

# EVIDÊNCIA DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL NO BRASIL: UMA ANÁLISE DO CRESCIMENTO ECONÔMICO E POLUIÇÃO

## *EVIDENCE OF ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE IN BRAZIL: AN ANALYSIS OF ECONOMIC GROWTH AND POLLUTION*

André Luiz Marques Serrano\*  
Paulo R. A. Loureiro\*\*  
Jorge Madeira Nogueira\*\*\*

### RESUMO

O presente artigo tem como motivação a controvérsia existente na literatura recente sobre crescimento, desenvolvimento econômico e degradação ambiental, gerada a partir da evidência empírica mostrada inicialmente por Grossman e Krueger (1991, 1995), em que a relação entre PIB *per capita* e emissão de poluentes - tal como dióxido de carbono - toma a forma de um U-invertido, denominada na literatura como Curva de Kuznets Ambiental (CKA). O objetivo central deste trabalho consiste em verificar empiricamente a relação entre o produto *per capita* e a emissão de CO<sub>2</sub> no Brasil no período de 1980 a 2010 com vistas a confirmar ou refutar tal hipótese. Dentre os principais resultados a renda *per capita* e renda *per capita* ao quadrado têm efeito positivo e negativo respectivamente sobre as emissões de CO<sub>2</sub>, já a renda *per capita* ao cubo tem efeito nulo sobre o modelo proposto.

**Palavras-chave:** Desenvolvimento econômico. Curva ambiental de Kuznets.

**Classificação JEL:** O44, Q56.

### ABSTRACT

This article is motivated by the controversy in the recent literature on growth, economic development and environmental degradation, generated from the first empirical evidence shown by Grossman and Krueger (1991, 1995), in which the relationship between GDP per capita and emissions pollutants - such as carbon dioxide - takes the form of an inverted-U, known in literature as the Environmental Kuznets Curve (CKA). The aim of this paper is to examine empirically the relationship between the product and per capita CO<sub>2</sub> emissions in Brazil in the period 1980 to 2010 in order to confirm or refute this hypothesis. Among the main findings per capita income and income per capita squared are positive and negative respectively on CO<sub>2</sub> emissions, as per capita income for the cube has no effect on the model.

**Keywords:** Economic development. Environmental Kuznets curve

**Classification JEL:** Q44, Q56.

## 1. INTRODUÇÃO

Há décadas tem-se verificado um significativo interesse no estudo que mostra a relação entre a distribuição de renda e crescimento econômico. O trabalho desenvolvido por Kuznets (1955) é considerado como motivador dessa análise. O estudo apresenta a hipótese da relação entre crescimento econômico e a relação não linear da desigualdade de renda, tal

---

\* Professor do Departamento de Administração da UNB. E-mail: [andrelms@unb.br](mailto:andrelms@unb.br)

\*\* Professor do Departamento de Economia da UNB. E-mail: [pauloloureiro@unb.br](mailto:pauloloureiro@unb.br)

\*\*\* Professor do Departamento de Economia da UNB. E-mail: [jmn0702@unb.br](mailto:jmn0702@unb.br)

estudo tem sido largamente debatido e testado. Observada inicialmente para os Estados Unidos, Grã-Bretanha e Alemanha, tem sua explicação fundamentada no diferencial de rendimentos revelada pela transição de uma economia agrícola para uma economia industrial. Baseando-se na idéia original da Curva de Kuznets, Grossman e Krueger (1991, 1995) reiniciaram as discussões a respeito da relação entre o crescimento da renda e a degradação do meio ambiente, dando origem ao conceito hoje conhecido na literatura como Curva de Kuznets Ambiental (CKA).

Entretanto, se tomarmos a renda *per capita* de países tanto periféricos quanto centrais como um indicador de crescimento, e se observarmos a relação ao longo do tempo desse indicador e de certos índices de qualidade ambiental, aparentemente só em países com baixos níveis de renda *per capita*, aumentos desta seriam acompanhados de uma acentuação na deterioração ambiental. Em países desenvolvidos, a relação que parece existir é inversa, quanto maior o crescimento da renda, menores seriam, em termos relativos, as magnitudes desses indicadores de degradação ambiental. Portanto, verifica-se que haveria um deslocamento das indústrias intensivas em poluição para os países de baixa renda *per capita* em função dos diferenciais de regulação ambiental, conforme prevê a Hipótese dos Paraísos de Poluição (*Pollution Haven Hypothesis*).

