

CRESCIMENTO ECONÔMICO BRASILEIRO E EMISSÃO DE CO₂

BRAZILIAN ECONOMIC GROWTH AND THE EMISSION OF CO₂

Cleyzer Adrian Cunha

Universidade Federal de Goiás – GO – Brasil

Paulo Roberto Scalco

Universidade Federal de Goiás – GO – Brasil

Resumo: O objetivo deste trabalho é verificar empiricamente a relação entre o produto *per capita* e a emissão de CO₂ no Brasil no período de 1980 a 2006. O escopo do trabalho se restringiu a este recurso natural devido ao seu papel para a atividade econômica, como importante insumo no processo produtivo na matriz energética brasileira. Dentre os principais resultados, destaca-se que existe uma relação de longo prazo e de causalidade simultânea entre as variáveis PIB *per capita* e emissão de CO₂. Essa evidência, somada ao fato de que as séries utilizadas não eram estacionárias em nível, impossibilitou estimar a Curva de Kuznets Ambiental (EKC), que é a principal base teórica utilizada nos trabalhos empíricos relacionados ao tema. Nesse sentido, um modelo VAR/VEC foi estimado e a elasticidade encontrada entre crescimento econômico e emissão de CO₂ foi de 7,32, ou seja, no longo prazo, podemos inferir que um aumento de 1% no PIB per capita eleva em 7,32%, as emissões de CO₂ decorrentes da utilização de petróleo.

Palavras-chave: Curva de Kuznets Ambiental, crescimento econômico e emissão.

Abstract: The objective of paper is verifying empirically the relationship between GDP per capita and CO₂ emissions in Brazil in the period 1980-2006. The scope of work was limited to this natural resource due to its role in economic activity, as an important input in the production process in the Brazilian energy matrix. Among the main results is that there is a long-term relationship and simultaneous causality between variables and GDP per capita CO₂ emissions. This evidence, coupled with the fact that the series used were not stationary in level, impossible to estimate the Environmental Kuznets Curve (EKC), which is the main theoretical basis used in empirical work related to the theme. The VAR / VEC has been estimated and found elasticity between economic growth and CO₂ emission was 7.32, ie, in the long run, we can infer that an increase of 1% in GDP per capita increases by 7, 32% CO₂ emissions.

Key Words: Environmental Kuznets Curve, Economic Growth and emissions.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o desenvolvimento econômico e o aumento populacional brasileiro disponibilizaram, a cada cidadão, maiores quantidades de bens e serviços. Todavia, o referido avanço intensificou o consumo de energia nas suas mais diversas formas dentro da matriz energética brasileira. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia do Brasil (MME), apenas o consumo final de

energia aumentou, entre 1970 e 2004, de 62.106 mil tep¹ para 191.128 mil tep, ou seja, um crescimento de 208%, em 34 anos (MME, 2007).

Por conseguinte, o aumento progressivo do uso de combustíveis fósseis ocorreu em paralelo ao aumento das atividades industriais, às mudanças no uso do solo, ao aumento da frota de veículos e às outras atividades. Em 1970 cerca de 37% do consumo final de energia era proveniente de derivados de petróleo; entretanto, entre 1970 e 2004 o consumo aumentou cerca de três vezes e meia, o que elevou a participação para 43,2% (MME, 2007). Não obstante, esse fato torna-se importante, pois a queima de combustíveis fósseis está entre as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa².

Diante do cenário de elevação da queima de combustíveis fósseis, há uma necessidade ecológica de os governos limitarem e regulamentarem as emissões desses gases, com o intuito de alcançar impactos ambientais menos danosos. Essas ações foram aceleradas pela intensificação do efeito estufa, reflexo da progressiva interferência do homem no sistema climático do planeta, que passa por um processo de aquecimento global, trazendo consequências irreversíveis e possivelmente catastróficas para as sociedades humanas e para os ecossistemas e sua biodiversidade.

Entretanto, a preocupação com o meio ambiente não pode se dissociar da relevância do crescimento econômico para a sociedade. O meio ambiente é fundamental para a atividade econômica e seu crescimento provém de fontes de recursos necessários para a produção de bens e serviços e exerce importante papel absorvendo e processando derivados não desejáveis do processo produtivo, como poluição e lixo. Além disso, o meio ambiente contribui amenizando riscos à economia e à atividade social, tais como: redução dos riscos de enchentes, regulação do clima local, fornecimento de água limpa, entre outros. (Everett et al., 2010).

Considerando-se especificamente os derivados de petróleo, o Brasil demonstra uma grande dependência desse recurso natural. Embora sua fonte de energia elétrica seja predominante renovável (usinas hidroelétricas), a eletricidade corresponde a apenas 16% do consumo final de energia. Os derivados de petróleo representam 43%, segundo MME (MME, 2007). Dessa forma, ao se considerar que o crescimento da economia possui uma relação direta de causalidade e dependência com a demanda e, conseqüente, oferta de energia, num cenário de perspectivas favoráveis para o crescimento econômico, a demanda e oferta de combustíveis fósseis devem continuar crescendo a taxas crescentes³.

Nesse sentido, existe a necessidade de se conciliar desenvolvimento e preservação do meio ambiente de forma a garantir a melhoria da qualidade de vida em todos os aspectos, inclusive ambiental. A necessidade mundial da busca

¹ Toneladas equivalente petróleo (tep).

² Principais gases de efeito estufa: vapor d'água (H₂O), Ozônio (O₃), Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Clorofluorcarbonos (CFCs), Hidrofluorcarbonos (HFCs) e Perfluorcarbonos PFCs).

