

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Ana Lúcia Pessanha Alves

EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO DAS PRINCIPAIS
ECONOMIAS DA AMÉRICA DO SUL

CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ
Agosto de 2019

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES - UCAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Ana Lúcia Pessanha Alves

EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO DAS PRINCIPAIS
ECONOMIAS DA AMÉRICA DO SUL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Candido Mendes – Campos/RJ, como parte das exigências para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. João José de Assis Rangel, D.Sc.

CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ
Agosto de 2019

Catálogo na Fonte

Preparada pela Biblioteca da **UCAM – CAMPOS** 015/2019

Alves, Ana Lúcia Pessanha.

Emissões de dióxido de carbono das principais economias da América do Sul. / Ana Lúcia Pessanha Alves. – 2019.

52 f.

Orientador: João José de Assis Rangel.

Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Candido Mendes – Campos. Campos dos Goytacazes, RJ, 2019.

Referências: 48 - 50.

1. Emissões de dióxido de carbono. 2. Economia – América do Sul. I. Universidade Candido Mendes – Campos. II. Título.

CDU – 661.975:33(8)

Bibliotecária Responsável: Flávia Mastrogirolamo CRB 7^a-6723

EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO DAS PRINCIPAIS ECONOMIAS DA AMÉRICA DO SUL

Ana Lúcia Pessanha Alves

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Candido Mendes – Campos/RJ, como parte das exigências para obtenção para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovado em: 08/08/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. João José de Assis Rangel, D.Sc. - Orientador
Universidade Candido Mendes (UCAM)

Prof. Claudio Luiz Melo de Souza
Universidade Candido Mendes (UCAM)

Profa. Aline Sardinha Cordeiro Morais
Instituto Federal Fluminense (IFF)

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ
Agosto de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus pelas conquistas e a minha família e amigos que vibram com minhas vitórias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, meu noivo, minha família e amigos por me apoiarem e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro ao longo do curso.

Agradeço muito ao meu professor e orientador João José de Assis Rangel pela oportunidade, paciência e auxílio durante este desafio.

RESUMO

Este trabalho estuda as emissões de dióxido de carbono (CO₂) resultantes da queima de combustíveis fósseis em relação ao crescimento econômico, populacional e demanda energética dos países com as principais economias da América do Sul. Além disso, analisa o desacoplamento das emissões de CO₂ e Produto Interno Bruto (PIB). As informações foram obtidas na base de dados da Agência Internacional de Energia referente ao período de 1990 a 2016. Os métodos utilizados foram Identidade de Kaya, que permite avaliar as forças motrizes que impactam nas emissões carbônicas e Método de Tapio, que analisa o grau de desacoplamento entre o PIB e as emissões de CO₂. Os resultados mostraram que nenhum dos países com as maiores economias do sul americano apresentaram queda na intensidade energética em 2016, ano dos últimos dados disponíveis. Chile, Colômbia e Argentina foram os países que continuaram aumentando as emissões. O Brasil possui as maiores emissões de CO₂, a maior população e maior PIB, além de enfrentar dificuldades na redução das emissões, sendo necessária uma mudança das realidades para que o país não perca o destaque de possuir uma matriz energética limpa e renovável. Os resultados mostraram que nenhum dos países estudados apresentou desacoplamento entre o crescimento econômico e as emissões de CO₂, ao contrário dos países mais desenvolvidos da OCDE.

Palavras-chave: Emissões de dióxido de carbono. Emissões de gases de efeito estufa. CO₂. Identidade de Kaya. Método de Tapio. Desacoplamento.

ABSTRACT

This paper studies the carbon dioxide (CO₂) emissions resulting from the burning of fossil fuels in relation to the economic, population growth and energy demand of countries with the main economies of South America. It also analyzes the decoupling of CO₂ emissions and Gross Domestic Product (GDP). The information was obtained from the International Energy Agency's database for the period from 1990 to 2016. The methods used were Kaya Identity, which allows the evaluation of the driving forces that impact carbon emissions and the Tapio Method, which analyzes the degree of decoupling between GDP and CO₂ emissions. The results showed that none of the countries with the largest economies in South America experienced a decrease in energy intensity in 2016, the year of the latest available data. Chile, Colombia and Argentina were the countries that continued to increase emissions. Brazil has the highest CO₂ emissions, the largest population and the highest GDP, as well as facing difficulties in reducing emissions, requiring a change in realities so that the country does not lose the prominence of having a clean and renewable energy matrix. The results showed that none of the countries studied showed decoupling between economic growth and CO₂ emissions, unlike the more developed OECD countries.

Keywords: Carbon dioxide emissions. Greenhouse Gases Emissions. CO₂. Kaya Identity. Method of Tapio. Decoupling.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Ano das publicações na base Scopus | 16 |
| Figura 2: Periódicos com mais publicações | 16 |
| Figura 3: Autores com mais publicações | 17 |
| Figura 4: Países com maior número de publicações | 17 |
| Figura 5: Áreas de conhecimento das publicações | 18 |
| Figura 6: Ilustração do Desacoplamento Diamante | 27 |
| Figura 7: Índice populacional dos países com as maiores economias .. | 31 |
| Figura 8: Índice das Emissões de CO ₂ dos países com as maiores economias | 32 |
| Figura 9: Relação Emissões de CO ₂ x População | 33 |
| Figura 10: Índice do PIB <i>per capita</i> dos países com as maiores economias | 34 |
| Figura 11: Relação Emissões de CO ₂ <i>per capita</i> x PIB <i>per capita</i> | 35 |
| Figura 12: Relação Emissões de CO ₂ <i>per capita</i> x IDH | 36 |
| Figura 13: Índice da Intensidade Energética (TPES/PIB) dos países com as maiores economias | 38 |
| Figura 14: Índice da Intensidade Carbônica (CO ₂ /TPES) dos países com as maiores economias | 39 |
| Figura 15: Método de Tapio aplicado ao Brasil | 40 |
| Figura 16: Método de Tapio aplicado ao Chile | 40 |
| Figura 17: Método de Tapio aplicado a Colômbia | 41 |
| Figura 18: Método de Tapio aplicado a Argentina | 42 |
| Figura 19: Método de Tapio aplicado a Venezuela | 42 |
| Figura 20: Intensidade de emissões de CO ₂ dos países estudados e da OCDE | 43 |
| Figura 21: Intensidade de emissões de CO ₂ dos países estudados | 44 |
| Figura 22: Intensidade de emissões de CO ₂ do mundo e da OCDE | 44 |
| Figura 23: Perfil das emissões de CO ₂ no Brasil | 45 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Categorias do Desacoplamento Diamante | 27 |
| Tabela 2: Participações percentuais da América do Sul | 37 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1: Relação das publicações analisadas correlato ao tema | 19 |
| Quadro 2: Participações percentuais da América do Sul e OCDE | 28 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|----------------------------------|----|
| Equação 1: Equação IPAT | 25 |
| Equação 2: Método de Kaya | 25 |
| Equação 3: Método de Tapio | 26 |

LISTA DE ABREVIATURAS

IEA Agência Internacional de Energia

CO₂ Dióxido de Carbono

GEE Gases do Efeito Estufa

PIB Produto Interno Bruto

IDH Índice de Desenvolvimento Humano

LMDI Método Divisia de Média Logarítmica

OCDE Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

CL Chile

AR Argentina

VE Venezuela

SR Suriname

EC Equador

BR Brasil

UY Uruguai

BO Bolívia

CO Colômbia

PE Peru

PY Paraguai

Sumário

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | Contextualização | 13 |
| 1.2 | Objetivos | 14 |
| 1.2.1 | Geral | 14 |
| 1.2.2 | Específico | 14 |
| 1.3 | Justificativas | 15 |
| 1.4 | Questões de Pesquisa | 20 |
| 1.5 | Método de Pesquisa | 20 |
| 1.6 | Delimitações e Estrutura do Trabalho | 21 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 21 |
| 2.1 | Emissões de CO ₂ e Crescimento Econômico | 21 |
| 2.2 | Método de Validação do Desacoplamento | 23 |
| 2.3 | Conclusões da Revisão de Literatura | 24 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 24 |
| 3.1 | IPAT e Identidade de Kaya | 25 |
| 3.2 | Método de Tapio | 26 |
| 3.3 | Fonte dos dados e Categorização dos países | 27 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 30 |
| 4.1 | Forças motrizes das emissões de GEE | 30 |
| 4.1.1 | População | 30 |
| 4.1.2 | Economia | 33 |
| 4.1.3 | Intensidade Energética | 37 |
| 4.1.4 | Intensidade Carbônica | 38 |
| 4.2 | Análise de desacoplamento CO ₂ e PIB | 39 |
| 4.3 | Perfil das emissões de CO ₂ | 43 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A DISSERTAÇÃO | 45 |
| 5.1 | Conclusões | 45 |
| 5.2 | Limitações do Trabalho | 47 |
| 5.3 | Sugestões para Trabalhos Futuros | 47 |
| 5.4 | Produções Originadas Neste Trabalho | 47 |
| | REFERÊNCIAS | 48 |
| | APÊNDICE 1..... | 51 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O crescimento econômico aliado ao populacional pressiona o meio ambiente, pois demanda um gasto maior de energia. Com isso, a preocupação governamental com o meio ambiente e o esgotamento dos recursos naturais vêm aumentando nos últimos anos. Diante do dilema entre desenvolver e preservar, surgiram os acordos e tratados internacionais a fim de alertarem em âmbito mundial a importância de se conservar os recursos naturais e a urgente necessidade de maior uso de energias limpas e renováveis (ALVARENGA; SOBRINHO, 2018).

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2018), a nova geração anual de eletricidade aguardada a partir dos investimentos renováveis de 2017 apontam para um declínio de 7% em comparação com os investimentos do ano anterior, representando a maior redução dos últimos 15 anos. Boa parte deste fato está relacionada aos custos da energia fotovoltaica, que ficaram mais acessíveis. Entretanto, esse decréscimo representa um alerta para o futuro sustentável.

Esses alertas ressaltam a importância das políticas governamentais para viabilizar os investimentos em fontes menos agressivas ao meio ambiente (LIMA, 2016). Apesar dessa queda, de acordo com a IEA, o ano de 2017 foi bom para o setor de energias renováveis, que representaram um recorde de dois terços do investimento em geração de energia, com adições de capacidade, expansão das instalações da energia solar fotovoltaica e crescimento da energia eólica *offshore*.

Com incentivos governamentais, mais tecnologias e recursos financeiros disponíveis, os países mais desenvolvidos têm alcançado um crescimento econômico com reduções de emissões de dióxido de carbono (CO₂). A China e os Estados Unidos são exemplos, pois, apesar de serem os maiores poluidores mundiais, estão conseguindo adequar o uso de recursos naturais e reduzir as suas emissões de gases do efeito estufa (GEE) nos últimos anos (FEIJÓ, 2018).

Para reduzir as emissões destes gases poluentes, são adotadas iniciativas visando esforços globais. O *Paris Agreement* é um exemplo recente, que entrou em vigor em novembro de 2016, com foco de reduzir os riscos e impactos das mudanças climáticas, através da maximização de esforços para limitar o aumento da temperatura média global em 1,5°C. Nesse acordo, os países devem adotar metas e ações para redução das emissões, as quais deverão ser avaliadas a cada cinco anos (LIU *et*

al.,2017).

Muitos países vêm buscando um compromisso de adequar o crescimento econômico com maior utilização dos recursos naturais e menor dependência de energia e menores emissões de GEE. Este fenômeno vem sendo reconhecido como desacoplamento, muito estudado nas relações entre crescimento econômico e meio ambiente (DAI *et al.*,2016).

Diante do exposto, este trabalho propõe avaliar o comportamento das emissões de CO₂. Foram analisados os países com as maiores economias da América do Sul e, conseqüentemente, maiores emissões, sendo esses países Argentina, Brasil, Chile, Colômbia e Venezuela. Além disso, foi aplicado teste comparativo de regressão linear para relacionar as emissões de CO₂ com alguns fatores citados anteriormente, a fim de facilitar a compreensão dos dados de todos os países da América do Sul. Os métodos utilizados foram a Identidade de Kaya, que é um método utilizado para explorar as mais importantes forças motrizes responsáveis pelas emissões de CO₂ (ROBALINO-LÓPEZ *et al.*, 2016), e o método de Tapio, utilizado para analisar o desacoplamento entre as emissões de CO₂ e o Produto Interno Bruto (PIB).

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar as relações entre as emissões de CO₂ e fatores relacionados à população, economia, intensidade energética e intensidade carbônica, verificando a categoria de desacoplamento dos países com as maiores economias da América do Sul.

1.2.2 Específico

- Avaliar as principais forças motrizes que interferem nas emissões de CO₂ de cada país estudado;
- Relacionar as emissões de CO₂ com forças motrizes, como população, PIB *per capita* e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e verificar as parcelas da participação mundial em percentuais de CO₂ dos países da América do Sul que possuem dados na IEA;
- Analisar categoricamente o desacoplamento das emissões de CO₂ e PIB dos cinco países estudados;

- Verificar o comportamento do perfil das emissões dos cinco países com as maiores economias, na série temporal de 1990 a 2016.