Nesse contexto, os diferenciais de rigidez no processo de regulação ambiental entre os países industrializados (ou economias centrais) e países em desenvolvimento (economias periféricas) gerariam vantagens comparativas em produtos intensivos em poluição para os últimos. Isso motivaria uma significativa transferência de atividades econômicas poluidoras para as economias periféricas. Logo, caso essa hipótese seja verdadeira, a elasticidade-renda por produtos manufaturados, em particular aqueles intensivos em poluição, deverá ser negativa quando se atinge um alto nível de renda (COLE, 2004).

Dessa forma, o conceito referente à Curva de Kuznets Ambiental descreve, em seus preceitos a trajetória no tempo, que a poluição de um país seguirá como resultado do crescimento econômico. Quando o crescimento ocorre em um país extremamente pobre, a poluição inicialmente cresce porque os aumentos na produção geram emissões de poluentes e porque o país, dada sua pobreza, coloca uma baixa prioridade sobre o controle da degradação ambiental. Portanto, se um país ganhar suficiente grau de afluência, sua prioridade mudará para proteção da qualidade ambiental, e se o efeito renda for forte o suficiente, então causará o declínio da poluição. Tal raciocínio sugere que a melhoria ambiental não pode vir sem crescimento econômico. Deste modo, o interesse despertado pela Curva de Kuznets Ambiental ocorreu em função da capacidade deste modelo se tornar uma referência para explicar a relação entre poluição ambiental em suas várias formas geradas pelo processo de crescimento *versus* desenvolvimento econômico (GROSSMAN e KRUEGER, 1995).

A despeito da explicação dada por Grossman e Krueger (1995), a Curva de Kuznets Ambiental demonstra que algumas medidas de degradação ambiental aumentariam nos momentos iniciais do crescimento econômico, porém, eventualmente, diminuiriam quando certo nível de renda fosse alcançado, ou seja, surgiu a seguinte hipótese: em um país subdesenvolvido cuja renda *per capita* apresenta um crescimento de forma significativa, a inserção de quantidades crescentes tanto de energia quanto de materiais conduz a uma degradação ambiental, com indicadores cada vez maiores. Mas isso, de acordo com os estudos, aconteceria até certo nível de renda *per capita*. Logo, se a renda desse país continuar crescendo, será atingido um nível de renda *per capita* após o qual, aumentos posteriores nesse indicador trariam reduções na magnitude dos indicadores de degradação

ambiental. Esta é a essência da hipótese do U-invertido ambiental, também conhecido como Curva de Kuznetz Ambiental (CKA), confirmada em estudos de Grossman e Krueger (1995), Andreoni e Levinson (1998).

Assim, a curva do U-invertido ambiental apresenta a idéia de que a pressão ambiental diminuiria após determinado nível de crescimento econômico. Alguns pesquisadores acreditam que a melhoria na qualidade ambiental ocorre naturalmente com o processo de desenvolvimento econômico, isto é, ela é endógena ao processo. Contudo, outros ressaltam que uma melhora nos indicadores ambientais seja fruto de uma maior demanda ambiental, que se amplia com o incremento da renda, e passa a pressionar as políticas públicas para maiores regulações e investimentos nas áreas ambientais (MUNASINGHE, 2002).

O artigo se encontra dividido em cinco seções, incluindo esta introdução. A segunda parte fundamenta a relação entre crescimento econômico e meio ambiente e aborda brevemente uma revisão empírica. A terceira parte apresenta o modelo utilizado e a base de dados. A quarta parte discute os resultados empíricos obtidos e a última seção é dedicada às principais conclusões.

## **2. CRESCIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE: ASPECTOS TEÓRICOS E EMPÍRICOS**

A relação do crescimento econômico com o nível de degradação ambiental tem sido amplamente discutida no meio acadêmico. Evidências empíricas ressaltam que o impacto ambiental dependerá, entre outros fatores, do estágio de crescimento econômico seguido por desenvolvimento que o país esteja inserido. Assim, o estágio inicial do desenvolvimento econômico dos países corresponde a uma intensa dependência da agricultura e dos produtos primários, mas pouco impactante no meio ambiente. Com o crescimento da economia, a produção de manufaturas passa a ter maior participação no produto interno e, como consequência, uma possível melhoria dos indicadores ambientais e da renda (MUELLER, 1996, 1997).

