível de erro, foi o modelo de efeitos fixos, LSDV, nas unidades individuais. Para finalizar os testes de identificação do modelo, ainda deve-se comparar o desempenho do modelo LSDV de efeitos fixos nas unidades individuais, com o modelo de efeitos fixos aleatórios nas unidades individuais. Para isso, aplicou-se o teste de Hausman (1978).

Por um lado, o teste de Hausman suporta que as estimativas do modelo de efeitos fixos são consistentes,⁹ tanto sob a hipótese H_0 como sob a hipótese H_1 – na hipótese H_0 , os resíduos não são correlacionados e na H_1 os resíduos são correlacionados. Por outro lado, o teste de Hausman suporta sob H_0 que as estimativas obtidas pelo modelo de efeitos aleatórios são eficientes¹⁰ e inconsistentes sob H_1 . Pode-se resumir que o modelo de efeitos aleatórios prevalece sob H_0 , pois se trata de um estimador de variância mínima e sob a hipótese H_1 , o modelo de efeitos fixos prevalece, pois se trata de um estimador consistente e eficiente. O teste de Hausman estimou a estatística H , a qual foi de ≈ 24.52 , conduzindo a um p – valor ≈ 0.0173 , prevalecendo a hipótese H_1 , sendo o modelo de efeitos fixos o que melhor estima os parâmetros. Assim, de acordo com os testes realizados, o modelo de efeitos fixos, LSDV, aplicado nesse estudo, demonstra robustez nas estimativas, pois o mesmo é consistente e eficiente.

9. Os erros tornam-se menores à medida que a amostra cresce, diminuindo os vieses com relação aos respectivos parâmetros populacionais. Quando o tamanho da amostra se torna igual à população, as estimativas tornam-se iguais aos respectivos parâmetros populacionais.

10. Ou seja, um estimador de variância mínima.

TABELA 1
Resultados do modelo LSDV de efeitos fixos

Regressão FGLS de séries de tempo em corte				Coeficientes: mínimos quadrados generalizados		
Correlação: nenhuma correlação				Autocorrelações estimadas = 0		
Coeficientes estimados = 49		Número de observações = 591		Covariâncias estimadas = 37		
Número de grupos = 37		Observações por grupos = 15		Wald $\chi^2(48)$ = 48731.46 Prob > χ^2 = 0,0000		
co2tmcap	Coef.	Erro-padrão	z	P> z	Intervalo de confiança 95%]	
d2	11.5000	0.2370	48.7400	0.0000	11.1000	12.0000
d3	-1.8200	0.3410	-5.3400	0.0000	-2.4900	-1.1500
d4	-1.5600	0.3060	-5.1000	0.0000	-2.1600	-0.9610
d5	1.1000	0.2780	3.9500	0.0000	0.5530	1.6400
d6	9.8100	0.2910	33.6700	0.0000	9.2400	10.4000
d7	-1.5400	0.3090	-4.9800	0.0000	-2.1500	-0.9330
d8	-1.2100	0.3210	-3.7700	0.0000	-1.8400	-0.5790
d9	4.4000	0.3990	11.0100	0.0000	3.6100	5.1800
d10	-0.9240	0.2260	-4.0900	0.0000	-1.3700	-0.4820
d11	-0.3040	0.3310	-0.9200	0.3590	-0.9540	0.3460
d12	-1.4800	0.1690	-8.7500	0.0000	-1.8100	-1.1500
d13	3.9500	0.4920	8.0300	0.0000	2.9800	4.9100
d14	1.3100	0.2620	4.9800	0.0000	0.7930	1.8200
d15	6.3900	0.3740	17.0800	0.0000	5.6600	7.1300
d16	3.2700	0.2360	13.8900	0.0000	2.8100	3.7400
d17	1.2100	0.2070	5.8600	0.0000	0.8080	1.6200
d18	-1.4700	0.3770	-3.9000	0.0000	-2.2100	-0.7310
d19	-2.8800	0.2520	-11.4100	0.0000	-3.3700	-2.3800
d20	2.8100	0.2650	10.5800	0.0000	2.2900	3.3300
d21	2.9800	0.3960	7.5200	0.0000	2.2000	3.7500
d22	4.4700	0.5310	8.4100	0.0000	3.4300	5.5100
d23	-1.1600	0.2030	-5.6900	0.0000	-1.5600	-0.7590
d24	0.4090	0.1880	2.1800	0.0290	0.0410	0.7770
d25	5.8000	0.2460	23.5600	0.0000	5.3200	6.2800
d26	1.9200	0.4170	4.6100	0.0000	1.1000	2.7400
d27	-2.2400	0.2540	-8.8000	0.0000	-2.7400	-1.7400
d28	-2.9500	0.1550	-19.0100	0.0000	-3.2600	-2.6500
d29	0.4440	0.2020	2.2000	0.0280	0.0477	0.8400
d30	4.6000	0.4180	11.0100	0.0000	3.7800	5.4200
d31	2.1600	0.2690	8.0300	0.0000	1.6300	2.6800
d32	-1.2600	0.3960	-3.1800	0.0010	-2.0300	-0.4820
d33	0.0590	0.2230	0.2600	0.7920	-0.3790	0.4970

(Continua)

(Continuação)

Regressão FGLS de séries de tempo em corte				Coeficientes: mínimos quadrados generalizados		
Correlação: nenhuma correlação				Autocorrelações estimadas = 0		
Coeficientes estimados = 49		Número de observações = 591		Covariâncias estimadas = 37		
Número de grupos = 37		Observações por grupos = 15		Wald chi2(48) = 48731.46	Prob > chi2 = 0,0000	
co2tmcap	Coef.	Erro-padrão	z	P> z	Intervalo de confiança 95%	
d34	4.5800	0.2260	20.2400	0.0000	4.1400	5.0200
d35	13.8000	0.2450	56.3700	0.0000	13.3000	14.3000
d36	3.7900	0.5230	7.2400	0.0000	2.7700	4.8200
d37	-2.4300	0.4750	-5.1200	0.0000	-3.3700	-1.5000
piicapcr	-	-	4.2200	0.0000	-	-
piicapcr2	-	-	-2.8700	0.0040	-	-
piicapcr3	-	-	2.1100	0.0350	-	-
Floperc	0.0216	0.0055	3.9200	0.0000	0.0108	0.0324
Prot	-0.0384	0.0061	-6.3400	0.0000	-0.0502	-0.0265
emprego	0.0361	0.0076	4.7200	0.0000	0.0211	0.0510
Energia	0.0057	0.0006	9.1200	0.0000	0.0045	0.0069
Gini	-0.0222	0.0057	-3.8900	0.0000	-0.0333	-0.0110
Agua	0.0288	0.0087	3.3100	0.0010	0.0118	0.0459
Vida	0.0188	0.0072	2.6100	0.0090	0.0047	0.0329
Afbadt	0.0259	0.0060	4.3400	0.0000	0.0142	0.0376
matseabr	0.0049	0.0018	2.7300	0.0060	0.0014	0.0085
_cons	-5.4200	0.7730	-7.0000	0.0000	-6.9300	-3.9000

Elaboração dos autores.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os testes indicaram o modelo LSDV de efeitos fixos por grupos de países, como o modelo que ajusta melhor a base de dados. A interpretação dos resultados desse modelo incorpora a utilização de variáveis binárias. Cada país tem um intercepto diferente, em consequência de decisões políticas e/ou atividades econômicas intrínsecas às economias, não introduzidas como variáveis explanatórias, mas estimados como efeitos autônomos, devidos às heterogeneidades no intercepto de cada país. Assim, as emissões de CO₂ *per capita* iniciam em pontos diferentes, evoluindo em função da renda *per capita* e demais variáveis explanatórias, seguindo um comportamento comum, conforme equação (1).

TABELA 2
Intercepto de cada país estimado pelo modelo LSDV de efeitos fixos

Código	País	Intercepto	Código	País	Intercepto
1	Argentina	-5.42	20	Itália	-2.61
2	Austrália	6.13	21	Japão	-2.44
3	Bolívia	-7.24	22	Cazaquistão	-0.95
4	Brasil	-6.98	23	Letônia	-6.57
5	Bulgária	-4.32	24	México	-5.01
6	Canadá	4.40	25	Holanda	0.39
7	China	-6.96	26	Noruega	-3.49
8	Colômbia	-6.62	27	Peru	-7.65
9	Dinamarca	-1.02	28	Filipinas	-8.37
10	Equador	-6.34	29	Romênia	-4.97
11	Egito	-5.42	30	Rússia	-0.81
12	El Salvador	-6.89	31	Espanha	-3.26
13	Finlândia	-1.47	32	Suécia	-6.67
14	França	-4.11	33	Tunísia	-5.42
15	Alemanha	0.98	34	Reino Unido	-0.84
16	Grécia	-2.14	35	Estados Unidos	8.41
17	Hungria	-4.20	36	Venezuela	-1.62
18	Índia	-6.89	37	Zâmbia	-7.85
19	Indonésia	-8.29	-	-	-

Elaboração dos autores.

Obs.: Os dados da tabela foram obtidos com base nos resultados do modelo LSDV de efeitos fixos, estimados no programa desenvolvido no STATA 11, apresentados na tabela A.1.

A tabela 1 mostra os resultados do modelo LSDV de efeitos fixos por grupos, considerando como variável dependente a emissão de CO_2 *per capita* e como variáveis explanatórias as demais variáveis destacadas na subseção 3.1. Também, na tabela 1, são apresentados os coeficientes angulares para as variáveis explanatórias e os coeficientes *dummies*, juntamente com os respectivos erros-padrões, as estatísticas *t*, as correspondentes probabilidades de aceitar as hipóteses nulas, de não significância dos coeficientes de inclinação ($H_0: \beta_i = 0$) e de não significância dos coeficientes *dummies* ($H_0: \alpha_i = 0$), bem como os respectivos intervalos de confiança para cada coeficiente, ao nível de significância de 5%. Observa-se, também, na tabela 1 que foram insignificantes, ao nível de 5%, somente os coeficientes *dummies* dos países onze e 33, correspondendo, respectivamente, a Egito e Tunísia. Esses países, juntamente com o país um, a Argentina, assumem o coeficiente da constante do modelo, da ordem de $-5,42$, significativo ao nível de 1%. Encontram-se na tabela 2 os resultados das estimativas dos interceptos para cada país, obtidos a partir dos coeficientes das *dummies* e constante do modelo apresentados na tabela 1.

Os interceptos individuais para cada economia, estimados na tabela 2, resultam de variáveis não observadas no país, invariantes ao longo do tempo. Segundo De Bruyn *et al.* (1998), esses fatores podem ser resultados de mudanças nas escalas de produção, na estrutura econômica e/ou nos níveis de tecnologia, ou em virtude de algum resultado de políticas ambientais impactantes sobre os níveis de poluição. Esses fatores podem causar impactos positivos ou negativos sobre a emissão de CO₂ *per capita*, de forma independente das variáveis explanatórias explícitas do modelo.

Observa-se que as economias com efeitos positivos não observáveis sobre os interceptos se caracterizam, na maioria, como economias desenvolvidas. Como exemplo (conforme tabela 1, destacam-se as seguintes economias com significativas emissões de toneladas de CO₂ *per capita*, devido aos efeitos de variáveis não observáveis: Estados Unidos (13,80); Austrália (11,50); Canadá (9,81); Alemanha (6,39); Reino Unido (4,58); Dinamarca (4,4); Finlândia (3,95); Noruega (1,92); e França (1,31). As economias com maior predominância de fontes de geração de energia intensivas em poluição nas suas matrizes energéticas apresentaram maiores efeitos não observáveis positivos. No entanto, à medida que as parcelas das fontes de energias poluentes diminuem no *mix* da matriz energética de uma economia desenvolvida, diminui também a intensidade dos efeitos não observáveis positivos. Considera-se as matrizes energéticas¹¹ desses países, onde se pode observar, como regra geral, que os países que possuem atualmente matrizes energéticas com maior ênfase em fontes intensivas em poluição,¹² apresentam maiores efeitos não observáveis positivos, como se destacam: Estados Unidos (83%); Austrália (95,7%); Canadá (87,1%); Alemanha (66,4%); Reino Unido (66%); Dinamarca (66%); Finlândia (54,8%); Noruega (59%); e França (25,9%). Assim, se conjectura, neste estudo, que um efeito não observável autônomo positivo para uma economia desenvolvida se caracteriza como um efeito de redução (tecnológico).