1.3 Justificativas

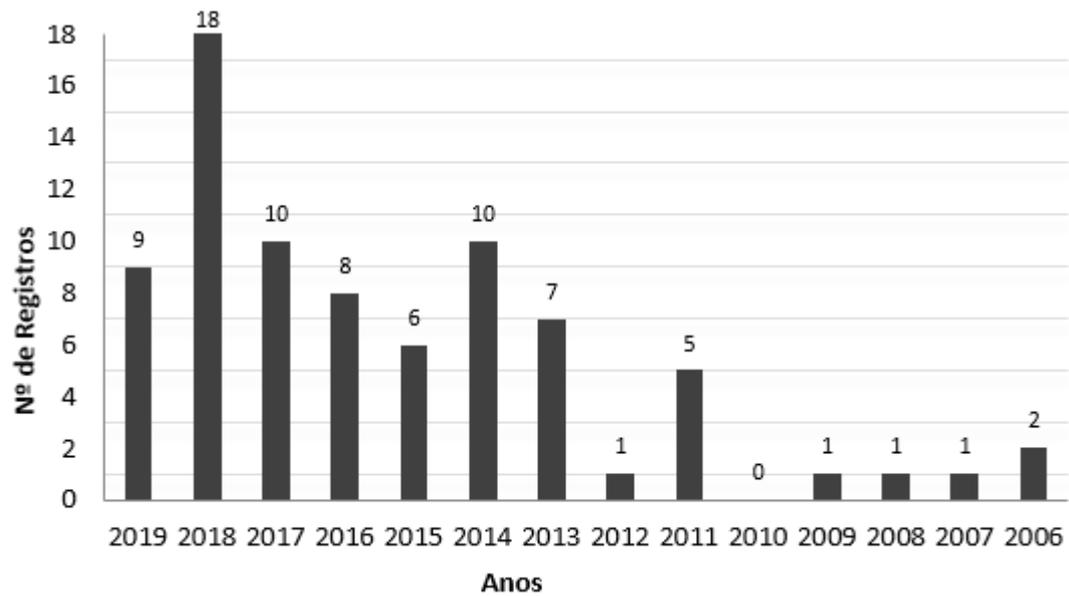
A preocupação com as mudanças climáticas ganhou maior notoriedade nas últimas duas décadas pelos governos, pesquisadores e sociedade em geral (ROBALINO-LÓPEZ *et al.*, 2016). Com isso, verifica-se um crescimento constante da busca pelo desenvolvimento econômico com menos dependência da energia, e conseqüentemente das emissões de GEE, diferente do que sempre foi observado. O desacoplamento e as emissões globais de gases poluentes vêm sendo a base de inúmeros estudos recentes, como os citados mais adiante na seção 2. Este estudo se concentra nas emissões de CO₂ resultante da queima de combustíveis fósseis.

Para isto, foram empregadas técnicas bibliométricas para análise e levantamento quantitativo dos resultados científicos, descrevendo ano das publicações, periódicos com mais publicações, autores, países e áreas de conhecimento com mais publicações. A pesquisa foi realizada na base SCOPUS, baseado no modelo de Costa (2010), através de buscas de artigos relacionados ao tema desta pesquisa. Esta base foi escolhida por ser uma plataforma com grande número de trabalhos indexados.

A primeira combinação de palavras chaves aplicadas foram “CO₂” e “Kaya Identity”, que retornaram 57 documentos publicados a partir de 2006. Já a segunda combinação de palavras foram “CO₂” e “Tapio”, que retornaram 22 documentos publicados a partir de 2011, o que mostra que o desacoplamento é um tema relativamente novo. Há uma correlação entre os métodos utilizados, onde um corrobora com o outro, o que justifica o uso nas palavras chaves.

A Figura 1 mostra os anos das publicações no SCOPUS da 1^a e 2^a combinação de palavras. Observe a ausência de publicações no ano de 2010. O ano de 2018 retornou o maior número de publicações, sendo 18 publicações até o presente momento.

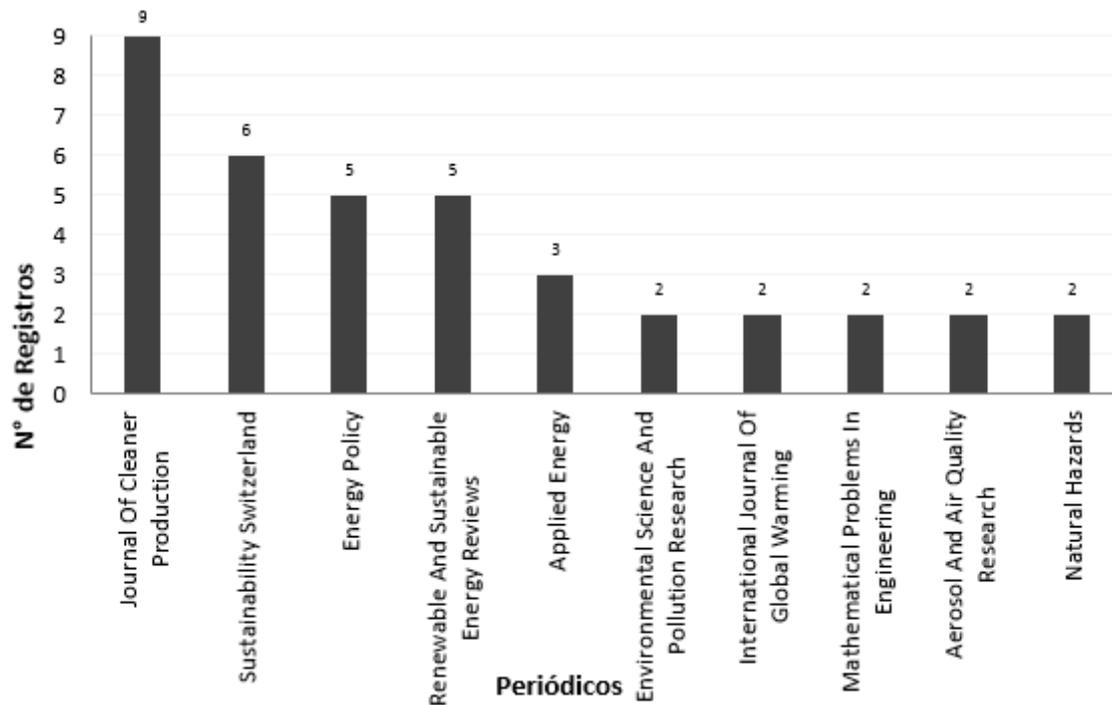
Figura 1 – Ano das publicações na base SCOPUS.



Fonte: SCOPUS/2019

A Figura 2 apresenta os periódicos com maiores publicações, listados os 10 mais relevantes, visto que os demais dispõem de apenas uma publicação. O periódico Journal Of Cleaner Production lidera, com nove publicações.

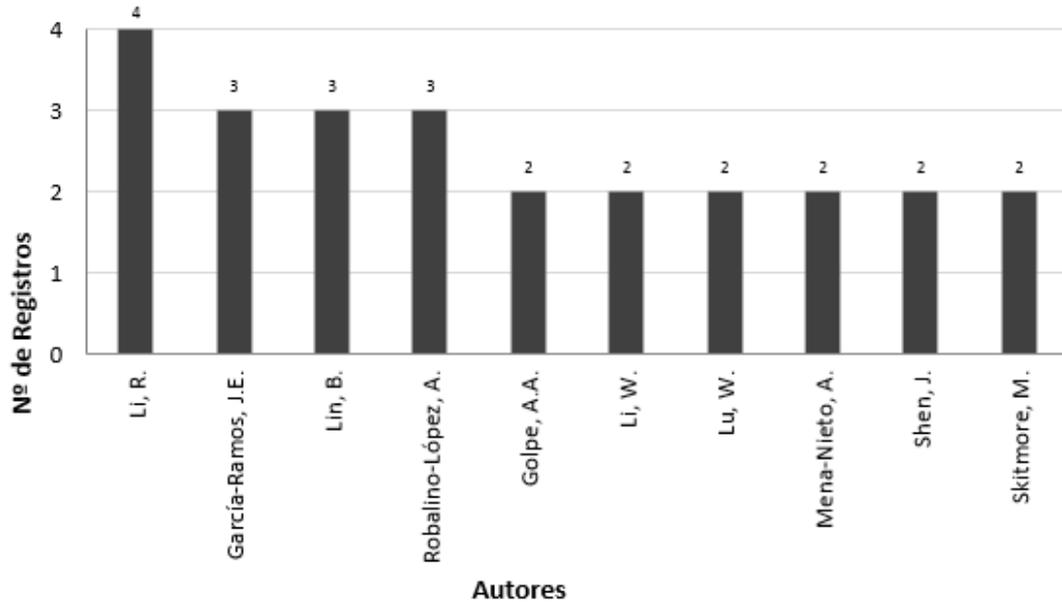
Figura 2 – Periódicos com mais publicações.



Fonte: SCOPUS/2019.

A Figura 3 apresenta os dez autores com maior número de publicações. O autor Li, R. é aquele com maior número de publicações sobre o tema. Os autores García Ramos, J.E.; Lin, B. e Robalino López, A vêm em seguida, com 3 publicações cada.

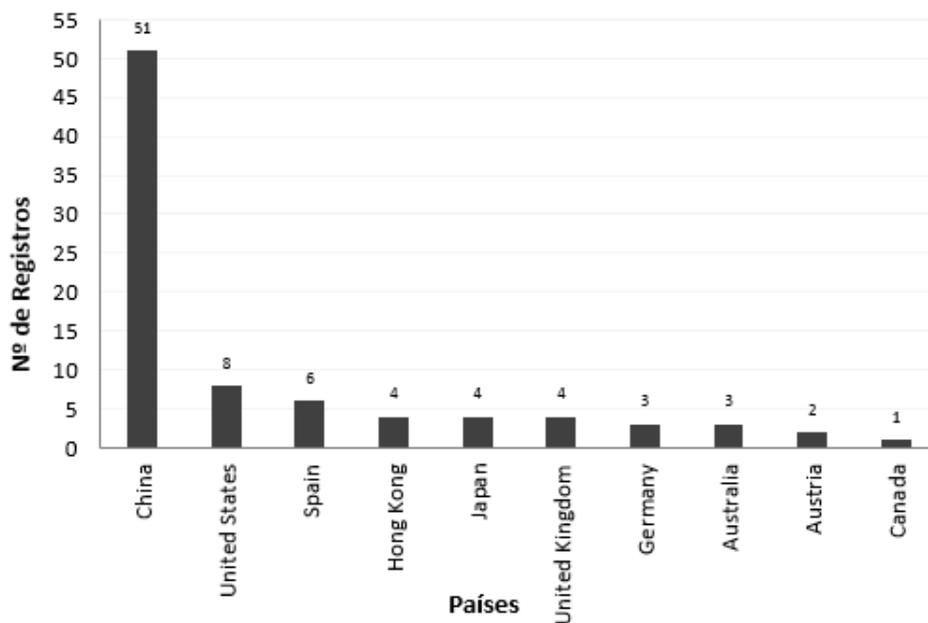
Figura 3 – Autores com mais publicações.



Fonte: SCOPUS/2019.

A Figura 4 ressalta os dez países com maior quantidade de publicações, mostrando que a China é o país que, disparadamente, lidera com 51 publicações acerca do tema. Cabe ressaltar que o Brasil não possui nenhum resultado nesta pesquisa.

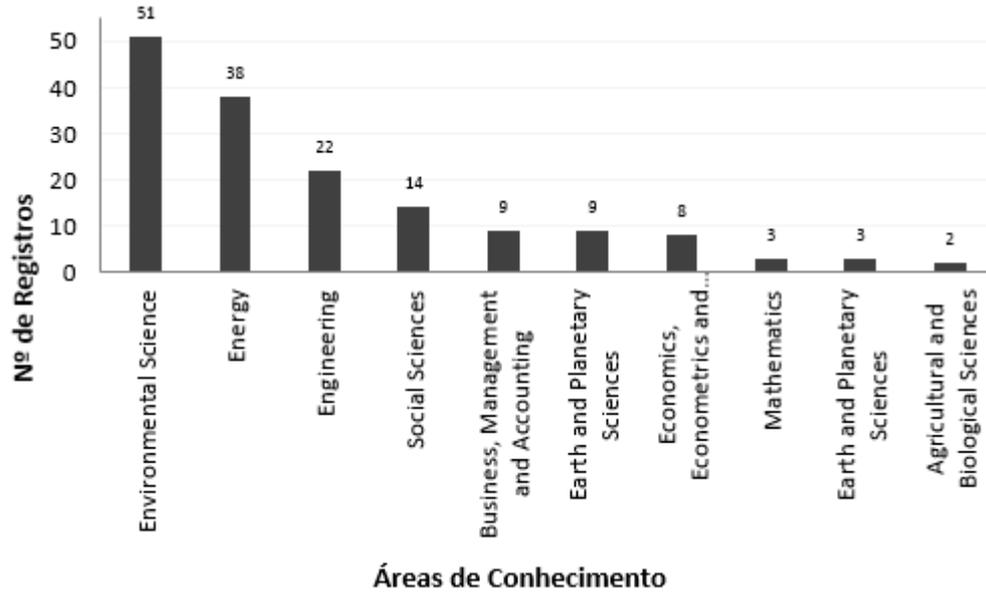
Figura 4 – Países com maior número de publicações.