³ A relação entre crescimento econômico e demanda por energia pode ser representada pela elasticidade-renda da demanda por energia. Na década de 1970 a elasticidade era 0,57; entretanto, na década de 2000, a elasticidade-renda já ultrapassava o valor de 1,2 (MME, 2007).

de novas fontes renováveis que garantam desenvolvimento socioeconômico mundial se deve tanto ao fato da comprovada extinção do petróleo em médio prazo, como também das emissões de gases de efeito estufa.

Isso gerou repostas mundiais como em 1987, com o Relatório de *Brundtland*, da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (*World Commission on Environmental and Development – WCED*), que apresentou a possibilidade de um desenvolvimento sustentável, que indica que as economias podem crescer de forma sustentável sem significativas mudanças para o sistema econômico.

O tema mudanças climáticas foi abordado e incluído oficialmente na "Conferência das Nações Unidas para o Ambiente e Desenvolvimento" ou simplesmente ECO-RIO 92. Por conseguinte, o acordo entrou em vigor em 1994, quando os vários países se comprometeram estabilizar as emissões e as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera a um nível que impedisse as interferências antrópicas de causar danos ao sistema climático, porém assegurando a produção de alimentos e o crescimento econômico de maneira sustentável.

Ainda nesse contexto, o documento *Earth Summit* elaborado na conferência ECO-RIO em associação ao Protocolo de Kyoto, fruto do encontro de mesmo nome realizado em 1997, reforçaram a atenção mundial para as consequências do aquecimento global provocado pelo efeito estufa. Nesse sentido, o Protocolo de Kyoto estabeleceu metas para emissões dos gases para um período compreendido entre 2008 e 2012, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, que financia projetos que possam gerar reduções certificadas de emissão e o comércio dessas emissões.

Com muitas fontes de recursos naturais e serviços de ecossistemas escassos ou sob pressão, alcançar o crescimento econômico sustentável significa dissociar a produção de bens e serviços de seus impactos ambientais⁴. Isto significa consumir recursos ambientais de uma maneira sustentável, por meio do aumento da eficiência ou por novas técnicas de produção e *design* de produtos.

Sendo assim, o objetivo geral do trabalho foi investigar a relação entre crescimento econômico e emissão de CO₂, na economia brasileira, no período de 1980 a 2006. Especificamente, pretende-se analisar a relação de curto e de longo prazo entre o crescimento da economia brasileira e as emissões de CO₂, provenientes do consumo de petróleo.

Para tanto, este artigo está organizado em cinco seções, incluindo esta introdução. Na próxima seção é feita uma breve revisão de literatura sobre a relação entre crescimento econômico e meio ambiente e na terceira seção são apresentados os dados e os procedimentos utilizados para análise. Na quarta seção, os resultados da investigação são apresentados e discutidos em consonância

⁴ No contexto de dissociação da produção, existe o conceito de dissociação absoluta que ocorre quando a degradação ambiental (representada por alguma variável ambiental de interesse) é estável ou decrescente, enquanto a economia percorre uma trajetória de crescimento (Everett et al., 2010).

com a revisão de literatura e empírica. Por fim, na quinta e última seção, são apresentadas as considerações finais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Depois do estudo do Clube de Roma, na década de 70, "Limites para o crescimento", a ciência economia passou a assumir o papel do meio ambiente nas questões econômicas (Meadows *et al.*, 1972). Em 1987, surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável no estudo "Nosso Futuro Comum". Novos estudos se seguiram, tais como CNUMAD-Rio-92, no Brasil, e o WSSDJ- Johannesburg, na África do Sul e Protocolo de Kyoto.

O meio ambiente desempenha um papel-chave na economia como fonte de insumo no processo produtivo e também por meio de outros serviços que ele provém. Recursos ambientais, tais como minérios e recursos fósseis, permitem a produção de bens e serviços e outros serviços como sequestro de carbono, purificação do ar e da água, proteção contra intempéries climáticas, etc., além de darem suporte à atividade econômica, também são vitais para o bem-estar, provendo oportunidades de recreação, saúde e muito mais (EVERETT *et al.*, 2010).

A relação entre crescimento econômico e qualidade ambiental é frequentemente representada pela curva de Kuznets Ambiental (EKC). Ela reflete a hipótese de uma relação, com formato de *U* invertido, entre o produto (PIB) *per capita* e alguma variável ambiental. De forma geral, a curva pode ser explicada como: na medida em que o PIB *per capita* cresce, ocorre degradação ambiental; entretanto, depois de certo ponto, os aumentos do PIB *per capita* levam a redução nos efeitos prejudiciais ao meio-ambiente (EVERETT *et al.*, 2010 e GROSSMAN e KRUEGER, 1993 e 1995).

Especificamente, existem várias teorias que podem ser utilizadas para fundamentar o formato da curva EKC. Primeiramente, para níveis mais baixos de renda, o combate à poluição seria indesejável, pois os indivíduos estariam em melhor situação usando toda sua dotação orçamentária para seu consumo básico; entretanto, a partir de um certo nível, alguns indivíduos começariam a considerar o *trade-off* entre qualidade ambiental e consumo. Por consequência, a degradação ambiental aumentaria, contudo a taxas menores e, finalmente, atingiria determinado ponto de inflexão. A partir desse ponto, as despesas na redução da degradação dominariam, na medida em que os indivíduos preferissem qualidade ambiental sobre consumo e, portanto, a degradação ambiental reduziria, enquanto ocorre aumento econômico.