11. Matrizes energéticas: Estados Unidos (37% em petróleo; 21% em carvão; 25% em gás natural; 8% em fonte renovável; e 9% em nuclear); Austrália (36% em petróleo; 34,9% em carvão; 24,8% em gás natural; e 4,32% em fontes renováveis); Canadá (41,4% em petróleo; 9,2% em carvão; 36,5% em gás natural; 7,5% em hidráulica; 3,5% em biomassa; e 0,1% em fontes emergentes (isto é, eólica e solar)); Alemanha (42% em carvão; 1,6% em petróleo; 13,3% em gás natural; 22,8% em energia nuclear; 15,9% em energia renovável; e 3,6% em outras); Reino Unido (38% em carvão; 28% em gás natural; 21% em energia nuclear; 11% em energia renovável; e 2% em outras); Dinamarca (40% em carvão e turfa; 20% em gás natural; e 40% em energia eólica, biomassa e resíduos de madeira); Finlândia (20,1% em carvão e turfa; 24,4% em petróleo; 10,3% em gás natural; 3,4% em hidrelétricas; 16,6% em energia nuclear; 3,1% em eletricidade importada; 20,3% em biomassa; e 1,9% em outras); Noruega (59% de petróleo; 20% biomassa e biocombustível; 10% em eficiência energética; 4% de fonte renovável (biomassa e eólica); e 7% energia elétrica importada); França (3,3 em petróleo; 29,4% em combustível sólido; 22,6% em gás natural; 27,8% em hidrelétrica e nuclear; 15,69% em energia renovável; e 1,2% em outras).

12. As fontes intensivas em poluição, em ordem decrescente, são carvão e turfa, petróleo e gás natural. As emissões mundiais de CO₂ se decompõem em 35,1% de queima do petróleo, 44% de queima do carvão, 20,2% de queima de gás natural, e 0,5% de outras fontes (Key World Energy Statistics, 2013).

Observa-se nas informações que a Noruega, apesar de possuir uma matriz energética relativamente intensiva em fontes poluentes (59%), apresenta índice baixo de emissão de CO₂ *per capita*, devido ao efeito de variáveis não observáveis (1,92 tonelada de CO₂ *per capita*). Esse comportamento se justifica, pois, a Noruega, um país que em poucas décadas se transformou em um oásis de prosperidade graças ao petróleo, utiliza como mecanismo de redução de emissão de CO₂ o sequestro do gás carbônico. Este procedimento consiste em levar o gás para outro lugar que não seja a atmosfera, impedindo concentrações excessivas e reduzindo seus efeitos deletérios. O método usado na Noruega injeta o CO₂ em camadas rochosas, primeiramente, como um mecanismo de exploração de gases naturais em camadas rochosas; e, segundo, o CO₂ permanece armazenado nas respectivas camadas rochosas que absorvem grandes quantidades de gás carbônico. Este processo é denominado de captura e armazenamento de carbono. A Noruega utiliza também o mercado de créditos de carbono para atingir as metas de redução de emissão de CO₂, comprando créditos de carbonos de outras nações que possuam, em seus processos de produção, mecanismo de desenvolvimento econômico limpo (MDL).

Considerando que se reivindica que os efeitos não observáveis se caracterizem como efeitos de redução – dependente do poder de poluição da matriz energética da economia em questão –, cabe destacar que as composições das matrizes energéticas de China, Índia e Indonésia são compostas por fontes altamente poluentes,¹³ contudo, com efeitos autônomos negativos, oriundos de variáveis não observáveis. Para essas economias, as emissões em toneladas de CO₂ *per capita* são, respectivamente: China (-1,54), a Índia (-1,47) e a Indonésia (-2,88). O que explica tal situação é que os níveis de emissões em toneladas de CO₂ *per capita* das variáveis não observáveis da China, Índia e Indonésia são ainda muito baixas, apesar de serem economias com setores manufatureiros com produções industriais significantes. Para esses países, as emissões de CO₂ diluem seus efeitos quando normalizados pelas suas imensas populações. Neste contexto, pode-se pressupor que um efeito não observável autônomo negativo poderá caracterizar uma economia com uma matriz energética pouco poluente (com preponderância em fontes de energia limpa), ou com níveis de emissões de CO₂ *per capita* ainda baixos, apesar de a matriz energética ser intensiva em energia suja, em virtude da dimensão de sua população.

Ainda, com a finalidade de enfatizar o efeito de redução detectado pelos coeficientes *dummies* das variáveis não observáveis, destaca-se a Suécia, um país

13. Matrizes energéticas: China (17,73% em petróleo; 70,4% em carvão; 4,5% em gás natural; 6% em hidráulica; 0,7% em nuclear; e 0,7% em fonte renovável); Índia (44,8% em carvão; 20,89% em petróleo; 25,97% em biomassa (lenhas); 5,71% em gás natural; 0,76% em energia nuclear; 1,46% em energia hidrelétrica); Indonésia (35% em carvão; 20% em petróleo; 30% em gás natural; 5% em biomassa (lenhas); 2% em energia nuclear; 5% em energia hidrelétrica; e 3% em fontes renováveis).

desenvolvido com matriz energética limpa,¹⁴ que apresenta índice de emissão em toneladas de CO₂ *per capita* na ordem de -1,26. Nesse país, as fontes intensivas em poluição somam 38%, seguramente, um país intensivo em energia limpa. O comportamento de preservação do meio ambiente da Suécia se justifica, em grande parte, pelo uso de energia de biocombustíveis na sua matriz energética, que representou o grande impulso para que esta economia assumisse o papel que hoje tem no cenário ambiental global.

Também se consideram os comportamentos dos efeitos autônomos das variáveis não observáveis, relativos aos países em desenvolvimento, entre outros: Rússia; Cazaquistão; Venezuela; Bulgária; e Romênia. Logo, são países em desenvolvimento que apresentam efeitos autônomos oriundos de variáveis não observáveis positivos, com emissões em toneladas de CO₂ *per capita*, como: Rússia (4,6); Cazaquistão (4,47); Venezuela (3,79); Bulgária (1,1); e Romênia (0,44). Tais países possuem matrizes energéticas intensivas em poluição,¹⁵ com destaque para Rússia (94%), Cazaquistão (97%), Venezuela (77%), Bulgária (73%) e Romênia (76%). Observa-se, mais uma vez, nesses dados, que existe uma relação positiva entre intensidade em poluição das matrizes energéticas e efeitos de emissões de CO₂ *per capita*, advindos de variáveis não observáveis.

Nota-se, de uma forma conclusiva, que os efeitos de variáveis não observáveis se manifestam como um efeito de redução (tecnológico), conforme destacado por De Bruyn *et al.* (1998).

O gráfico 1 apresenta as evoluções das CAKs, determinadas pelas inclinações das variáveis explanatórias PIBPC_{it} (PIBPC), PIBPC_{it}² (PIBPC2) e PIBPC_{it}³ (PIBPC3), estimadas por três modelos. Todas as inclinações de todos os modelos mostraram-se significantes ao nível de 5%. Estes modelos são: *i*) modelo FE-1, modelo de efeito fixo nas unidades, proposto no estudo, com resultados na tabela 1, CAK cúbica com intercepto zero (coeficientes: 0,0000976, $-2,26 \times 10^{-9}$ e $2,00 \times 10^{-14}$); *ii*) modelo FE-2, modelo de efeito fixo nas unidades, considerando como variáveis explicativas somente os termos do PIB *per capita*, CAK cúbica com intercepto zero (coeficientes: 0,0001144, $-2,87 \times 10^{-9}$ e $2,58 \times 10^{-14}$); e *iii*) modelo CC-AGRUPADO, modelo com coeficientes constantes, considerando como variáveis explicativas somente os termos PIB *per capita*, CAK cúbica com intercepto de 1,13

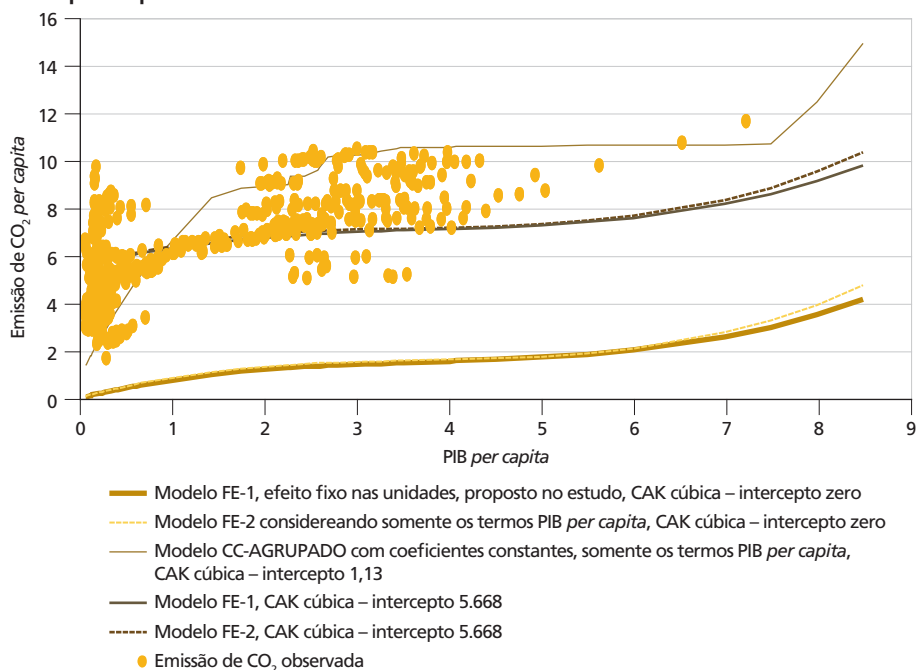
14. Matriz energética da Suécia (5% em petróleo; 30% em carvão; 3% em gás natural; 14,9% em hidráulica; 13,1% em nuclear; 31,6% em bioenergia; 1,4% em eólica; e 1% bomba de calor).

15. Matrizes energéticas: Rússia (15,66% em carvão; 32,66% em petróleo; 45,69% em gás natural; 5,22% em energia nuclear; e 0,78% em energia hidrelétrica); Cazaquistão (64% em carvão; 19% em petróleo; 14% em gás natural; e 3% energia hidrelétrica); Venezuela (2,0% em carvão; 47,0% em petróleo; 28,0% em gás natural; e 23,0% em energia hidrelétrica); Bulgária (36,65% em carvão; 24,06% em petróleo; 12,35% em gás natural; 22,87% em energia nuclear; 4,10% em energia hidrelétrica; 0,3 em energia renovável); e Romênia (21,57% em carvão; 23,93% em petróleo; 30,79% em gás natural; 8,90% em energia nuclear; 3,88% em energia hidrelétrica; 11,42% em biomassa; e 0,07% em energia renovável).

(0,000769, $-1,91 \times 8$ e $1,41 \times 10^{-13}$). No gráfico 1, evidenciam-se, também, os modelos FE-1 e FE-2, com interceptos de 5,668. Os sinais desses coeficientes foram, respectivamente, positivo, negativo e positivo, portanto, identifica-se uma CAK no formato de N. As CAKs estimadas por estes modelos permitem caracterizar que as variáveis explanatórias exógenas introduzidas neste estudo não afetam as taxas marginais do PIB *per capita* sobre os níveis de emissões de CO₂ *per capita*.