Uma significativa evidência empírica foi citada no artigo de Grossman e Krueger (1995), no qual foi demonstrado não existir um consenso sobre a ligação entre a renda e a melhoria dos indicadores ambientais. Grande parte dos autores concorda sobre os elementos que atuam na determinação do nível de degradação ambiental. Assim, acredita-se que ela depende do efeito escala, do efeito composição e do efeito tecnológico. Estes efeitos relacionam-se respectivamente com o incremento da atividade econômica, com a estrutura do consumo e da produção e com a tecnologia a ser empregada.

Caso a intensidade da degradação fosse constante entre os países, seria de se esperar, pelo efeito escala, que um aumento na produção deles aumentasse a degradação ambiental, na mesma proporção, no globo. Contudo, o efeito escala pode ficar minorado se os efeitos de composição e de tecnologia forem suficientemente grandes para agir em sentido contrário. Dessa forma, a degradação poderia se reduzir com o crescimento econômico à medida que a produção se transferisse entre setores, ou seja, o setor de serviços pudesse aumentar sua participação relativamente ao setor manufatureiro. Além disso, alguns setores podem adotar tecnologias que utilizem menos recursos naturais e que poluam menos.

Vale salientar que o estudo da relação crescimento *versus* desenvolvimento e meio ambiente não é novo dentro da vasta literatura de crescimento econômico e remonta à

década de 1960 e início da década de 1970. O impacto do crescimento sobre o meio ambiente foi observado por Mishan (1969) e Solow (1972).

Uma das formulações teóricas desenvolvidas por Daly (1991) não considerou que os próprios avanços na renda *per capita* dos países podem fazer com que se diminua o uso dos recursos e da poluição gerada, conforme exposto pela Curva de Kuznets Ambiental. Uma das explicações para este fenômeno está em que, com o crescimento econômico, o efeito composição e as técnicas de produção (avanços tecnológicos) podem ser suficientemente fortes a ponto de sobrepor o efeito adverso sobre o meio ambiente.

Ademais, o próprio crescimento da renda provoca um aumento da demanda por produção ambiental, na medida em que questões mais imediatas para o desenvolvimento econômico são resolvidas (saúde e educação), de forma a provocar o aumento da qualidade ambiental para níveis altos de renda. Desse modo, a literatura sobre crescimento econômico aponta que a introdução de uma base de recursos naturais não-renováveis tem por efeito retardar a acumulação de capital ou limitar o crescimento sustentado, mesmo em condições de progresso tecnológico (DASGUPTA e HEAL, 1974; KAMIEN e SCHWARTZ, 1978; HOWITT e AGHION, 1998).

Uma vez expostas, as argumentações teóricas apontam que existe certo padrão negativo entre a abundância de recursos naturais, crescimento econômico, geração de resíduos *versus* pobreza, e isto parece ser tanto maior, quanto maior é a proporção das exportações de recursos naturais, em relação ao PIB (GROSSMAN e KRUEGER, 1995; GYLFASON et al. 1999; GYLFASON, 2001).

Portanto, os diversos estudos sobre crescimento econômico e meio ambiente citados anteriormente se tornaram oportunos à medida que a maioria dos trabalhos relativos à Curva de Kuznets Ambiental foram realizados em países nos quais a desigualdade social não era um elemento intrínseco à realidade local. Dessa forma, o ciclo de pobreza de alguns países periféricos pode estar alterando a *rationale* da CKA, ou seja, fazendo com que o ponto a partir do qual se reduziria a poluição de determinado poluente se tornasse mais elevado ou até que deixasse de existir. Isso poderia estar ocorrendo graças ao fato do elevado nível de pobreza alterar as preferências e conseqüentemente, a demanda ambiental. Assim, os *linkages* que poderiam ajudar a explicar a teoria da CKA se tornariam viesados, pois a parcela da população mais carente estaria mais preocupada em satisfazer suas necessidades básicas de sobrevivência.

Contudo, caso as variáveis socioeconômicas - principalmente educação - sejam significantes nos modelos a serem rodados, surgirão novos indícios de que investimentos em educação e serviços básicos podem alterar a demanda ambiental de um país e, desta forma, reduzir seu potencial de degradação. Entre outras coisas, este resultado mostrará que não existe uma relação direta entre pobreza e degradação ambiental, como alguns organismos internacionais tendem a ressaltar.

Portanto, uma vez expostas as principais argumentações teóricas e evidências da literatura relacionando crescimento econômico e ciclo ambiental, faz-se em seguida uma conexão desta relação com alguns estudos empíricos.