Fonte: SCOPUS/2019.

Quando relacionadas às áreas de conhecimento com maiores publicações, as áreas de Ciência Ambiental e Energia lideram com maior quantidade de registros, com 51 e 38 publicações, respectivamente, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Áreas de conhecimento das publicações.



Fonte: SCOPUS/2019.

Com base no número de documentos sobre o tema, os trabalhos mais relevantes foram explorados e resumidos. No Quadro 1 estão representados os dez principais artigos com maior relação sobre o tema proposto, constando os autores, ano de publicação, revista que foi publicada e número de citações.

Quadro 1: Relação das publicações analisadas correlato ao tema

| PUBLICAÇÃO | AUTOR | REVISTA | ANO | Nº DE CITAÇÕES |
|--|--|--|------------|-----------------------|
| <i>Study on the decoupling relationship between CO₂ emissions and economic development based on two-dimensional decoupling theory: A case between China and the United States</i> | Song, Y. Zhang, M. Zhou, M. | <i>Ecological Indicators</i> | 2019 | 0 |
| <i>An analysis of the decoupling relationship between CO₂ emission in power industry and GDP in China based on LMDI method</i> | Xie, P. Gao, S. Sun, F. | <i>Journal of Cleaner Production</i> | 2019 | 3 |
| <i>Carbon emissions from energy consumption in China: Its measurement and driving factors</i> | Ma, X. Wang, C. Dong, B. Gu, C. Chen, R. Li, Y. Zou, H. Zhang, W. Li, Q. | <i>Science of the Total Environment</i> | 2019 | 9 |
| <i>Decomposing the decoupling of CO₂ emissions from economic growth in Cameroon</i> | Engo, J. | <i>Environmental Science and Pollution Research</i> | 2018 | 0 |
| <i>Decomposition and decoupling analysis of CO₂ emissions in OECD</i> | Chen, J. Wang, P. Cui, L. Huang, S. Song, M. | <i>Applied Energy</i> | 2018 | 4 |
| <i>Drivers analysis of CO₂ emissions from the perspective of carbon density: The case of Shandong province, China</i> | Dong, F. Li, J. Zhang, Y.-J. Wang, Y. | <i>International Journal of Environmental Research and Public Health</i> | 2018 | 2 |
| <i>CO₂ emissions convergence among 10 South American countries. A study of Kaya components (1980–2010)</i> | Robalino-López, A. García-Ramos, J.E. Golpe, A.A. Mena-Nieto, A. | <i>Carbon Management</i> | 2016 | 6 |
| <i>Energy consumption trends and decoupling effects between carbon dioxide and gross domestic product in South Africa</i> | Lin, S.-J. Beidari, M. Lewis, C. | <i>Aerosol and Air Quality Research</i> | 2015 | 14 |
| <i>Studying the relationship between economic growth, CO₂ emissions, and the environmental Kuznets curve in Venezuela (1980-2025)</i> | Robalino-López, A. Mena-Nieto, Á. García-Ramos, J.-E. Golpe, A.A. | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | 2015 | 49 |
| <i>System dynamics modeling for renewable energy and CO₂ emissions: A case study of Ecuador</i> | Robalino-López, A. Mena-Nieto, A. García-Ramos, J.-E. | <i>Energy for Sustainable Development</i> | 2014 | 35 |

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da base SCOPUS, 2019.

1.4 Questões de Pesquisas

- Quais os principais determinantes que interferem nas emissões de CO₂ das principais economias da América do Sul?
- Alguns destes países estão conseguindo desacoplar as emissões de CO₂ do PIB?
- Qual o posicionamento das emissões destes países em relação aos países desenvolvidos da OCDE e do mundo?

1.5 Método de Pesquisa do Trabalho

A aplicação de um método de pesquisa permite melhor compreensão e análise das pesquisas, bem como possibilita assegurar a autenticidade dos resultados (SANTOS, 2009).

As metodologias aplicadas aos trabalhos científicos podem ser divididas quanto à natureza da pesquisa, à abordagem do problema e aos objetivos da pesquisa.

Quanto à natureza, pode ser definida como básica e aplicada. A básica objetiva gerar novos conhecimentos para avanço da ciência sem aplicação prática. A aplicada se propõe a gerar conhecimentos com aplicação prática visando solucionar problemas específicos.

Quanto à abordagem se classifica em qualitativa e quantitativa. A qualitativa é uma pesquisa descritiva, onde não há tradução numérica. Já a quantitativa propõe que tudo é quantificável, onde números e opiniões podem ser classificados e analisados.

Quanto ao objetivo à pesquisa pode ser exploratória, que consiste em gerar hipóteses para pesquisas posteriores; descritiva, que se preocupa em descrever as características dos fatos e fenômenos, envolvem coleta de dados padronizados; e explicativa, que visa identificar os fatores que determinam os fenômenos, explicar o porquê através dos resultados obtidos.

Diante do apresentado, esse trabalho se enquadra nos quesitos de uma pesquisa aplicada, quantitativa e explicativa.

1.6 Delimitações e Estrutura do Trabalho

O primeiro capítulo apresenta a introdução e contextualização do trabalho, objetivo geral e específico, justificativa, questões de pesquisa, método de pesquisa do trabalho, delimitações e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo mostra a revisão de literatura, emissões de CO₂ e crescimento econômico, método de validação do desacoplamento e conclusões da revisão de literatura.

O terceiro capítulo refere-se aos materiais e métodos utilizados nesta dissertação. Foram descritos a equação de IPAT e Identidade de Kaya, Método de Tapio e a fonte de dados e categorização dos países.

O quarto capítulo mostra os resultados e discussões, apresentando uma análise das seguintes forças motrizes das emissões de GEE: população, economia, intensidade energética e intensidade carbônica. Além disso, foi realizada uma análise do desacoplamento entre as emissões de CO₂ e PIB e analisado o perfil das emissões de CO₂.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais do trabalho, com as conclusões, limitações, sugestões para trabalhos futuros e produções originadas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Essa seção apresenta os fundamentos para o tema abordado e alguns artigos relacionados ao tema, descrevendo artigos recentes com a mesma metodologia utilizada nesta dissertação.

2.1 Emissões de CO₂ e Crescimento Econômico

Ma *et al.* (2019) combinam o método Índice de Divisia de Média Logarítmica-LMDI com a Identidade de Kaya estendida para decompor e medir a intensidade das emissões de carbono na China. Os resultados mostraram que, de 2005 a 2016, a China foi responsável por quase um terço das emissões totais de CO₂ no mundo, com intensidade mais alta que o mundo, e que a redução da intensidade do consumo de energia, ajuste da estrutura interna da indústria e aperfeiçoamento do sistema de política econômica se faz necessário para promover uma economia de baixo carbono

na China.

Chen *et al.* (2018) utilizam o método LMDI I, sob o arcabouço da Identidade de Kaya, para explorar os impactos das emissões de CO₂ da energia fóssil, intensidade energética, estrutura do consumo de energia, PIB *per capita* e população nos países da OCDE, no período de 2001 a 2015. O método de Tapio também é utilizado para avaliar o desacoplamento destes fatores com as emissões de dióxido de carbono. Os resultados mostraram que a intensidade energética e o PIB *per capita* são os principais fatores que influenciam as emissões de CO₂. O impacto da distribuição populacional nas emissões é insignificante na OCDE.

Dong *et al.* (2018) analisam os condutores na densidade de carbono da província de Shandong na China, utilizando a Identidade de Kaya e o método LMDI, de 2000 a 2015. Verificou-se que o efeito econômico e efeito de urbanização são os principais impulsionadores positivos. Já a intensidade energética, efeito estrutural e efeito de escala contribuem negativamente para as mudanças na densidade de carbono.

Robalino-López *et al.* (2016) analisam a convergência das emissões de CO₂ per capita de 10 países da América do Sul, de 1980 a 2010, utilizando dados dos componentes Kaya como PIB *per capita*, intensidade energética e intensidade carbônica. Através da metodologia Phillips e Sul, os resultados mostraram que a região não apresenta um padrão de convergência global relacionadas as emissões de CO₂ *per capita*, porém existe a formação de vários clubes de convergência para cada componente de Kaya.

Robalino-López *et al.* (2015) verificam se é possível estabilizar as emissões de CO₂ da Venezuela com um aumento do PIB a médio prazo. A metodologia consiste numa extensão da Identidade de Kaya e na formação do PIB com inclusão do efeito das energias renováveis. Considerando dados passados e projeções futuras, no período temporal 1980-2025, sob diferentes cenários econômicos, verificou-se que o país pode estar no caminho para atingir a estabilização no médio prazo, através da combinação do crescimento econômico com maior uso de energias renováveis.

Robalino-López *et al.* (2014) analisam como as mudanças na matriz energética e no PIB podem afetar as emissões de CO₂ no Equador, até 2020, através do efeito da redução do uso da energia fóssil e melhoria na eficiência de seu uso. Os resultados mostraram que, com um aumento contínuo do PIB e do uso de energias renováveis, melhorando a eficiência da tecnologia do uso de combustíveis fósseis, o controle das

emissões de CO₂ se faz possível.

2.2 Método de Validação do Desacoplamento

Song *et al.* (2019) estudam, primeiramente, uma relação interna entre o método de Tapio e a hipótese do EKC, a fim de superar a dificuldade da atual teoria de desacoplamento em categorizar o desacoplamento de regiões com diferentes níveis de desenvolvimento econômico. Além disso, utiliza uma teoria de desacoplamento bidimensional do desenvolvimento econômico e das emissões de CO₂, para aplicar no caso da China e dos EUA, no período de 1965 a 2016. Os resultados obtidos mostraram que a China está experimentando, atualmente, um baixo nível de desenvolvimento econômico e que os EUA apresentaram no período de 2014 a 2016 um desacoplamento forte com alto nível de desenvolvimento econômico.

Xie *et al.* (2019) descrevem que a China depende da geração de energia térmica para atender sua demanda de energia e que o aumento do total das emissões de CO₂ representa uma ameaça para a indústria de energia. Com isso, este estudo foi realizado a fim de estudar como alcançar um forte desacoplamento entre as emissões de CO₂ na indústria de energia e o PIB da China, uma vez que há poucos trabalhos sobre este tema. Para tal, foi utilizado o Método de Tapio para medir o desacoplamento. Também foi utilizado o método de decomposição do LMDI e a Identidade de Kaya para explorar os fatores determinantes. Os resultados mostraram que o desacoplamento está alternado entre desacoplamento fraco e desacoplamento negativo expansivo entre 1985 e 2016 no país. A intensidade energética e o consumo de energia promovem o desacoplamento, enquanto a escala econômica e a eletrificação são os principais fatores que o inibem. Já a perda de transmissão e distribuição, bem como a estrutura de energia térmica e de geração de energia tem efeitos fracos no desacoplamento.

Engo (2018) aplicou os métodos de Tapio e LMDI baseados na Identidade de Kaya estendida para analisar os fatores que influenciaram a relação de desacoplamento entre o crescimento econômico e as emissões de CO₂ em Camarões, no período de 1990 a 2015. Os resultados mostraram que o país alcançou desacoplamento fraco ao longo do período estudado. O trabalho mostra que a mudança demográfica, a intensidade energética e a atividade econômica desempenharam um papel negativo no desacoplamento, enquanto a estrutura

econômica e os fatores de emissão o promoveram. O crescimento industrial foi determinante para determinar o grau de dissociação entre as emissões e o crescimento econômico no país.

Lin *et al.* (2015) analisam o desacoplamento entre as emissões de CO₂ e o PIB na África do Sul no período de 1990 a 2012, utilizando métodos da OCDE e Tapio, além de dados da Identidade de Kaya. Os resultados mostraram que a melhor situação de dissociação foi no período 2010-2012. Pela Identidade de Kaya, observou-se que o crescimento populacional, PIB *per capita* e a deterioração da eficiência energética foram os principais impulsionadores do aumento das emissões da CO₂ no país.

2.3 Conclusões da Revisão da Literatura

Os países vêm buscando cada vez mais seu desenvolvimento econômico, o que demanda um consumo energético maior. Sendo o modelo de desenvolvimento muitas vezes baseado nos combustíveis fósseis, como consequência ocorre um acelerado crescimento das emissões de CO₂. Tal crescimento vem sendo bastante explorado, gerando numerosas pesquisas com diferentes metodologias de estudo. Estas pesquisas auxiliam no esclarecimento sobre o assunto, mostrando que a maior utilização de energias renováveis e maior empenho governamental são necessários para mitigação das emissões de gases poluentes no mundo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos utilizados neste trabalho foram Identidade de Kaya, que se deriva da IPAT, e Método de Tapio, que avalia o grau de desacoplamento entre as emissões de CO₂ e o PIB. Estes métodos foram utilizados por se complementarem e permitirem melhor avaliação das forças motrizes que impactam nas emissões de CO₂. Além destes métodos, este trabalho apresenta a fonte dos dados e a categorização dos países, com análise dos determinantes utilizados.

