

**MATHEUS DE MATOS WIRTH**

**O MODELO DE SOLOW VERDE E A CONVERGÊNCIA  
DE EMISSÕES NA AMÉRICA LATINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Econômicas da Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Atuária da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Simão Davi Silber

**SÃO PAULO**  
**2022**

**MATHEUS DE MATOS WIRTH**

**O MODELO DE SOLOW VERDE E A CONVERGÊNCIA  
DE EMISSÕES NA AMÉRICA LATINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Econômicas da Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Atuária da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Simão Davi Silber

**SÃO PAULO**  
**2022**

## FICHA CATALOGRÁFICA

WIRTH, Matheus de Matos

O Modelo de Solow Verde e a Convergência de Emissões na América Latina – São Paulo, 2022.

47 p.

Área de concentração: Economia Ecológica.

Orientador: Prof. Dr. Simão Davi Silber

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo.

1. MODELO DE SOLOW VERDE; 2. CRESCIMENTO ECONÔMICO;  
3. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

## AGRADECIMENTOS

*“Sejam gratos em todas as circunstâncias” (1Ts 5:18a).*

Início agradecendo a Deus, que me deu a paixão pelo conhecimento. Agradeço pelo caminho que me permitiu trilhar nesses quatro anos de FEA-USP. Quando lembro do menino de 14 anos que sonhava em aprender economia, me alegro em ver a maturidade que ganhei e a paixão que conservei.

Agradeço aos meus pais, Noeme e Klaus, pelo exemplo pastoral, profissional e científico. Agradeço pelos sacrifícios empenhados para que eu e as minhas irmãs pudéssemos crescer em tamanho e em conhecimento, mesmo quando as condições pareciam tão desfavoráveis. Às minhas irmãs também agradeço por me ajudarem a desbravar o mundo do conhecimento. Em especial, à Katja pelos caminhos acadêmicos e à Karina pelos caminhos profissionais.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Simão Davi Silber, por aceitar o desafio de me orientar neste tema que eu escolhi e pelos comentários ao longo do trabalho. Também estendo minha gratidão a todo o corpo docente da FEA-USP, em especial Prof. Dr. Hélio Zylberstajn e ao Prof. Dr. Gilberto Tadeu Lima.

Agradeço fortemente ao Joaquim Levy, Eduardo Yuki, Thalita Silva e os demais economistas do Banco Safra, com os quais aprendi muito da instuição econômica e da ética no trabalho. Também agradeço a Daniela Figueiredo e Gustavo Torigoe pela parceria.

Agradeço ao Guilherme Luccas, meu companheiro e meu melhor amigo. Agradeço por sua infinita curiosidade sobre o mundo, inclusive sobre o cenário econômico. Responder suas perguntas faz de mim um economista melhor.

Aos meus companheiros de jornada na faculdade, também agradeço pelo crescimento conjunto e pela parceria. Em especial: Vitor Uliani, Priscila Lacerda e Nicolas Bisin.

“Uma verdadeira abordagem ecológica sempre se torna uma abordagem social,  
que deve integrar a justiça nos debates sobre o meio ambiente,  
para ouvir tanto o clamor da terra como o clamor dos pobres.”

Papa Francisco

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 CRESCIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE: O QUE DIZ A LITERATURA? .....</b>	<b>12</b>
2.1 OS CRÍTICOS DO CRESCIMENTO .....	14
2.2 ENTUSIASTAS DO CRESCIMENTO.....	15
2.3 UMA TERCEIRA VISÃO: A CURVA EM U INVERTIDO .....	17
<b>3 O MODELO DE SOLOW VERDE .....</b>	<b>20</b>
<b>4 CONVERGÊNCIA DAS EMISSÕES PARA A AMÉRICA LATINA .....</b>	<b>33</b>
4.1 DADOS.....	33
4.2 RESULTADOS .....	36
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>45</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS (CAK) .....	17
<b>FIGURA 2.</b> FUNÇÃO DE POLUIÇÃO EMITIDA .....	21
<b>FIGURA 3.</b> CONVERGÊNCIA PARA ECONOMIA DE EQUILÍBRIO .....	22
<b>FIGURA 4.</b> MODELO DE SOLOW VERDE COM CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL .....	25
<b>FIGURA 5.</b> MODELO DE SOLOW VERDE SEM CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL .....	26
<b>FIGURA 6.</b> EMISSÕES AGREGADAS PARA A AMÉRICA LATINA .....	34
<b>FIGURA 7.</b> EMISSÕES PARA OS MAIORES POLUIDORES DA AMÉRICA LATINA .....	35
<b>FIGURA 8.</b> REGRESSÃO DO LOG DAS EMISSÕES PER CAPTA EM 1960 COM O LOG DA TAXA DE CRESCIMENTO DAS EMISSÕES PER CAPTA NO PERÍODO ENTRE 1960 E 1997 .....	37

### TABELAS

<b>TABELA 1.</b> ESTIMAÇÃO DO MODELO DE SOLOW VERDE PARA O GÁS METANO (CH <sub>4</sub> ) .....	38
<b>TABELA 2.</b> ESTIMAÇÃO DO MODELO DE SOLOW VERDE PARA O DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ) .....	39
<b>TABELA 3.</b> ESTIMAÇÃO DO MODELO DE SOLOW VERDE PARA O ÓXIDO NITROSO (N <sub>2</sub> O) .....	40
<b>TABELA 4.</b> ESTIMAÇÃO DO MODELO DE SOLOW VERDE PARA OS GASES DE KYOTO .....	40

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAK – Curva Ambiental de Kuznets

EEE – Economia de Estado Estacionário

CAE – Convergência Absoluta de Emissões

CCE – Convergência Condicional de Emissões

CH<sub>4</sub> – Metano

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso

PIK – *Postdam Institute for Climate Impact Reseach*

GGDC – *Groningen Growth and Development Centre*



## RESUMO

### O MODELO DE SOLOW VERDE E A CONVERGÊNCIA DE EMISSÕES NA AMÉRICA LATINA

O presente trabalho estuda a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental, através da replicação do Modelo de Solow Verde, proposto por Brock e Taylor (2004, 2010), com dados da América Latina. O modelo presume convergência nas emissões per capita de poluentes e os resultados concluem que existe convergência e acomodação nas emissões de alguns poluentes na América Latina. Essa observação sinaliza que o *trade-off* entre crescimento econômico e degradação ambiental pode não existir ao longo de todo o processo de crescimento, com as emissões por unidade de produto encolhendo.

**Palavras-chave:** Modelo de Solow Verde, crescimento econômico e desenvolvimento sustentável.

**Códigos JEL:** O44, Q57 e Q01.

## **ABSTRACT**

### **THE GREEN SOLOW MODEL AND THE CONVERGENCE OF EMISSIONS IN LATIN AMERICA**

The present work studies the relationship between economic growth and environmental degradation, through the replication of the Green Solow Model presented by Brock and Taylor (2004, 2010), using data from Latin America. The model assumes convergence in per capita emissions and this study results conclude that some emissions do converge and settle in Latin America. This observation indicates that the trade-off between economic growth and environmental degradation may not exist throughout the entire growth path, when emissions per unit of product shrink.

**Keywords:** Green Solow Model, economic growth and sustainable development.

**JEL codes:** O44, Q57 and Q01.

## **1 INTRODUÇÃO**

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa testar o Modelo de Solow Verde usando dados de emissões de poluentes na América Latina. O modelo faz parte da literatura de economia ecológica e contribui para responder a seguinte pergunta: existe um *trade-off* de longo prazo entre preservação ambiental e crescimento econômico? A partir do modelo, podemos derivar uma trajetória para as emissões de poluentes em relação ao acúmulo de capital, o que nos fornece base para responder essa pergunta. O Modelo de Solow original nos traz uma hipótese sobre a trajetória da renda per capita dos países: elas devem convergir para o mesmo nível no longo prazo. A versão verde do modelo afirma que, no longo prazo, também devem convergir as emissões de poluentes per capita. Neste trabalho, trataremos da convergência nas emissões de poluentes na América Latina e o isso significa para responder o *trade-off* apresentado. Se no longo prazo as emissões se acomodarem, então os resultados nos dão base para rejeitar o *trade-off*. Trataremos destes temas a seguir.

No Capítulo 2, tratamos de como economistas tentaram responder o *trade-off* entre crescimento econômico e meio ambiente nas últimas décadas. No Capítulo 3, adentramos no Modelo de Solow Verde e destrinchamos as hipóteses do modelo, com destaque para a trajetória de emissão de poluentes e a convergência nas emissões entre os países. No Capítulo 4, testamos o Modelo de Solow Verde e procuramos uma confluência nas emissões de países da América Latina para CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e a soma de todos os gases contemplados no Protocolo de Kyoto. Por fim, no Capítulo 5 apresentamos as considerações finais.

## **2      CRESCIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE: O QUE DIZ A LITERATURA?**

## 2 CRESCIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE: O QUE DIZ A LITERATURA?

A relação entre crescimento econômico e meio ambiente tem sido objeto de estudo de economistas e ambientalistas desde o final da década de 1960. Nas décadas de 1950 e 1960, a rápida expansão da economia e a aumento do padrão material das famílias dos países desenvolvidos se deu ao mesmo tempo em que os primeiros efeitos da destruição do meio ambiente passaram a ser percebidos pela população (KÅGESON, 1998, p. 1). Não tardou para que estudiosos chamassem o crescimento de causa e a destruição ambiental de efeito. Em 1967, com a publicação de *The costs of economic growth*, EJ Mishan se fez pioneiro na crítica a uma economia orientada ao crescimento, defensora de uma expansão infinita em um mundo finito. Teóricos que o sucederam amadureceram a crítica, propondo conduzir a economia para o estado estacionário, na intenção de fugir da armadilha ambiental provocada pelo crescimento.

A crítica não ficou sem réplica. Do outro lado, autores guiados por um otimismo econômico e uma abordagem neoclássica rejeitaram a afirmação de que o crescimento é uma bomba-relógio para a natureza, mas defenderam que é a própria expansão da economia que cria as condições para a melhora da qualidade do meio ambiente e redução do grau de poluição.

O debate que se instaurou visa responder à seguinte pergunta: existe um *trade-off* entre preservação ambiental e desenvolvimento econômico? Uma resposta não trivial foi levantada por Panayotou e outros teóricos na década de 1990. Esses autores acreditam que a relação entre crescimento e poluição não é única ao longo de todo o processo de desenvolvimento de uma economia. Para eles, a degradação ambiental é baixa em economias pouco desenvolvidas e cresce com o desenvolvimento, até que atinge um ponto de virada e a degradação ambiental decresce em estágios mais avançados.

Vejamos em detalhe como pensam esses autores.