GRÁFICO 1

CAKs estimadas por três modelos: evolução das previsões de emissão de CO₂, como função do PIB *per capita*, para o conjunto de economias incluídas no estudo, e para o período de 1991-2006



Elaboração dos autores.

Comparando as evoluções das CAKs dos modelos FE-1 e FE-2 (gráfico 1), primeiro, com intercepto zero, observa-se que são totalmente similares, praticamente, evoluindo com as mesmas taxas marginais e acompanhando o comportamento das emissões de CO₂ *per capita* observadas para os países; no entanto, deslocadas abaixo. Utilizou-se nestas curvas o intercepto zero, pois são modelos de efeitos fixos, com um intercepto específico para cada país, devido às variáveis não observáveis. Em seguida, introduziu-se nas CAKs dos modelos FE-1 e FE-2 um intercepto médio de 5,668, estimado a partir dos interceptos individuais dos países no modelo FE-2. Para essa situação, as CAKs dos modelos FE-1 e FE-2 evoluem

acompanhando, satisfatoriamente, as emissões de CO_2 *per capita* em função da renda *per capita*, para dados observados. As diferenças intrínsecas entre os dois modelos encontram-se nas estimativas dos efeitos das variáveis não observáveis, bem como nos impactos das demais variáveis exógenas (outras além do PIB *per capita*). Esse aspecto faz entender que as variáveis explicativas adicionais introduzidas no modelo FE-1 não causaram qualquer viés nas estimativas das taxas marginais da renda *per capita* sobre os níveis de CO_2 *per capita*. O gráfico 1 permite, ainda, comparar as evoluções dos modelos FE-1 e FE-2, como o modelo CC-AGRUPADO (modelo com coeficientes constantes, modelo com somente os termos PIB *per capita*, CAK cúbica com intercepto de 1,13). Observa-se que estes três modelos apresentam, em termos de taxas marginais da renda *per capita*, de forma bastante similar para as economias desenvolvidas, na região de $\approx \text{PIB per capita} \geq \text{US\$ } 20.000,00$. O modelo CC-AGRUPADO apresenta uma evolução totalmente desconexa com o comportamento das economias em desenvolvimento, em processo de industrialização, inseridas na região de $\approx \text{PIB per capita} \leq \text{US\$ } 20.000,00$, região de inclinação íngreme, especialmente para aqueles com $\approx \text{PIB per capita} \leq \text{US\$ } 7.000,00$. Para essa região, o modelo FE-2 capta o comportamento dessas economias por meio de efeitos de variáveis não observáveis, como efeitos autônomos, e o modelo FE-1 por meio de efeitos de variáveis não observáveis e pelas variáveis explicativas exógenas caracterizando o comportamento de desenvolvimento, conforme estruturado neste estudo. A conclusão básica desta análise encontra-se no fato de que se pode reivindicar que as variáveis de desenvolvimento introduzidas neste modelo comportam distintamente dos impactos da renda *per capita*, com impactos diretos sobre a variável ambiental dependente, a emissão de CO_2 *per capita*.

No gráfico 1, considerando para análise a CAK do modelo FE-1, tomando a região de taxas marginais decrescentes ($\approx 70.00,00 \leq \text{PIB per capita} \leq 25.000,00$) como um estágio de desaceleração do impacto positivo do crescimento econômico sobre os níveis de CO_2 *per capita*. Conforme Liu (2008), essa desaceleração do nível de poluição ocorre, pela melhoria da qualidade ambiental, com regulamentações mais rigorosas, igualdade de renda e justiça social. Para a região de países desenvolvidos (níveis de rendas entre $25.000,00 \leq \text{PIB per capita} \leq 60.000,00$), constata-se uma região de baixas taxas marginais de emissões de CO_2 , devido ao crescimento. Nesta região, praticamente plana, a rota dos níveis de emissões de CO_2 evolui de forma quase constante com o PIB *per capita*. Os pesquisadores pressupõem que essa desaceleração completa na emissão de CO_2 dá-se em função da predominância de mecanismos pelos quais as economias desenvolvidas exportam seus processos de produção intensivos em poluição para as economias não desenvolvidas, mantendo em seu território a parte de serviços e processos industriais limpos, associadas às melhorias nas inovações tecnológicas e ao aperfeiçoamento nas leis de regulação ambiental (Suri e Chapman, 1998; Cole, 2004).

Na concepção teórica, a CAK obtida neste estudo apresenta a forma de N, contudo, sem demonstrar de forma evidente, o segundo estágio clássico da parte descendente da curva de U-invertido, refletindo a diminuição dos níveis de poluição *per capita*, em virtude da renda *per capita*. A região de PIB *per capita* > 60.000,00 caracteriza o terceiro estágio da CAK em forma de N, em que as taxas marginais passam a crescer de forma acentuada, sugerindo que a degradação ambiental volta a aumentar em altos níveis de crescimento. No entanto, esse processo acontece em intervalo de rendas consideravelmente altos, praticamente inatingível para a grande maioria das economias.

Observa-se que, apesar da CAK acompanhar a evolução das emissões de CO₂ *per capita* devido ao crescimento econômico, especificamente na região de economias desenvolvidas, verifica-se um acentuado espalhamento dos valores observados em torno da CAK. Esse aspecto evidencia que a renda *per capita*, por si só, não possibilita descrever com precisão o comportamento de emissões de poluentes, em nível global.

Os coeficientes de *população empregada*, em termos percentuais, EMPR e uso de energia (equivalente ao quilo de óleo, por US\$1 mil de PIB), a preços constantes de 2005, estimados pela paridade do poder de compra em US\$, ENER, foram significantes ao nível de 5% e tiveram sinais positivos (conforme se observa na tabela 1).

A direção do sinal esperado para a variável ENER é positivo, como já argumentado anteriormente. Isto, em função do efeito de deslocamento que induz uma mudança na estrutura do setor manufatureiro das economias em desenvolvimento, com consequente aumento deste setor na composição do *mix* produtivo dessas economias. Nesse processo de reestruturação, as economias em desenvolvimento intensificam as exportações e o consumo interno, com consequente efeito de escala na produção. Por conseguinte, as economias em desenvolvimento intensificam o consumo de energia, que impactam, por um lado, positivamente na renda *per capita* da economia e, por outro, diretamente sobre o nível de poluição, tendo em vista que as economias envolvem quantidades de energia diferentes em seus sistemas produtivos, para uma unidade de renda *per capita*.

A direção do sinal esperado para o coeficiente da variável EMP (percentual da população empregada) deverá também ser positivo, pois se pressupõe que o impacto dessa variável é devido ao crescimento do nível de emprego nas economias em desenvolvimento, pela intensificação do comércio internacional e pelo crescimento do consumo interno, fatores correlacionados diretamente ao crescimento do setor manufatureiro dessas economias, no *mix* dos respectivos sistemas produtivos. Assim, o coeficiente positivo para a variável EMPR caracteriza um efeito na escala da produção.

Ainda na tabela 1, é possível observar que os coeficientes dos indicadores ambientais foram significantes ao nível de 5%, sendo positivo para FLORPC e negativo para PROT, respectivamente, a proporção de área coberta por florestas, bem como a de áreas protegidas em relação ao território total, ambas em porcentagem. Os sinais esperados para os coeficientes destas duas variáveis explanatórias encontram-se nas direções corretas.

Como já destacado, as variáveis FLORPC e PROT incorporam atributos ambientais importantes. Tal importância se dá devido aos seus impactos sobre o sequestro de carbono e redução das emissões de gases de efeito estufa. A conversão de florestas para outros usos da terra tem crescido de forma significativa – queima para a expansão da atividade agrícola e de pastagens, extração de madeira para geração de energia e industrialização etc. A variável FLORPC avalia as implicações sobre o meio ambiente, por meio das destruições de florestas, e a variável PROT protege a biodiversidade. Assim, por um lado, espera-se um sinal positivo do coeficiente da variável FLORPC, pois quanto maiores forem as áreas florestais, maiores serão as ações de destruição do sequestro de carbonos. Por outro lado, espera-se um sinal negativo do coeficiente da variável PROT, pois quanto maiores forem as áreas florestais protegidas, menor será o sequestro de carbono – áreas florestais protegidas significa que essas se encontram protegidas por ações governamentais, por leis ou sistema de repressão que inibem sua destruição. Com isso, a variável FLORPC causa efeito positivo na escala de produção de resíduos e a variável PROT impacta sobre efeito de redução, sinais corretos captados pelo modelo do estudo.

Observa-se na tabela 1 que o coeficiente estimado para a variável Gini foi significativo ao nível de 1%, e negativo. Entende-se (sustentado pela argumentação já apresentada) que países com menores índices de Gini possuem maiores níveis de consumo, o que exige maiores níveis de produção e diversificação industrial para atender ao crescimento da demanda; consequentemente, produzindo maiores níveis de emissão CO_2 *per capita*. Portanto, um sinal negativo do coeficiente da variável índice de Gini encontra-se corretamente identificado pelo modelo.

Os coeficientes das variáveis de saúde, VIDA e AGUA, respectivamente, a expectativa de vida e o percentual da população que possui acesso à água potável, foram significantes ao nível de 1% e apresentaram sinais positivos (tabela 1). A poluição da água é responsável por uma série de doenças transmissíveis que reduzem a produtividade da força humana. Doenças advindas da falta de água potável manifestam a consciência ambiental e a educação, com consequente aumento da pressão por regulamentações ambientais mais rigorosas que impactem positivamente no nível de saúde no longo prazo. Mais saúde para a população implica em mais poluição, pois o consumo e a produção industrial se intensificam.

Com a melhoria nas condições ambientais, as pessoas passam a ter mais saúde, aumentando a expectativa de vida, e gerando mais poluição, pois o consumo também se intensifica. Assim, as variáveis AGUA e VIDA se caracterizam com impactos sobre o efeito de escala da produção. Portanto, os sinais positivos detectados pelo modelo para essas variáveis se apresentam corretamente.

Observa-se na tabela 1 que os coeficientes das variáveis educacionais MATSEC e AFDT, respectivamente, o percentual da população matriculada no ensino médio e taxa de alfabetização de adultos, em percentual de pessoas com 15 anos ou mais, foram significantes ao nível de 1% e apresentaram sinais de impactos positivos. Essas variáveis representam insumos caracterizados como capital humano, determinantes do grau de escolaridade da força de trabalho que impactam na produtividade das atividades econômicas, em forma de progresso tecnológico, com consequentes influências sobre o efeito de escala na produção. Assim, no contexto deste estudo, as variáveis educacionais AFDT e MATSEC representam potenciais de produtividade, impactando positivamente sobre a massa salarial, sobre o consumo, e sobre o nível de produção industrial (com efeito na escala na produção), além de registrar consequente aumento dos níveis de emissões de CO₂ *per capita*. Portanto, as direções de causalidade das variáveis AFDT e MATSEC ocorrem de forma que os seus respectivos coeficientes sejam positivos, conforme detectados pelo modelo.

Na análise realizada até aqui se identificou, simplesmente, as direções de impactos das variáveis explanatórias sobre a emissão de CO₂ *per capita*, com base nas argumentações expostas na seção 3.1. Portanto, uma avaliação quantitativa relativa sobre os impactos é necessária, pois permite identificar as economias mundiais com maiores consequências sobre os níveis de poluição de CO₂ *per capita*. Para tanto, serão estimadas as elasticidades da emissão média de CO₂ *per capita*, relativas às variáveis explanatórias.¹⁶

16. A fórmula da Elasticidade para valores médios, para um modelo de regressão linear, é a seguinte (Gujarati, 2006): $E_{Y_i \leftarrow X_i} = \frac{dY_i}{dX_i} \times \frac{\bar{X}_i}{\bar{Y}_i}$, em que dY_i/dX_i é a derivada de Y_{it} em função de X_{it} , $\bar{X}_i$ é valor médio da variável explanatória e $\bar{Y}_i$ é o valor médio da variável dependente. Em particular, a elasticidade-renda para a variação relativa da emissão de CO₂ *per capita* foi estimada conforme a seguinte equação, tendo em vista que o modelo de regressão incluiu, na sua análise, os impactos do PIB *per capita* ao quadrado e ao cúbico: $E_{Y_i \leftarrow X_i} = (\beta_1 + 2\beta_2\bar{X}_i + 3\beta_3\bar{X}_i^2) \times \frac{\bar{X}_i}{\bar{Y}_i}$. Nesta equação, Y_i representa a emissão de CO₂ *per capita* e X_i o PIB *per capita*, ambos para o país i .