Outra explicação factível também pode ser encontrada no progresso técnico, na mudança comportamental e no modelo de crescimento econômico. Com relação ao primeiro, as firmas, inicialmente, expandiriam sua produção tão rápido quanto possível; entretanto, como a tecnologia envolve o processo produtivo, com o tempo eles se tornariam mais limpos e mais eficientes em termos de utilização de recursos. A segunda teoria estabelece que a sociedade está interessada, num primeiro momento, em maiores níveis de renda, independente da

forma como são alcançados; entretanto, depois de um certo ponto, aspectos relacionados à qualidade de vida, incluindo meio-ambiente, são considerados e, portanto, ocorre uma mudança de comportamento. Por fim, o padrão de desenvolvimento de uma economia pode, normalmente, ser caracterizado pela mudança do padrão da atividade econômica. Num primeiro estágio, a economia concentra-se em torno do setor primário (extração e agricultura, por exemplo). Posteriormente, com o aumento da renda e da demanda por bens de consumo, a economia passa para o segundo estágio, onde ocorre a mudança da concentração da atividade econômica do setor primário, para o setor secundário (indústria). Por fim, no terceiro estágio, a sociedade move-se do setor secundário para o setor terciário (serviços) caracterizado por níveis muito menores de poluição⁵ (EVERETT *et al.*, 2010).

O primeiro estudo científico que observou a relação existente na curva EKC foram os trabalhos de Grossman e Krueger (1993 e 1995). Os autores investigaram a relação entre PIB *per capita* e alguns indicadores ambientais e chegaram à conclusão de que não existe uma relação estável entre crescimento econômico e deterioração ambiental. As evidências indicavam uma relação semelhante à curva EKC e, embora diferente, entre os diversos tipos de poluentes analisados, na maioria dos casos, o ponto de inflexão da curva EKC era alcançado em nível de renda *per capita*, inferior a US\$ 8.000⁶. Estudos mais recentes, entretanto, estimam o ponto de inflexão em torno de US\$ 34.000 (EVERETT *et al.*, 2010).

Nesse contexto, diversas formas funcionais e modelos econométricos procuraram corroborar a hipótese da EKC (Cropper e Griffiths, 1994; Shubert e Dietz, 2001; Carvalho e Almeida, 2010, entre outros). Em contrapartida, vários autores atentaram apenas para a relação empírica; por isso, diversos trabalhos surgiram com a finalidade de criticar a hipótese da EKC, dentre os quais citam-se os de Arrow *et al.* (1996), de Bruyn e Heintz (2000), de Ekins (2000), e de Harbaugh *et al.* (2001).

As principais críticas, quanto à relevância da EKC, dizem respeito primeiro, à limitação das análises, normalmente restritas a um conjunto reduzido de poluente. Dessa forma, nem sempre a relação proposta é comprovada para conceitos mais gerais, ou medidas mais agregadas de degradação ambiental (por exemplo, não existem evidências de uma relação EKC com a Pegada Ecológica⁷); em segundo lugar, as evidências estatísticas nem sempre se mostram robustas. Os resultados são sensíveis ao modelo matemático utilizado. Além disso, países com níveis de renda similar apresentam desempenho completamente diferente, com relação à

⁵ Entre todas as teorias levantadas, a última, referente ao modelo de crescimento econômico, é a menos aplicável, pois num mundo crescentemente globalizado, as economias têm se movido do primeiro para o terceiro estágio sem que isso implique a redução dos níveis globais de poluição. As evidências sugerem que as atividades mais poluentes estão sendo exportadas dos países desenvolvidos para países em desenvolvimento, sem que ocorra uma redução da poluição em nível global (Everett *et al.*, 2010).

⁶ Preços de 1988 (Grossman e Krueger, 1995).

⁷ Uma medida agregada de pressão humana sobre recursos ambientais (Everett *et al.*, 2010).

qualidade ambiental, rejeitando, assim, qualquer indicação de convergência (EVERETT *et al.*, 2010).

Portanto, percebe-se que a relação entre crescimento econômico e meio ambiente é complexa e toma um carácter multidimensional e, embora existam algumas evidências da relação EKC para certos países e para certos poluentes, ela ainda não pode ser generalizada. Entretanto, Everett *et al.* (2010) destacam que, mesmo que as evidências não sejam conclusivas, ainda assim, pode-se retirar alguns aspectos importantes dessa discussão que são úteis na investigação dos determinantes da relação entre crescimento econômico e meio ambiente. Os autores fazem referência a quatro efeitos: o efeito escala, o efeito composição, o efeito técnico e por último mudança nas preferências da sociedade.

O efeito escala está relacionado ao fato de que o crescimento econômico tem um efeito negativo sobre o meio ambiente, no qual o aumento da produção e do consumo causam aumentos na degradação ambiental. O efeito composição, por sua vez, está relacionado à mudança da composição da produção das economias, que muda ao longo da trajetória de crescimento. Como discutido anteriormente, o crescimento econômico leva as economias do estágio inicial com produção, predominantemente, primária, para um segundo estágio mais industrializado e, por fim, a uma mudança para o setor terciário. Na medida em que uma economia passa da produção de bens manufaturados para a produção de serviços, devido a mudanças tanto no lado da oferta, quanto no lado da demanda, o ritmo de degradação ambiental reduz. O efeito técnico diz respeito ao desenvolvimento tecnológico que leva a mudanças no impacto da produção sobre o meio ambiente e, por fim, as mudanças nas preferências da sociedade podem direcionar as mudanças no impacto do crescimento econômico sobre o meio ambiente, na medida em que aumente a preferência por bens produzidos de forma ecologicamente sustentável, por exemplo, ou por meio do enrijecimento da regulação ambiental sobre as firmas poluidoras. Em última análise, o tamanho relativo desses efeitos determinará a relação entre crescimento econômico e meio ambiente (EVERETT *et al.*, 2010).

3. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS ADOTADOS

Com a finalidade de entender a relação entre crescimento econômico e meio ambiente, utilizou-se os dados do PIB *per capita* do Brasil e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) proveniente do consumo de petróleo entre o período de 1980 a 2006. O PIB *per capita* foi obtido na base de dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e corresponde a preços reais de 2012. As emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes do consumo de petróleo, estão expressas em milhões de toneladas métricas e foram coletadas junto a *Energy Information Administration*, órgão vinculado ao Governo dos Estados Unidos (www.eia.doe.gov). Para facilitar a análise, foram tomados os logaritmos naturais das duas séries, portanto, nos modelos estimados, os parâmetros estimados correspondem à elasticidade.

A primeira limitação na investigação da relação empírica entre crescimento econômico e emissão de CO₂ decorre do fato de que nenhuma das duas variáveis pode ser considerada exógena ao modelo econométrico. Tradicionalmente a curva EKC é estimada a partir de uma função polinomial (de 2ª ou 3ª ordem) em que a variável ambiental é a variável dependente e a variável econômica é a variável explicativa, ou exógena ao modelo. Entretanto, pelo fato de este trabalho investigar a relação entre crescimento econômico e emissão de CO₂ decorrente do consumo de petróleo, essa relação não pode ser estabelecida. São diversas as evidências de que o comportamento do PIB e da oferta e demanda de energia são comuns ao longo do tempo, mostrando comportamentos muito similares, embora em escalas diferentes. Segundo o relatório do MME "...o contexto econômico e as ocorrências no âmbito do sistema energético guardaram uma forte relação de dependência e causalidade." (MME, 2007, p.245).

Além disso, como será visto na próxima seção, ambas as séries possuem indícios de existência de raiz unitária, ou seja, as séries são não estacionárias em nível. Essas dificuldades técnicas, associadas ao problema teórico de que não se pode determinar uma relação de causa e efeito entre as variáveis, impossibilitam que a função que representa a curva EKC seja estimada para investigação proposta neste artigo. Portanto, a única alternativa disponível para investigar a relação entre o crescimento da economia brasileira e as emissões de CO₂, provenientes do consumo de petróleo, foi a utilização do modelo econométrico Autorregressivo Vetorial com o Vetor de Correção de Erros, popularmente conhecido como VAR/VEC.

O Autorregressivo Vetorial (VAR) é um modelo de equações simultâneas que não distingue as variáveis no modelo como exógenas ou endógenas. Sendo assim, os modelos VAR examinam relações lineares entre cada variável e os valores defasados dela própria e de todas as demais variáveis. Esses modelos tomam em consideração a existência de relações de interdependência entre as variáveis e permitem avaliar o impacto dinâmico das perturbações aleatórias sobre o sistema de variáveis

A formulação geral do modelo VAR é descrita da seguinte forma:

$$A_0 y_t = \sum_{s=1}^{p} A_s y_{t-s} + B_0 v_t, \quad S = 1, 2, \dots, p, \quad (1)$$

em que y_t é o um vetor ($k \times 1$) das variáveis incluídas no modelo; A_0 é a matriz ($k \times k$) de coeficientes das relações contemporâneas; A_s são matrizes ($k \times k$) de relações com defasagem s ; v_t é um vetor de erros aleatórios suposto ortogonal e que tem distribuição multinormal, com matriz de variância-covariância $\text{cov}(v_t) = D$, diagonal; e B_0 é uma matriz identidade ($k \times k$).

A matriz A_0 é importante para obter a forma reduzida de (1). Multiplicando ambos os lados da expressão (1) pela matriz inversa de coeficientes de interações contemporâneas (A_0^{-1}), obtém-se a forma reduzida:

$$y_t = \sum_{s=1}^p A_0^{-1} A_s y_{t-s} + A_0^{-1} v_t \quad (2)$$

O sistema de equações (2) agora pode ser estimado por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) para obter os resíduos:

$$\mu_t = A_0^{-1} V_t, \quad (3)$$

em que a matriz de variância-covariância é $cov(\mu_t) = \Omega$. Esta matriz é utilizada para estimar A_0^{-1} . Ω possui $k(k+1)/2$ parâmetros livres, sendo este o número máximo de parâmetros que podem ser estimados em A_0 . O número mínimo de restrições que precisam ser impostas para a identificação é igual a $k(k-1)/2$. Note-se que o modelo VAR recursivo é exatamente identificado, pois a matriz A_0 , no modelo, é dita triangular inferior com $k(k+1)/2$ parâmetros. No caso de existir um número menor de restrições, tem-se um modelo subidentificado; em contrapartida, tem-se o modelo superidentificado.

Uma importante restrição para estimação do modelo VAR é que todas as variáveis contidas no vetor y_t sejam estacionárias. Caso contrário, as estimativas obtidas serão viesadas. Nesse contexto, um modelo de Vetor de Correção de Erros (VEC) deve ser estimado. Um VEC é um VAR na forma de primeira-diferença, embutindo explicitamente uma cointegração que captura a informação de longo prazo contida na tendência estocástica de cada série utilizada. Segundo o método, do ponto de vista econômico, quando duas ou mais séries estão cointegradas, as mesmas se movem conjuntamente no tempo e suas diferenças são estáveis (estacionárias), mesmo quando cada série em particular tem uma tendência estocástica e seja, portanto, não estacionária. A cointegração reflete a presença de um equilíbrio de longo prazo para o qual o sistema econômico converge. Segundo Hamilton (1994), se cada série é um processo I(1), a possibilidade de equilíbrio é analisada utilizando-se o teste de cointegração de Johansen (1991).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro passo na análise de séries temporais é testar a hipótese de existência de raiz unitária nas séries utilizadas, ou seja, testar se as séries são estacionárias em nível. Para testar a hipótese de raiz unitária foi utilizado o teste de Dickey-Fuller (DF) – GLS que é considerado um teste de “segunda geração”, ou seja, é um método mais recente, desenvolvido para o teste de raiz unitária que, segundo Maddala e Kim (1998), tem maior poder (probabilidade de não se cometer um erro do tipo II) e tamanho. A hipótese a ser testada no teste DF-GLS segue o método tradicional em que a hipótese nula é que a série segue um passeio aleatório (ou seja, não estacionária).