## 2.1 Revisão da literatura empírica

Uma farta literatura sobre a Curva Ambiental de Kuznets tem se evidenciado, e tem sua origem nos trabalhos de Grossman e Krueger (1991), do World Bank (1992), e Shafik e Bandyopadhyay (1992), e revelam evidências empíricas de que alguns indicadores de poluição apresentam um comportamento análogo ao caminho descrito pelo U invertido, ao

passo em que a renda *per capita* aumenta, a poluição aumenta até um determinado ponto de inflexão. Tais estudos, afirmam que economias em desenvolvimento ou economias periféricas tendem a degradar seu meio ambiente na medida em que crescem economicamente, e esta degradação atinge um ápice, quando começa um movimento de queda simultâneo ao acúmulo de riquezas. Os resultados apresentados pelos artigos descritos evidenciam que a relação entre poluição e crescimento econômico tem sido, desde então, denominada Curva Ambiental de Kuznets, devido à analogia desta com a relação apontada por Kuznets (1955) entre desigualdade de renda e crescimento econômico.

A relação entre a renda e os níveis de poluição tornou-se um fato representativo, de acordo com a literatura econômica, e vários trabalhos foram escritos apoiando-se sobre tais resultados. Os artigos disponíveis sobre o tema apresentam os determinantes teóricos da CKA, e apresentam algumas evidências empíricas. A lista completa desses trabalhos pode ser vista no apêndice.

Os trabalhos que fazem parte do braço empírico deste tema, afirmam que a relação entre meio ambiente e desenvolvimento econômico apresenta diversas possibilidades de pesquisa. Os indicadores de degradação ambiental apresentam grandes variações, as especificações dos modelos e suas possíveis formas funcionais, as técnicas econométricas utilizadas, os países envolvidos e o período de tempo analisado. Alguns trabalhos confirmam a CKA, enquanto outros criticam a alta sensibilidade dos resultados às formas funcionais e especificações dos modelos. Já o braço teórico apresenta desde modelos estáticos simples até modelos dinâmicos de gerações superpostas.

Nesta seção, pretendemos apresentar os principais trabalhos empíricos produzidos nesta área. Nosso objetivo é possibilitar ao leitor uma visão geral do que tem sido dito a respeito do tema, de como os estudos têm evoluído e quais têm sido as principais conclusões.

Começamos apresentando, primeiramente, o trabalho pioneiro de Grossman e Krueger (1991), e, em seguida, com um nível de detalhamento ligeiramente maior, apresentamos Shafik e Bandyopadhyay (1992), Stern (2002), Selden e Song (1994), entre outros. No Brasil, são poucos os trabalhos sobre a CKA, podendo-se destacar o trabalho de Lucena (2005), Fonseca e Ribeiro (2005) e Cunha (2008).

Grossman e Krueger (1991) testaram de forma empírica a relação entre meio ambiente e crescimento econômico. Utilizando uma amostra *cross-country* e três medidas de degradação do ar, os resultados apontam um U invertido para os níveis de dióxido de enxofre e fumaça (concentração de “partículas escuras” suspensas – *dark matter suspended*), enquanto para o montante de partículas suspensas (*mass of suspended particles*) em um dado volume de ar a relação apresenta tendência monotonicamente decrescente em relação à renda. Nesse sentido, foi uma das primeiras análises econométricas que comprovou a reversão da degradação, a partir de determinado nível de renda *per capita*.

Shafik e Bandyopadhyay (1992) estimaram um modelo econométrico levando-se em consideração 149 países no período compreendido entre 1960 e 1990. Foram utilizados dados em painel, no qual, considerou como variáveis dependentes a ausência de água limpa, saneamento urbano, óxido de enxofre, oxigênio dissolvido em rios, coliformes fecais em rios, resíduos per capita lançados em alguns municípios e emissões de carbono per capita. Os resultados demonstraram que os dois poluentes de ar apresentam a forma de “U” invertido conforme a hipótese do CKA. Ambos os resíduos municipais e emissões de

carbono per capita foram crescentes com a renda. De acordo com o trabalho escrito por estes autores o ponto de inflexão ficou em torno de \$3000 a \$4000 para os poluentes do ar

Stern (2002) realizou uma pesquisa, levando em consideração 64 países em um período compreendido entre 1973 e 1990. Considerou para esta pesquisa dados em painel. O artigo procurou avaliar a relação entre CO<sub>2</sub> e renda per capita. E de acordo com os resultados encontrados, verificaram-se modificações nas emissões devidas a mudanças nos fatores (mix de insumos, mix de produtos, escala de produção progresso tecnológico, uso de energia e estrutura industrial) em vez de atribuí-las ao formato da Curva de Kuznets Ambiental gerado pelo Produto Interno Bruto *per capita*, portanto, o impacto das emissões tem fornecido pouco incentivo para as nações desenvolverem ações unilaterais para sua redução.