TABELA 3

Elasticidades da emissão de CO₂ pelos países, em relação às variáveis explanatórias
(Em %)

Elasticidade	Argentina	Austrália	Bolívia	Brasil	Bulgária	Canadá	China	Colômbia	Dinamarca	Equador	Egito	El Salvador	Finlândia
$E_{CO2PC-PIBPC}$	0,12	0,03	0,08	0,18	0,03	0,03	0,03	0,13	0,04	0,09	0,06	0,20	0,05
$E_{CO2PC-FLORPC}$	0,57	0,12	1,97	1,23	0,35	0,13	0,73	1,38	0,21	1,12	1,24	2,38	0,19
$E_{CO2PC-PROT}$	-1,01	-0,22	-3,51	-2,18	-0,62	-0,23	-1,30	-2,46	-0,37	-1,98	-2,21	-4,22	-0,34
$E_{CO2PC-EMPR}$	0,95	0,21	3,29	2,05	0,58	0,22	1,22	2,31	0,35	1,86	2,07	3,96	0,32
$E_{CO2PC-ENER}$	0,24	0,07	0,79	0,44	0,33	0,09	0,78	0,40	0,07	0,34	0,56	0,82	0,12
$E_{CO2PC-GINI}$	-0,29	-0,04	-1,11	-0,74	-0,11	-0,04	-0,31	-0,81	-0,05	-0,63	-0,40	-1,23	-0,05
$E_{CO2PC-AGUA}$	0,76	0,17	2,63	1,64	0,46	0,18	0,97	1,85	0,28	1,49	1,66	3,17	0,26
$E_{CO2PC-SANEA}$	0,06	0,01	0,21	0,13	0,04	0,01	0,08	0,15	0,02	0,12	0,13	0,25	0,02
$E_{CO2PC-VIDA}$	0,36	0,09	1,07	0,74	0,22	0,09	0,45	0,85	0,14	0,70	0,73	1,43	0,13
$E_{CO2PC-AFADT}$	0,68	0,15	2,36	1,47	0,42	0,16	0,87	1,66	0,25	1,34	1,49	2,84	0,23
$E_{CO2PC-MATPR}$	-0,10	-0,02	-0,34	-0,21	-0,06	-0,02	-0,13	-0,24	-0,04	-0,19	-0,21	-0,41	-0,03
$E_{CO2PC-MATSEC}$	0,13	0,03	0,45	0,28	0,08	0,03	0,17	0,32	0,05	0,25	0,28	0,54	0,04
Elasticidade	França	Alemanha	Grécia	Hungria	Índia	Indonésia	Itália	Japão	Cazaquistão	Letônia	México	Holanda	
$E_{CO2PC-PIBPC}$	0,08	0,05	0,08	0,07	0,04	0,07	0,08	0,04	0,02	0,08	0,10	0,05	
$E_{CO2PC-FLORPC}$	0,33	0,20	0,27	0,38	1,96	1,72	0,28	0,22	0,22	0,61	0,52	0,19	
$E_{CO2PC-PROT}$	-0,58	-0,36	-0,48	-0,67	-3,49	-3,06	-0,50	-0,39	-0,38	-1,09	-0,92	-0,35	
$E_{CO2PC-EMPR}$	0,54	0,34	0,45	0,63	3,28	2,87	0,47	0,36	0,36	1,02	0,87	0,33	
$E_{CO2PC-ENER}$	0,13	0,08	0,09	0,19	1,39	1,16	0,08	0,08	0,32	0,38	0,19	0,08	
$E_{CO2PC-GINI}$	-0,11	-0,06	-0,09	-0,11	-0,74	-0,69	-0,10	-0,06	-0,07	-0,20	-0,26	-0,06	
$E_{CO2PC-AGUA}$	0,43	0,27	0,36	0,50	2,62	2,30	0,37	0,29	0,29	0,82	0,69	0,26	
$E_{CO2PC-SANEA}$	0,03	0,02	0,03	0,04	0,21	0,18	0,03	0,02	0,02	0,06	0,05	0,02	
$E_{CO2PC-VIDA}$	0,22	0,14	0,18	0,23	1,04	0,99	0,19	0,15	0,12	0,37	0,33	0,13	
$E_{CO2PC-AFADT}$	0,39	0,24	0,32	0,45	2,35	2,06	0,33	0,26	0,26	0,73	0,62	0,23	
$E_{CO2PC-MATPR}$	-0,06	-0,04	-0,05	-0,06	-0,34	-0,30	-0,05	-0,04	-0,04	-0,11	-0,09	-0,03	
$E_{CO2PC-MATSEC}$	0,07	0,05	0,06	0,09	0,45	0,39	0,06	0,05	0,05	0,14	0,12	0,04	

(Continua)

(Continuação)

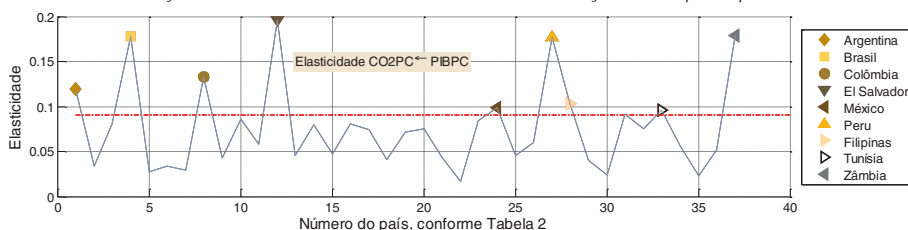
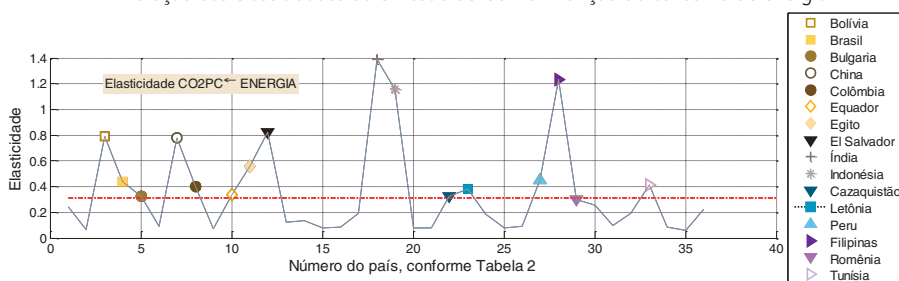
Elasticidade	Noruega	Peru	Filipinas	Romênia	Rússia	Espanha	Suécia	Tunísia	Reino Unido	Estados Unidos	Venezuela	Zâmbia	
$E_{CO2PC-PIBPC}$	0,06	0,18	0,10	0,04	0,02	0,09	0,08	0,10	0,06	0,02	0,05	0,18	-
$E_{CO2PC-FLORPC}$	0,25	1,99	2,41	0,45	0,20	0,31	0,35	1,08	0,23	0,11	0,35	9,67	-
$E_{CO2PC-PROT}$	-0,45	-3,54	-4,28	-0,80	-0,35	-0,55	-0,63	-1,92	-0,40	-0,19	-0,63	-17,18	-
$E_{CO2PC-EMPR}$	0,42	3,32	4,02	0,76	0,33	0,51	0,59	1,80	0,38	0,18	0,59	16,14	-
$E_{CO2PC-ENER}$	0,09	0,45	1,23	0,30	0,25	0,10	0,20	0,41	0,08	0,06	0,22	14,44	-
$E_{CO2PC-GINI}$	-0,07	-1,00	-1,10	-0,14	-0,08	-0,11	-0,09	-0,48	-0,08	-0,05	-0,17	-5,02	-
$E_{CO2PC-AGUA}$	0,34	2,66	3,22	0,60	0,27	0,41	0,47	1,44	0,30	0,15	0,47	12,91	-
$E_{CO2PC-SANEA}$	0,03	0,21	0,25	0,05	0,02	0,03	0,04	0,11	0,02	0,01	0,04	1,02	-
$E_{CO2PC-VIDA}$	0,17	1,21	1,44	0,28	0,11	0,21	0,24	0,68	0,15	0,07	0,21	3,76	-
$E_{CO2PC-AFADT}$	0,30	2,39	2,88	0,54	0,24	0,37	0,42	1,29	0,27	0,13	0,42	11,58	-
$E_{CO2PC-MATPR}$	-0,04	-0,34	-0,42	-0,08	-0,03	-0,05	-0,06	-0,19	-0,04	-0,02	-0,06	-1,67	-
$E_{CO2PC-MATSEC}$	0,06	0,45	0,55	0,10	0,05	0,07	0,08	0,25	0,05	0,03	0,08	2,21	-

Elaboração dos autores.

Neste estudo, a elasticidade, representada por $E_{Y_i \leftarrow X_i}$, caracteriza a variação relativa da variável Y_i (a emissão de CO_2 *per capita* do país i), pela variação média do nível da variável explanatória X_i , também referente ao país i . A elasticidade é interpretada como sendo a variação de $E_{Y_i \leftarrow X_i}$ *per centos* da variável dependente, em função da variação de 1% da respectiva variável explanatória, em termos médios. A tabela 3 mostra os valores de elasticidade para todos os países inseridos no modelo por meio das variáveis explanatórias – os valores da tabela estão expressos em termos percentuais.

Para a análise da elasticidade, selecionaram-se na tabela 3 alguns países com impactos mais intensos sobre a emissão de CO_2 *per capita*, em virtude das variáveis dependentes, cujos gráficos de elasticidade estão ilustrados nos gráficos que se seguem na sequência da análise.

GRÁFICO 2

Evolução das elasticidades da emissão de CO₂ (PIB *per capita* e consumo de energia)2A – Evolução das elasticidades da emissão de CO₂ em função do PIB *per capita*2B – Evolução das elasticidades da emissão de CO₂ em função do consumo de energia

No gráfico 2A, selecionaram-se os países que apresentam maiores impactos, em termos relativos (elasticidade), do PIB *per capita* sobre a emissão de CO₂. Tomou-se como referência, a linha de elasticidade de 0,09%, em pontilhado (a média das elasticidades da emissão de CO₂ *per capita* relativa ao PIB *per capita*). Observa-se que os países em destaque, conforme legenda, constituem-se, em sua maioria, de países em desenvolvimento, situados na América Latina, na África, e Filipinas, na Ásia. Observa-se que para 1% de aumento no PIB *per capita*, em média, a emissão de CO₂ *per capita* aumenta, respectivamente, 0,12% para a Argentina; 0,18% para o Brasil; 0,13% para Colômbia; 0,20% para El Salvador; 0,10% para México; 0,18% para o Peru; 0,10% para Filipinas; 0,10% para Tunísia; e 0,18% para a Zâmbia.

Observa-se também na tabela 3 que, de uma forma geral, quanto mais desenvolvido for o país, menores são os impactos do PIB *per capita*, em termos percentuais, na poluição gerada na emissão de CO₂. Por exemplo, considerando 1% de aumento no PIB *per capita* aumenta a emissão de CO₂ *per capita*, respectivamente, de 0,02% para os Estados Unidos; 0,04% para a Dinamarca; 0,05% para a Finlândia; 0,04% para o Japão; 0,05% para a Alemanha; 0,05% para a Holanda; 0,03% para a Austrália; 0,03% para o Canadá; 0,06% para a Noruega; 0,08 para a Suécia; e 0,06% para o Reino Unido.