Os resultados do teste DF-GLS encontram-se resumidos na Tabela 1, no qual se verifica que a hipótese nula, de presença de raiz unitária, não é rejeitada em nível de significância de 1%, para as emissões de CO₂. Entretanto, na série do PIB *per capita*, a hipótese é rejeitada para a especificação com tendência e

constante e não rejeitada para especificação apenas com constante. Isso significa que a série do logaritmo natural do PIB *per capita* é estacionária com tendência determinística; em outras palavras, se for considerada a série em nível ela é não estacionária, entretanto, a não estacionariedade é causada pela presença de uma tendência determinística. O mesmo teste realizado na primeira diferença de ambas as séries rejeita a hipótese de raiz unitária em nível de significância de 1% para emissões de CO₂ e 10% para o PIB *per capita*. Portanto, chega-se à conclusão que ambas as séries são estacionárias em primeira diferença e integradas de ordem um, ou apenas I(1).

Tabela 1. Teste de Raiz Unitária no logaritmo natural das variáveis CO₂ e PIBper em nível e primeira diferença.

	Variáveis em nível		Variáveis em primeira diferença
	Tendência + intercepto	Intercepto	Intercepto
<i>ln</i> CO ₂	-2,046	-0,402	-3,399***
<i>ln</i> PIBper	-4,374***	-0,562	- 1,695*

Notas: *** significativo a 1%, ** significativo a 5%, * significativo a 10%;

Fonte: Elaboração própria.

Uma vez que os resultados dos testes de raiz unitária indicam que as séries são I(1), um modelo VEC, mostra-se mais apropriado que um modelo VAR para caracterizar a relação entre PIB *per capita* e emissão de CO₂ (HAMILTON, 1994) e como discutido anteriormente, se cada série é um processo I(1), a possibilidade de equilíbrio é analisada, utilizando o teste de cointegração de Johansen (1991). Esses resultados estão reportados na Tabela 2.

Na estimativa dos vetores de cointegração é importante selecionar uma defasagem ótima que irá gerar resíduos do tipo ruído branco (*White Noise*). Esta etapa é muito importante na análise, uma vez que as defasagens exercem uma significativa influência sobre os resultados. Dessa forma, por meio dos critérios de informação de Akaike (AIC) e Hannan-Quin (HQ)⁸, foi definida uma defasagem de três períodos, ou seja, K = 3.

O teste de Johansen (1991) utiliza o teste do traço e da raiz, característica máxima para testar a hipótese de existência de um vetor de cointegração entre as variáveis analisadas. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 2 e a equação de cointegração utilizada no teste contém um intercepto e não possui tendência determinística. Verifica-se que o resultado dos testes estatísticos do

⁸ Na definição do número de defasagens de um VAR um outro critério de informação comumente utilizado é o critério de informação de Schwarz (SC). Entretanto, o critério de SC foi o único destoante entre os três critérios empregados (indicava apenas 1 defasagem) e por isso, optou-se pela seleção de três defasagens como apresentado no texto.

traço e da raiz característica máxima, em nível de 5% de significância, rejeitam a hipótese de $r = 0$. Entretanto, falham ao rejeitar as hipóteses de que o *rank* de cointegração do sistema é $r \leq 1$. Assim, pode-se concluir que existe uma combinação linear, estacionária, entre $\ln CO_2$ e $\ln PIBper$.

Tabela 2. Teste de Johansen para vetores de Cointegração

Teste do Traço					
Teste de hipótese				Valor	
H_0	H_1	Raiz característica	Traço Calculado	crítico (5%)	Prob.*
$r = 0$	$r \geq 1$	0,580	25,066	20,26	0,010
$r \leq 1$	$r \geq 2$	0,161	4,215	9,164	0,380

Teste da Raiz Característica Máxima					
Teste de hipótese				Valor	
H_0	H_1	Raiz característica	Estatística raiz característica máxima	crítico (5%)	Prob.*
$r = 0$	$r = 1$	0,580	20,850	15,892	0,007
$r \leq 1$	$r = 2$	0,161	4,215	9,164	0,380

Notas: r é o *rank* de cointegração;

* Valores críticos de MacKinnon-Haug-Michelis (1999)

Fonte: Elaboração própria

Os resultados da análise feita até o momento confirmaram a hipótese de que a abordagem mais adequada para quantificar as relações entre série I(1) é construir um modelo VEC. Nesse modelo, a primeira diferença de cada variável é representada como uma função de seus próprios valores defasados, na ordem de duas defasagens ($K-1 = 2$, K é o número de defasagens determinadas na estimação do VAR), mais uma equação de cointegração. O modelo utilizado para conduzir os testes de cointegração na Tab. 3 é dado pelas seguintes equações:

$$\Delta \ln CO_{2t} = \sum_{j=1}^k (\alpha_{1j} \Delta \ln CO_{2t-j} + \beta_{1j} \Delta \ln PIBper_{t-j}) + \lambda_{11}(\tilde{\varepsilon}_{1t-1}) + \varepsilon_{1t} \quad (1)$$

$$\Delta \ln PIBper_t = \sum_{j=1}^k (\alpha_{2j} \Delta \ln PIBper_{t-j} + \beta_{2j} \Delta \ln CO_{2t-j}) + \lambda_{21}(\tilde{\varepsilon}_{1t-1}) + \varepsilon_{2t} \quad (2)$$

onde t representa os anos, $\Delta \ln PIBper$ é a primeira diferença do logaritmo natural do PIB *per capita* (PIBper) e $\Delta \ln CO_2$ é a primeira diferença do logaritmo natural da

emissão de dióxido de carbono (CO_2); $\tilde{\varepsilon}_{1t-1} = \ln CO_{2,t-1} - \theta \ln PIBper_{t-1} - \pi$ são os resíduos de desequilíbrio, defasados um ano, provenientes das respectivas equações de cointegração; α , β , λ , θ , e π são parâmetros desconhecidos a serem estimados e ε representa um vetor de erros estocásticos usual.