3.1 IPAT e Identidade de Kaya

Em um estudo sobre o meio ambiente apresentado por Ehrlich e Holdren (1971), o impacto ambiental pode ser exposto pela seguinte equação:

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

Equação 1: Equação IPAT

Onde:

I = impacto ambiental

A = afluência

P = população

T = tecnologia

Esta equação relaciona os danos ambientais ou impactos (I) como resultado da função da faixa populacional (P), afluência (A) - expressa como consumo *per capita* ou PIB *per capita*, e da tecnologia (T) entendida como o impacto ambiental por consumo ou atividade econômica.

O método de Kaya, muito utilizado pela IEA, pode ser apresentado como derivada da identidade de IPAT, porém engloba o impacto ambiental causado pelas emissões de dióxido de carbono relacionadas com a energia, enquanto o IPAT expressa o impacto ambiental no geral. (TIMMA *et al.*, 2014).

$$C = P \times \left(\frac{\text{PIB}}{P}\right) \times \left(\frac{E}{\text{PIB}}\right) \times \left(\frac{C}{E}\right)$$

Equação 2: Método de Kaya

Onde:

C = emissões de CO₂ (MtCO₂)

P = população (milhões de pessoas)

PIB = Produto Interno Bruto (milhões de dólares americanos em 2010)

E = energia (Mtep)

Comparando o método de Kaya com o IPAT, observa-se que o termo $\left(\frac{\text{PIB}}{P}\right)$ se equivale a A, a intensidade energética – energia por unidade de PIB $\left(\frac{E}{\text{PIB}}\right)$ e a

intensidade carbônica – emissão de CO₂ por unidade de energia consumida $\left(\frac{C}{E}\right)$ equivalem ao T.

A Identidade de Kaya possibilita, portanto, avaliar e comparar o comportamento dos países em relação as variáveis citadas, conforme sugerido nesse trabalho.

3.2 Método de Tapio

O método de Tapio tem como objetivo medir o grau de desacoplamento entre as emissões de CO₂ e o PIB de determinados países em certo período de tempo. A classificação é feita entre oito possíveis categorias. Para melhor entendimento, o método sofreu alterações de sua forma original, originando o Desacoplamento Diamante (FINEL e TAPIO, 2012).

Neste método, as taxas de variação das emissões de CO₂ (Δ CO₂) e do PIB (Δ PIB) resultam em um valor de elasticidade, conforme fórmula abaixo:

$$e = \frac{\% \Delta \text{CO}_2}{\% \Delta \text{PIB}}$$

Equação 3: Método de Tapio

Onde:

e = elasticidade de desacoplamento

% Δ CO₂ = percentual da variação de emissões de CO₂

% Δ PIB = percentual da variação do PIB

As oito categorias possíveis de variação que podem ser obtidos desta equação são apresentadas na Tabela 1.

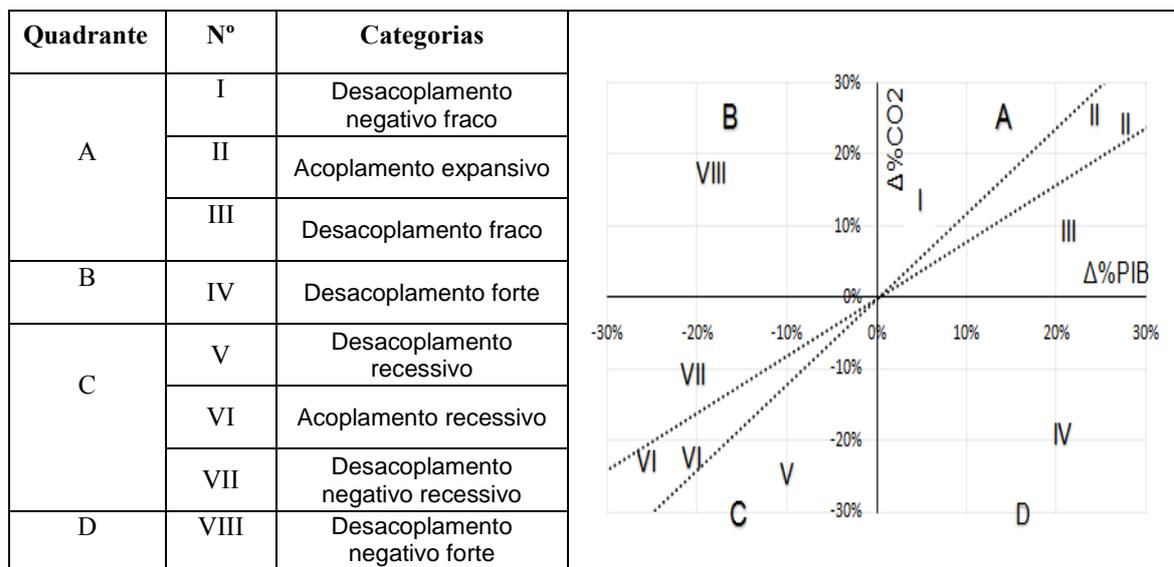
Tabela 1 – Categorias do Desacoplamento Diamante

| Condições | Categorias |
|---|-----------------------------------|
| Se $0.8 < e < 1.2$ e $\% \Delta CO_2 > 0$ e $\% \Delta PIB > 0$ | Acoplamento expansivo |
| Se $0.8 < e < 1.2$ e $\% \Delta CO_2 < 0$ e $\% \Delta PIB < 0$ | Acoplamento recessivo |
| Se $e > 1.2$ e $\% \Delta CO_2 > 0$ e $\% \Delta PIB > 0$ | Desacoplamento negativo fraco |
| Se $e < 0$ e $\% \Delta CO_2 > 0$ e $\% \Delta PIB < 0$ | Desacoplamento negativo forte |
| Se $0 > e < 0.8$ e $\% \Delta CO_2 < 0$ e $\% \Delta PIB < 0$ | Desacoplamento negativo recessivo |
| Se $e > 1.2$ e $\% \Delta CO_2 < 0$ e $\% \Delta PIB < 0$ | Desacoplamento recessivo |
| Se $0 < e < 0.8$ e $\% \Delta CO_2 > 0$ e $\% \Delta PIB > 0$ | Desacoplamento fraco |
| Se $e < 0$ e $\% \Delta CO_2 < 0$ e $\% \Delta PIB > 0$ | Desacoplamento forte |

Fonte: Elaborado pelos autores com dados do artigo FINEL e TAPIO, 2012.

O Desacoplamento Diamante é apresentado na Figura 6, demonstrando graficamente o comportamento de cada categoria.

Figura 6 - Ilustração do Desacoplamento Diamante



Fonte: Elaborado pelos autores com dados do artigo FINEL e TAPIO, 2012.

O quadrante IV corresponde ao quadrante desejável, onde há variação positiva do PIB e variação negativa das emissões de CO₂. Já o quadrante VIII representa o pior quadrante, onde há variação negativa do PIB e positiva das emissões de CO₂.

3.3 Fonte dos dados e categorização dos países

Com base em dados oficiais coletados da IEA referente ao período de 1990 a 2016, utilizaram-se os valores do ano de 2016, por serem os últimos dados disponíveis, para análise dos países.

O continente Sul Americano foi eleito para este estudo por ser composto, em sua maioria, por países em desenvolvimento, que experimentaram nas últimas décadas um padrão de crescimento dinâmico, porém instável (PIAGGIO et al., 2017). Além disso, verificou-se que há algumas publicações que tangenciam o tema, porém este trabalho se apresenta de forma inovadora. Foram analisados os onze países da América do Sul que possuem dados na IEA. O Quadro 2 mostra em ordem decrescente os seguintes determinantes: DI- PIB, DII- Emissões de CO₂, DIII- População, DIV- PIB *per capita*, DV- Emissões de CO₂ *per capita*, DVI- Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), DVII- Intensidade Energética: energia primária por unidade de PIB e DVIII- Intensidade Carbônica: emissões de carbono por unidade de energia primária, para cada país da América do Sul. Estes determinantes foram escolhidos por serem os mais empregados para este tipo de análise (TAKAVOLI, 2018 e FEIJÓ; RANGEL, 2018). Em cada determinante, os cinco países com as maiores economias do continente estão em destaque para melhor visualização e identificação.

QUADRO 2 – Determinantes para categorização dos países

| Determinante I DI | | Determinante II DII | | Determinante III DIII | | Determinante IV DIV | |
|----------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| País | PIB - bi (US\$-2010) | País | Emissões (MtCO ₂) | País | População (milhões) | País | PIB <i>per capita</i> |
| Brasil | 2.248,00 | Brasil | 417,00 | Brasil | 208,00 | Uruguai | 16,00 |
| Argentina | 445,00 | Argentina | 191,00 | Colômbia | 49,00 | Chile | 14,89 |
| Colômbia | 366,00 | Venezuela | 127,00 | Argentina | 44,00 | Brasil | 10,81 |
| Venezuela | 324,00 | Colômbia | 86,00 | Venezuela | 32,00 | Venezuela | 10,12 |
| Chile | 268,00 | Chile | 85,00 | Peru | 32,00 | Argentina | 10,11 |
| Peru | 193,00 | Peru | 51,00 | Chile | 18,00 | Colômbia | 7,47 |
| Equador | 85,00 | Equador | 35,00 | Equador | 16,00 | Suriname | 7,14 |
| Uruguai | 48,00 | Bolívia | 20,00 | Bolívia | 11,00 | Peru | 6,03 |
| Bolívia | 27,00 | Uruguai | 6,00 | Paraguai | 7,00 | Equador | 5,31 |
| Paraguai | 26,00 | Paraguai | 6,00 | Uruguai | 3,00 | Paraguai | 3,71 |
| Suriname | 4,00 | Suriname | 2,00 | Suriname | 0,60 | Bolívia | 2,45 |
| Determinante V DV | | Determinante VI DVI | | Determinante VII DVII | | Determinante VIII DVIII | |
| País | Emissões <i>per capita</i> | País | IDH* | País | Intensidade Energética | País | Intensidade Carbônica |
| Chile | 4,72 | Argentina | 0,84 | Bolívia | 0,333 | Suriname | 3,389 |
| Argentina | 4,34 | Chile | 0,83 | Paraguai | 0,231 | Equador | 2,5 |
| Venezuela | 3,97 | Uruguai | 0,79 | Argentina | 0,193 | Venezuela | 2,348 |
| Suriname | 3,57 | Venezuela | 0,76 | Venezuela | 0,173 | Chile | 2,237 |
| Equador | 2,19 | Brasil | 0,76 | Equador | 0,165 | Bolívia | 2,222 |
| Brasil | 2,01 | Peru | 0,73 | Suriname | 0,147 | Argentina | 2,221 |
| Uruguai | 2,00 | Equador | 0,73 | Chile | 0,142 | Colômbia | 2,15 |
| Bolívia | 1,82 | Colômbia | 0,72 | Brasil | 0,127 | Peru | 2,125 |
| Colômbia | 1,76 | Suriname | 0,71 | Peru | 0,124 | Brasil | 1,463 |
| Peru | 1,59 | Paraguai | 0,68 | Colômbia | 0,109 | Uruguai | 1,2 |
| Paraguai | 0,86 | Bolívia | 0,66 | Uruguai | 0,104 | Paraguai | 1 |

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2016 e *PNUD, 2014.

No Quadro 2, verifica-se que há uma forte correlação entre DI e DII, ou seja, entre a economia e as emissões de CO₂. Os países que são mais significativos

economicamente, conseqüentemente são os que mais emitem CO₂. Dentre os cinco primeiros com as principais economias do continente, apenas a Colômbia e a Venezuela invertem as posições nos dois primeiros determinantes. Mais abaixo no ranque, o Uruguai e a Bolívia também invertem as colocações.

No DIII, quando avaliamos a população, nota-se que a correlação percebida em DI e DII praticamente se mantém, com pequenas alterações, como é o caso do Chile que não aparece entre os cinco primeiros no ranque, pois o país possui uma população menor, apesar de ter uma forte economia. O Brasil se destaca com uma população de 208 milhões de habitantes. Agrupando as populações da Colômbia (49 milhões), Argentina (44 milhões), Peru (32 milhões), Venezuela (32 milhões), Chile (18 milhões), Equador (16 milhões) e Bolívia (11 milhões) somam 202 milhões de habitantes, o que ainda é menor que a população do país.

O DIV mostra que o Uruguai, apesar de ter uma população pequena (3 milhões) e baixas emissões de CO₂ (6 MtCO₂), ultrapassa as economias mais fortes, apresentando o PIB *per capita* mais alto do sul americano (16 US\$), seguida pelo Chile (14,89 US\$) que é o único da América do Sul pertencente a OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, que é constituído por países considerados desenvolvidos.

Observa-se no DV que a Colômbia (1,76 tCO₂/capita) e o Brasil (2,01 tCO₂/capita) caem de forma positiva no ranque, pois apresentam menores emissões de CO₂ *per capita* dentre os cinco países mais fortes economicamente. Já o Suriname (3,57 tCO₂/capita) e o Equador (2,19 tCO₂/capita) apresentam maiores emissões de CO₂.

Quando avaliamos o IDH no DVI, o Uruguai volta a ocupar as primeiras posições (0,79), logicamente influenciado pelo forte PIB *per capita*, e a Colômbia desce no ranque (0,72). A Argentina (0,84) e o Chile (0,83) apresentam os mais altos IDH.