Ainda na tabela 3, observa-se que existem países em desenvolvimento com baixo impacto (abaixo da linha referência 0,09%) do PIB *per capita* na emissão de CO₂. Por exemplo, para 1% de aumento no PIB *per capita* aumenta-se a emissão de CO₂ *per capita*, respectivamente, de 0,03% para a Bulgária; 0,03% para a China; 0,06% para o Egito; 0,04% para a Índia; 0,07% para a Indonésia; 0,02% para o Cazaquistão; 0,04% para a Romênia; 0,05% para a Venezuela; e 0,02% para a Rússia.

De uma forma geral, os resultados destacados no gráfico 2A demonstram que, à medida em que se aumenta o nível relativo de renda *per capita*, diminui-se a emissão média relativa de CO₂ *per capita*. Quanto mais desenvolvida for a economia, menor será o seu nível relativo de emissão de poluentes, em função da renda *per capita*. As identificações das causas relacionadas às características das elasticidades entre emissões de CO₂ *per capita* e PIB *per capita* exige um estudo mais detalhado. Contudo, pode-se dizer que os fatores determinantes se encontram relacionados aos estágios de desenvolvimento das respectivas economias, de suas composições produtivas e das características de suas matrizes energéticas. Em especial, com relação aos países em desenvolvimento que experimentaram processos de rápida industrialização e se encontram no segmento íngreme da parte ascendente da inclinação da CAK, o crescimento da renda *per capita* não constitui o principal fator causador das emissões de CO₂, como se observa na tabela 3, outras variáveis explicativas do modelo demonstraram ser predominantes nas causalidades de emissões de CO₂ *per capita*, como será destacado a seguir.

No gráfico 2B, destacaram-se os países que apresentaram maiores impactos do uso de energia sobre a emissão de CO₂. Considera-se como referência a linha em pontilhado de elasticidade média de 0,31%. Observa-se que os países em destaque, conforme legenda, constituem-se de países em desenvolvimento que se encontram situados na América Latina (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, El Salvador, Peru), na Ásia (China, Índia, Indonésia, Cazaquistão, Filipinas), no Leste Europeu (Bulgária, Romênia, Letônia – noroeste do Leste Europeu) e África (Egito, Tunísia e Zâmbia¹⁷). Para 1% de aumento no consumo de energia ocorre 0,8% de crescimento de emissão de CO₂ *per capita* para países como Bolívia, China e El Salvador, e de 1,4% para a Índia, de 1,2% para a Indonésia e de 1,2% para as Filipinas.

Esses países caracterizam-se por apresentarem aumentos significativos no consumo de energia, como consequência do crescimento de seus setores manufatureiros no *mix* produtivo. Esses países, que se encontram no segmento íngreme da parte ascendente da inclinação da CAK, experimentaram processos de rápida industrialização, para os quais as produções de manufaturados têm aumentado

17. A Zâmbia não foi incluída nos gráficos devido a sua alta elasticidade relativa às outras variáveis explanatórias, destoando das elasticidades dos demais países, conforme pode ser observado na tabela 3.

para atender o consumo interno e exportações, exigindo maior consumo de energia, com impacto significativo na emissão de CO_2 *per capita*. As exportações desses países beneficiam as economias desenvolvidas, com a poluição evitada. Isso se dá porque os países desenvolvidos têm conduzido mudanças estruturais com predominância em serviços, e importando produtos manufaturados de indústrias sujas, o que têm desempenhado um papel fundamental no declínio de suas emissões de poluentes, como se observa no gráfico inferior do gráfico 2.

As deslocações industriais em direção ao Sudeste Asiático (Filipinas e Indonésia), ao sul (Índia) e ao leste (China), onde reside o grosso da população mundial, com um PIB *per capita* relativamente muito baixo, mas com uma faixa de população com um grau de instrução cada vez mais alto, exigem fluxos de energia progressivamente mais intensos, a fim de sustentar o aumento do nível de vida dessas populações e subsidiar a enorme capacidade produtiva que o capital internacional tem instalado na região. Com o deslocamento das atividades produtivas para a Ásia Oriental, não é de surpreender que a China e a Índia adquirissem pesos cada vez mais importantes nas emissões de CO_2 . A Índia apresenta a terceira maior demanda de energia do mundo, atrás apenas da China e dos Estados Unidos. Em especial, as matrizes energéticas da Índia e da China são dominadas por fontes intensivas em poluição. O mesmo entendimento pode ser aplicado para o Leste Europeu, onde a população possui uma renda *per capita* relativamente baixa para os padrões europeus, mas com um grau de escolaridade alto e leis ambientais menos restritivas, o que faz com que muitas indústrias da Europa Ocidental, com alta intensidade em poluentes, desloquem-se para a região em busca de mão de obra mais barata e leis ambientais menos restritivas, com consequente aumento do consumo de energia. Com relação à América Latina, o consumo de energia na região é altamente concentrado em fontes fósseis (aproximadamente 74% do consumo total, incluindo petróleo, gás e carvão); exceto o Brasil que tem 44% da energia renovável em sua matriz energética. Contudo, especialmente no Brasil e no México, o setor do transporte é o grande culpado pela alta concentração de poluentes no ar, já que 38% da poluição emitida na América Latina saem dos escapamentos de carros, ônibus e caminhões.

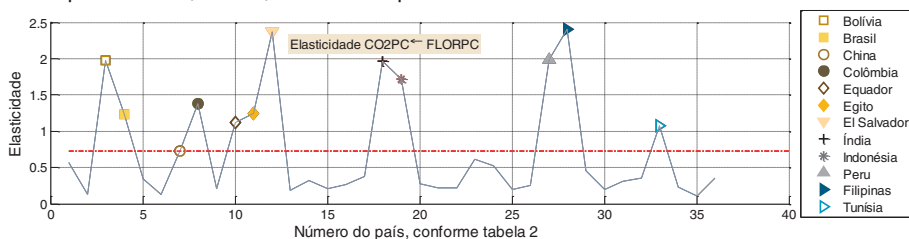
No gráfico 3A, selecionaram-se os países que apresentaram as maiores elasticidades da emissão de CO_2 em virtude da proporção de área territorial coberta por florestas, logo, a variável FLORPC. No gráfico 3A, considera-se como referência para a separação dos países com mais altos índices de poluição a linha, em pontilhado, de elasticidade média de 0,73%. Observa-se que os países em destaque, conforme legenda, são países em desenvolvimento, situados na América Latina (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, El Salvador, Peru), Ásia (China, Índia, Indonésia, Filipinas) e África (Egito, Tunísia e Zâmbia – não incluída nos gráficos, devido a sua alta elasticidade relativa). No gráfico 3B, selecionaram-se os países que apresentaram maiores elasticidades de emissão de CO_2 em função do percentual

de áreas territoriais protegidas em relação ao território total, a variável PROT. No gráfico 3B, considera-se como referência para a separação dos países em destaque a linha, em pontilhado, de elasticidade média de 0,31%. Observa-se que os países referenciados na legenda do gráfico 3B constituem os mesmos países em desenvolvimento que são referenciados para o caso do gráfico 3A, situados na América Latina, Ásia e África.

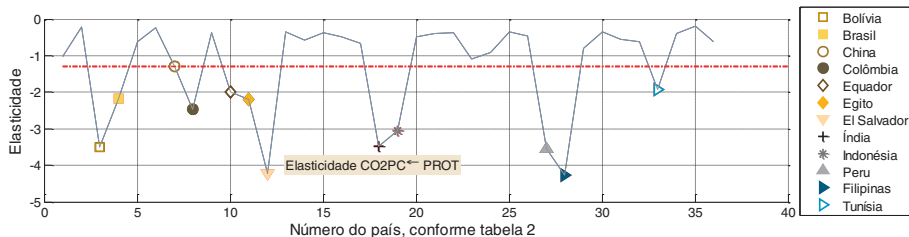
GRÁFICO 3

Evolução das elasticidades da emissão de CO₂ (variáveis FLORPC e PROT)

3A – Evolução das elasticidades da emissão de CO₂ em função da proporção de área coberta por florestas (FLORPC) – em termos percentuais



3B – Evolução das elasticidades da emissão de CO₂ em função do percentual de áreas protegidas (PROT) – em relação ao território total



Ao comparar os gráficos 3A e 3B, pode-se observar que os países que mais causam emissão de CO₂ *per capita*, em função da proporção de área territorial coberta por florestas, são também os mesmos países que apresentam as mais altas elasticidades negativas em relação ao percentual de áreas territoriais protegidas. Esses dois gráficos constituem uma imagem reversa um do outro, o que demonstra que a proporção de áreas florestais em uma economia constitui-se em um fator que contribui positivamente para a emissão de CO₂ e as áreas de florestas protegidas constituem-se em um fator que contribui para a redução da emissão de CO₂, de forma bastante elástica, atingindo elasticidades da ordem de grandeza de -4%, para El Salvador e Filipinas.

Reenfatizando, a devastação e a queima de áreas florestais constituem um dos principais fatores causadores da emissão de CO₂ para a atmosfera.

De acordo com Andreae (1991), a maior parte das queimadas ocorre nos países em desenvolvimento, nos trópicos. Sendo estes responsáveis por 87% das emissões globais de CO₂ produzidas por queimadas. O Brasil, um país com uma imensa área territorial coberta por florestas, destaca-se com grande impacto na emissão de CO₂ *per capita* pelas queimadas, com uma elasticidade que estabelece uma emissão de 1,23% de tonelada de CO₂ *per capita*, para cada 1% de área florestal. Na região Amazônica e Brasil Central ocorrem queimadas antropogênicas nas áreas de Cerrado e de Floresta Tropical que se encontram relacionadas à agricultura de subsistência na região, fazendo parte da cultura do povo que ali vive. Estas queimadas estão atreladas à forte expansão das atividades agropecuária e agrícola, em alta escala nas regiões especificadas.

A Índia, um dos países em desenvolvimento com alto índice de emissão de CO₂ *per capita*, pela proporção de áreas florestais, possui uma elasticidade da ordem de 2,0 (para cada 1% de área florestal ocorre, em média, 2% de emissões de toneladas CO₂ *per capita*). A explicação para esse comportamento encontra-se no fato de que a Índia possui 25% da população sem acesso à eletricidade, e 72% da população usando lenha para cozinhar. Isto significa que 289 milhões de indianos não têm luz elétrica em suas casas e 836 milhões não têm fontes de energia modernas para preparar seus alimentos. A matriz energética da Índia é composta pelo carvão (44,4%), seguido pelos biocombustíveis (lenha e resíduos) com 25,95%, pelo petróleo e seus derivados 20,89%, e gás natural (5,71%). Observa-se que a queima de lenha provinda de áreas florestais na Índia constitui uma importante fonte de energia, com significativa emissão de CO₂ para a atmosfera.

Verificou-se que os países em desenvolvimento, destacados no gráfico 3B, são praticamente os mesmos ilustrados no gráfico 3^a. São países que possuem grandes áreas territoriais (em consequência, grandes áreas de florestas). Com base nos resultados das elasticidades obtidas para a variável PROT, pode-se afirmar que a proteção de áreas florestais constitui um mecanismo bastante eficiente para conter a expansão de fronteiras agrícolas e de agropecuárias (e suas associadas queimadas) e/ou o uso de lenha como fonte de energia biocombustível, especialmente em países com grandes áreas florestais.