Em tal sistema, os parâmetros α , β são difíceis de determinar os sinais esperados *a priori*; o mesmo se aplica a constante π . Entretanto, espera-se que $\theta > 0$, o que implica que crescimentos no PIB *per capita* tenham impactos positivos sobre as emissões de dióxido de carbono. Além disso, os parâmetros λ 's conhecidos como termo de correção de erro (ECT – *Error Correction Term*) descrevem as velocidades de ajustamento de desequilíbrios que ocorrem no curto prazo até restabelecer o equilíbrio de longo prazo.

De acordo com os testes do Multiplicador de Lagrange, para correlação serial nos resíduos, em nível de 1% de significância, foram rejeitadas as hipóteses de correlação serial. O teste normalidade dos resíduos, através do método de Cholesky de ortogonalização dos resíduos, não rejeitou a hipótese nula de que os resíduos sejam normalmente distribuídos e os valores de R^2 variam entre 0,31 e 0,58, indicando que o modelo explica um percentual significativo da variação das duas variáveis.

A Tabela 3 reporta às estimativas empíricas de θ , e π para o vetor de cointegração normalizado. Esses resultados, como discutido anteriormente, representam as relações de longo prazo entre as emissões de CO_2 e o PIB *per capita*. De acordo com os resultados, o sinal do parâmetro θ corresponde com o esperado *a priori*, indicando que existe uma relação positiva entre PIB *per capita* e emissão de CO_2 (como os vetores estão normalizados, em sua interpretação torna-se necessário inverter os sinais) e mostrou-se estatisticamente significativo em nível 1%. Uma vez estabelecida a existência de um equilíbrio de longo prazo entre PIBper e CO_2 , isto significa que um aumento de 1% PIB *per capita* brasileiro implica um aumento aproximado de 7,32% nas emissões de CO_2 derivado do consumo de petróleo.

Tabela 3. Parâmetros estimados do vetor de cointegração normalizado.

Eq. de cointegração	$CO_{2,t-1}$	$PIBper_{t-1}$	C
$\tilde{\varepsilon}_{1t}$	1	-7,321*** (1,036)	15,413*** (2,916)

Notas: *** significativo a 1%, ** significativo a 5%, * significativo a 10%;

Fonte: Elaboração própria

As estimativas empíricas das velocidades de ajustamento (parâmetros λ) e dos parâmetros α e β estão resumidas na Tabela 4. *A priori*, interessa analisar a relação de causalidade entre as variáveis CO_2 e PIBper. Segundo Yoo (2005), a causalidade de curto e de longo prazo, entre as séries analisadas, podem ser

identificadas a partir da significância dos coeficientes estimados nas equações (1) e (2).

Tabela 4. Parâmetros estimados do modelo de vetor de correção de erros (VEC)

Variáveis	ΔCO_2	ΔPIBper
$\tilde{\varepsilon}_{1t-1}$	0,114***	0,078***
$\Delta \ln \text{CO}_{2(-1)}$	-0,142	-0,116
$\Delta \ln \text{CO}_{2(-2)}$	-0,063	-0,367***
$\Delta \ln \text{PIBper}_{(-1)}$	0,795**	0,517**
$\Delta \ln \text{PIBper}_{(-2)}$	0,969**	0,826***
R ²	0,317	0,581
R ² Ajustado	0,174	0,492
F-statistic	2,21	6,58
Log likelihood	45,459	61,551
Determinant resid covariance	4,39 E-07	
Log likelihood	107,569	

Notas: *** significativo a 1%, ** significativo a 5%, * significativo a 10%;

Fonte: Elaboração própria

O teste de causalidade de Granger para modelos VEC pode ser descrito da seguinte forma: em cada equação, a mudança na variável dependente é causada não somente por seus valores defasados, mas também por desequilíbrios decorrentes do período passado, ou seja, pela variável $\tilde{\varepsilon}_{1t-1}$ (correspondente ao vetor de cointegração).

Dessa forma, tanto a presença de causalidade de curto-prazo, como longo-prazo podem ser testadas. Tomando a eq. (1), por exemplo, se os parâmetros estimados dos valores defasados do PIB per capita β_{ij} forem estatisticamente significantes, isso implica que o PIB per capita causa, no sentido de Granger, a emissão de CO₂, no curto-prazo. Do outro lado, a causalidade de longo-prazo, pode ser testada pela significância do parâmetro estimado do termo de correção de erro λ_{11} . De forma análoga, pode-se examinar se a emissão de CO₂ causa, no sentido de Granger, o PIB *per capita*.

De acordo com a mecânica do teste, a hipótese nula a ser testada, portanto, é: para $i = 1, 2$; $H_0: \beta_{ij} = \dots = \beta_{ij} = 0$; $j = 1, 2, \dots, J$; $J = K - 1$. Assim, a hipótese nula é que PIBper não causa CO_2 , na equação (1) e que o CO_2 não causa PIBper na equação (2). Os resultados possíveis do Teste de Causalidade de Granger são os seguintes:

- a) Causalidade unidirecional de PIBper para CO_2 (PIBper \rightarrow CO_2): ocorre quando se rejeita H_0 para $i = 1$ e não se rejeita H_0 para $i = 2$;
- b) Causalidade unidirecional de CO_2 para PIBper ($CO_2\rightarrow$ PIBper): ocorre quando se rejeita H_0 para $i = 2$ e não se rejeita H_0 para $i = 1$;
- c) Causalidade bidirecional (PIBper \leftrightarrow CO_2): ocorre quando se rejeita H_0 para $i = 1$ e 2 simultaneamente;
- d) Ausência de causalidade (independência): ocorre quando não se rejeita H_0 para $i = 1$ e 2 simultaneamente;

Para calcular a causalidade de curto prazo foi utilizado o teste de bloco de exogeneidade (*Block Exogeneity Wald Tests*). A causalidade de longo prazo, entretanto, é encontrada baseada na significância dos coeficientes de ajustamento λ 's, das equações estimadas. Este teste de significância é realizado através do teste t (YOO, 2005).