Selden e Song (1994) estimaram uma Curva de Kuznets Ambiental, levando em consideração 30 países (22 são países do OCDE), utilizando dados em painel. No modelo, as variáveis dependentes foram; emissões de SO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, SPM, CO e as variáveis independentes são a renda *per capita* e densidade populacional. As estimações demonstraram que em níveis suficientemente altos de renda, a poluição poderia cair a zero.

Panayotou (1993,1997), ao estimar a CKA para NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, partículas suspensas e desflorestamento, utilizando uma metodologia de estimações de *cross-section*, obteve para todos os indicadores uma relação de U invertido.

No caso da literatura empírica referente à economia brasileira, Lucena (2005) estimou uma Curva de Kuznets Ambiental para o Brasil utilizando séries temporais para o período entre 1970 e 2003. O autor empregou duas medidas diferentes para a variável dependente do modelo estimado. Uma estimação foi realizada com o consumo de energia como variável dependente e outra com as emissões de dióxido de carbono. As variáveis explicativas são a renda *per capita*, a renda *per capita* ao quadrado, a renda *per capita* ao cubo e variáveis de controle. Os resultados para as duas variáveis dependentes são fundamentalmente diferentes. No caso de emissões de dióxido de carbono, as estimações não suportam a existência de uma curva no formato de U invertido, mas sim uma relação positivamente inclinada entre a renda *per capita* e as emissões de CO<sub>2</sub>. As estimações considerando-se o consumo de energia não são conclusivas, de forma que não é possível confirmar ou refutar a existência de uma Curva de Kuznets Ambiental para o Brasil no período estudado.

Fonseca e Ribeiro (2005) estimaram uma Curva de Kuznets Ambiental modificada para os estados brasileiros e o Distrito Federal, utilizando dados em painel. A grande contribuição dos autores foi fugir das medidas usuais de poluição utilizadas na literatura como variáveis dependentes. Fonseca e Ribeiro (2005) utilizaram como variável dependente o percentual de áreas ambientais protegidas dos estados da federação. Como variáveis independentes, os autores utilizaram a renda *per capita*, a renda *per capita* ao quadrado, a renda *per capita* ao cubo e algumas variáveis de controle. Foram testadas algumas especificações distintas, porém, de forma geral, os autores captaram a importância da renda *per capita* e da variável de controle que reflete a escolaridade da população de cada estado como determinantes da extensão da proteção ambiental no Brasil. Desse modo, os resultados alcançados por Fonseca e Ribeiro (2005) sugerem que existe uma relação positiva entre proteção ambiental e crescimento econômico no país.

O trabalho de Cunha (2008) estimou uma equação cúbica econométrica da Curva de Kuznets Ambiental, assim como proposta no trabalho de Grossman e Krueger (1995). No modelo, a variável dependente é a emissão de dióxido de carbono e as variáveis

independentes são a renda *per capita*, a renda *per capita* ao quadrado e a renda *per capita* cúbica do Brasil. Utilizando estimação por Mínimos Quadrados Ordinários, para uma série temporal entre 1980 e 2004, os resultados mostraram que um aumento na renda *per capita* aumenta a emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Mais especificamente, um aumento de 1% na renda *per capita* brasileira levaria a um aumento de 1,68% na emissão de dióxido de carbono, de acordo com os parâmetros do modelo estimado. As variáveis independentes não lineares da renda mostraram-se não significantes a 10%. Portanto, não há evidências contundentes, de acordo com Cunha (2008), da existência de uma Curva de Kuznets Ambiental brasileira no período.

### 3. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

#### 3.1 Os dados

Para coletar dados, utilizaram-se fontes secundárias e sites específicos na Internet, por meio de uma prévia seleção bibliográfica já publicada, ou seja, de domínio público. Os dados utilizados são provenientes de séries temporais anuais, abrangendo o período de 1980 a 2010. As séries foram construídas como indicado a seguir: dados de produto *per capita* foram coletados no IPEA data (1980 a 2010), e as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) provenientes do consumo de petróleo em milhões de toneladas métricas foram obtidas por meio do *Energy Information Administration* compreendido entre 1980 a 2010 ([www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov)).