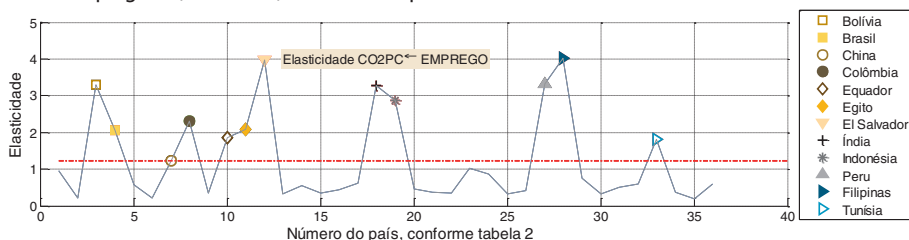
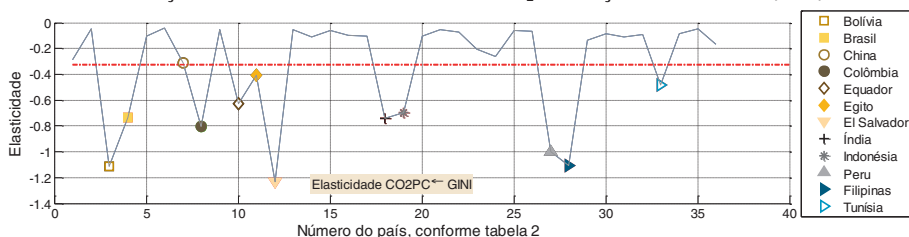
No gráfico 4A, observa-se a elasticidade na emissão de CO₂ *per capita* relativa à variável EMP (percentual da população empregada), com destaque para os países com maiores elasticidades. Toma-se como referência para a separação dos países com mais altos índices de poluição a linha de elasticidade média de $\approx 1,22\%$. Conforme legenda do gráfico 4, os países destacados são países em desenvolvimento, situados na América Latina (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, El Salvador, Peru), Ásia (China, Índia, Indonésia, Filipinas), e África (Egito, Tunísia e Zâmbia – tabela A.2, no anexo A). Para Bolívia,

El Salvador, Índia, Indonésia, Peru e Filipinas, a elasticidade da emissão de CO₂ *per capita*, em relação à proporção da população empregada, caracteriza-se de forma elástica (elasticidade maior que um). Nestes países, para 1% de aumento na proporção da população empregada tem-se impactos acima de 3,0% sobre a emissão de CO₂.

GRÁFICO 4

Evolução das elasticidades da emissão de CO₂ (variáveis EMPREGO e GINI)

4A – Evolução das elasticidades da emissão de CO₂ em função da proporção da população empregada (EMPREGO) – em termos percentuais

**4B – Evolução das elasticidades da emissão de CO₂ em função do índice Gini (GINI)**

No gráfico 4B, observa-se a elasticidade na emissão de CO₂ *per capita* relativa à variável GINI (índice de Gini), com destaque para os países com maiores elasticidades. Toma-se como referência para a separação dos países com mais altas elasticidades da emissão de poluição a linha de elasticidade média de $\approx -0,33\%$. Os países destacados são os mesmos do gráfico 4A, para a curva de elasticidade EMPR, sendo os países em desenvolvimento, situados na América Latina (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, El Salvador, Peru), Ásia (China, Índia, Indonésia, Filipinas), e África (Egito, Tunísia e Zâmbia – esta última não incluída no gráfico 4). A elasticidade da emissão de CO₂ *per capita* em relação ao índice de Gini se caracteriza de forma elástica para alguns países como Bolívia, El Salvador, Peru e Filipinas. Para esses países, 1% de aumento no índice de Gini tem impactos negativos com valores absolutos maiores que 1% sobre a emissão de CO₂.

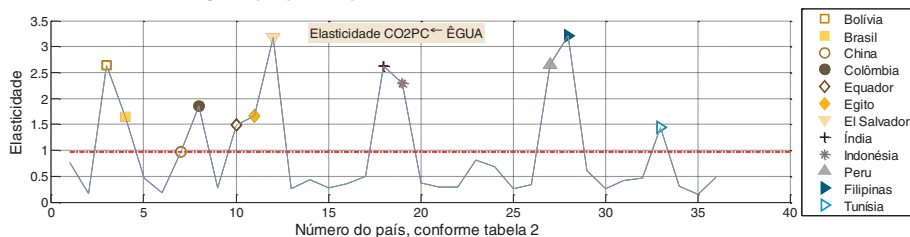
No gráfico 5A, observa-se a elasticidade na emissão de CO₂ *per capita* relativa à variável AGUA (a proporção da população com fonte de água apropriada para o consumo), com destaque para os países com maiores elasticidades. Toma-se como

referência para a separação dos países com mais altas elasticidades de emissão de poluição a linha de elasticidade média de $\approx 0.97\%$. Conforme legenda do gráfico 5, os países destacados são países em desenvolvimento, situados na América Latina (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, El Salvador, Peru), Ásia (China, Índia, Indonésia, Filipinas), e África (Egito, Tunísia e Zâmbia – tabela A.2 do anexo A). A elasticidade da emissão de CO_2 *per capita* em relação à proporção da população com fonte de água apropriada para o consumo se caracteriza de forma elástica para Bolívia, El Salvador, Índia, Indonésia, Peru e Filipinas. Para esses países, 1% de aumento na proporção da população com fonte de água apropriada para o consumo tem impactos acima de 2,5% sobre a emissão de CO_2 .

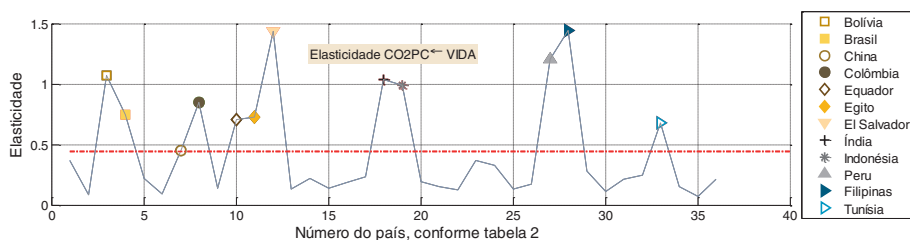
GRÁFICO 5

Evolução das elasticidades da emissão de CO_2 (variáveis AGUA e VIDA)

5A – Evolução das elasticidades da emissão de CO_2 em função da proporção da população com fonte de água apropriada para o consumo (AGUA)



5B – Evolução das elasticidades da emissão de CO_2 em função da expectativa de vida ao Nascer (VIDA) – em média de anos



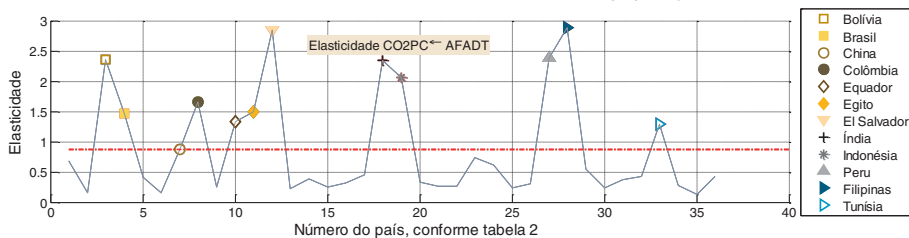
No gráfico 5B, observa-se a elasticidade na emissão de CO_2 *per capita* relativa à variável VIDA (a expectativa de vida ao nascer, em média de anos), destacando-se os países com maiores elasticidades. Toma-se como referência para a separação dos países com mais altas elasticidades de emissão de poluição a linha de elasticidade média de $\approx 0.44\%$. Conforme legenda do gráfico 5B, os países destacados são os mesmos do gráfico 5A. Ou seja, os países situados na América Latina (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, El Salvador, Peru), Ásia (China, Índia, Indonésia, Filipinas), e África (Egito, Tunísia e Zâmbia – tabela A.2 do anexo A). A elasticidade da emissão de CO_2 *per capita* em relação à expectativa de vida se caracteriza de forma

elástica para Bolívia, El Salvador, Índia, Indonésia, Peru e Filipinas. Para esses países, 1% de aumento na expectativa de vida ao nascer tem impactos maiores que 1% sobre a emissão de CO_2 *per capita*.

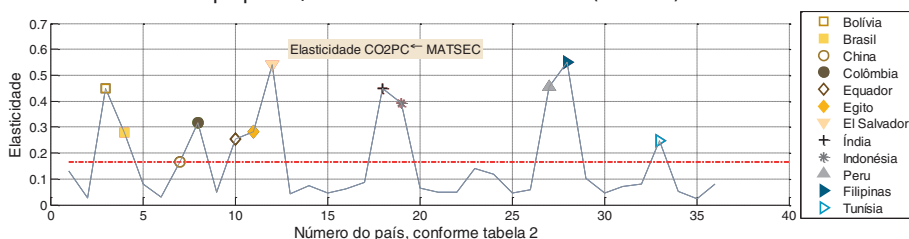
GRÁFICO 6

Evolução das elasticidades da emissão de CO_2 (variáveis AFDT e MATSEC)

6A – Evolução das elasticidades da emissão de CO_2 em relação ao percentual de alfabetização de adultos com idade acima de 15 anos (AFDT) – relativo à população



6B – Evolução das elasticidades da emissão de CO_2 em relação ao percentual da população na faixa de idade apropriada, matriculados no ensino médio (MATSEC)



No gráfico 5A, observa-se a elasticidade na emissão de CO_2 *per capita* relativa à variável AFDT (percentual de alfabetização de adultos, com idade acima de 15 anos), com destaque para os países com maiores elasticidades. Toma-se como referência para a separação dos países com mais altas elasticidades da emissão de poluição a linha de elasticidade média de $\approx 0,87\%$. Conforme legenda do gráfico 5A, os países são exatamente os mesmos países em desenvolvimento destacados nas análises anteriores. Ou seja, aqueles situados na América Latina (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, El Salvador, Peru), Ásia (China, Índia, Indonésia, Filipinas) e África (Egito, Tunísia e Zâmbia – tabela A.2 do anexo A). A elasticidade da emissão de CO_2 *per capita* em relação à variável AFDT se caracteriza de forma elástica para Bolívia, El Salvador, Índia, Indonésia, Peru e Filipinas. Para esses países, 1% de aumento na variável AFDT tem impacto acima de 2%.

No gráfico 5B, observa-se a elasticidade na emissão de CO_2 *per capita* relativa à variável educacional MATSEC (percentual da população matriculada no ensino médio), com destaque para os países com maiores elasticidades. Toma-se como referência para a separação dos países com mais altas elasticidades da emissão de poluição

a linha de elasticidade média de $\approx 0,17\%$. Conforme legenda do gráfico 5B, os países são exatamente os mesmos países em desenvolvimento destacados nas análises anteriores. Ou seja, aqueles situados na América Latina (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, El Salvador, Peru), Ásia (China, Índia, Indonésia, Filipinas) e África (Egito, Tunísia e Zâmbia – tabela A.2 do anexo A).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estruturou-se um modelo de painel de efeitos fixos para estimar a CAK, observando as diferenças entre os países na emissão de CO_2 , em virtude de seus desenvolvimentos, medidos por um conjunto de variáveis explanatórias, conforme destacado.