Os resultados do teste de causalidade, de curto-prazo, indicam a existência de causalidade bidirecional, uma vez que o teste de H_0 , para $i = 1$, foi 9,508 e para $i = 2$, foi 13,132, ambos significativos ao nível de 1%. O teste de causalidade de longo-prazo traz indícios na mesma direção, uma vez que tanto λ_{11} como λ_{21} , mostraram-se significativos ao nível de 1%. Esses resultados, portanto, corroboram a hipótese de que emissão de CO_2 e crescimento da renda são determinados simultaneamente e confirmam a discussão realizada na seção 3 sobre a limitação da estimação da curva EKC.

A impossibilidade de estimação da curva EKC traz importantes limitações ao trabalho proposto, primeiro, porque não temos como determinar se essa relação teórica, de fato, existe para emissões de CO_2 de derivados de petróleo. Em segundo lugar, caso exista, também não se pode determinar em qual estágio a economia brasileira se encontra, ou a renda associada ao ponto de inflexão da curva, a partir do qual, o ritmo de degradação ambiental cai enquanto existe crescimento econômico.

Os resultados permitem, entretanto, observar alguns fatores, envolvidos na discussão entre crescimento econômico e meio ambiente, que são importantes do ponto de vista empírico. O primeiro fator é o efeito escala. Os resultados encontrados indicam uma forte relação de causalidade, tanto de longo como de curto prazo do crescimento econômico sobre as emissões de CO_2 . Esse resultado justifica-se, em parte, pelo escopo do trabalho analisar apenas as emissões de CO_2 provenientes de derivados de petróleo. Entretanto cabe novamente ressaltar que esse é um recurso natural de que o Brasil é altamente dependente. Como destacado no Plano Nacional de Energia 2030 do MME (MME, 2007), 43% da base energética atual é proveniente de derivados de petróleo e as projeções realizadas para 2030, mesmo que indiquem redução da participação relativa desse

recurso na base energética nacional, prevê um crescimento do consumo da ordem de 90% a 190%⁹. Portanto, é de se esperar um aumento significativo na emissão de CO₂ para o horizonte futuro. Os principais determinantes desse crescimento serão os setores de transportes e agropecuária.

O segundo fator importante a ser observado nos resultados é o paradoxo com o efeito composição. Independente da hipótese de existência ou não de uma curva EKC, os resultados indicam uma relação positiva entre crescimento econômico e emissão de CO₂. O efeito composição estabelece que, se a economia passa da produção de bens manufaturados para a produção de serviços, o ritmo de degradação ambiental se reduz. As evidências empíricas (Soares et al. 2011; Sonaglio, et al., 2010; entre outros), entretanto, mostram que desde o final da década de 80 o Brasil se encontra num processo contínuo de desindustrialização e aumento do setor de serviços; contudo, a redução de emissão de CO₂ não foi observada. Portanto, sob o ponto de vista teórico, essas evidências inviabilizam a perspectiva de redução da emissão de CO₂ com a transição da economia brasileira do 2º para o 3º estágio de desenvolvimento¹⁰.

Por fim, os resultados destacam a margem existente que os efeitos técnico/tecnológico e as preferências da sociedade podem ter sobre a relação entre crescimento econômico e emissão de CO₂. O mundo inteiro está envolvido numa busca crescente por novas fontes de energia, de preferência renováveis, mas, sobretudo, que emitam poucos poluentes no meio ambiente e, neste contexto, o Brasil não pode ficar de fora. Embora seja dotado de uma vasta área territorial e atualmente estimule a produção de biocombustíveis, não podemos esquecer que este também é um recurso natural, escasso e que possui uma taxa de degradação e renovação que deve ser otimizada. Portanto, políticas públicas devem ser elaboradas no sentido de estimular a pesquisa e o desenvolvimento de processos produtivos mais eficientes em termos de uso de recursos naturais e também de novos produtos. Além disso, destaca-se o papel importantíssimo que os hábitos comportamentais da sociedade exercem sobre a qualidade do meio ambiente. Desenvolver políticas que estimulem o uso eficiente de energia elétrica ou o racionamento e reutilização da água, por exemplo, podem trazer impactos significativos sobre a preservação ambiental.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como principal objetivo investigar a relação entre crescimento econômico e emissão de CO₂, proveniente do consumo de derivados de petróleo. O escopo do trabalho se restringiu a este recurso natural devido ao

⁹ Previsões realizadas com base na formulação de cenários "hipotéticos" da evolução do consumo de energia para o período de 2007 a 2030. Para mais detalhes ver (MME, 2007).

¹⁰ Cabe ressaltar que como não foi possível estimar a curva EKC, também não temos como testar a hipótese de dissociação (absoluta ou relativa) do crescimento econômico com a emissão de CO₂. Portanto, não sabemos se a economia se encontra no estágio de retornos crescentes ou decrescentes da fase ascendente de uma possível curva EKC.

seu papel para a atividade econômica, como importante insumo no processo produtivo na matriz energética brasileira.