O DVII mostra que a Bolívia (0,333) e o Paraguai (0,231) apresentam a Intensidade Energética mais alta, ou seja, possuem suas economias altamente demandante de energia. Dentre os países com as principais economias, Colômbia (0,109), Brasil (0,127) e Chile (0,142) possuem menor demanda de energia pela economia, o que é positivo.

Finalizando, o DVIII mostra que o Suriname (3,389) e Equador (2,5), apesar de terem economias pequenas, emitem muito CO₂ para cada unidade energética, o que

é típico de países com matriz energética com alto uso de combustíveis fósseis. O Brasil (1,463) cai neste ranque, o que também é positivo para o país, pois indica que sua matriz utiliza bastante energia renovável.

Diante do exposto, este trabalho avalia os países da América do Sul, evidenciando os cinco países que possuem as maiores economias do continente, que mais impactam nas emissões de CO₂.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

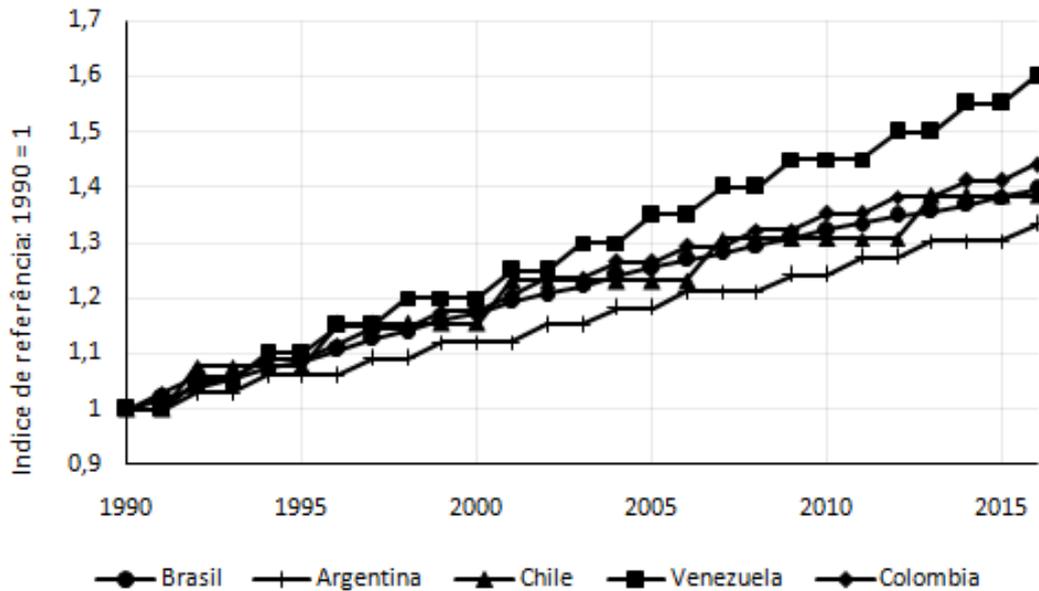
4.1 Forças motrizes das emissões de GEE

Esta seção apresenta uma análise gráfica dos determinantes exibidos no Quadro 1 através da aplicação da Identidade de Kaya. Além disto, foram feitas as seguintes relações: emissões de CO₂ x população, emissões de CO₂ *per capita* x PIB *per capita* e emissões de CO₂ *per capita* x IDH. Para comparar as taxas de emissão de CO₂ de diferentes países, aplicou-se um teste de comparação segundo os procedimentos estatísticos aos modelos de regressão linear ($\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 x_1$) e foi feita correlação do coeficiente Pearson (R) para facilitar a compreensão e interpretação dos dados, além de exercer a comparação de meios. Nesses casos, calculamos o erro padrão, a variância e os graus críticos de liberdade entre os países testados, de acordo com a equação descrita por Montgomery (2008).

4.1.1 População

Esta seção mostra de forma mais detalhada a existência de uma forte correlação entre a população e as emissões de CO₂, exibidas nas Figuras 7 e 8. Nota-se que há uma taxa positiva de crescimento em ambos os determinantes, porém este crescimento não se dá de forma paralela. Na Figura 7 demonstra-se que apesar de o Brasil ser o país que possui a maior população do sul americano, a Venezuela é o país que possui o maior crescimento populacional entre os anos de 1990 e 2016, com um crescimento de aproximadamente 60% em relação ao ano inicial. Colômbia, Brasil, Chile e Argentina seguem apresentando, também, um crescimento de até 45%.

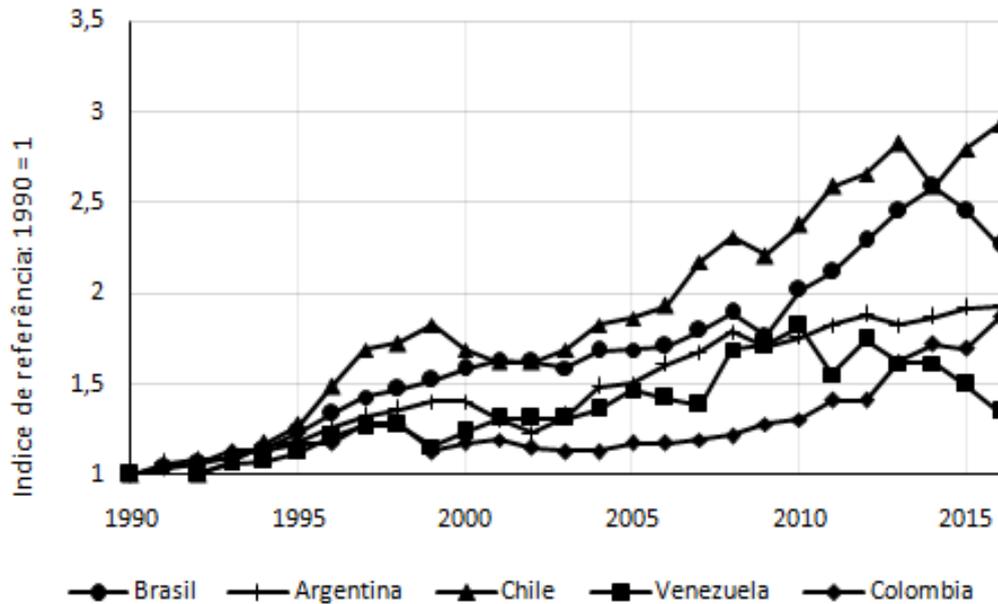
Figura 7 – Índice populacional dos países com as maiores economias



Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

Apesar de a Venezuela apresentar o maior crescimento populacional, o país não apresenta o maior crescimento das emissões de CO₂, uma vez que este papel é do Chile, como mostra a Figura 8. Observa-se, também, que entre oscilações de crescimento e decréscimo, a partir de 2014, Brasil e Venezuela reduziram suas emissões, mesmo que discretamente.

Durante muitos anos no Brasil, as queimadas, em especial na Floresta Amazônica, representaram a principal fonte de emissões de GEE no país. Entre os anos de 2005 e 2010, a participação das queimadas nas emissões reduziu de 57,5% para 22,4%, modificando o padrão das emissões. (SCHUTTE, 2014).

Figura 8 – Índice das emissões de CO₂ dos países com as maiores economias

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

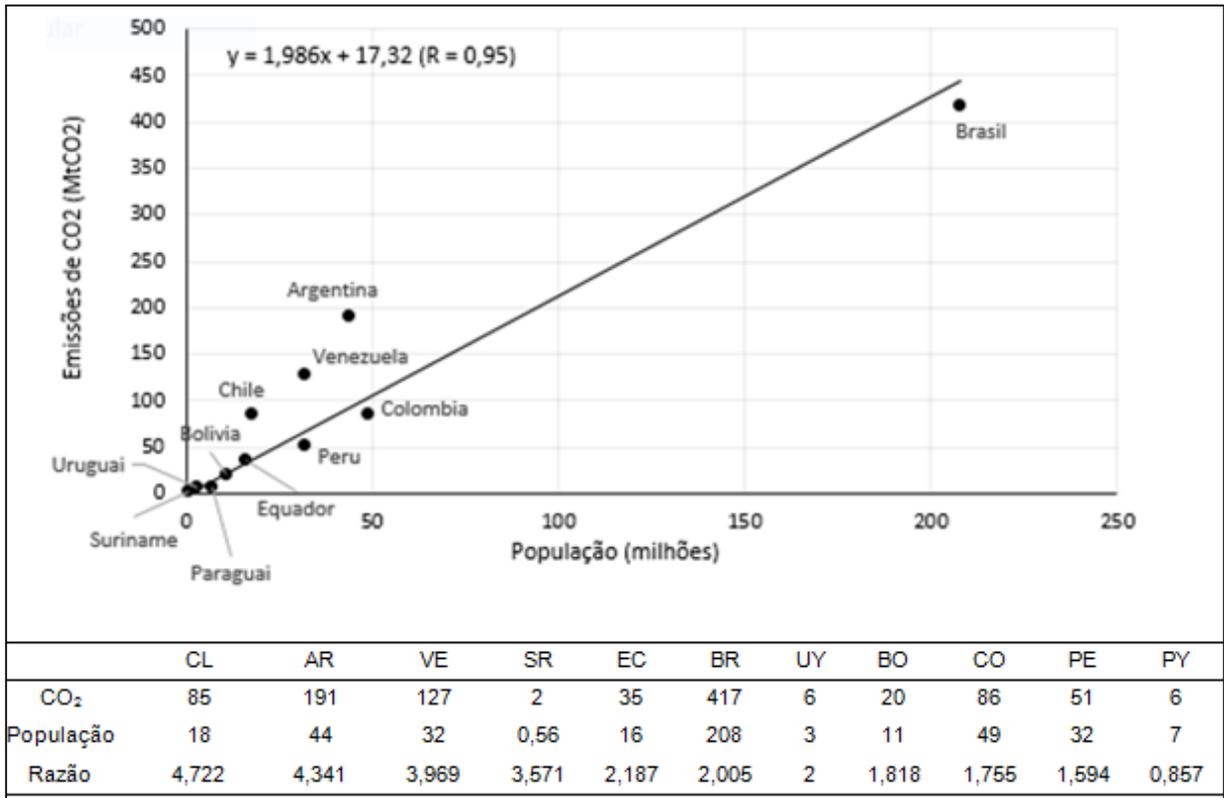
A regressão linear apresentada nas Figuras 9, 11 e 12 permitem melhor visualização, com o propósito de exibir a proporcionalidade entre os pontos, complementando a análise realizada pelo método de Kaya. Os países acima da reta possuem relação mais desproporcional entre as variáveis estudadas, ou seja, apresentam situação mais crítica. Para facilitar esta interpretação, cada Figura vem acompanhada de uma tabela com os valores das razões relativos a cada país. Dessa forma pode-se visualizar o grupo de países com maior desproporcionalidade e verificar com precisão na tabela qual desses países está em pior ou melhor situação.

A Figura 9 representa graficamente a relação das emissões de CO₂ com a população dos países da América do Sul. Note então que os países que estão posicionados acima da reta, conforme citado anteriormente, têm uma relação mais desproporcional entre a razão emissões de CO₂ e população, sendo Chile, Argentina e Venezuela os mais críticos, com as razões mais altas conforme mostram os dados.

Note ainda que, ao se comparar os valores absolutos das emissões de CO₂ do Chile com a Argentina, verifica-se que a Argentina é maior emissor que o Chile, ou seja, a Argentina emite 191MtCO₂, enquanto o Chile 85MtCO₂. No entanto, ao se verificar as emissões de CO₂ em relação à população, cada cidadão do Chile é mais poluidor em comparação com Argentina, visto que as razões CO₂/população para o Chile e Argentina são de: 4,722 e 4,341, respectivamente. Da mesma forma, ao se observar os valores do Brasil, verifica-se que é o país com o maior valor de emissões

totais de CO₂ (417MtCO₂). Porém, o país se localiza abaixo da reta, ou seja, com menor desproporcionalidade e, além disso, possui uma razão inferior a outros cinco países comparativamente.