No estudo obteve-se uma CAK em forma de N. Na região de inclinação íngreme, com $\text{PIB per capita} \leq 70.000,00$, encontram-se os países em desenvolvimento em processos de rápida industrialização. Entre eles, alguns manifestaram as maiores elasticidades da emissão de $\text{CO}_2 \text{ per capita}$ (Argentina, Brasil, Colômbia, El Salvador, México, Peru, Filipinas, Tunísia e Zâmbia). Outros, ao contrário do esperado, a emissão de CO_2 não demonstrou elasticidades significativas com relação ao PIB, mantendo-se nos níveis de elasticidades dos países desenvolvidos, como Bulgária, China, Egito, Índia, Indonésia, Cazaquistão, Romênia, Venezuela e Rússia, por exemplo. O comportamento das economias dessa região, diferentemente das economias desenvolvidas, é fortemente sensível às variáveis explicativas exógenas introduzidas no modelo, caracterizando os efeitos do desenvolvimento. Na região da CAK de $70.000,00 \leq \text{PIB per capita} \leq 25.000,00$, o nível de emissão de $\text{CO}_2 \text{ per capita}$ desacelera gradualmente, possivelmente em relação à melhoria da qualidade ambiental, com regulamentações mais rigorosas, igualdade de renda e justiça social. Na região de $25.000,00 \leq \text{PIB per capita} \leq 60.000,00$, constata-se baixas taxas marginais de emissões de CO_2 devido ao crescimento, região praticamente plana, em que as taxas de emissões de CO_2 desaceleraram completamente. Nessa região, pressupõe-se a predominância de mecanismos pelos quais as economias desenvolvidas exportam a produção industrial suja para as economias menos desenvolvidas, intensificando as atividades de serviços e processos industriais limpos. Os países inclusos nessas faixas de renda *per capita* demonstram, como esperado, uma baixa elasticidade da emissão de $\text{CO}_2 \text{ per capita}$. A CAK obtida neste estudo apresenta a forma de N, contudo, sem demonstrar de forma evidente, o segundo estágio clássico da parte descendente da curva de U-invertido, refletindo a diminuição dos níveis de poluição *per capita*, em virtude da renda *per capita*. O terceiro estágio da CAK em formato de N, a região de $\text{PIB per capita} > 60.000,00$, possui taxas marginais de crescimento acentuados de emissões de CO_2 relativas à renda. Contudo, acontecendo em rendas consideravelmente altas, inatingível, no curto prazo, para a grande maioria das economias.

Esse aspecto da CAK indica que o PIB *per capita* é um fator de determinação dos níveis de emissões de poluente, contudo, não constituindo o único e nem o principal determinante nas emissões de CO₂, conforme destacado na análise deste estudo. Entre os fatores que impactam positivamente na emissão de CO₂ *per capita*, notou-se que os maiores responsáveis pelo aumento da poluição são por ordem decrescente: *i*) o nível de emprego da população, com elasticidade média igual 1,621%; *ii*) proporção da população com água disponível para o consumo, com elasticidade média de 1,296%; *iii*) alfabetização de adultos, com média igual a 1,163%; *iv*) proporção do território de áreas florestais, com elasticidade média de 0,971%; *v*) o uso de energia, com elasticidade média de 0,731%; *vi*) expectativa de vida, com elasticidade média de 0,531%; *vii*) percentual de matrículas no ensino médio, com elasticidade de 0,222%; e, finalmente; *viii*) PIB *per capita*, com elasticidade de 0,09%. Também notou-se que os maiores responsáveis para o decrescimento na emissão de CO₂ *per capita*, são, por ordem decrescente, em termos absolutos: *i*) o percentual de área florestal protegida, com elasticidade de -1,725%; e *ii*) o índice de Gini, com elasticidade de -0,454%.

Conforme as estimativas supracitadas, o PIB *per capita* constitui a variável explanatória com menor impacto sobre o crescimento da emissão de CO₂ *per capita*, apesar de se ter constatado, nos ajustes do modelo, uma CAK na forma de N. Foi possível perceber ainda que o impacto ambiental cresce em virtude do desenvolvimento da economia, em termos econômicos, ambientais, educacionais, sociais e qualidade de vida. Observa-se que entre os países analisados no estudo, aqueles mais significativos, em termos de elasticidades, são os mesmos em todos os segmentos utilizados como variáveis explicativas (estes são: Bolívia; Brasil; Colômbia; Equador; El Salvador; Peru; China; Índia; Indonésia; Filipinas; Egito; Tunísia; e Zâmbia) – exceção se faz relativa à variável PIB *per capita*.

Contrariamente ao reivindicado pela CAK, verificou-se que a emissão de CO₂ encontra-se muito mais relacionada com o desenvolvimento das economias de baixa renda e de grandes populações. Os países destacados como os mais significantes são os de renda *per capita* relativamente baixa e bastantes populosos. A população total destes países é de aproximadamente 50% da população mundial. Estas nações evoluíram seus estágios de desenvolvimento econômico devido ao processo de industrialização, à intensificação do consumo interno e ao incremento das exportações, consequentemente, com significativo impacto no sistema produtivo mundial. Tais países se apresentaram como países de maiores impactos na emissão de CO₂, devido: *i*) ao uso de energia; *ii*) ao nível de emprego; *iii*) ao índice Gini; *iv*) à expectativa de vida; *v*) à proporção de água adequada para o consumo; *vi*) à alfabetização de adultos; *vii*) à proporção de matriculados no ensino médio; *viii*) à proporção territorial de áreas florestais; e, finalmente, *ix*) ao percentual de áreas florestais protegidas.

Em virtude destas conclusões, imagina-se não haver razão para se acreditar que a melhoria na qualidade ambiental seja algo que ocorra naturalmente, à medida que as nações se tornam mais ricas. Entende-se que, com a prosperidade econômica, a sociedade tende a dedicar-se mais aos aspectos não econômicos como a proteção ambiental, com base em leis mais severas e efetivas que, por sua vez, afetam a adoção de novas tecnologias. No entanto, imagina-se que para tornar as políticas ambientais mais eficientes seria necessário estabelecer políticas ambientais de nível global que causem resultados mais homogêneos para o conjunto das economias. De uma forma indireta, os resultados induzem que é preciso que o mundo se torne mais igualitário, sobretudo no que se refere às políticas ambientais de redução de poluição e aos níveis de desenvolvimento sociais e econômicos. O desenvolvimento econômico se caracteriza por altos níveis de emprego, geração de novas tecnologias, geração de energia a partir de fontes limpas, grandes proporções territoriais de áreas florestais protegidas, altos níveis de educação, e assim por diante; o desenvolvimento social se caracteriza pela eliminação das desigualdades sociais, saúde e qualidade de vida para a população. Também, para que haja homogeneização na diminuição das emissões de poluentes, é necessário que haja difusão – em nível global – do uso de inovações tecnológicas, tanto no que se refere à produção de energias limpas quanto ao uso das melhores tecnologias industriais.

ABSTRACT

In this study, it is structure a panel model to estimate the Environmental Kuznets Curve, noting the differences between countries in the CO₂ emissions, as function of the social and economic developments. The relationship between GDP *per capita* and CO₂ *per capita* emissions behaves according to the forecast of the Environmental Kuznets Curve as N. The results showed that GDP *per capita* is the explanatory variable with less impact on the emissions of CO₂ *per capita*, and that the environmental impact grows mainly by development of the economies (economic and social developments and quality of life).

Keywords: environmental Kuznets curve; greenhouse gas; CO₂ emission; panel data model.

REFERÊNCIAS

- ALAM, M. J. *et al.* Energy consumption, carbon emissions and economic growth nexus in Bangladesh: cointegration and dynamic causality analysis. **Energy Policy**, v. 45, p. 217-225, 2012.
- ANDREAE, M. O. **Biomass burning – its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate, in Global Biomass Burning: atmospheric, climatic and biospheric implications.** Cambridge: MIT Press, J. S. Levine, p. 3-21, 1991.
- ANSELIN, L.; REY, S. Properties of tests for spatial dependence in linear regression models. **Geographical Analysis**, v. 23, p. 112-131, 1991.

APERGIS, N.; PAYNE, J. E. CO₂ emissions, energy usage, and output in Central America. **Energy Policy**, Elsevier, v. 37, n. 8, p. 3282-3286, 2009.

_____. The emissions, energy consumption, and growth nexus: evidence from the commonwealth of independent states. **Energy Policy**, Elsevier, v. 38, n. 1, p. 650-655, 2010a.

_____. The causal dynamics between coal consumption and growth: Evidence from emerging market economies. **Applied Energy**, Elsevier, v. 87, n. 6, p. 1972-1977, 2010b.

ARRHENIUS, S. On the influence of carbonic acid upon the temperature of the ground. **London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 41, n. 5, p. 237-276, 1896.

ARROW, K. *et al.* Economic growth, carrying capacity and the environment. **Science**, v. 268, n. 5217, p. 520-521, 1995.

BARRETT, S.; GRADDY, K. Freedom, growth, and the environment – Environment and Development. **Economics**, v. 5, n. 4, p. 433-456, 2000.

BASTOS, P. P. Z. A economia política do novo desenvolvimentismo e do social desenvolvimentismo. **Economia e Sociedade**, v. 21, n. especial, p. 779-810, 2012.

BHATTARAI, M.; HAMMIG, M. Institutions and the environmental Kuznets curve for deforestation: a crosscountry analysis for Latin America, Africa and Asia. **World Development**, v. 29, n. 6, p. 995-1010, 2001.

BROWN, K.; PEARCE, D. W. **The causes of tropical deforestation**, UCL press London, 1994.

CALLENDAR, G. S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. **Quarterly Journal Royal Meteorol. SOL**, n. 64, p. 223, 1938.

CARNEIRO, R. M. Velhos e novos desenvolvimentismos. **Economia e Sociedade**, v. 21, n. especial, p. 749-778, 2012.

COLE, M. A. Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. New York: **Ecological Economics**, v. 48, p. 71-81, 2004.

COOK, R. D. S. WEISBERG. Diagnostics for heteroscedasticity in regression. **Biometrika**, v. 70, p. 1-10, 1983.

COONDOO, D.; DINDA, S. Causality between income and emission: a country group specific econometric analysis. **Ecological Economics**, n. 40, p. 351-367, 2002.

DEACON, R.; NORMAN, C. S. **Does the environmental Kuznets curve describe how individual countries behave?** University of California at Santa

Barbara, Department of Economics, UC, Santa Barbara, 2004a. (Economics Working Paper Series qt6gm8164w).

_____. **Is the environmental Kuznets curve an empirical regularity?** University of California at Santa Barbara, Department of Economics, UC, Santa Barbara, 2004b. (Economics Working Paper Series qt2m44f7kr).

DE BRUYN, S. M. Explaining the environmental Kuznets curve: structural change and international agreements in reducing Sulphur emissions. **Environment and Development Economics**, v. 2, n. 4, p. 485-503, 1997.

DE BRUYN, S. M.; VAN DEN BERGH, J. C. J. M.; OPSCHOOR, J. B. Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. **Ecological Economics**, v. 25, p. 161-175, 1998.

DUPAS, G. **Economia global e exclusão social: pobreza, emprego, estado e o futuro do capitalismo**. São Paulo: Paz e Terra, 1999.

FOURIER, J. B. J. **Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires**. Annales de Chimie et de Physique, v. 27, p. 136-167, 1824.

_____. Memoire sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planétaires. **Memoires de l'Académie Royale des Sciences**, v. 7, p. 569-604, 1827. Disponível em : <<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k32227.image.f808.tableDesMatières.langEN>>.

FUJII, H.; MANAGI, S. Which industry is greener? An empirical study of nine industries in OECD countries. **Energy Policy**, v. 57, p. 381-388, 2013.

GENTILI, P. Educar para o desemprego: a desintegração da promessa integradora. In: FRIGOTTO, G. **Educação e crise do trabalho**: perspectivas de final de século. Petrópolis, RJ: Vozes, 1998.

GILLES, M. Sustainable development in poor and formerly poor nations. **Houston Business Review**, v. 6, p. 40, 1997.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. **Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement**. National Bureau of Economic Research Working Papers, Cambridge, n. 3914, 1991.

_____. Economic growth and the environment. **Quarterly Journal of Economics**, Cambridge, v.110, n. 2, p. 353-377, 1995.

GUJARATI, D. N. **Econometria Básica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 4th. ed. Tradução de Maria José Cyhlar Monteiro, 2006.

HAUSMAN, J. A. Specification Tests in Econometrics. **Econometrica**, v. 46 n. 6, p. 1251-1271, 1978.

HE, J. **Is the environmental Kuznets curve hypothesis valid for developing countries?** Montreal: Université de Sherbrooke, 2007. (Working paper). Disponível em: <<http://ideas.repec.org/S>>.

HSIAO, C. **Analysis of panel data**. Cambridge University Press, 2003.