#### 3.2 O Modelo

O presente artigo orientou-se a partir do trabalho desenvolvido por Grossman e Krueger (1995), no qual a Curva de Kuznets Ambiental que foi proposta, apresentou uma relação inversa entre o produto *per capita* e emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A relação apresentada desta curva propôs que crescimento da renda *per capita* tende a gerar aumentos ou reduções nas emissões de CO<sub>2</sub> de acordo com o estágio de desenvolvimento em que se encontra o país. Levou-se em consideração a existência de um modelo cúbico onde  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 < 0$  e  $\beta_3 = 0$ , portanto, o gráfico confirma o comportamento de uma curva parabólica no formato de U invertido, ou seja, a concavidade está voltada para baixo ( $\beta_2 < 0$ ), e o vértice da parábola representa o valor máximo ou o ponto de inflexão (mudança na orientação da curva).

No que diz respeito às possíveis relações entre as variáveis apontadas no parágrafo acima, o argumento para justificá-las não oferece nenhuma polêmica adicional. Aceitando a hipótese de que a renda *per capita* é um bom indicador de desenvolvimento econômico, é natural concluir que países com maior renda *per capita* tendem a ser mais desenvolvidos. No entanto, desenvolvimento econômico abarca outras dimensões do espectro social. Ora, então deve existir um *benchmark* para o nível de renda em que, valores à esquerda indicam uma relação positiva entre a renda *per capita* e emissões de CO<sub>2</sub> e valores à direita indicam uma relação negativa entre a renda *per capita* e emissões de CO<sub>2</sub>. Dessa forma, o modelo é capaz não só de mensurar a relação entre poluição ambiental e desenvolvimento econômico como também apresentar evidências sobre o estágio de desenvolvimento em que se encontra o país.

A regressão linear descreve o relacionamento entre a variável dependente (emissão de dióxido de carbono) e três variáveis independentes (produto interno bruto *per capita*,

produto interno bruto *per capita* ao quadrado, produto interno bruto *per capita* ao cubo) no período de 1980 a 2010. Vale salientar que esse estudo estimou a equação cúbica econométrica derivada do estudo de Grosman e Krueger (1995). Sendo assim, o modelo econométrico proposto, defasado de 1 período, com objetivo de explicar a equação CKA para o Brasil é o seguinte:

$$D(\text{LogCO}_2) = \alpha + D(\beta_1 \text{LogY}) + D(\beta_2 \text{LogY}^2) + D(\beta_3 \text{LogY}^3) + \xi_t \quad (1)$$

Em que:

$D$  - primeira diferença;

$\text{CO}_2$  – emissão de dióxido de carbono em milhões de toneladas métricas;

$Y$  – produto interno bruto *per capita*;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$  - são os coeficientes a serem estimados e medem as elasticidades do  $\text{CO}_2$  em relação às respectivas variáveis independentes;

$\xi_t$  - erro aleatório

Vale salientar que a relação da CKA sugere que o crescimento da renda per capita tende a gerar um crescimento nas emissões de  $\text{CO}_2$  e posteriormente uma redução nas emissões de  $\text{CO}_2$  ao longo do tempo. O modelo proposto por Grosman e Krueger (1995), implica em uma função quadrática para a relação entre emissão de  $\text{CO}_2$  e renda per capita. O modelo econométrico estimado teve como objetivo avaliar tal relação, para isso os parâmetros calculados para a Equação (1) deverão ser estatisticamente:

$$\beta_1 > 0, \beta_2 < 0 \text{ e } \beta_3 = 0.$$

A opção pela forma logarítmica deu-se por questões de conveniência empírica. Segundo Koutsoyiannis (1978), na maioria dos casos, a teoria econômica não mostra explicitamente a forma matemática das relações econômicas. Devido à incerteza da teoria econômica a esse respeito, tem-se tornado uma prática usual para o economista experimentar várias formas e então escolher, entre os vários resultados, aquele que é julgado o mais satisfatório com base em certos critérios estatísticos e econométricos.

Para as estimativas dos coeficientes, utilizou-se o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), com matriz de covariância robusta a heterocedasticidade e autocorrelação Newey-West.

Vale salientar que, antes de estimar a equação da Curva de Kuznets Ambiental, buscou-se verificar a presença de estacionariedade das séries temporais, o que foi feito por meio do teste KPSS de estacionariedade e ADF de raiz unitária. A combinação desses dois testes garante que as conclusões quanto à estacionariedade são robustas (GUJARATI, 2000).