Figura 9 – Relação Emissões de CO₂ x População (MtCO₂/milhões)

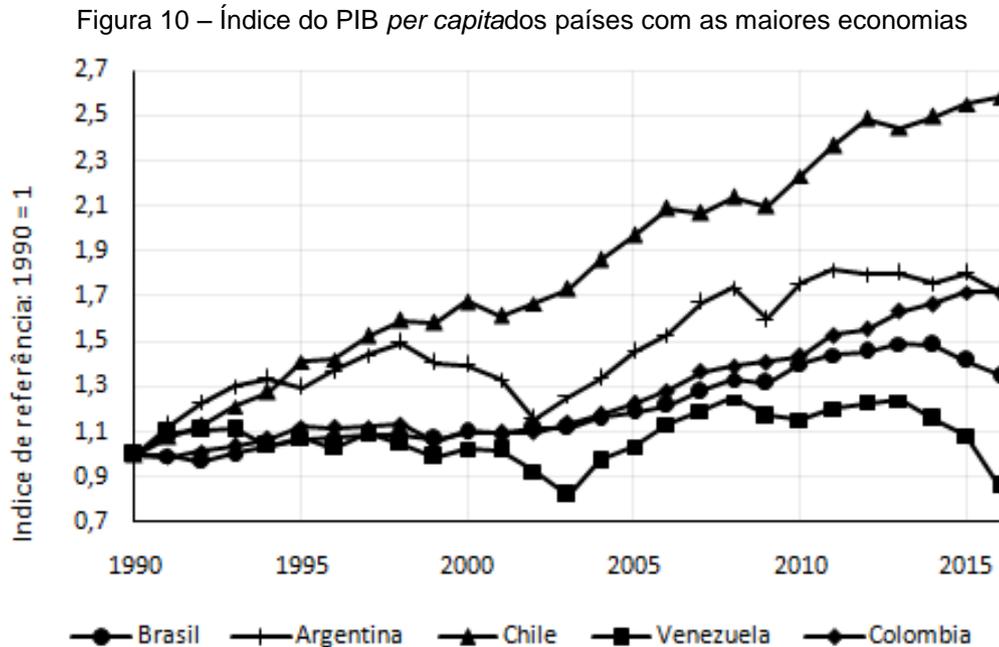


Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

4.1.2 Economia

Uma forma de avaliar o desempenho econômico de um país é por meio do PIB *per capita*, que representa o total da riqueza de uma população dividida pelo número de habitantes. Este indicador demonstra a distribuição da renda no país, mas não permite uma avaliação de questões de desigualdade social. Na Figura 10 é apresentado o PIB *per capita* dos países em estudo. Observa-se que o Chile se destaca como o país com maior crescimento deste indicador. O país obteve um crescimento de aproximadamente 150%, seguido da Argentina e Colômbia que cresceram aproximadamente 70%, entre 1990 e 2016. O Brasil, apesar de possuir o maior PIB bruto da América do Sul (2248US\$), quando dividido pela sua população, sofre uma queda em sua colocação. A Venezuela passou por diversas oscilações e

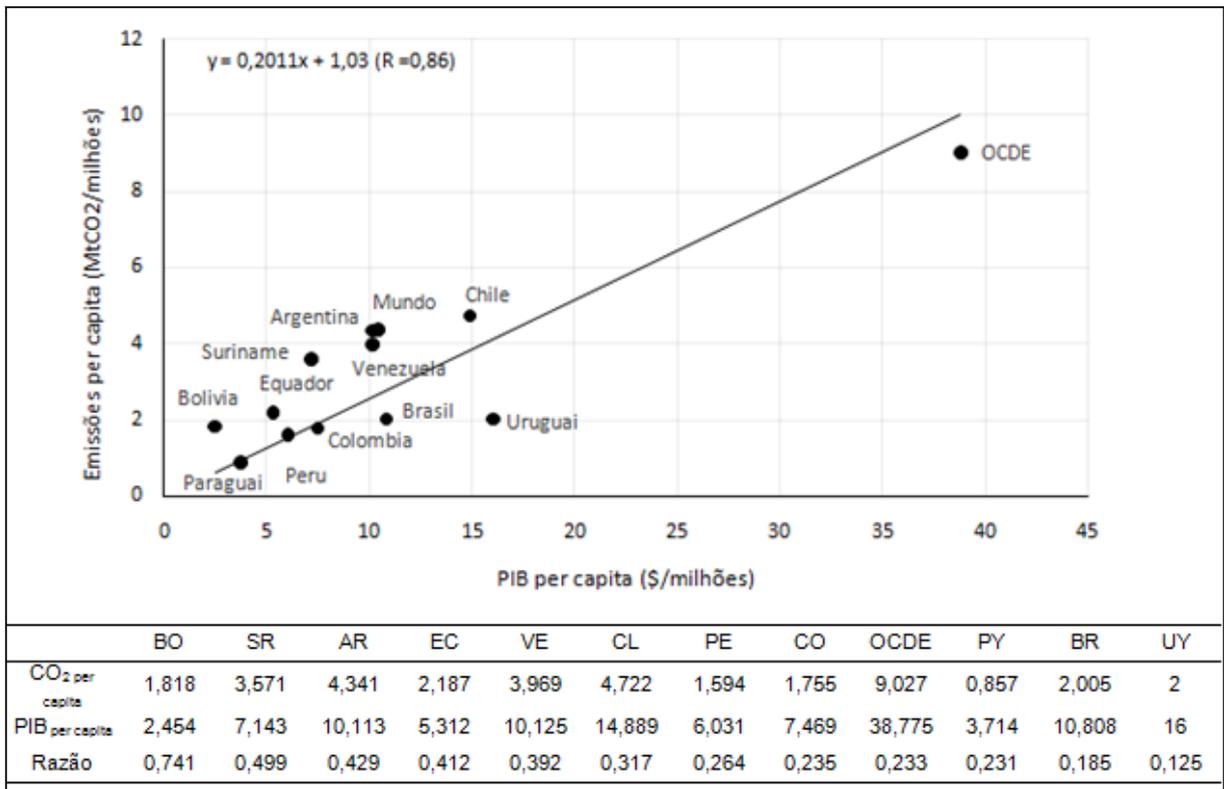
no ano de 2016 obteve decréscimo de pouco mais de 10% (0,862) quando comparado a o ano de 1990 (1).



Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

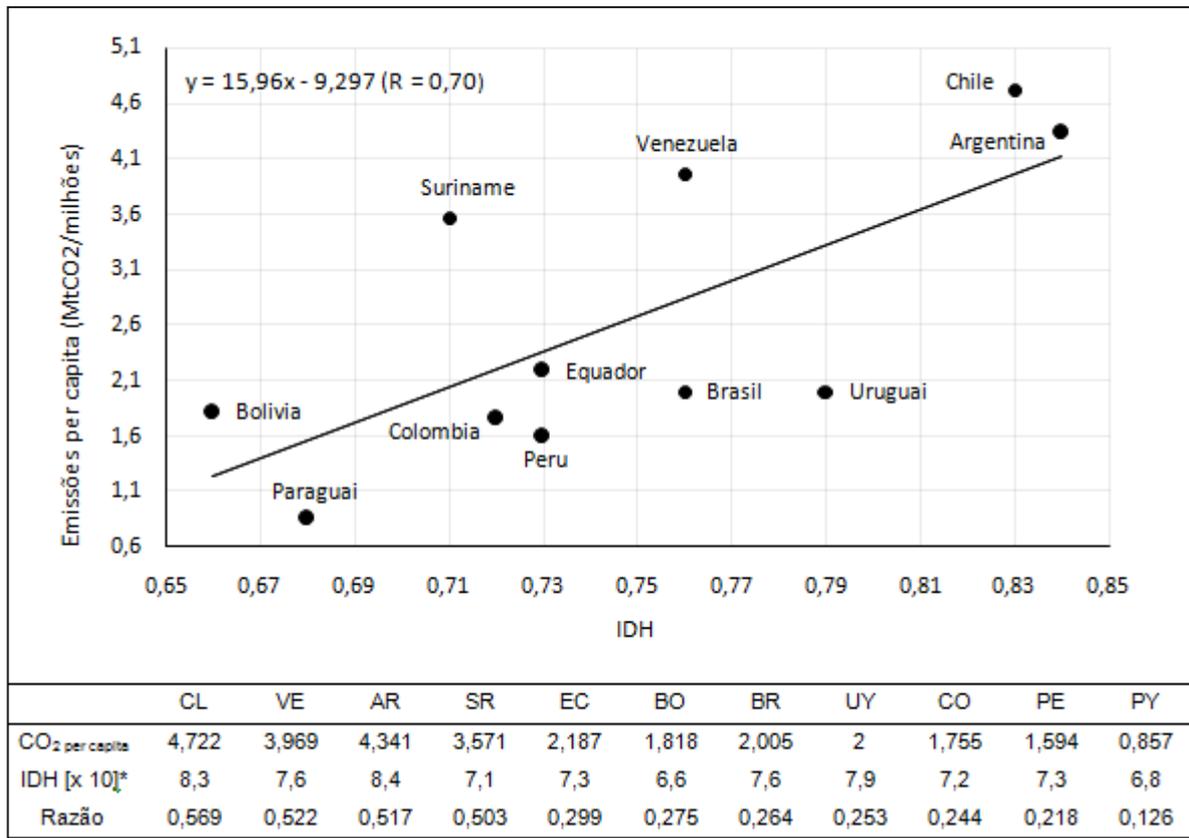
Por outro lado, o desenvolvimento econômico também influencia no comportamento das emissões de CO₂. Na Figura 11 observa-se a relação das emissões de CO₂ *per capita* x PIB *per capita*. Para fins de comparação, foram acrescentados os dados mundiais e da OCDE no gráfico. Verifica-se que a OCDE possui os maiores valores em relação às variáveis: PIB *per capita* e emissões de CO₂ *per capita*, com 9,027MtCO₂ *per capita* e 38,775US\$ *per capita*, respectivamente. Isto pode ser explicado pelo fato de os países mais ricos e mais desenvolvidos do mundo pertencerem a este grupo e serem dotados de altos indicadores econômicos, ambientais e sociais. Nota-se, também, que o comportamento mundial se assemelha ao da Argentina.

A Bolívia, apesar de ter uma das menores emissões de CO₂ *per capita* (1,818MtCO₂ *per capita*), apresenta a situação mais crítica, seguido por Suriname e Argentina, com as maiores razões (0,741; 0,499 e 0,429, respectivamente). Nesse caso, as emissões de CO₂ por pessoa foram mais significativas que a riqueza para cada habitante destes países.

Figura 11 – Relação Emissões de CO₂ *per capita* x PIB *per capita*

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

Outra comparação que ainda pode ser feita é em relação ao IDH. Apesar do PIB demonstrar um parâmetro comparativo relativo ao desempenho econômico, o IDH pode indicar uma análise mais abrangente relacionada ao desenvolvimento do país alcançado em longo prazo. Na Figura 12 demonstra-se a relação das emissões de CO₂ *per capita* com o IDH e é possível observar que o Chile foi o país que apresentou maiores valores de emissões de CO₂ *per capita* (4,722MtCO₂), seguido pela Argentina (4,341MtCO₂). Por sua vez quando analisado o IDH, a questão muda, pois a Argentina vem em primeiro (com índice 0,84), seguida pelo Chile (0,83). Na tabela, observe a razão das emissões de CO₂ *per capita* pelo IDH e note que Chile, Venezuela e Argentina possuem as maiores razões (0,569; 0,522 e 0,517, respectivamente) assim como maiores emissões *per capita* (4,722; 3,969 e 4,341MtCO₂, respectivamente). Sendo assim, apesar de possuírem alto desenvolvimento humano, as emissões *per capita* de CO₂ ainda foram mais expressivas que o IDH.

Figura 12 – Relação Emissões de CO₂ *per capita* x IDH

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

*os valores do IDH foram multiplicados por 10

As Figuras 9, 11 e 12 representam três relações de emissões propostas nesse trabalho, e em todas elas a Argentina aparece entre os países mais críticos, ou seja, com maior desproporcionalidade entre as variáveis apresentadas em cada Figura. Chile e Venezuela ocupam as piores posições nas relações emissões de CO₂ x população e emissões de CO₂ *per capita* x IDH. Já a Bolívia apresenta a razão mais alta (0,741), seguida pelo Suriname (0,499) e Argentina (0,429) apenas na relação emissões de CO₂ *per capita* x PIB *per capita*.

Observa-se que quase não há semelhança entre as razões nas Figuras 11 e 12. Tal semelhança seria o esperado, pois a renda da população está inclusa no IDH, que além desta inclui também saúde e educação da população. Apenas a Argentina permanece na mesma posição. Talvez esta variação se dê pelo fato de que demande décadas para um país aumentar o IDH, já a mudança no PIB *per capita* pode ocorrer de forma mais rápida, pois depende do desempenho econômico. O questionamento que fica é acerca do porquê que há esta diferença notória no posicionamento dos

países quando analisamos estas relações, o quão distintamente o IDH e a renda da população influenciam nas emissões de CO₂ *per capita*.

A Tabela 2 apresenta a parcela da participação mundial em percentuais de CO₂, PIB e CO₂/PIB dos países da América do Sul e a OCDE. Nota-se que o resultado recomendado é quando o país apresenta maior participação na economia mundial do que nas emissões mundiais, ou seja, o percentual do PIB é maior do que o percentual das emissões de CO₂. Quando esse estado é alcançado, logicamente, a razão entre esses dois indicadores será menor do que 1. Verifica-se então que apenas a Bolívia, Suriname e Argentina apresentam esta relação maior que 1, com 1,77:1, 1,2:1, 1,03:1, respectivamente.

Os demais países apresentam a razão recomendada, menor que 1. Dentre esses países, o Uruguai, Brasil, e Paraguai foram os que apresentaram os melhores resultados, respectivamente, 0,29:1 ; 0,44:1 ; 0,54:1. A OCDE possui razão equivalente a Colômbia (0,56:1).