## 2.1 OS CRÍTICOS DO CRESCIMENTO

Mishan (1967) é um pioneiro na crítica ao crescimento. O autor afirma que a expansão está diretamente associada a uma piora no bem estar social, já que o crescimento econômico, populacional e tecnológico produz custos sociais não desejados. Esses custos, que se traduzem em uma piora da qualidade do meio ambiente e uma maior fragmentação das relações humanas, seriam o produto óbvio de uma economia que almeja um crescimento infinito em um mundo com recursos limitados. O Clube de Roma, criado em 1968 na *Accademia dei Lincei*, reúne um dos mais importantes grupos de estudo dos críticos do crescimento. O clube se une na ideia de que as instituições e políticas econômicas tradicionais, orientadas à expansão, perderam a capacidade de lidar com os complexos problemas produtivos da humanidade (MEADOWS et al, 1972, p. 9) e defendem a adoção de instituições novas, que combatam a exaustão de recursos finitos, as mudanças no meio ambiente e o crescimento populacional (KÅGESON, 1998, p.1).

Meadows et al (1972) escrevem um dos mais importantes trabalhos do Clube de Roma em *The limits of growth*. Os autores proferem um discurso alarmista, dizendo que é necessário interromper o ritmo exponencial de crescimento econômico para se evitar que o limite da expansão seja atingido dentro de 100 anos. Se nada for feito, a armadilha do crescimento levará a uma crise de recursos, forçando a queda abrupta da população e da capacidade industrial. Mesmo que os recursos se provem ser o dobro do esperado, o acúmulo de poluição definiria o limite da expansão. Os efeitos da poluição não poderiam ser completamente enfrentados pelo avanço tecnológico, uma vez que nenhum progresso é espontâneo e sem custos. Para evitar os efeitos destrutivos do crescimento, Meadows et al defendem que a economia deve ser guiada para o *Equilíbrio Global*, em que não há expansão econômica. Essa proposta dialoga bem com a conclusão mais geral dos estudiosos do Clube de Roma e dos demais críticos do crescimento, que é a necessidade de superar as catástrofes promovidas por uma economia orientada à expansão, conduzindo a economia para um estado estacionário sem crescimento.

A formulação de uma Economia de Estado Estacionário (EEE) atinge alto grau de detalhamento nos trabalhos de Herman Daly. Daly (1973) perpetua a crítica a um otimismo tecnológico que desconsidera os custos do progresso técnico. O

autor dá o nome de *Growthmania* a uma economia que se orienta ao crescimento sem levar em conta os custos do avanço técnico e econômico. Como alternativa à *Growthmania*, o autor sugere a EEE. O estado estacionário de Daly é um conceito mais físico que econômico: o que se controla não é o nível de crescimento do produto, mas o da população. A EEE seria, portanto, uma economia com o tamanho da população e o padrão material das famílias em nível constante, mantido a um patamar desejado e suficiente (DALY, 1991, p.16). Para isso, são necessárias instituições que regulem e estabilizem: (I) o tamanho da população; (II) a quantidade de recursos naturais, de forma que mantenha a produtividade sempre abaixo dos limites ecológicos; e (III) o grau de desigualdade. O autor reconhece que as melhoras no uso dos recursos e na eficiência devem provocar algum crescimento do produto, mas nega que a produtividade dos recursos naturais possa crescer em ritmo exponencial, de forma a sustentar o crescimento exponencial da economia. Sendo assim, as barreiras físicas de Daly se traduzem em barreiras também para a expansão da economia.

## 2.2 ENTUSIASTAS DO CRESCIMENTO

Jacoby (1973) caracteriza os apelos pelo fim do crescimento da população e do produto como ideias radicais e de inversão dos valores. O autor argumenta que a melhor forma de combater a poluição é por meio do crescimento da renda. Ele não está sozinho nessa retórica. Muitos economistas argumentam que a expansão econômica impulsiona o progresso tecnológico, a eficiência e a substituição de mecanismos poluentes por outros mais limpos. Os efeitos de substituição são, inclusive, estimulados pela elevação dos preços em uma situação de escassez de recursos naturais. Ou seja, se o atual sistema produtivo devora recursos escassos, é a própria relação entre oferta e demanda que forçará a substituição dos recursos em falta (e mais caros) por outros em maior disponibilidade.

Beckerman (1992) argumenta que a narrativa de cessar a expansão pode ter ignorado que, mesmo com algum impacto indesejado no meio ambiente nos estágios iniciais de desenvolvimento, o crescimento é fundamental para superar a pobreza e a desnutrição nos países emergentes e garantir o padrão material e o bem estar nos países desenvolvidos. O autor argumenta que, em termos de perda



de bem estar, o maior problema ambiental que enfrentam as nações emergentes é a falta de acesso a água potável e saneamento básico. Esses são problemas que o progresso econômico contribui para eliminar. Se tornar rico, portanto, é a melhor escolha para um país que deseja melhorar a qualidade do meio ambiente no longo prazo. Beckerman argumenta que a possibilidade de exaustão de recursos não deve se mostrar um empecilho para o crescimento, uma vez que os mecanismos de *feedback* da economia, como as variações nos preços, favorecem a substituição e permitem uma produção menos intensiva em matéria-prima.

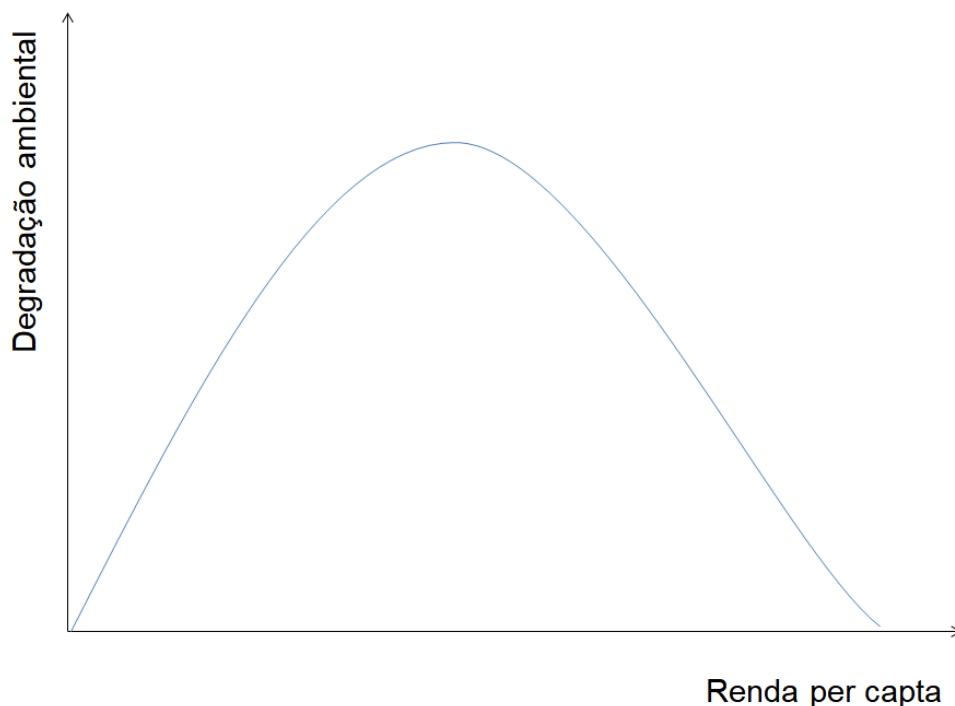
Beckerman inicialmente defende que a imposição de barreiras ao uso de recursos naturais não melhora a qualidade do meio ambiente, mas tira o foco dos principais problemas ambientais. No entanto, o autor pondera que nem todos os problemas podem ser resolvidos pelo crescimento econômico e admite a necessidade de algumas políticas de controle de poluição. Bartlett (1994), por sua vez, radicaliza e argumenta contra todo tipo de controle e regulamentação ambiental. Ele afirma que os investimentos em abatimento de poluição, necessários para se adequar às políticas ambientais, não podem ser contabilizados junto aos outros tipos de investimentos, pois o esforço empenhado no abatimento não constrói valor agregado: é peso-morto. O autor aponta que o crescimento da produtividade nos Estados Unidos passou a declinar após a adoção de algumas regulamentações na década de 1970 e destaca: “Every serious study that has ever been done on the subject confirms that the U.S. is paying an enormous cost for environmental regulation” (BARTLETT, 1994, p.1). Bartlett argumenta que os recursos naturais devem ser tratados como ilimitados. A razão é que o crescimento econômico cria o ambiente para: (I) a procura e a descoberta de novas fontes de recursos naturais; (II) substituições na produção; e (III) substituições no consumo. A conclusão é de que a regulação ambiental, ao reduzir o crescimento, reduz a qualidade do meio ambiente. Isso porque, na ausência de crescimento, se suprimem as inovações e substituições que reduzem a poluição. Ele exemplifica com o consumo de cobre pela telefonia. Com os avanços tecnológicos, o cobre foi substituído pela fibra ótica, feita de vidro, que por sua vez é feito de areia. Sem a expansão econômica, argumenta o autor, poderíamos ainda estar minerando cobre para fazer ligações.

### 2.3 UMA TERCEIRA VISÃO: A CURVA EM U INVERTIDO

Uma terceira perspectiva emerge na década de 1990. No *World Development Report* de 1992, o Banco Mundial presumiu que a relação entre crescimento econômico e qualidade do meio ambiente poderia ser mais bem descrita por uma curva no formato de *U invertido*. Isso significa que, nos estágios iniciais de desenvolvimento, o crescimento gera custos de poluição crescentes. Depois, a redução no uso intensivo de matéria prima e as crescentes preocupações com os impactos no meio ambiente fazem com que o nível de degradação ambiental se estabilize. Em fases avançadas de desenvolvimento, tecnologias mais limpas e eficientes são empregadas, empurrando o nível de poluição para baixo.

Panayotou (1992), ao observar a curva em *U invertido*, sugere a existência de uma Curva Ambiental de Kuznets (CAK). A Curva de Kuznets se refere à hipótese de que a desigualdade de renda é baixa em economias pobres e cresce conforme a economia se desenvolve, para depois decrescer quando a economia se torna rica (KUZNETS, 1971). Panayotou substitui a desigualdade por degradação ambiental na formulação da CAK (Figura 1).

**FIGURA 1.** CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS (CAK)



**Fonte:** Panayotou (2000, p. 52)

Os economistas que assinaram o *World Development Report* de 1992 encontraram resultados compatíveis com a CAK especialmente para a poluição do ar, contaminação das águas e alguns tipos de desflorestamento. Mas argumentam que outros tipos de poluição se encaixam melhor em outros formatos de curva, como a falta de acesso a água potável e saneamento, que apenas decresce com a renda.

Grossman e Krueger (1995) estimaram uma CAK com dados em painel das emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e fumaça para várias cidades do planeta. Ao nível de renda, em dólares de 1985, de US\$ 4.053 *per capita* para o SO<sub>2</sub> e de US\$ 6.151 *per capita* para a fumaça, ocorreu o ponto de virada e as emissões passaram a declinar. Selden e Song (1994) também descobriram uma CAK para a emissão de gases poluentes. Nos países desenvolvidos, os pontos de virada foram, em dólares de 1985, de US\$ 8.709 para SO<sub>2</sub>; US\$ 11.217 para óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>); US\$ 10.289 para sólidos suspensos; e US\$ 5.963 para monóxido de carbono (CO).