#### IV - RESULTADOS

A curva de Kuznets propõe uma relação quadrática invertida entre pressão ambiental e PIB. Para avaliar a proposta, estimou-se a Equação (1), que admite três possíveis relações: linear, quadrática e cúbica. O modelo é válido para a amostra adotada caso a relação quadrática seja suportada como a mais adequada para descrever o comportamento dos dados.

Os valores estimados para os testes ADF e KPSS para as séries  $\text{CO}_2$  e PIB per capita foram:

- $\text{CO}_2$ : ADF: -4,3126 e KPSS: 0,2027.

- PIB per capita: ADF: -3,4564 e KPSS: 0,3183.

Tanto o teste KPSS quanto o ADF indicam, portanto, a estacionaridade das séries em primeira diferença.

A equação estimada por MQO está reproduzida na Tabela 1. Os valores encontrados para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), para os testes t e F e demais estatísticas são dados para a equação estimada. Com base nos valores encontrados, observamos que as relações estimadas para a renda *per capita* podem explicar individualmente o comportamento observado do nível de poluição medido por meio das emissões de CO<sub>2</sub>; as mesmas, em conjunto, são estatisticamente significativas a 10% de probabilidade, logo o modelo é globalmente significativa segundo o teste F.

Verificou-se que o modelo apresentou  $R^2$  igual a 23,48, o que significa que 23,48% das variações na emissão de CO<sub>2</sub>, no Brasil, são explicados pelo produto per capita da economia.

Tabela 1 – Estimativa por MQO: Parâmetros de emissão de dióxido de carbono em função da renda *per capita* defasados de 1 período (1980 a 2010).

Variáveis	Coeficientes	Std. Error	t-Statistic	Probabilidade.
$\alpha$	0.015958	0.008552	1.865852	0.0738
$\beta_1$	1.155239	0.517169	2.233773	0.0347
$\beta_2$	-32.44982	23.65572	-1.371754	0.1823
$\beta_3$	292.4612	240.0518	1.218325	0.2345

Fonte: Elaborado pelos autores

Para avaliação da hipótese de Kuznets, é necessário o uso de testes unicaudais para os estimadores  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , o parâmetro  $\beta_3$  permanece sendo avaliado em um teste bi-caudal.

Para realização dos testes de hipótese faz-se necessária a avaliação da normalidade dos resíduos. Para tanto, um teste Jarque-Bera (1,137078) foi realizado e indicou normalidade na distribuição dos resíduos.

O teste F de significância global do modelo, cuja estatística de teste foi estimada em 2,557426, aponta para rejeição da hipótese nula de que o modelo não é estatisticamente significativo. Quanto à heteroscedasticidade de auto-correlação, a matriz covariância foi estimado pelo método Newey-West, que gera estimadores robustos a ambos o problemas.

Um teste uni-caudal com 10% de significância e 29 graus de liberdade, tem valor t tabelado de 1,3114, as estatísticas de teste estimadas na Tabela 1 permanecem inalteradas.

Com base no t tabelado, a hipótese nula é rejeita para os parâmetros  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , sendo eles, respectivamente, maior e menor que zero. O teste bi-caudal com o mesmo nível de significância indica que a hipótese nula para  $\beta_3$  não pode ser rejeitada. Os resultados encontrados corroboram a hipótese de Kurznets.

## 5. - CONCLUSÕES

A equação estimada tem implicações importantes para analisar a relação entre o grau de poluição e o nível de renda *per capita* e constitui um bom instrumento para o

Estado na formulação de políticas públicas e na tomada de decisões quanto a preservação do meio ambiente e crescimento econômico.

O objetivo desse artigo, portanto, foi investigar e mensurar a existência de uma relação entre o grau de poluição (medida pelas emissões de CO<sub>2</sub>) e a renda *per capita* no Brasil. Utilizando o modelo proposto por Grossman e Krueger, para uma base de dados anual que vai de 1980 a 2010, estimamos a equação para as variáveis em logaritmo por MQO, com regressores defasados. Para todas as estimações, concluímos que:

- (i) As variáveis independentes do modelo são estatisticamente significativas individualmente; e.
- (ii) Segundo o teste F a 10% de probabilidade, o modelo é globalmente significativo;
- (iii) Renda *per capita* e renda *per capita* ao quadrado têm efeito positivo e efeito negativo respectivamente sobre as emissões de CO<sub>2</sub>, já renda *per capita* ao cubo tem efeito nulo sobre a emissão de poluentes;
- (iv) Os resíduos são normalmente distribuídos, erros padrão robustos.

## VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, K. P. Optimal Growth when the Stock of Resources Is Finite and Deplatable. **Journal of Economic Theory**, Vol. 4, pp. 256-267, 1972.

ANDREONI, J.; LEVINSON, A., The Simple Analytics of the Environmental Kuznets Curve, **NBER Working Papers 6739**, National Bureau of Economic Research, Inc., 1998.

COLE, M. A. Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. **Ecological Economics**, v. 48, pp. 71 – 8, 2004.

CUNHA, C. A. Curva de Kuznets Ambiental: Estimativa Econométrica Usando CO<sub>2</sub> e PIB per capita. In **Anais do XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural**. Rio Branco, 2008.

DASGUPTA, P; HEAL G.M. The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. **Review of Economic Studies** (Symposium, 1974), pp.3-28, 1974.

DALY, Herman E. Elements of Environmental Macroeconomics. In MUNASINGHE, Mohan. **Macroeconomics and the Environment**. UK e USA: Elgar, 2002.

FONSECA, L. N.; RIBEIRO, E. P. Preservação ambiental e crescimento econômico no Brasil. In: **Anais do VII Encontro de Economia da Região Sul**, 2005. Porto Alegre: ANPEC, 2005.

GROSSMAN, G.; KRUEGER, A. Environmental impacts of a North American free trade agreement. **NBER, National Bureau of Economic Research Working Paper 3914**. Cambridge, MA, 1991.

GROSSMAN; G. M.; KRUEGER A. B. Economic Growth and Environment. **The Quarterly Journal of Economics**. May, 1995, p. 353-377.

GROSSMAN, Gene M. e KRUEGER, Alan B. Economic Growth and the Environment. In MUNASINGHE, Mohan. **Macroeconomics and the Environment**. UK e USA: Elgar, 2002.

- GUJARATI, D. N. **Econometria básica**. 3.ed. São Paulo: Makron Books, 2000.
- GYLFASON, T; HEBERTSSON, T.T; ZOEGA, G. A Mixed Blessing: Natural Resources and Economic Growth. **Macroeconomic Dynamics**, n. 3, p. 204-205, 1999.
- GYLFASON, T. Natural Resources, Education, and Economic Development. **European Economic Review**, n. 45, 2001.
- HOWITT, P. AGHION, P. **Endogeneous Growth Theory**. London, England, Cambridge Massachusetts: the MIT Press, 1998.
- KAMIEN, M I.; SCHWARTZ, N L. Optimal Exhaustible Resource Depletion with Endogenous Technical Change. **Review of Economic Studies**. Vol. 45, pp.179-196, 1978.
- KOUTSOYIANNIS, A. **Theory of econometrics**. 2.ed. New Jersey: Barnes & Noble Books, 1978.
- KUZNETS, P., SIMON, P. Economic growth and income inequality. **American Economic Review**, 45, 1955, pp. 1-28
- LUCENA, A. F. P. **Estimativa de uma Curva de Kuznets Ambiental aplicada ao uso de energia e suas implicações para as emissões de carbono no Brasil**. 2005. 132f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- MUNASINGHE, M. Macroeconomics and the Environment. UK e USA: Elgar, 2002, pp. 353-376. Publicado originalmente: **The Quarterly Journal of Economics**, Vol. 110, No. 2, 1995.
- MISHAN, E.J..**The Costs of Economic Growth**. Pelikan book, 1969.
- MUELLER, Charles C. Economia e meio-ambiente na perspectiva do mundo industrializado: uma avaliação da economia ambiental neoclássica. **Estudos Econômicos**, v. 26, n. 2, 1996.
- MUELLER, C. Problemas ambientais de um estilo de desenvolvimento: a degradação da pobreza no Brasil. **Ambiente e Sociedade**, ano I, nº. 1, 1997.
- PANAYOTOU, T. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development, **World Employment Programme Research Working Paper WEP2-22/WP 238**, 1993.
- PANAYOTOU, T. Dymistifying the Environmental Kuznets curve **Environment and Development Economics**, n. 2, 1997.
- SOLOW, R.. An almost practical step toward sustainability. In MUNASINGHE, Mohan. **Macroeconomics and the Environment**. UK e USA: Elgar, 2002.