TABELA 2 – Participações percentuais da América do Sul e OCDE

| | Bolívia | Suriname | Argentina | Equador | Venezuela | Chile |
|-----------------|---------|----------|-----------|----------|-----------|---------|
| CO ₂ | 0,062% | 0,006% | 0,591% | 0,108% | 0,393% | 0,263% |
| PIB | 0,035% | 0,005% | 0,575% | 0,109% | 0,419% | 0,346% |
| Razão | 1,77:1 | 1,2:1 | 1,03:1 | 0,99:1 | 0,93:1 | 0,76:1 |
| | Peru | OCDE | Colômbia | Paraguai | Brasil | Uruguai |
| CO ₂ | 0,158% | 35,867% | 0,266% | 0,018% | 1,290% | 0,018% |
| PIB | 0,249% | 64,356% | 0,473% | 0,033% | 2,906% | 0,062% |
| Razão | 0,63:1 | 0,56:1 | 0,56:1 | 0,54:1 | 0,44:1 | 0,29:1 |

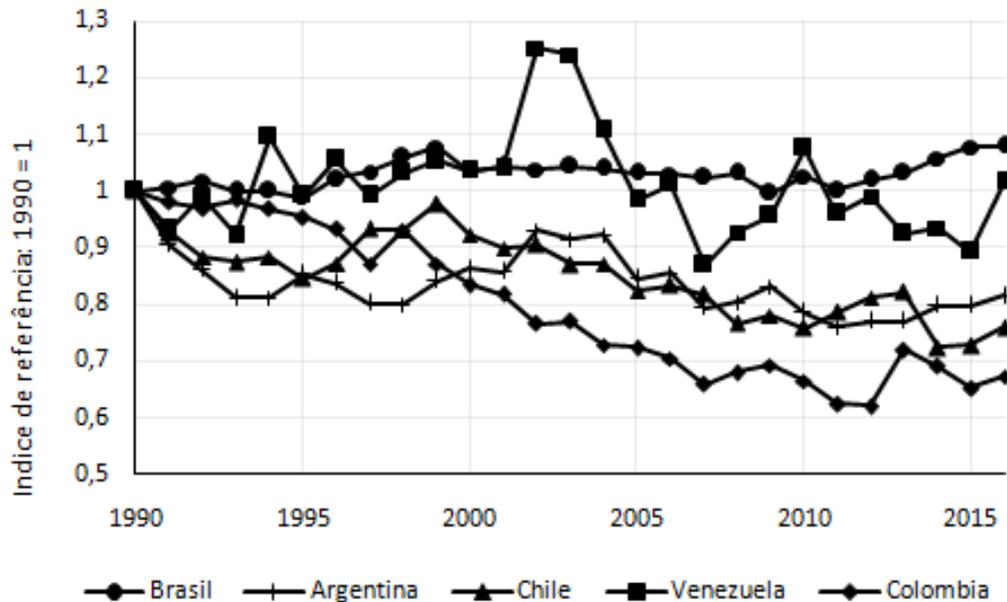
Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

4.1.3 Intensidade Energética

O gráfico exibido na Figura 13 avalia a intensidade energética dos países, ou seja, mede a eficiência da utilização de energia em relação ao desempenho econômico do país. A industrialização, melhorias na eficiência energética e o grau de utilização de tecnologias constituem alguns fatores que influenciam na intensidade energética de um país (TAKAVOLI, 2018). A Venezuela mostra total instabilidade em sua intensidade energética, atingindo o pico em 2002 (1,253), ano em que o país passou por uma forte crise política. Apenas o Brasil (1,080) e a Venezuela (1,015) apresentaram crescimento em 2016, comparado a 1990, inferior a 10%. Os demais

países obtiveram decréscimo em sua intensidade energética, mostrando que o PIB cresceu mais que a energia.

Figura 13 – Índice da Intensidade Energética (TPES/PIB) dos países com as maiores economias

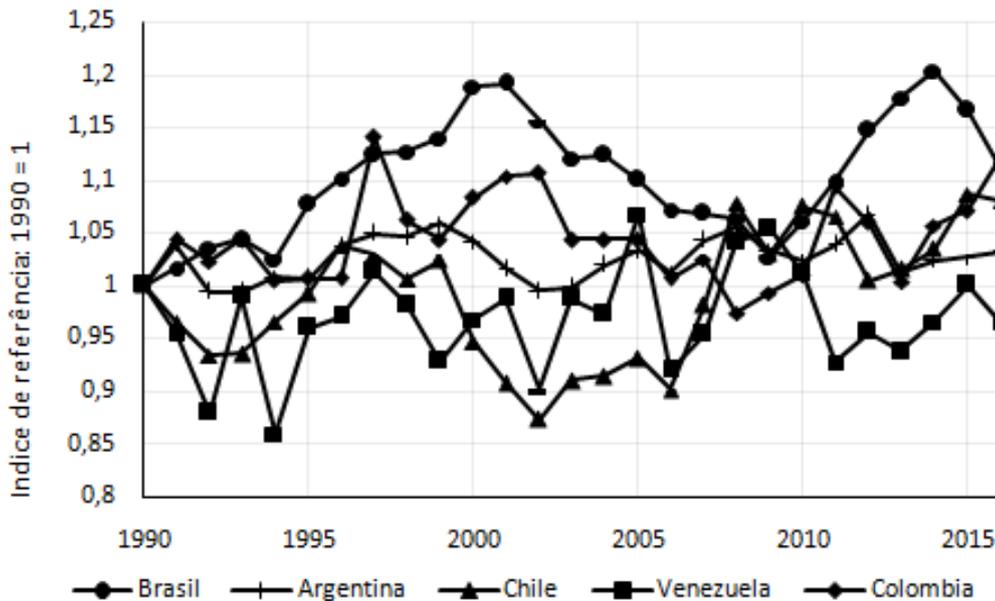


Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

4.1.4 Intensidade Carbônica

As emissões de CO₂ foram baseadas principalmente na queima de combustíveis fósseis (carvão, gás e petróleo). Na Figura 14 encontram-se as intensidades carbônicas dos países estudados neste trabalho, que corresponde à taxa de emissões de carbono por unidade de energia (TAKAVOLI, 2018). Nota-se que os países apresentam grandes oscilações, sem um padrão bem definido. Comparado ao ano de 1990, em 2016 o Brasil (1,113) e a Colômbia (1,122) cresceram sua intensidade carbônica em pouco mais de 10%. O Chile aumentou cerca de 7% (1,079) e a Argentina aproximadamente 3% (1,032). A Venezuela decresceu em 4% (0,965).

Figura 14 – Índice da Intensidade Carbônica (CO₂/TPES) dos países com as maiores economias



Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

4.2 Análise do desacoplamento CO₂ e PIB

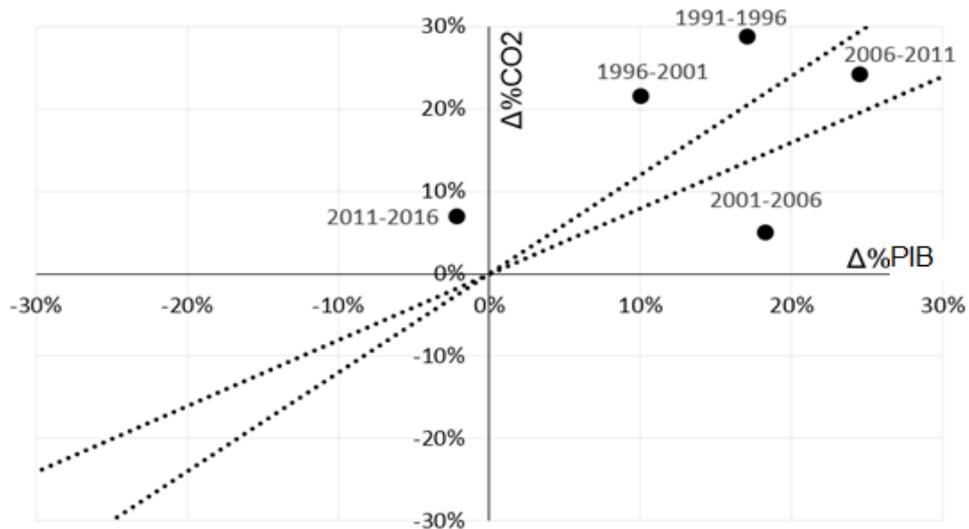
Esta seção apresenta uma análise de desacoplamento das emissões de CO₂ e PIB dos países com as principais economias, através da aplicação do Método de Tapio. Para isto, considera-se uma série temporal de 25 anos subdivididos em cinco grupos de 5 anos: 1991-1996; 1996-2001; 2001-2006; 2006-2011; 2011-2016.

No geral, nota-se que nenhum dos países apresentou situação de desacoplamento forte nos últimos anos. Apenas a Colômbia alcançou, porém não conseguiu manter.

Na Figura 15 está a análise de desacoplamento no Brasil. Observa-se que de 1991 a 2001 o país atingiu um desacoplamento negativo fraco. De 2001 a 2006, apresentou um comportamento um pouco melhor, dando indícios que a situação poderia melhorar. Porém, de 2006 a 2011 o país atingiu acoplamento expansivo, não conseguindo atingir uma situação de desacoplamento. De 2011 a 2016, o Brasil apresentou variação negativa do PIB, atingindo a pior categoria, o quadrante não desejado. Isso expõe a crise econômica e política enfrentada pelo país nos últimos anos. Segundo Freitas e Kaneko (2011), o Brasil difere de outros países que experimentaram o desacoplamento porque a melhoria da maioria dos países foi baseada em tecnologias focadas na redução da intensidade energética, enquanto o

país se esforça no uso racional de recursos naturais e na diversificação na matriz energética.

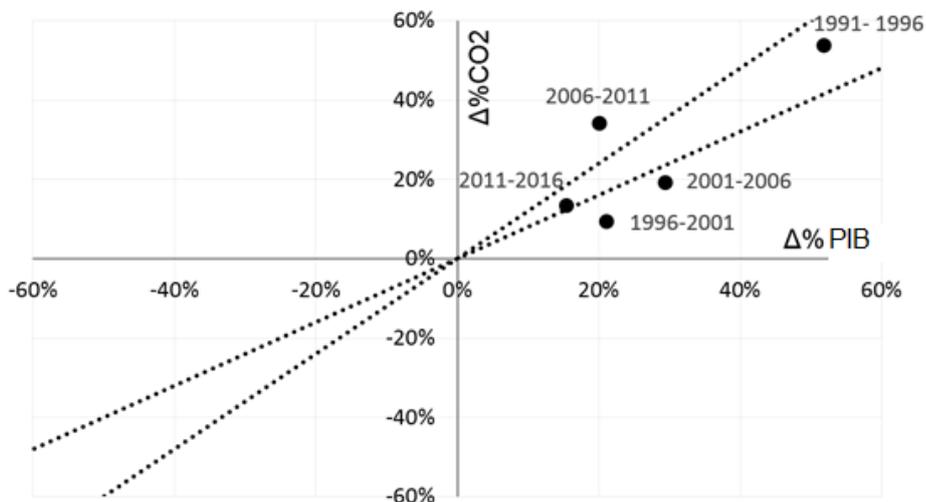
Figura 15 – Método de Tapio aplicado ao Brasil



Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

Na Figura 16 o desacoplamento do Chile apresenta-se como acoplamento expansivo de 1991 a 1996, e de 1996 a 2006 sustentou um estado de desacoplamento fraco, favorecendo seu desacoplamento. De 2006 a 2011 atingiu o desacoplamento negativo fraco, pois a variação de emissões de CO₂ aumentou mais que o PIB. Porém, de 2011 a 2016, o país não conseguiu manter seu padrão de desacoplamento, retornando ao acoplamento expansivo inicial.

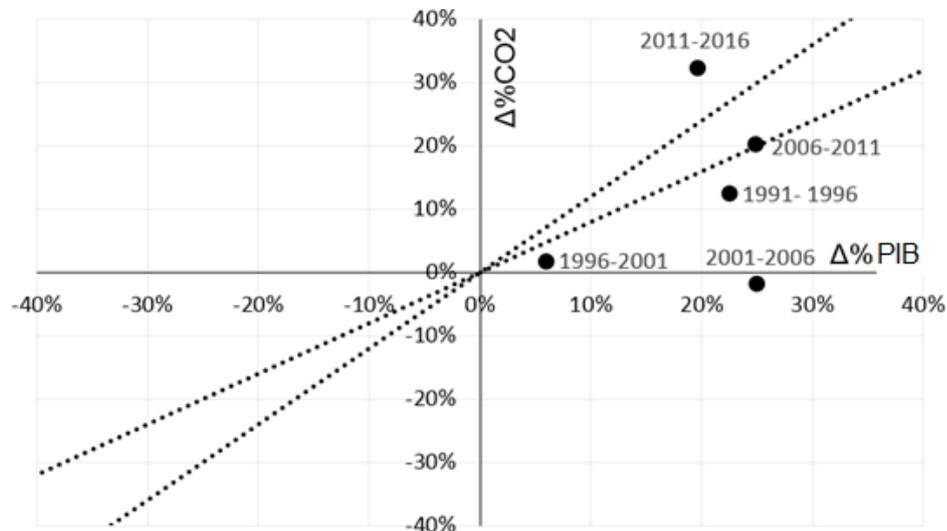
Figura 16 – Método de Tapio aplicado ao Chile



Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

A Figura 17 representa o desacoplamento da Colômbia. Nota-se que o país apresentava uma situação de desacoplamento fraco nos primeiros 10 anos, de 1991 a 2001, passando a desacoplamento forte de 2001 a 2006, atingindo o padrão desejável, pois aumentou a variação do PIB e reduziu a variação de emissões de CO₂. Mas não manteve esta situação, passando para acoplamento expansivo de 2006 a 2011. Nos últimos 5 anos em estudo, o país não atingiu uma situação tão positiva quanto anteriormente, atingindo o desacoplamento negativo fraco.