Cropper e Griffith (1994) encontraram uma CAK para o desflorestamento de países emergentes. Os autores encontraram o ponto de virada em US\$ 4.760 *per capita* para África e em US\$ 5.420 *per capita* para a América Latina, também em dólares de 1985. Bhattarai e Hamming (2001) estimaram um ponto de virada no desflorestamento da América Latina um pouco mais alto, de US\$ 6.600 na mesma base de comparação.

Entre os estudos que defendem que a CAK explica bem a relação entre renda e degradação ambiental, temos o Modelo de Solow Verde, proposto por William A. Brock e M. Scott Taylor. Brock e Taylor (2004, 2010) desenvolvem uma adaptação do Modelo de Solow para incorporar também os dados de poluição. A conclusão dos autores é de que, sob a adoção de algumas hipóteses, a curva em *U invertido* aparece. Vejamos em detalhes como funciona o Modelo de Solow Verde a seguir.

### **3 O MODELO DE SOLOW VERDE**

### 3 O MODELO DE SOLOW VERDE

O *Modelo de Solow Verde* parte de um caminho comum ao Modelo de Solow original. O produto ( $Y$ ) é função de capital ( $K$ ), trabalho ( $L$ ) e progresso tecnológico. O investimento líquido ( $\dot{K}$ ), ou acúmulo de capital, cresce com a taxa de poupança ( $s$ ) e corrói com a depreciação do capital ( $\delta$ ). A variação do fator trabalho ( $\dot{L}$ ) sobe com a taxa de crescimento populacional ( $n$ ).  $\dot{B}$  representa a tecnologia aumentadora de trabalho e  $g_B$  representa a taxa de crescimento dessa tecnologia.

$$Y = F(K, BL) \quad (1)$$

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} = sY - \delta K \quad (2)$$

$$\dot{L} = \frac{dL}{dt} = nL$$

$$\dot{B} = \frac{dB}{dt} = g_B B$$

Brock e Taylor modelam o impacto da poluição assumindo que poluição produzida e poluição abatida operam em retornos constantes de escala. A poluição produzida está em função do produto: toda unidade  $F$  de atividade econômica gera  $\Omega$  unidades de poluição. A poluição abatida ( $A$ ) é função estritamente crescente e côncava, que está em função da atividade econômica ( $F$ ) e dos esforços de abatimento da economia ( $F^A$ ). O total de poluição emitida ( $E$ ) é igual à poluição produzida menos poluição abatida.

$$E = \text{poluição produzida} - \text{poluição abatida}$$

$$E = \Omega F - \Omega A(F, F^A)$$

Como  $A$  é homogênea de grau 1, vale que:

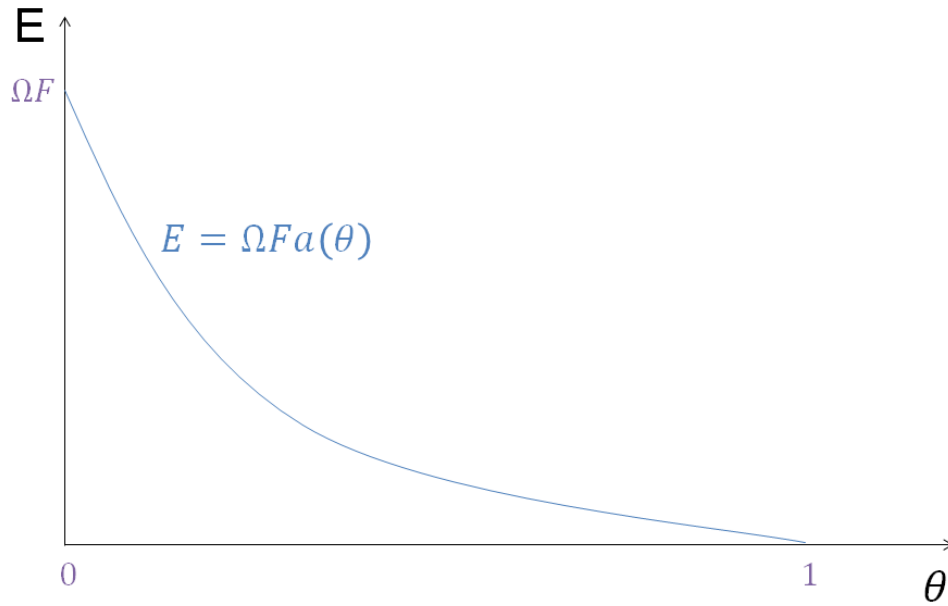
$$E = \Omega F \left[ 1 - A \left( 1, \frac{F^A}{F} \right) \right]$$

$$E = \Omega F a(\theta), \text{ onde } \theta = \frac{F^A}{F} \quad (3)$$

O sinal  $\theta$  é a fração da economia dedicada ao abatimento. Se não existem esforços de abatimento, vale que  $a(0) = 1$ , fazendo com que poluição emitida seja

igual à poluição produzida ( $E = \Omega F$ ). Se, ao contrário, toda a economia for dedicada ao abatimento, vale que  $a(1) = 0$  e poluição emitida é nula ( $E = 0$ ). O abatimento tem impacto positivo, mas marginalmente decrescente na redução da poluição, ou seja,  $a$  é uma função decrescente com concavidade para cima (vale que  $a'(\theta) < 0$  e  $a''(\theta) > 0$ ). Essa relação pode ser observada na Figura 2.

**FIGURA 2. FUNÇÃO DE POLUIÇÃO EMITIDA**



**Fonte:** Elaboração própria.

Hipóteses sobre poluição e abatimento devem ser integradas ao Modelo de Solow para derivar o modelo verde. O produto da economia, esboçado em (1), deve ser deduzido em  $\theta\%$ , uma vez que  $\frac{F^A}{F}$  representa exatamente a parte do produto que se sacrifica nos esforços de abatimento. Adequando (1) e (2) para o Modelo de Solow Verde, temos:

$$Y = [1 - \theta]F(K, BL) \quad (4)$$

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} = s[1 - \theta]F(K, BL) - \delta K \quad (5)$$

A seguir, reescrevemos (3), (4) e (5) em unidades intensivas, considerando  $f(k) = F(K, 1)$ .

$$e = \frac{E}{BL} = \Omega f(k)a(\theta) \quad (6)$$

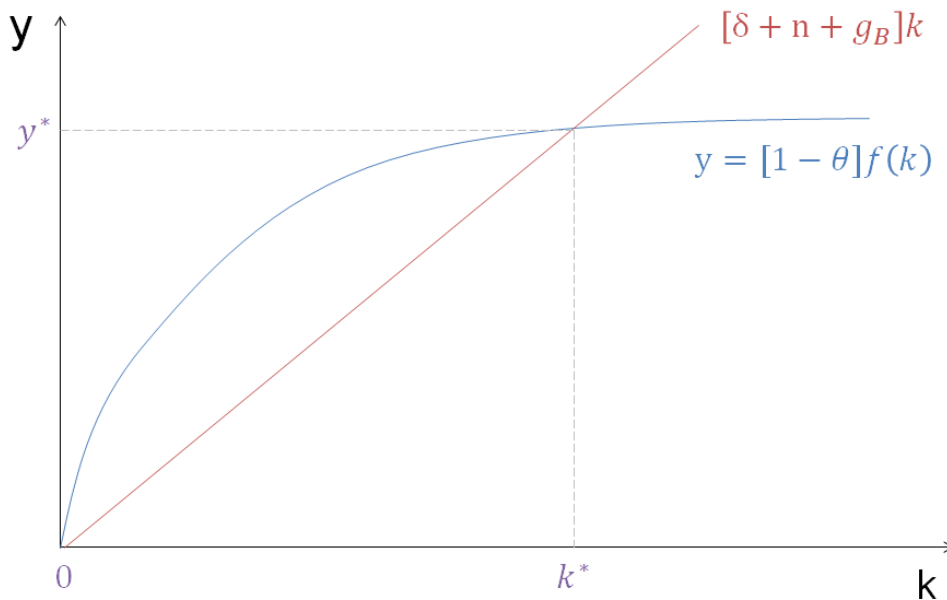
$$y = \frac{Y}{BL} = [1 - \theta]f(k) \quad (7)$$

$$\dot{k} = \frac{d\frac{K}{BL}}{dt} = \frac{(sY - \delta K)BL - K[BL(n + g_B)]}{BL}$$

$$\dot{k} = s[1 - \theta]f(k) - [\delta + n + g_B]k \quad (8)$$

Assumindo que valem as condições de Inada para  $F$  e que  $\theta$  é constante no tempo, é certo que a economia convergirá para um nível da razão capital-trabalho de equilíbrio ( $k^*$ ), assim como no *Modelo de Solow* original. Isso é, se a condição inicial de uma economia é  $k^0 > 0$ , essa economia convergirá para o estado estacionário em que  $k = k^*$ , indicado na Figura 3.

**FIGURA 3.** CONVERGÊNCIA PARA ECONOMIA DE EQUILÍBRIO



**Fonte:** Elaboração própria.

No equilíbrio, produto e capital crescem a uma taxa  $g_B + n$ , enquanto as medidas *per capita* crescem a  $g_B$ . O crescimento do produto acompanha o correspondente crescimento da poluição, como exposto em (6). É importante considerar que o progresso tecnológico permite que novas práticas menos poluentes aumentem a eficiência do combate à poluição. Logo, pode-se assumir que existe uma taxa de progresso tecnológico no abatimento ( $g_A$ ), que reduz a poluição emitida por unidade de produto. Dessa forma, podemos derivar de (6) que a taxa de

crescimento da poluição ( $g_E$ ) será igual à taxa de crescimento do produto ( $g_B + n$ ) menos a taxa de crescimento do progresso tecnológico no abatimento ( $g_A$ ).

$$g_E = g_B + n - g_A \quad (9)$$

Crescimento sustentável existe em uma economia se, e somente se,  $g_B > 0$  e  $g_E < 0$ . Ou seja, desde que exista crescimento positivo do produto *per capita* e decrescimento da emissão de poluentes. Essa melhora na qualidade do meio ambiente só deve ocorrer se a taxa de crescimento do progresso tecnológico no abatimento superar a taxa de crescimento do produto ( $g_A > g_B + n$ ).