JAUNKY, V. C. The CO₂ emissions-income nexus: evidence from rich countries. **Energy Policy**, v. 39, p. 1228-1240, 2011.

JAYANTHAKUMARAN, K.; VERMA, R.; LIU, Y. CO₂ emissions, energy consumption, trade and income: a comparative analysis of China and India. **Energy Policy**, v. 42, p. 450-460, 2012.

KEY WORLD ENERGY STATISTICS. **International Energy Agency**. 2013.

KHANNA, N. The income elasticity of non-point source air pollutants: revisiting the environmental Kuznets curve. **Economics Letters**, v. 77, p. 387-392, 2002.

KIEHL, J. T.; KEVIN, E. T. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 2, p. 197-208, 1997.

KOVÁCS, I. **As metamorfoses do emprego: ilusões e problemas da sociedade da informação**. Oeiras, Celta Editora, 2002.

KUZNETS, S. Economic growth and income inequality. **American Economic Review**, v. 45, p. 1-28, 1955.

LI, H.; GRIJALVA, T.; BERRENS, R. P. Economic growth and environmental quality: a meta-analysis of environmental Kuznets curve studies. **Economic Bulletin**, v. 17, n. 5, p. 1-11, 2007.

MARTINEZ-ZARZOSO, I.; BENGOCHEA-MORANCHO, A. Pooled mean group estimation of an environmental Kuznets curve for CO₂. **Economics Letters**, Elsevier, v. 82, n. 1, p. 121-126, 2004.

MUNASINGHE, M. Rising temperatures, rising risks: making development more sustainable will help address climate change. **Finance and Development**, v. 45, n. 1, p. 37-41, 2008.

NAKAMURA, S. **Applied numerical methods**. PTR Prentice Hall, New Jersey, 1992.

NARAYAN, P. K.; NARAYAN, S. Carbon dioxide emissions and economic growth: panel data evidence from developing countries. **Energy Policy**, Elsevier, v. 38, n. 1, p. 661-666, 2010.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **UNSTATS Millennium Indicators**. Disponível em: <<http://unstats.un.org/unsd/mdg/Default.aspx>>. Acesso em: 21 nov. 2013a.

_____. **Millennium Development Goals Report 2013**. Disponível em: <<http://unstats.un.org/unsd/mdg/Resources/Static/Products/Progress2013/English2013.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2013b.

ORUBU, C.O.; OMOTOR, D. G. Environmental quality and economic growth: searching for environmental Kuznets curves for air and water pollutants in Africa. **Energy Policy**, v. 39, p. 4178-4188, 2011.

OPSCHOOR, J. B. Ecologische duurzame economische ontwikkeling: een theoretisch idee en een weerbarstige praktijk. In: NIJKAMP, P.; VERBRUGGEN, H. (Eds.). **Het Nederlands Milieu in de Europese Ruimte**: preadviezen van de koninklijke vereniging voor staathuishoudkunde. Stenfert Kroese, Leiden, p. 77-126, 1990.

OZTURK, I.; ACARAVCI, A. The causal relationship between energy consumption and GDP in Albania, Bulgaria, Hungary and Romania: evidence from ARDL bound testing approach. **Applied Energy**, Elsevier, v. 87, n. 6, p. 1938-1943, 2010.

PAYNE, J. E. On the dynamics of energy consumption and output in the US. **Applied Energy**, v. 86, n. 4, p. 575-577, 2009.

PORTER, M. E.; VAN DER LINDE, C. Towards a new conception of the environmental-competitiveness relationship. **Journal of Economic Perspectives**, v. 9, p. 97-118, 1995.

RICHMOND, A. K.; KAUFMANN, R. K. Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions? **Ecological Economics**, Elsevier, v. 56, n. 2, p.176-189, 2006.

SELDEN, T. M.; SONG, D. Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air Pollution Emission? **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 27, p.147-162, 1994.

SHAFIK, N.; BANDYOPADHYAY, S. **Economic growth and environmental quality**: time series and cross-country evidence. Washington: World Bank, background paper for the World Development Report, 1992.

SMULDERS, S. Economic growth and environmental quality. In: FOLMER, H.; GABEL, L. (Eds.). **Principles of environmental and resource economics**. Edward Elgar, Cheltenham, Chapter 20, 2000.

STAGL, S. **Delinking economic growth for environmental degradation? A literature survey on the environmental Kuznets curve hypothesis**. Wirtschaftsuniversitat Wien, 1999. (Working Paper, n. 6). Disponível em: <<http://epub.wu-wien.ac.at/epubS>>. Acesso em: 5 dez. 2013.

STERN, D. I. The rise and the fall of the Environmental Kuznets Curve. **World Development**, v. 32, n. 8, p. 1419-1439, 2004.

STEPHEN H. S. In: BENGTSSON, L. O.; HAMMER, C. U. (Eds.). **Geosphere-biosphere interactions and climate**. Cambridge: University Press, 2001. p. 90-91.

SURI, V.; CHAPMAN, D. Economic growth, trade and the energy: implications for the environmental Kuznets curve. **Ecological Economics**, New York, v. 25, p. 195-208, 1998.

TYNDALL, J. **Note on the transmission of radiant heat through gaseous bodies – proceedings of the royal society of London**. v. 10, p. 37-39, 1859.

_____. On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption, conduction – the Bakerian lecture. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, Series 4, v. 22, p. 169-194, p. 273-285, 1861.

WELLS, J. R. **Subconsumo, tamanho de mercado e padrões de gastos familiares no Brasil**. São Paulo: Cebrap, n. 17, 1976.

WDI – WORLD DEVELOPMENT INDICATORS. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

WOOD, R. W. Note on the Theory of the Greenhouse. **The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, series 6, v. 17, p. 319-320, 1909.

(Originais submetidos em maio de 2013. Última versão recebida em dezembro de 2014. Aprovada em fevereiro de 2015.)

ANEXO A

TABELA A.1
Testes de multicolinearidade: fator de inflação de variância (FIV) e o índice condicional (IC), utilizando a função COLIN do STATA-12

Variável	Fator de inflação de variância, FIV				Índice condicional		
	VIF	SQRT-VIF	Tolerância	Squared		Autovalores	Índice
FLORPC	1.34	1.16	0.75	0.25	1	10.396	1.000
PROT	1.34	1.16	0.75	0.25	2	0.632	4.057
EMPR	1.86	1.36	0.54	0.46	3	0.468	4.712
ENER	2.05	1.43	0.49	0.51	4	0.232	6.699
PIBCAPC	2.17	1.47	0.46	0.54	5	0.187	7.448
GINI	1.92	1.38	0.52	0.48	6	0.047	14.889
AGUA	2.57	1.59	0.39	0.61	7	0.035	17.334
VIDA	2.23	1.48	0.45	0.55	8	0.021	22.203
AFADT	2.83	1.68	0.35	0.65	9	0.016	25.491
MATSEC	2.78	1.66	0.36	0.64	10	0.013	28.279
					11	0.012	29.434
Média VIF	2.13					Condição Number	29.434
Cálculo do índice de condição a partir dos autovalores e linhas escalonadas Det(correlation matrix) 0.054.							

Elaboração dos autores.

TABELA A.2
Teste de heterocedasticidade de Cook e Weisberg (1983), utilizando a função htest do STATA

Variáveis	Escore	GL	p-valor	Variáveis	Escore	GL	p-valor
PIBCAPC	72.70	1	0.00	ENER	6.00	1	0.01
PIBCAPC2	51.18	1	0.00	GINI	1	3.78	0.05
PIBCAPC3	23.37	1	0.00	AGUA	1	14.12	0.00
FLORPC	1.19	1	0.27*	VIDA	1	14.28	0.00
PROT	1.41	1	0.24*	AFADT	1	36.32	0.00
EMPR	31.74	1	0.00	MATSEC	1	38.10	0.00
Resultado combinado							
Escore		GL		p-valor			
174.78		13		0.0000			

Elaboração dos autores.
Obs.: GL significa graus de liberdade e o * representa os p-valores das respectivas variáveis com resíduos homoscedástico.

TABELA A.3
Esquematização dos testes de escolha do modelo de painel que melhor ajusta a base de dados

Modelo	Teste	Hipótese	Resultado
TESTE 1	M ₁ : $Y_{it} = \alpha_i + \beta_{it}^{tr} X_{itk} + \epsilon_{it}$, com $i = 1, 2, \dots, N$ e $t = 1, 2, \dots, T$	$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_N$ $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$	F(540,37) $\approx 44,11$
	M ₂ : $Y_{it} = \alpha^* + \beta^{tr} X_{it} + \epsilon_{it}$, com $i = 1, 2, \dots, N$ e $t = 1, 2, \dots, T$	H_1 : Os interceptos α_i ou os coeficientes de inclinação β_i não são todos iguais	$p - value$ $\approx 4,41$ $\times 10^{-24}$
	M ₁ : $Y_{it} = \alpha_i + \beta_{it}^{tr} X_{itk} + \epsilon_{it}$, com $i = 1, 2, \dots, N$ e $t = 1, 2, \dots, T$	$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$ H_1 : Os coeficientes de inclinação β_i não são todos iguais	(504,37) $\approx 1,5101$
	M ₃ : $Y_{it} = \alpha_i + \beta^{tr} X_{it} + \epsilon_{it}$, com $i = 1, 2, \dots, N$ e $t = 1, 2, \dots, T$	$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$ H_1 : Os coeficientes de inclinação β_i não são todos iguais	$p - value$ $\approx 0,061638$
TESTE 2	M ₂ : $Y_{it} = \alpha^* + \beta^{tr} X_{it} + \epsilon_{it}$, com $i = 1, 2, \dots, N$ e $t = 1, 2, \dots, T$	$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_N$, dado que $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$ H_1 : Os interceptos α_i não são todos iguais, dado que $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$	F(36, 541) $F \equiv 242,89$
	M ₃ : $Y_{it} = \alpha_i + \beta^{tr} X_{it} + \epsilon_{it}$, com $i = 1, 2, \dots, N$ e $t = 1, 2, \dots, T$	$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_N$, dado que $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$ H_1 : Os interceptos α_i não são todos iguais, dado que $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$	$p - value$ $\approx 0,061638$
	M ₁ : $Y_{it} = \alpha_i + \beta_{it}^{tr} X_{itk} + \epsilon_{it}$, com $i = 1, 2, \dots, N$ e $t = 1, 2, \dots, T$	$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_N$, dado que $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$ H_1 : Os interceptos α_i não são todos iguais, dado que $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$	$p - value$ $\approx 0,061638$
	M ₂ : $Y_{it} = \alpha^* + \beta^{tr} X_{it} + \epsilon_{it}$, com $i = 1, 2, \dots, N$ e $t = 1, 2, \dots, T$	$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_N$, dado que $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$ H_1 : Os interceptos α_i não são todos iguais, dado que $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_N$	$p - value$ $\approx 0,061638$

Fonte: Hsiao (2003, p. 15-19).
Obs.: 1. Nos modelos, α^* um parâmetro de intercepto; $\alpha_i^{tr} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]$; $\beta_i^{tr} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K]$ com K igual ao número de variáveis exógenas, N o número de país, T o número de anos amostrados, com $i = 1, 2, \dots, N$, $t = 1, 2, \dots, T$. Ainda no modelo, S_R representa a soma do quadrado residual do modelo restrito; S_R a soma do quadrado residual do modelo irrestrito.
2. No TESTE 1, o teste F é estimado com $[(N - 1)(K + 1)]$ graus de liberdade no numerador e $[N(T - K - 1)]$ graus de liberdade no denominador; No TESTE 2, o teste F é estimado com $[(N - 1)K]$ graus de liberdade no numerador e $[N(T - K - 1)]$ graus de liberdade no denominador; No TESTE 3, o teste F é estimado com $[(N - 1)]$ graus de liberdade no numerador e $[N(T - K - 1)]$ graus de liberdade no denominador.