Os resultados obtidos permitiram inferir que existe uma relação de longo prazo e de causalidade simultânea entre as variáveis PIB *per capita* e emissão de CO₂. Essa evidência, somada ao fato de que as séries utilizadas eram não estacionárias em nível, impossibilitou estimar a Curva de Kuznets Ambiental, que é a principal base teórica utilizada nos trabalhos empíricos relacionados ao tema. Nesse sentido, um modelo VEC foi estimado e a elasticidade encontrada entre crescimento econômico e emissão de CO₂ foi de 7,32, ou seja, no longo prazo, podemos inferir que um aumento de 1% no PIB *per capita*, eleva em 7,32%, as emissões de CO₂.

Esse resultado se torna relevante, pois confirmou a hipótese do efeito escala em que o crescimento econômico gera aumentos da emissão de poluentes e também porque contradiz uma hipótese da teoria relacionada ao tema sobre o efeito composição. Segundo essa teoria, na medida em que a economia passa da produção de bens manufaturados para a produção de serviços, o ritmo de degradação ambiental reduz e esse fenômeno não foi observado nos resultados. O período analisado corresponde ao intervalo entre 1980 e 2006 e diversas evidências empíricas apontam que desde o final da década de 80 o Brasil encontra-se num processo de desindustrialização da economia e, conseqüente, aumento do setor de serviços.

Esse resultado, por si só, talvez seja o mais relevante deste trabalho, pois indica que, no horizonte futuro, não existem perspectivas de redução da emissão de CO₂ em função do processo de desenvolvimento econômico. Portanto, esforços deveriam ser empenhados para o avanço tecnológico e para mudança comportamental da sociedade, a fim de amenizar os impactos que o crescimento econômico exerce sobre o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ARROW, K *et al.* **Economic Growth, Carrying Capacity and the Environment.** *Science* v. 268, p.p. 520-521, 1995.

BRUYN, S.M., HEINTZ, R.J. **The environmental Kuznets Curve Hypothesis.** *Handbook of environmental and Resource Economics.* p.p. 656-677, Edward Elgar: Cheltenham, 2000.

CARVALHO, T.S.; ALMEIDA, E. A hipótese da curva de Kuznets ambiental global: Uma Perspectiva Econométrico- Espacial. **Estudos Econômicos** , São Paulo, v. 40, n. 3, P. 587-615, Julho/Setembro 2010.

CROPPER, M.; GRIFFITHS G. The Interaction of Population, Growth and Environmental Quality. **American Economic Review**, v.84, p.250-254, 1994.

EKINS, P. **Economic Growth and Environmental Sustainability**: The Prospects for Growth. Routledge, London, 2000.

EVERETT, T.; ISHWARAN, M.; ANSALONI, G.P.; RUBIN, A. Economic Growth and the Environment. **Defra Evidence and Analysis Series**. Disponível em: <http://mpr.ub.uni-muenchen.de/23585/>. [Acessado em 01/02/2013].

GROSSMAN G. M.; KRUEGER, A. B. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. In GARBER, P., **The Mexico-U.S. Free Trade Agreement**, ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1993.

GROSSMAN, G. M., KRUEGER, A. B. Economic Growth and The Environment. *Quarterly Journal of Economics* v. 112, p.p 353-378, 1995.

HAMILTON, J. D. **Time Series Analysis**. Princeton: Princeton University Press, 1994.

HARBAUGH, W.T. , LEVINSON, A., WILSON, D. M. Reexamining the Empirical Evidence for an Environmental Kuznets Curve. University of Oregon. Working Paper, 2001.

JOHANSEN, S. estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in Gaussian vector autoregressive models. **Econometrica**, v. 59, p. 1551-1580, 1991.

KUZNETS, S. Economic Growth and Income Equality. *American Economic Review* 45 (1). p.1-28. 1955.

MADALLA, G. S.; KIM, I. M. **Unit roots, co-integration and structural change**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 505, 1998.

MEADOWS, D.H., MEADOWS D.L, RANDERS, J., BEHRENS, W.W. **The Limits to Growth** London Earth Island Limited (1972).

MME – Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília : MME : EPE, 2007.

SCHUBERT, R., DIETZ, S. Environmental Kuznets Curve, Biodiversity and Sustainability. ZEF -University of Bonn – Discussion Papers on Development Policy Bonn, 2001.

SOARES, C; Mutter, A.; OREIRO, J.L. Uma análise empírica dos determinantes da desindustrialização no caso brasileiro (1996-2008). **Anais do XVI Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Política**. Uberlândia, 2011.

SONAGLIO, Claudia Maria ; ZAMBERLAN, Carlos Otávio ; Lima, J. E. de ; CAMPOS, A. C. Evidências de desindustrialização no Brasil: uma análise com dados em painel. **Economia Aplicada**, v. 14, p. 347-372, 2010.

YOO, S H., Electricity consumption and economic growth: evidence from Korea. *Energy Policy*, 33: 1627 – 1632, 2005.

Submetido em 03/06/2012

Aprovado em 16/04/2013

Sobre os autores

Cleyzer Adrian Cunha

Doutor em Economia Aplicada. Professor da Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia e do Programa de Pós-Graduação em Agronegócio da Universidade Federal de Goiás.

Endereço: Cx. Postal: 131 - Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia – FACE. Campus II – Samambaia. Rodovia Goiânia/Nova Veneza - 74001970 - Goiânia, GO - Brasil

E-mail: cleyzer@face.ufg.br

Paulo Roberto Scalco

Doutor em Economia Aplicada. Professor da Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia e do Programa de Pós-Graduação em Agronegócio da Universidade Federal de Goiás.

Endereço: Cx. Postal: 131 - Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia – FACE. Campus II – Samambaia. Rodovia Goiânia/Nova Veneza - 74001970 - Goiânia, GO - Brasil

E-mail: pauloscalco@yahoo.com.br