Supondo válida a hipótese de crescimento sustentável, o Modelo Verde de Solow produz uma trajetória de poluição no formato de uma CAK, sem que sejam necessárias políticas ambientais que aumentem o abatimento. Mesmo que a intensidade do abatimento permaneça nula e constante, a relação em *U invertido* entre poluição e renda per capita se mantém. Para a exposição desse resultado, tomamos a função de produção como uma Cobb-Douglas, como especificado em (10). Substituindo (10) em (3), encontramos que o nível de poluição será (11).

$$Y = F(K, BL) = K^\alpha BL^{(1-\alpha)} = BL \left( \frac{K}{BL} \right)^\alpha = BLk^\alpha \quad (10)$$

$$E = \Omega BLk^\alpha a(\theta) \quad (11)$$

A taxa de crescimento das emissões será a primeira derivada de (11).

$$\frac{\dot{E}}{E} = \frac{\frac{dE}{dt}}{E} = g_B + n - g_A + \alpha \frac{\dot{k}}{k} = g_E + \alpha \frac{\dot{k}}{k} \quad (12)$$

Por sua vez, a taxa de crescimento da razão capital-trabalho é:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{k}}{k} &= \frac{\frac{dk}{dt}}{k} = \frac{sk^\alpha[1-\theta] - [\delta + n + g_B]k}{k} \\ \frac{\dot{k}}{k} &= sk^{\alpha-1}[1-\theta] - [\delta + n + g_B] \end{aligned} \quad (13)$$

A construção da CAK do *Modelo de Solow Verde* surge da plotagem de (12) e (13), assumindo a hipótese de crescimento sustentável ( $g_E < 0$ ). A Figura 4 mostra como esse processo ocorre. No estado estacionário, a taxa de crescimento da razão



capital-trabalho é nula, ou seja, vale que  $\frac{\dot{k}}{k} = 0$ . De (13), observamos que isso ocorrerá quando  $sk^{\alpha-1}[1 - \theta] = [\delta + n + g_B]$ . No gráfico superior da Figura 4, plotamos essas duas séries com  $\frac{\dot{k}}{k}$  no eixo vertical e  $k$  no eixo horizontal. Na intersecção entre as duas curvas se encontra o equilíbrio de longo prazo ( $L$ ), que é o estado estacionário.

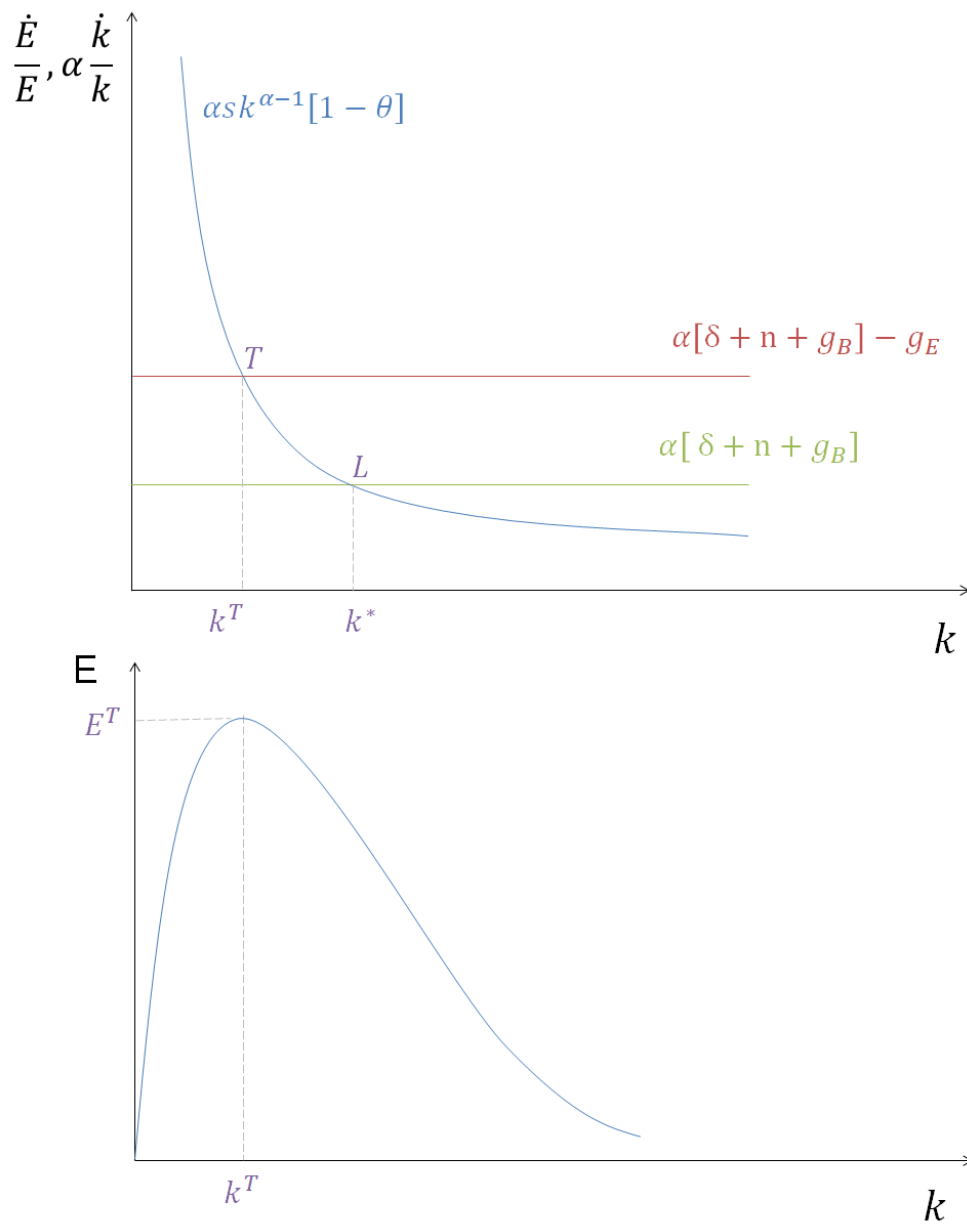
De (12), vemos que a taxa de crescimento da poluição se comporta de forma parecida com a taxa de crescimento de  $k$ . Substituindo (13) em (12), surge:

$$\frac{\dot{E}}{E} = \alpha sk^{\alpha-1}[1 - \theta] - \alpha[\delta + n + g_B] + g_E \quad (14)$$

A taxa de variação da poluição é positiva até que o nível de poluição faça pico. A partir de então, a taxa passa a ser negativa e o nível começa a cair. Esse pico marca o ponto de virada da degradação ambiental ( $T$ ). Em  $T$ , vale que  $\frac{\dot{E}}{E} = 0$ , que ocorre quando  $\alpha sk^{\alpha-1}[1 - \theta] = \alpha[\delta + n + g_B] - g_E$ . Também plotamos essas retas no gráfico superior da Figura 4, com  $\frac{\dot{E}}{E}$  no eixo vertical e  $k$  no eixo horizontal.

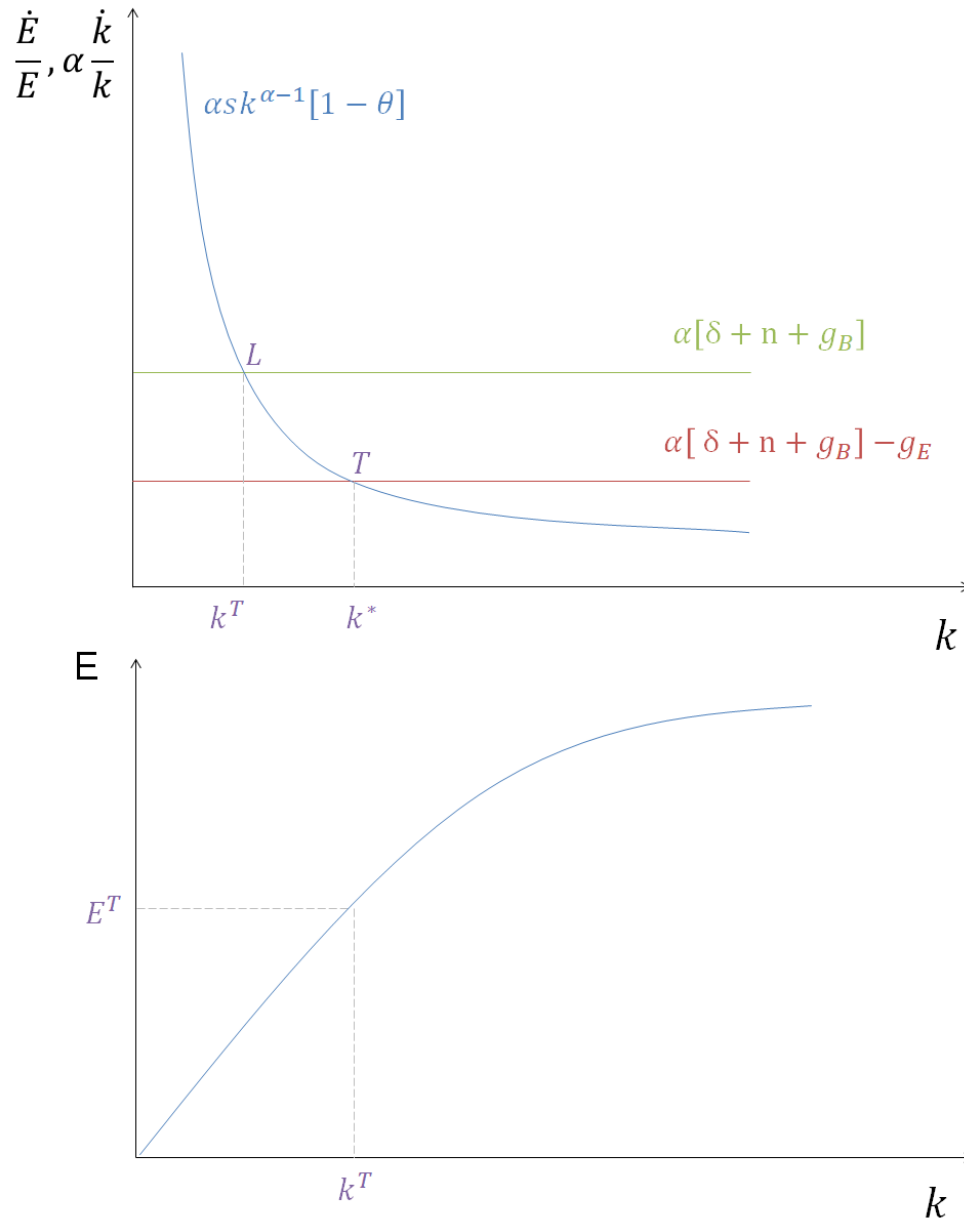
O gráfico inferior da Figura 4, com nível de emissões no eixo vertical e  $k$  no eixo horizontal, mostra a trajetória da poluição. Quando  $k$  é muito baixo, a taxa de crescimento da poluição é muito alta, como mostra o gráfico superior da Figura 4 ( $\lim_{k \rightarrow 0} \frac{\dot{E}}{E} = +\infty$ ). Dessa forma, o volume de poluição cresce rapidamente em níveis baixos de  $k$  e vai desacelerando conforme  $k$  aumenta, até que atinge  $k_T$ , o ponto de virada. À direita de  $k_T$ , o volume de poluição passa a cair. O formato de *U invertido* do gráfico inferior evidencia a CAK que sugere o modelo.

É importante destacar que modelar a CAK só foi possível graças à hipótese de crescimento sustentável, que faz com que a linha  $\alpha[\delta + n + g_B] - g_E$  esteja acima de  $\alpha[\delta + n + g_B]$  e o ponto de virada ( $T$ ) à esquerda do estado estacionário ( $L$ ). Sob a hipótese de crescimento não sustentável ( $g_E > 0$ ),  $T$  estaria à direita de  $L$ . Com isso, nada aconteceria no ponto de virada e as emissões cresceriam infinitamente (Figura 5). Mas independentemente de as condições da economia implicarem em crescimento sustentável ou não, vale que a taxa de crescimento da poluição é estritamente decrescente com  $k$ .

**FIGURA 4. MODELO DE SOLOW VERDE COM CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL**

**Fonte:** Brock e Taylor (2010, p. 137).

Assumindo crescimento sustentável: se a condição inicial ( $k_0$ ) estiver à esquerda de  $k_T$ , então a taxa de crescimento da poluição é inicialmente positiva e depois se inverte para negativa até atingir o estado estacionário. Caso  $k_0$  já esteja à direita de  $k_T$ , toda a trajetória da taxa de crescimento da poluição será negativa.

**FIGURA 5.** MODELO DE SOLOW VERDE SEM CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL

**Fonte:** Adaptado de Dos Santos (2019, p. 69).

Os valores de  $E_T$  e  $y_T$  não são únicos para diferentes economias que compartilhem os mesmos parâmetros (taxa de poupança, taxa de depreciação etc.). Diferentes condições iniciais implicarão em níveis diferentes de poluição emitida e produto no ponto  $T$ , em razão dos diferentes percursos das taxas de crescimento. O pico de poluição é atingido quando a poluição gerada via produto se iguala a poluição abatida. A parcela do produto dedicada ao abatimento é constante no tempo, mas o progresso tecnológico no abatimento cresce a uma taxa  $g_A$ . Sabe-se

também que  $\frac{\dot{E}}{E}$  é estritamente decrescente no percurso até o equilíbrio de longo prazo. Mas o momento em que poluição produzida e poluição abatida se encontrarão em  $T$  depende da taxa de variação da poluição, que por sua vez depende de  $k_0$ . Quanto mais distante estiver  $k_0$  de  $k^*$ , mais rápida é a taxa de crescimento do produto (e, por consequência, da poluição) em direção ao estado estacionário e mais tempo decorre até que as emissões sejam zeradas, aumentando a poluição emitida em  $T$ .

Isso resulta em uma dificuldade de estimar  $E_T$  e  $y_T$  em modelos de corte transversal, já que países com diferentes condições iniciais não chegarão aos mesmos resultados. Por essa razão, estudos que buscam estimar a CAK para um mesmo tipo de poluição chegam a valores diferentes para os dados da economia no ponto de virada. Brock e Taylor argumentam que muitas das estimações da CAK são feitas em estudos de corte transversal, frequentemente com países desenvolvidos e em desenvolvimento, ou com países comunistas e democráticos. Esses países não diferem apenas nas condições iniciais, mas também nos parâmetros do crescimento. Essa heterogeneidade dificulta que o modelo chegue a resultados consistentes para os indicadores no ponto  $T$ . Analisando a heterogeneidade, vemos que um aumento em  $s$ , por exemplo, desloca a curva azul do gráfico superior da Figura 4 para cima, aumentando o nível de  $k$  em  $T$  e  $L$ . Dado um mesmo  $k_0$ , uma maior taxa de poupança prolonga a trajetória da economia até  $T$ , resultando em um maior nível de  $E_T$  e  $y_T$ . A intuição econômica para isso é de que uma taxa de poupança maior acelera a acumulação de capital, que por sua vez acelera o crescimento do produto e das emissões, qualquer que seja  $k_0$ . Outro exemplo pode ser um aumento em  $\theta$  em razão de uma política ambiental mais austera. Um aumento em  $\theta$  desloca a curva azul da Figura 4 para baixo e encurta a trajetória das emissões até  $T$ . A justificativa é de que um aumento em  $\theta$  reduz a intensidade em capital de uma economia, reduzindo  $k$  em cada momento.

O Modelo de Solow Verde dá um passo a mais em relação à convergência de renda entre economias do Modelo de Solow original e sugere também uma convergência para a poluição. Sejam  $k_1$  e  $k_2$  condições iniciais de duas economias com os mesmos parâmetros e  $k_1 < k_2 < k_T < k^*$ , está claro que o crescimento do produto e da poluição será inicialmente maior na economia 1 em relação a economia

2. Conforme as economias convergem para  $k^*$ , as taxas de crescimento decrescem até que se estabilizam no estado estacionário. Logo, a convergência de poluição se verifica, mesmo que as economias apresentem trajetórias diferentes para a CAK. Façamos a estimação da convergência de emissões a seguir.

Primeiro, reescrevemos (3) em unidades poluição *per capita* ( $e^c$ ):

$$e^c = \frac{E}{L} = \frac{F\Omega a(\theta)}{L}$$

$$e^c = \frac{y^c}{[1-\theta]} \Omega a(\theta), \text{ onde } y^c = \frac{Y}{L} = \frac{F[1-\theta]}{L} \quad (15)$$

Diferenciando (15), temos a taxa de variação da poluição *per capita*.

$$\frac{\dot{e}^c}{e^c} = \frac{\frac{de^c}{dt}}{e^c} = \frac{\dot{y}^c}{y^c} - g_A \quad (16)$$

A equação (16) nos evidencia o que esperávamos em (9): a taxa de crescimento da poluição é igual à taxa de crescimento da economia menos a taxa de crescimento do progresso tecnológico no abatimento. Adicionando tempo ao modelo, podemos aproximar as taxas de crescimento de (16), supondo crescimento em um período discreto de tamanho  $N$ , pelas médias da variação em logaritmo entre os intervalos  $t$  e  $t - N$ .

$$\frac{1}{N} \ln \left[ \frac{e^c_t}{e^c_{t-N}} \right] = \frac{1}{N} \ln \left[ \frac{y^c_t}{y^c_{t-N}} \right] - g_A \quad (17)$$

De acordo com Mankiw et al. (1992) e Brock e Taylor (2010), podemos aproximar o crescimento do produto *per capita* em  $N$  períodos discretos do crescimento próximo ao estado estacionário do modelo, via linearização por *log*. Dessa forma, vale que:

$$\frac{1}{N} \ln \left[ \frac{y^c_t}{y^c_{t-N}} \right] = \frac{[1 - \exp[-vN]]}{N} \ln[y^{c*}] - \frac{[1 - \exp[-vN]]}{N} \ln[y^c_{t-N}] \quad (18)$$

Em que  $v$  é a velocidade de convergência para  $k^*$  no *Modelo de Solow*, tal que  $v = [1 - \alpha][\delta + n + g_B]$ . Valem ainda algumas substituições. Resgatamos (7) e (15), que nos mostram que  $y = \frac{Y}{BL}$  e  $y^c = \frac{Y}{L}$  e inferimos que  $y^{c*} = y^* B_{t-N} \exp(g_B t)$ .

De (15), também sabemos que  $y^c_{t-N} = \frac{e^c_{t-N}[1-\theta]}{\Omega_{t-N}a(\theta)}$ . Substituindo as expressões em (18), temos:

$$\frac{1}{N} \ln \left[ \frac{y^c_t}{y^c_{t-N}} \right] = \beta_0 + \beta_1 \ln \left[ \frac{e^c_{t-N}[1-\theta]}{\Omega_{t-N}a(\theta)} \right] \quad (19)$$

$$\beta_0 = g_B + \frac{[1 - \exp[-vN]]}{N} \ln[y^* B_{t-N}]$$

$$\beta_1 = -\frac{[1 - \exp[-vN]]}{N}$$

Substituindo (19) em (17), obtemos a estimação mais curta do Modelo de Solow Verde, que relaciona o crescimento da poluição *per capita* no período  $N$  com a poluição *per capita* no momento inicial em uma regressão linear simples com erro  $\mu_t$ . O termo  $i$  nos diz respeito ao número de economias na amostra. As intuições sobre o modelo e a formulação matemática nos indicam que o crescimento da poluição *per capita* deve ser menor conforme a condição inicial de  $e^c_{t-N}$  aumenta ( $\beta_1 < 0$ ).

$$\frac{1}{N} \ln \left[ \frac{e^c_{i,t}}{e^c_{i,t-N}} \right] = \beta_0 + \beta_1 \ln[e^c_{i,t-N}] + \mu_t \quad (20)$$

$$\beta_0 = g_B - g_A + \frac{[1 - \exp[-vN]]}{N} \ln \left[ \frac{y^* a(\theta) B_{t-N} \Omega_{t-N}}{[1 - \theta]} \right]$$

$$\beta_1 = -\frac{[1 - \exp[-vN]]}{N} < 0$$

A estimação curta nos diz a respeito da Convergência Absoluta de Emissões (CAE). Como os parâmetros que determinam o capital não são considerados como variáveis no modelo, a regressão nos dará a resposta para uma convergência de emissões entre as  $i$  economias, independentemente desses fatores.

Para gerar a estimação longa do Modelo de Solow Verde, é necessário abrir os determinantes do produto no estado estacionário em (20). Sabe-se que  $y^* = k^{*\alpha}(1-\theta)$ , então será necessário desmembrar  $k^*$ . Sabemos que no estado estacionário a taxa de variação da razão capital trabalho é nula. Assim, de (13), podemos inferir que:

$$\begin{aligned}
k^* &= \sqrt[\alpha-1]{\frac{[\delta + n + g_B]}{s[1 - \theta]}} \\
y^* &= \left( \sqrt[\alpha-1]{\frac{[\delta + n + g_B]}{s[1 - \theta]}} \right)^\alpha [1 - \theta] \\
y^* &= \left( \frac{[\delta + n + g_B]}{s[1 - \theta]} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} [1 - \theta] \\
y^* &= [s(1 - \theta)]^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} [\delta + n + g_B]^{-\frac{\alpha}{1-\alpha}} [1 - \theta] \quad (21)
\end{aligned}$$

Fazendo a substituição de  $y^*$  dentro do logaritmo de  $\beta_0$  pela expressão em (21), obtemos:

$$\begin{aligned}
\ln[y^* B_{t-N}] &= \ln \left[ [s(1 - \theta)]^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} [\delta + n + g_B]^{-\frac{\alpha}{1-\alpha}} a(\theta) B_{t-N} \Omega_{t-N} \right] \\
\ln \left[ s^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \right] &+ \ln \left[ [\delta + n + g_B]^{-\frac{\alpha}{1-\alpha}} \right] + \ln \left[ (1 - \theta)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} a(\theta) \right] + \ln[B_{t-N} \Omega_{t-N}] \quad (22)
\end{aligned}$$

As propriedades de  $a(\theta)$  permitem que escrevamos  $a(\theta) = [1 - \theta]^\epsilon$  com  $\epsilon >$

1. De forma que  $[1 - \theta]^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} a(\theta) = [1 - \theta]^{\frac{\alpha}{1-\alpha} + \epsilon}$ . Fazendo as devidas substituições, chegamos à estimação longa do *Modelo de Solow Verde*:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{N} \ln \left[ \frac{e^c_{i,t}}{e^c_{i,t-N}} \right] &= \beta_0 + \beta_1 \ln[e^c_{i,t-N}] + \beta_2 \ln[s_i] + \beta_3 \ln[1 - \theta_i] \\
&+ \beta_4 \ln[\delta_i + n_i + g_{B_i}] + \mu_t \quad (23)
\end{aligned}$$

$$\beta_0 = g_B - g_A + \frac{[1 - \exp[-vN]]}{N} \ln[B_{t-N} \Omega_{t-N}]$$

$$\beta_1 = -\frac{[1 - \exp[-vN]]}{N} < 0$$

$$\beta_2 = \left[ \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right] \frac{[1 - \exp[-vN]]}{N} > 0$$

$$\beta_3 = \left[ \frac{\alpha}{1 - \alpha} + \epsilon + 1 \right] \frac{[1 - \exp[-vN]]}{N} > 0$$

$$\beta_4 = -\left[ \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right] \frac{[1 - \exp[-vN]]}{N} < 0$$

Os sinais dos estimadores  $\beta$  sugerem que:

(I)  $\ln \left[ \frac{e^c_{i,t}}{e^c_{i,t-N}} \right]$  decresce com  $\ln[e^c_{i,t-N}]$ , uma vez que um nível mais alto de poluição per capita inicial sugere que a economia está mais próxima de  $k^*$ ;

(II)  $\ln \left[ \frac{e^c_{i,t}}{e^c_{i,t-N}} \right]$  cresce com  $\ln[s_i]$ , considerando que uma poupança maior aumenta a taxa de acumulação de capital, que reflete em maiores taxas de variação no produto e na poluição per capita;

(III)  $\ln \left[ \frac{e^c_{i,t}}{e^c_{i,t-N}} \right]$  cresce com  $\ln[1 - \theta_i]$ , já que uma menor proporção de  $\theta$  implica em um aumento da intensidade em capital de uma economia e com isso o crescimento da poluição; e

(IV)  $\ln \left[ \frac{e^c_{i,t}}{e^c_{i,t-N}} \right]$  decresce com  $\ln[\delta_i + n_i + g_{B_i}]$ , uma vez que o aumento nesses parâmetros reduz o nível de  $k^*$ , aproximando o equilíbrio da condição inicial e fazendo com que o crescimento do capital, do produto e da poluição seja menor.

A versão longa do modelo nos diz respeito à Convergência Condicional de Emissões (CCE). Aqui desmembramos os parâmetros e percebemos o impacto deles na taxa de crescimento da poluição per capita, ou seja, no desenho da trajetória de poluição. A convergência de emissões sob a CCE será apenas possível caso os parâmetros das economias sejam iguais.



## **4      CONVERGÊNCIA DAS EMISSÕES PARA A AMÉRICA LATINA**

## 4 CONVERGÊNCIA DAS EMISSÕES PARA A AMÉRICA LATINA

Observamos agora como o *Modelo de Solow Verde* nos ajuda a estimar uma convergência de emissões entre os países da América Latina. Exploraremos como se comporta a estimação para quatro medidas de poluição: as emissões de gás metano ( $\text{CH}_4$ ), de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e da soma dos gases de efeito estufa considerados no Protocolo de Kyoto (abaixo referidos como gases de Kyoto), que abrange os gases acima mencionados e os gases fluorados.

### 4.1 DADOS

Foram reunidos dados para 22 países da América Latina<sup>1</sup> entre os anos de 1960 e 1997. A data de início da série dos dados foi definida de forma que fosse a mais longa possível, sem que houvesse perda significativa na amostragem, já que parte dos países não possuem séries de dados longas. A data de fim foi definida no ano em que foi assinado o Protocolo de Kyoto. Estimar dados de abatimento de poluição é muito difícil e sabe-se que, antes da assinatura do protocolo, pouco esforço foi empenhado pelos países no sentido de reduzir a poluição. Dessa forma, aproximamos a taxa de abatimento da economia de zero, isso é,  $\theta_i = 0$ , de forma que  $\ln[1 - \theta_i] = 0$  para todo  $i$ . Portanto, excluimos a taxa de abatimento de nosso modelo e não nos interessa estimar  $\beta_3$ .

Usamos os dados do *Postdam Institute For Climate Impact Research* (PIK) e do *Groningen Growth and Development Centre* para realizar a estimação da convergência entre os países. Para calcular o modelo, consideramos a taxa de poupança média para cada país no intervalo de 1960 e 1997, usando a parcela de investimento no produto como *proxy* da taxa de poupança. Também simplificamos

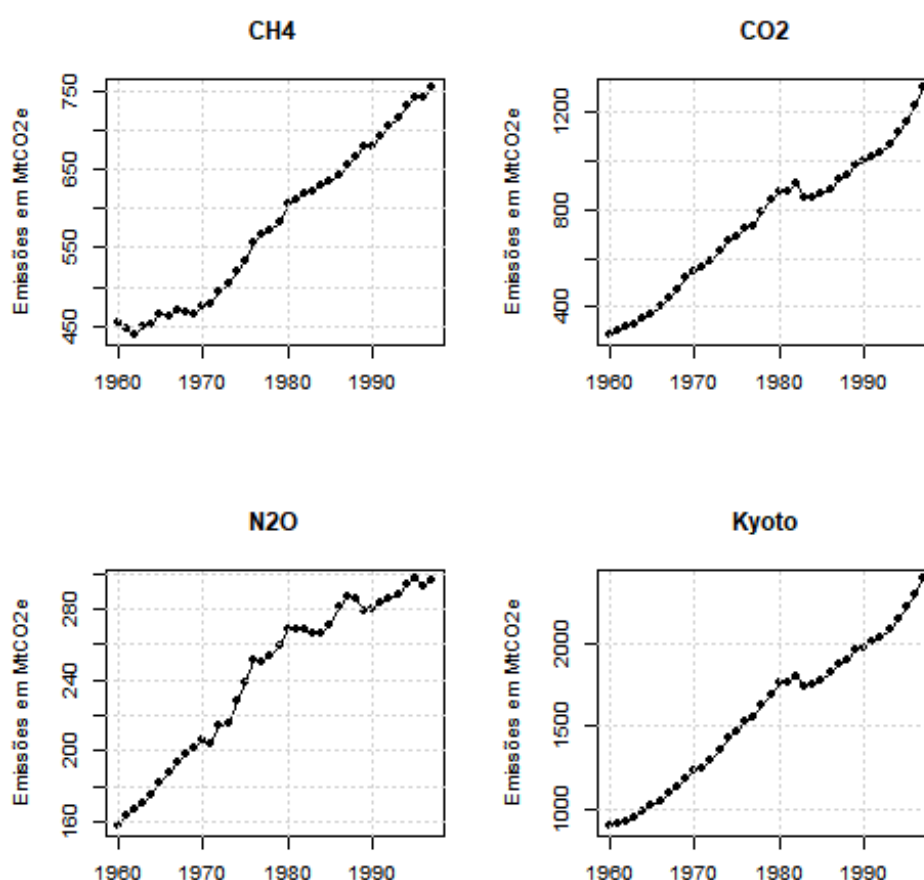
---

<sup>1</sup> São eles: Argentina, Barbados, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Costa Rica, El Salvador, Equador, Guatemala, Haiti, Honduras, Jamaica, México, Nicarágua, Panamá, Paraguai, Peru, República Dominicana, Trindade e Tobago, Uruguai e Venezuela.

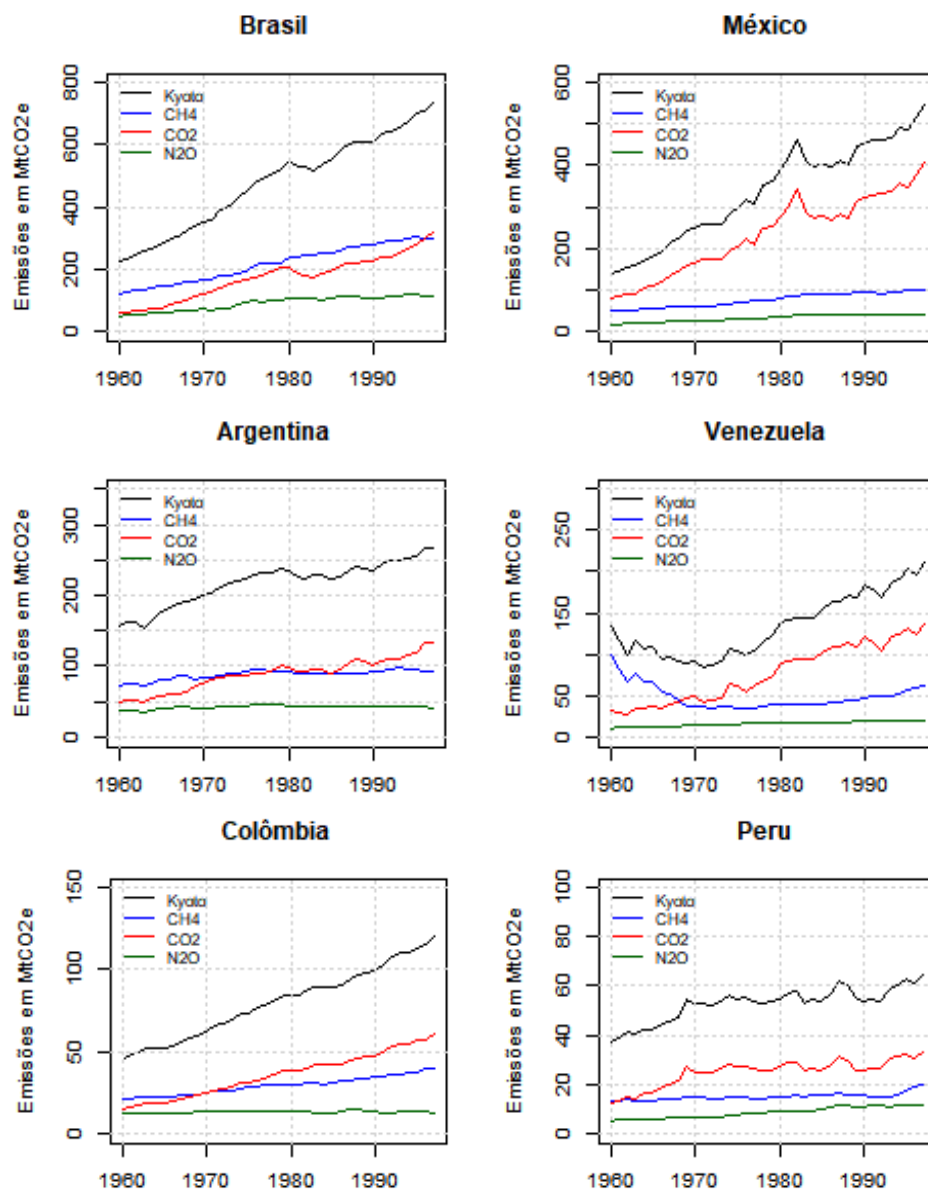
os parâmetros que determinam o capital para incluir apenas a taxa de crescimento da população e calculamos sua expansão entre 1960 e 1997 para cada economia.

A Figura 6 apresenta a evolução no tempo das emissões agregadas em toda a América Latina para  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e dos gases de Kyoto em milhares de toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente. É claro nos gráficos que os as emissões absolutas não caíram em nenhuma das medidas observadas. Se as emissões não caíram, mesmo considerando que as décadas de 1960 a 1990 foram tempos de considerável acúmulo de capital para o continente, então não é possível observar uma CAK para o período. Essas considerações também valem para os seis países que mais poluíram no período observado (Figura 7). Os dados nos dão dessa forma uma boa oportunidade para testar o Modelo de Solow Verde na ausência de uma CAK. Mesmo que no período observado as emissões de poluentes não se comportaram no formato de um *U invertido*, o modelo sustenta que deve haver alguma convergência nas emissões per capita.

**FIGURA 6. EMISSÕES AGREGADAS PARA A AMÉRICA LATINA**



Fonte: PIK e Elaboração própria.

**FIGURA 7. EMISSÕES PARA OS MAIORES POLUIDORES DA AMÉRICA LATINA**

**Fonte:** PIK e Elaboração própria.

Consideramos três amostras para testar o Modelo de Solow Verde. A amostra 'A' testa a CAE para os 22 países, usando a estimação curta apresentada em (20). A amostra 'B' testa a CCE, por meio da estimação longa, exposta na regressão em (23). Não foram encontrados dados consistentes de taxa de poupança para Trindade e Tobago, que precisou ser excluído da segunda amostra, que passou a ser composta de 21 países. Na amostra 'C' excluímos também a Venezuela e países com população menor que 2 milhões de habitantes em 1960. Para a Venezuela, a razão da exclusão é de que a extração de petróleo e outras atividades de baixo valor

agregado são responsáveis por grande parte do PIB, como também ocorre em outros países da OPEP. Para os países pequenos, sua estrutura produtiva geralmente reflete atividades muito particulares, como atividades financeiras de paraísos fiscais ou empresas de reexportação marítima. Nesses países, é difícil observar como as inovações tecnológicas no abatimento definem a convergência nas emissões per capita. A terceira amostra é composta de 13 países.

## 4.2 RESULTADOS

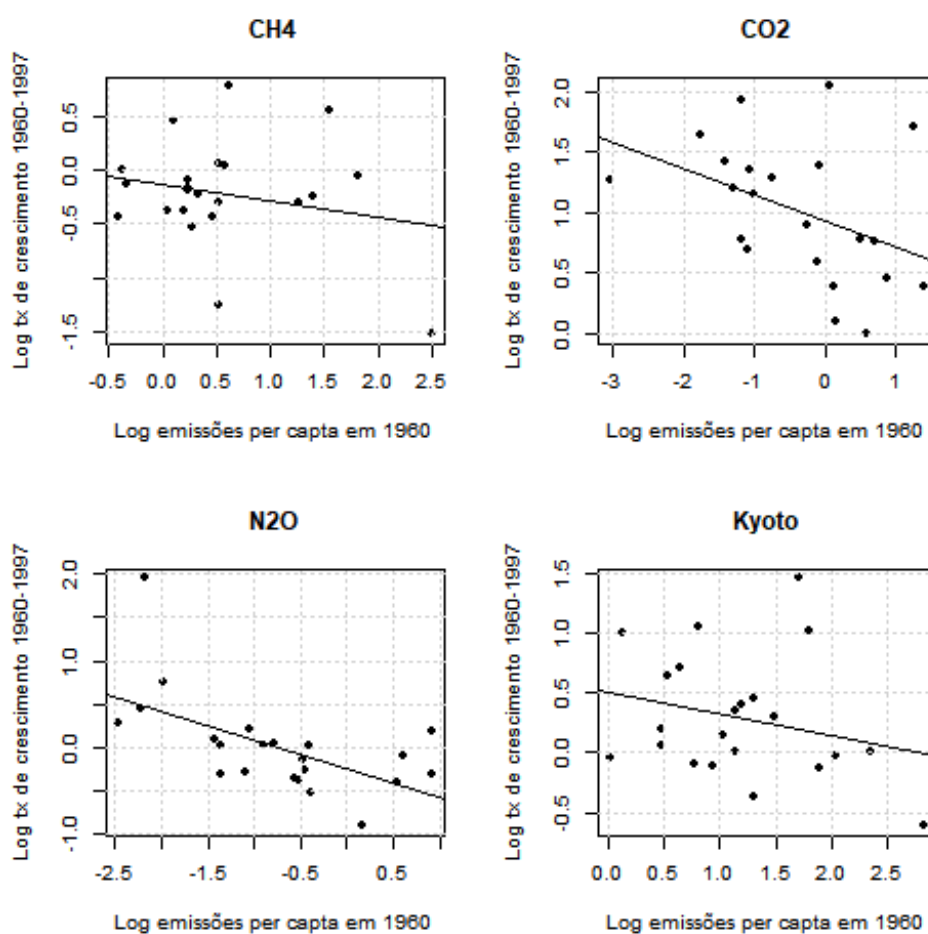
Examinemos primeiro os resultados da amostra 'A'. Na Figura 8 plotamos os dados com o *log* das emissões per capita em 1960 no eixo horizontal e o *log* da variação nas emissões per capita entre 1960 e 1997 no eixo vertical. A linha de regressão se mostrou negativamente inclinada em todos os casos. Apesar de o sinal de  $\beta_1$  se mostrar consistente com uma CAE, deve-se alertar que o  $R^2$  ajustado foi muito baixo para o CH<sub>4</sub> (0,002), o CO<sub>2</sub> (0,127) e os gases de Kyoto (0,019).

O resultado para N<sub>2</sub>O foi surpreendentemente compatível com a CAE, com o estimador de  $\beta_1$  com sinal negativo e um  $R^2$  ajustado de 0,313. Vale notar que, na Figura 6, as emissões totais de N<sub>2</sub>O são as únicas que desaceleram no tempo. Também na Figura 7, as emissões de N<sub>2</sub>O se mantiveram mais ou menos constantes para todos os seis maiores poluidores.

De fato, os gráficos sugerem que as emissões de óxido nitroso parecem estar se acomodando mais rapidamente que as demais. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* de 2001 estimou que um terço das emissões de N<sub>2</sub>O seja antropogênico e a maior parte está associada à agricultura e ao uso de fertilizantes a base de nitrogênio, sendo amônia (NH<sub>3</sub>) o principal. O documento também afirma que no início da década de 1990 houve uma desaceleração nas emissões de N<sub>2</sub>O, principalmente em razão da redução do uso de insumos agrícolas nitrogenados. Uma redução no uso de amônia por uma possível substituição por fertilizantes fosfatados pode ser a mudança tecnológica que favoreceu a convergência absoluta nas emissões de N<sub>2</sub>O no período destacado. Nos anos 2000, a expansão do agronegócio brasileiro puxou novamente as emissões absolutas de N<sub>2</sub>O da América Latina para cima. Esse fenômeno nos sugere que, pelo menos em um primeiro momento, os mecanismos de substituição podem ser limitados e terem se esgotado,

favorecendo o uso de compostos nitrogenados conforme a demanda por fertilizantes aumenta. Estudos ainda se fazem necessários para compreender se a CAE se mantém para o  $N_2O$  após o período observado. Por hora sabemos que, pelas estimações do Modelo de Solow Verde, os dados são compatíveis com uma CAE para o  $N_2O$  entre os anos 1960 e 1997.

**FIGURA 8.** REGRESSÃO DO LOG DAS EMISSÕES PER CAPTA EM 1960 COM O LOG DA TAXA DE CRESCIMENTO DAS EMISSÕES PER CAPTA NO PERÍODO ENTRE 1960 E 1997



Fonte: PIK, GGDC e Elaboração própria.

Nas tabelas que seguem, apresentamos os resultados obtidos com a regressão para cada amostra. A Tabela 1 apresenta os resultados para as emissões de  $CH_4$ , a Tabela 2 para  $CO_2$ , a Tabela 3 para  $N_2O$  e a Tabela 4 para os gases de Kyoto.

Para as emissões de  $CH_4$ , observamos inicialmente que a amostra 'A' apresenta um estimador condizente com uma CAE, mas com um  $R^2$  ajustado muito

baixo. As amostras 'B' e 'C' testam a CCE e nenhuma das duas apresentou resultados satisfatórios. Na amostra 'B', o sinal de  $\beta_2$  foi o oposto ao esperado, indicando que a taxa de crescimento das emissões de CH<sub>4</sub> crescem com a taxa de poupança. Na amostra 'C',  $\beta_2$  foi positivo como se esperava, mas os estimadores  $\beta_1$  e  $\beta_4$  também vieram positivos, contrariando as expectativas. Além disso, as amostras 'B' e 'C' produziram um  $R^2$  ajustado muito baixo, de 0,129 e -0,112, respectivamente.

**TABELA 1.** ESTIMAÇÃO DO MODELO DE SOLOW VERDE PARA O GÁS METANO (CH<sub>4</sub>)

Variável	(A)	(B)	(C)
Constante	-0,1327 (-0,984)	-1,8709 (-2,164)	0,7138 (0,502)
$\ln[e^c_{t-N}]$	-0,1525 (-1,024)	-0,2698 (-1,692)	0,0951 (0,441)
$\ln[s]$	---	-0,0333 (-0,142)	0,2336 (1,137)
$\ln[\delta + n + g_B]$	---	-0,4347 (-2,059)	0,1184 (0,300)
Observações	22	21	13
$R^2$ Ajustado	0,002	0,129	-0,112

**Fonte:** PIK, GGDC e Elaboração própria.

Para os dados de CO<sub>2</sub>, observamos que a amostra 'A' é compatível com a CAE, mas com  $R^2$  ajustado baixo (0,127). A amostra 'B' produziu dados consistentes com uma CCE para o CO<sub>2</sub>. Além disso, o  $R^2$  ajustado de 0,481 é bastante significativo. Quando avançamos para a amostra 'C', observamos que o sinal de  $\beta_4$  aparece invertido em relação ao que supõe o Modelo de Solow Verde. Apesar de um  $R^2$  ajustado muito alto, marcando 0,622, os resultados de 'C' sugerem rejeitar uma CCE para o CO<sub>2</sub>. Esse resultado é bastante interessante, pois sugere que a incorporação de países com baixa atividade industrial na amostragem parece ser importante para a estimação de convergência condicional para o CO<sub>2</sub>.

**TABELA 2.** ESTIMAÇÃO DO MODELO DE SOLOW VERDE PARA O DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)

Variável	(A)	(B)	(C)
Constante	0,9246 (7,658)	0,0942 (0,115)	2,9128 (2,541)
$\ln[e^c_{t-N}]$	-0,2140 (-2,011)	-0,4431 (-4,510)	-0,3563 (-3,565)
$\ln[s]$	---	0,5051 (2,360)	0,5138 (1,956)
$\ln[\delta + n + g_B]$	---	-0,3975 (-2,122)	0,31101 (1,009)
Observações	22	21	13
$R^2$ Ajustado	0,127	0,481	0,622

**Fonte:** PIK, GGDC e Elaboração própria.

Para o caso do N<sub>2</sub>O, o sucesso da amostra 'A' na estimação de uma CAE já foi discutido acima. A amostra 'B' parece, surpreendentemente, rejeitar uma CCE, mas quando avançamos para 'C', temos resultados muito bons para uma convergência condicional nas emissões de N<sub>2</sub>O entre os países latinos, com um  $R^2$  ajustado de 0,648. Como as emissões de N<sub>2</sub>O estão muito associadas a atividades agroindustriais, faz sentido que a exclusão de países com características produtivas muito particulares melhore a estimação, uma vez que se torna mais fácil entender as inovações tecnológicas que abatem N<sub>2</sub>O, já que o razão das emissões entre os países que restam na amostra tem origem bastante parecida: o uso de fertilizantes nitrogenados.



**TABELA 3.** ESTIMAÇÃO DO MODELO DE SOLOW VERDE PARA O ÓXIDO NITROSO (N<sub>2</sub>O)

Variável	(A)	(B)	(C)
Constante	-0,2563 (-2,027)	-0,8746 (-0,849)	-2,8536 (-2,837)
$\ln[e^c_{t-N}]$	-0,3360 (-3,248)	-0,3454 (-2,846)	-0,4279 (-4,511)
$\ln[s]$	---	-0,1020 (-0,416)	0,5400 (2,911)
$\ln[\delta + n + g_B]$	---	-0,1119 (-0,490)	-0,8913 (-3,461)
Observações	22	21	13
$R^2$ Ajustado	0,313	0,225	0,648

Fonte: PIK, GGDC e Elaboração própria.

**TABELA 4.** ESTIMAÇÃO DO MODELO DE SOLOW VERDE PARA OS GASES DE KYOTO

Variável	(A)	(B)	(C)
Constante	0,5078 (2,392)	-0,8431 (-1,162)	0,8216 (0,499)
$\ln[e^c_{t-N}]$	-0,1830 (-1,182)	-0,4596 (-3,339)	-0,2772 (-1,113)
$\ln[s]$	---	0,2284 (1,162)	0,4131 (1,344)
$\ln[\delta + n + g_B]$	---	-0,5143 (-2,922)	-0,1365 (-0,279)
Observações	22	21	13
$R^2$ Ajustado	0,019	0,358	0,039

Fonte: PIK, GGDC e Elaboração própria.

Por fim, a amostra 'A' produziu estimadores consistentes com uma CAE para os gases de Kyoto, mas com um  $R^2$  ajustado muito pequeno, de apenas 0,019. As amostras 'B' e 'C' também produziram estimadores que suportam uma CCE para os gases de Kyoto, mas o  $R^2$  ajustado da amostra 'B' (0,358) foi muito maior que o da amostra 'C' (0,039). De forma similar ao resultado para as emissões de CO<sub>2</sub>, a amostra 'B' produz um resultado melhor que a amostra 'C', sugerindo que a incorporação de países pequenos e exportadores de petróleo é importante para a convergência nas emissões.



## 5 CONCLUSÕES

Apresentamos neste trabalho uma aplicação do Modelo de Solow Verde para dados dos países da América Latina, replicando o estudo proposto por Brock e Taylor (2004, 2010). Uma das conclusões do modelo estudado é de que, além da convergência de renda entre os países proposta por Solow no modelo original, o modelo verde avança e encontra também uma convergência nas emissões dos países. Essa convergência pode ser absoluta (CAE) ou condicional (CCE), a depender se os parâmetros dos países (taxa de crescimento da população, taxa de depreciação, taxa de poupança etc.) precisam ser idênticos para que haja a convergência. A existência de convergência nas emissões é uma hipótese do Modelo de Solow Verde, independentemente de a trajetória das emissões absolutas formarem uma CAK ou não, o que garante uma boa oportunidade de testar o modelo nas mais diferentes condições e para variadas medidas de poluição e degradação ambiental.

Nas estimações aqui apresentadas, o resultado para as emissões de CH<sub>4</sub> divergiram do esperado. Não foi possível constatar convergência nas emissões de gás metano. Por sua vez, o resultado para as emissões de CO<sub>2</sub> entre 1960 e 1997 foi bem positivo para uma CAE ( $R^2$  ajustado de 0,127) e uma CCE ( $R^2$  ajustado de 0,481). A título de comparação, Brock e Taylor encontram  $R^2$  ajustado de 0,14 para a CAE e 0,29 para a CCE nas emissões globais de CO<sub>2</sub>.

O experimento que melhor se enquadra na convergência de emissões foi o com dados de N<sub>2</sub>O entre os anos de 1960 e 1997. A regressão marcou um  $R^2$  ajustado de 0,313 para uma CAE e de 0,648 para uma CCE quando desconsideramos países muito pequenos ou pertencentes a OPEP. Como as emissões de N<sub>2</sub>O estão fortemente associadas ao uso de fertilizantes na agricultura industrial, o resultado sugere que inovações ou mudanças nas técnicas agrícolas, como a ampliação do uso de fertilizantes fosfatados, se deram de forma mais ou menos generalizada no continente, até mesmo independentemente dos parâmetros dos países. O experimento com os gases de efeito estufa considerados pelo Protocolo de Kyoto, que inclui CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e os gases fluorados, também foi positivo para uma CCE ( $R^2$  ajustado de 0,358).

Em suma, o presente trabalho contribuiu para reforçar a hipótese de que o Modelo de Solow, além de ser útil para explicar o crescimento econômico dos países no longo prazo, pode também servir para encontrar uma CAK e explicar a trajetória das emissões de poluentes. Encontrar essa curva, por sua vez, significa afirmar de que a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental não é única ao longo de todo o processo de crescimento, mas que os danos ao meio ambiente crescem para depois decrescerem com a renda. Apesar de não ter sido encontrada uma CAK e de os resultados terem sido mistos, a maior parte dos dados calculados e aqui apresentados indica que as emissões de alguns poluentes convergiram na América Latina entre os anos de 1960 e 1997. Essa informação nos fornece uma base para rejeitar que no longo prazo impera um *trade-off* entre crescimento econômico e preservação ambiental. Isso porque o sinal negativo de  $\beta_1$  em cada estimação sugere que quanto maior o nível de emissões per capita no período inicial, menor será a taxa de crescimento dessas emissões, indicando que também houve acomodação das emissões em um período de expansão do capital e do produto. Ou seja, as inovações tecnológicas, provenientes do desenvolvimento econômico, contribuíram para reduzir a poluição emitida por unidade de produto. Eventualmente, a redução pode ser de tamanha magnitude que as emissões totais de poluentes também regridam. Se isso for observado, encontraremos uma CAK. Mas a simples acomodação das emissões já sugere que o crescimento econômico pode não ser necessariamente predador do meio ambiente no longo prazo, contrariando o que sugere o *trade-off* apresentado.

## REFERÊNCIAS

BARTLETT, Bruce. The High Cost of Turning Green. **The Wall Street Journal**. Nova Iorque, p. 1-2. 14 set. 1994.

BECKERMAN, Wilfred. Economic Growth and the Environment: Whose growth? Whose environment?. **World Development**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 481-496, 1992.

BHATTARAI, Madhusudan; HAMMING, Michael. Institutions and the Environmental Kuznets Curve for Deforestation: A Crosscountry Analysis for Latin America, Africa and Asia. **World Development**, [s. l.], v. 29, ed. 6, p. 995-1010, 2001.

BROCK, William; TAYLOR, M. Scott. The Green Solow model. **Social Sciences Research Institute Working Paper**: University of Wisconsin, Wisconsin, ed. 16, 2004.

BROCK, William A.; TAYLOR, M. Scott. The Green Solow Model. **Journal of Economic Growth**, Published online, p. 127-153, 16 mai. 2010.

CROPPER, Maureen; GRIFFITHS, Charles. The Interaction of Population Growth and Environmental Quality. **The American Economic Review**, [s. l.], v. 84, ed. 2, p. 250-254, 1994.

DALY, Herman. Introduction to the Steady State Economy. In: DALY, Herman. **Economics, Ecology, Ethics**: Essays Towards a Steady State Economy. São Francisco: W H Freeman & Co, 1980. cap. 1, p. 1-30. ISBN 0716711796.

DALY, Herman. **Steady-State Economics**. 2. ed. atual. [S. l.: s. n.], 1991.

DALY, Herman. **Towards a Steady State Economy**. São Francisco: W H Freeman & Co, 1973. 332 p. ISBN 9780716707998.

DEN BUTTER, F. A. G.; VERBRUGGEN, H.. Measuring the Trade-Off Between Economic Growth and a Clean Environment. **Environmental And Resource Economics**, [s. l.], v. 4, p. 187-208, 1994.

DOS SANTOS, José Martins. **Três Ensaio Empíricos Sobre Crescimento Econômico e Meio Ambiente**. Orientador: Adalmir Antônio Marquetti. 2019. 157 p. Tese (Doutorado em Economia) - Programa de Pós Graduação em Economia do Desenvolvimento - PUC/RS, Porto Alegre, 2019.

FEIOCK, Richard C.; STREAM, Christopher. Environmental Protection Versus Economic Development: a false trade-off?. **Public Administration Review**, [S.L.], v. 61, n. 3, p. 313-321, maio 2001.

GROSSMAN, Gene M.; KREUGER, Alan B. Economic Growth and the Environment. **The Quarterly Journal of Economics**, [s. l.], v. 110, ed. 2, p. 353-377, 1995.

GUILLÓ, María Dolores; MAGALHÃES, Manuela. Land capital and emissions convergence in an extended Green Solow model. **Environment And Development Economics**, [S.L.], p. 1-22, 28 jun. 2022. Cambridge University Press (CUP)

GÜTSCHOW, Johannes et al. The PRIMAP-hist national historical emissions time series. **Potsdam Institute for Climate Impact Research**, Potsdam, v. 8, p. 571–603, 2016.

JACOBY, Neil H.. Organization for Environmental Management: national and transnational. **Management Science**, [s. l.], v. 19, n. 10, p. 1138-1150, jul. 1973.

KÅGESON, Per. **Growth versus the Environment: Is there a Trade-off?**. 1. ed. Lund University: Springer, 1998. 300 p. v. 14. ISBN 9789401062152.

KUZNETS, Simon. **Economic Growth of Nations**. [S. l.]: Harvard University Press, 1971. 363 p. ISBN 0674227808.

LOPES, Guilherme Byrro. Um estudo sobre a Curva Ambiental de Kuznets e a convergência da pegada ecológica. **Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto: Texto para Discussão**, Ribeirão Preto, ed. 3, p. 1-21, 2013.

MANKIW, N. Gregory et al. A contribution to the empirics of economic growth. **The Quarterly Journal of Economics**, [s. l.], ed. 107, p. 407-438, 1992.

MEADOWS, Donella H. et al. **The Limits to Growth**. Nova Iorque: Universe Books, 1972. 209 p. v. 1. ISBN 0-87663-165-0.

MISHAN, Ezra J. **The costs of Economic Growth**. 1. ed. Londres: Staples, 1967. 212 p. ISBN 028661619X.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2001. 891 p. ISBN 0521 80767 0.

PANAYOTOU, Theodore. **Economic Growth and the Environment**. Cambridge: Harvard University, 2000. 117 p.

SELDEN, Thomas M.; SONG, Daqing. Environmental Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions?. **Journal of Environmental Economics and Management**, Nova Iorque, v. 27, p. 147-162, 1994.

SENADO FEDERAL (Brasil). Subsecretaria de Edições Técnicas. **Protocolo de Quioto e Legislação Correlata**. Brasília: Senado Federal, 2004. 82 p.

WORLD BANK. **World Development Report 1992: Development and the Environment**. Nova Iorque: Oxford Press, 1992. 322 p. ISBN 0195208773.