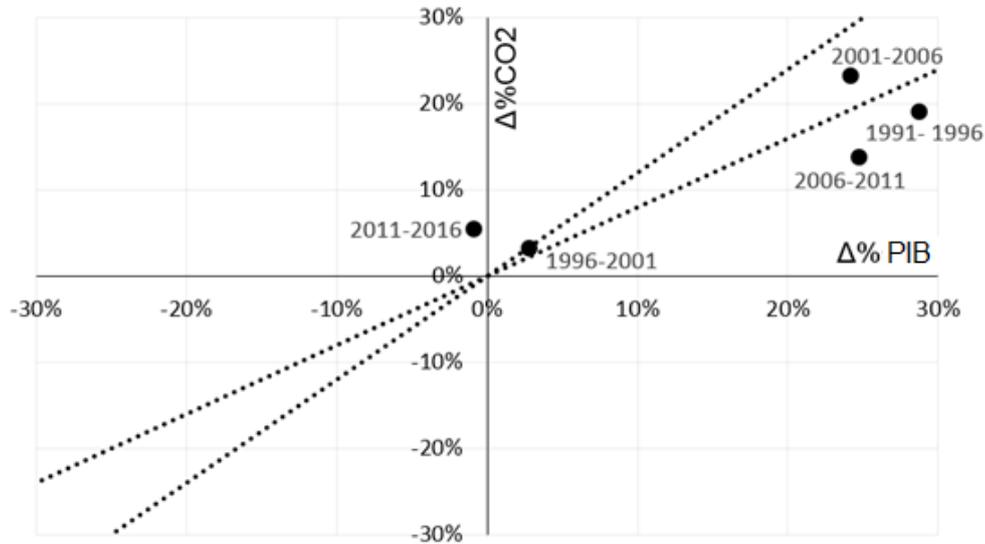
Figura 17 – Método de Tapio aplicado a Colômbia



Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

Na Figura 18, o Método de Tapio foi aplicado a Argentina e verificou-se que o país parte de um desacoplamento fraco entre 1991 e 1996, atingindo acoplamento expansivo nos próximos 10 anos (1996-2006). De 2006 a 2011, retornou ao desacoplamento fraco e, nos últimos cinco anos estudados, apresentou desacoplamento negativo forte, pois não conseguiu se desenvolver economicamente.

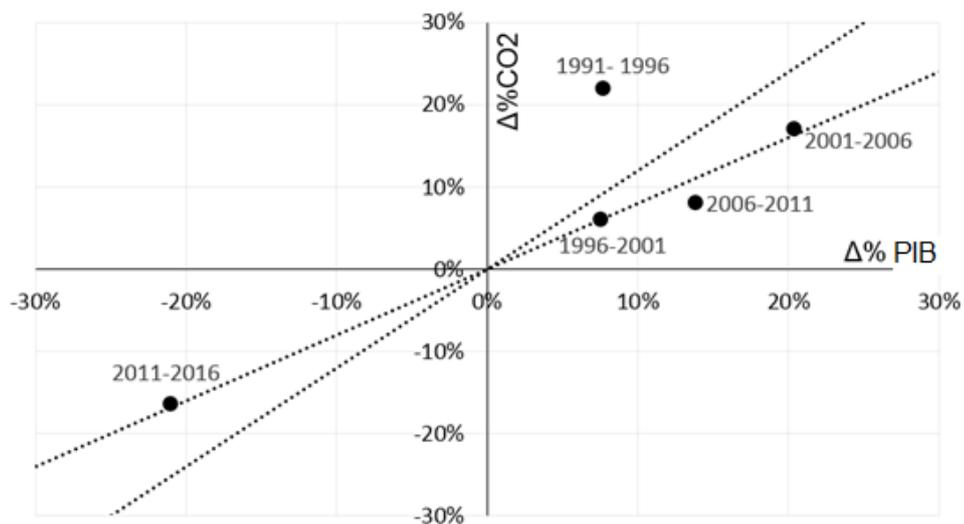
Figura 18 – Método de Tapio aplicado a Argentina



Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

Quanto à Venezuela, o Método de Tapio apresentou oscilação, mostrando-se instável (Figura 19). Nos cinco primeiros anos em estudo, o país apresentou desacoplamento negativo fraco. De 1996 a 2001, apresentou desacoplamento fraco, atingindo acoplamento expansivo de 2001 a 2006, retornando à situação de desacoplamento fraco de 2006 a 2011. A crise no país reduziu bastante o PIB e as emissões de CO₂, atingindo de 2011 a 2016 situação de desacoplamento negativo recessivo.

Figura 19 – Método de Tapio aplicado a Venezuela



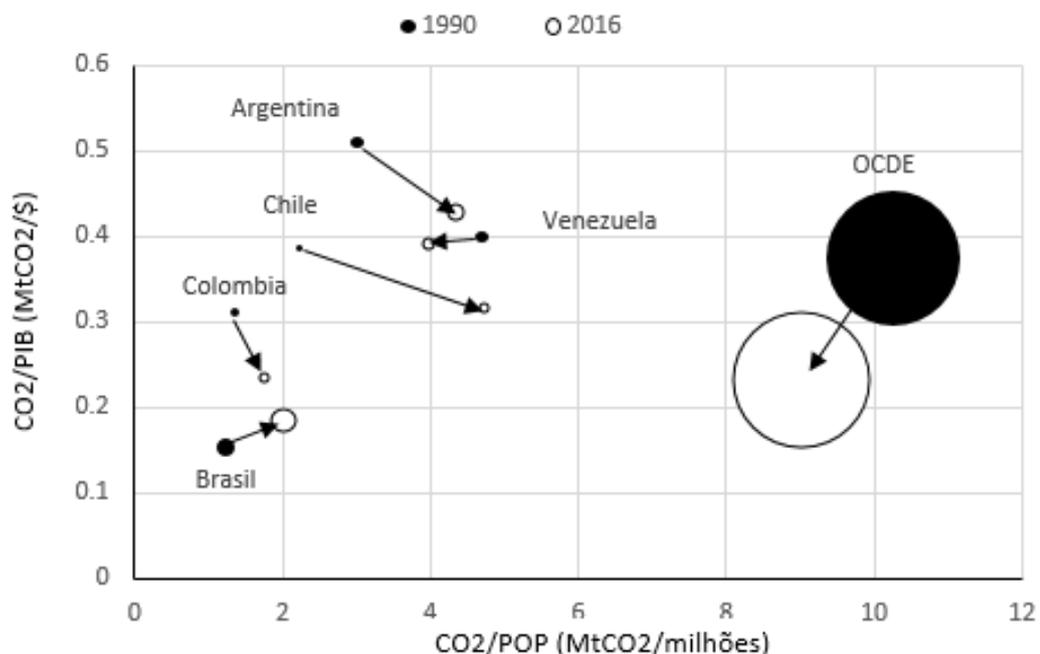
Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

4.3 Perfil das Emissões de CO₂

Nesta seção é apresentada a intensidade das emissões de CO₂ dos países com as maiores economias do continente acrescido com os dados da OCDE, que apresenta o comportamento desejado. A OCDE vem conseguindo reduzir suas emissões, como resultado de grandes investimentos em tecnologias e resposta às políticas energéticas adotadas. O período temporal desta análise corresponde ao ano inicial de 1990 e o ano final de 2016

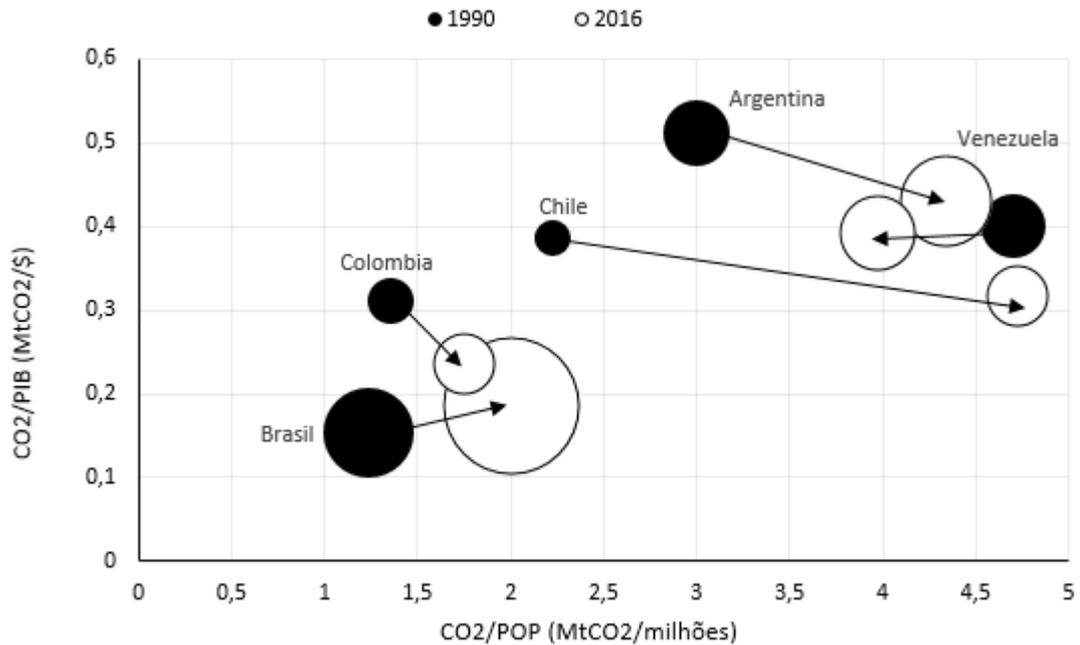
Na Figura 20 apresenta-se a relação da intensidade das emissões de CO₂ com as emissões de CO₂ *per capita*. O comportamento ideal deve apresentar a seta voltada para o vértice, que indica que as emissões de CO₂ cresceram menos que a população ou o PIB. O tamanho da bolha mostra de forma relativa os valores das emissões de CO₂ em ambos os anos analisados.

Figura 20 – Intensidade de emissões de CO₂ dos países estudados e da OCDE



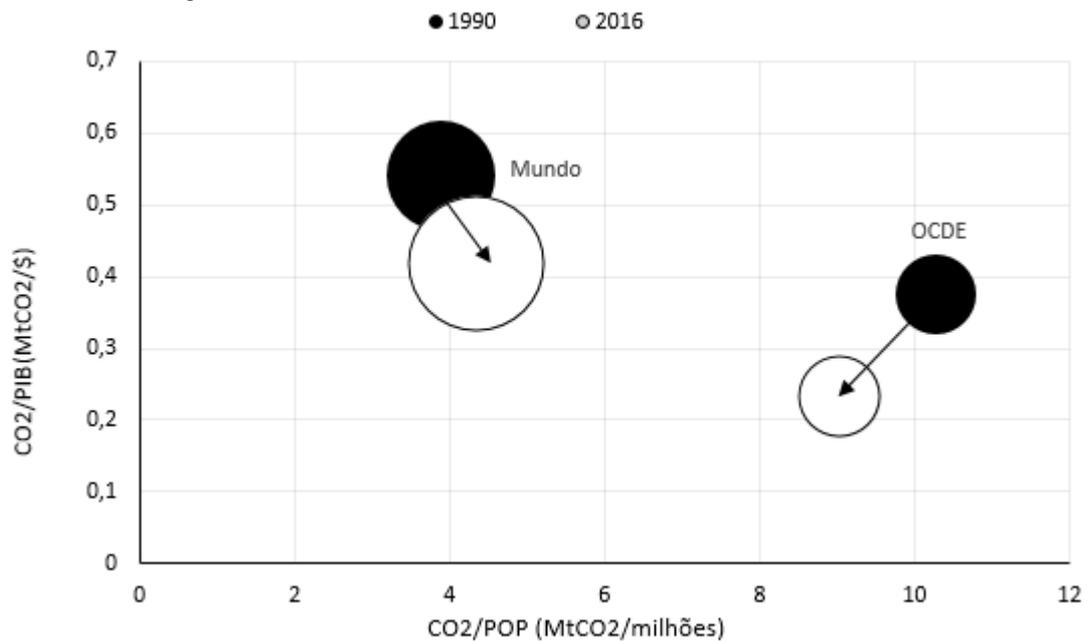
Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

Para melhor visualização, o perfil das emissões de CO₂ apenas dos países estudados, sem o comportamento da OCDE foi apresentado na Figura 21. Nota-se que o Brasil apresenta a situação mais distante da ideal e a Venezuela apresenta o comportamento mais próximo, porém pode ser reflexo da crise que o país enfrenta.

Figura 21 – Intensidade de emissões de CO₂ dos países estudados

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

A Figura 22 mostra o perfil das emissões de CO₂ do Mundo e da OCDE. Observa-se que o grupo de países da OCDE apresenta comportamento melhor que o mundial.

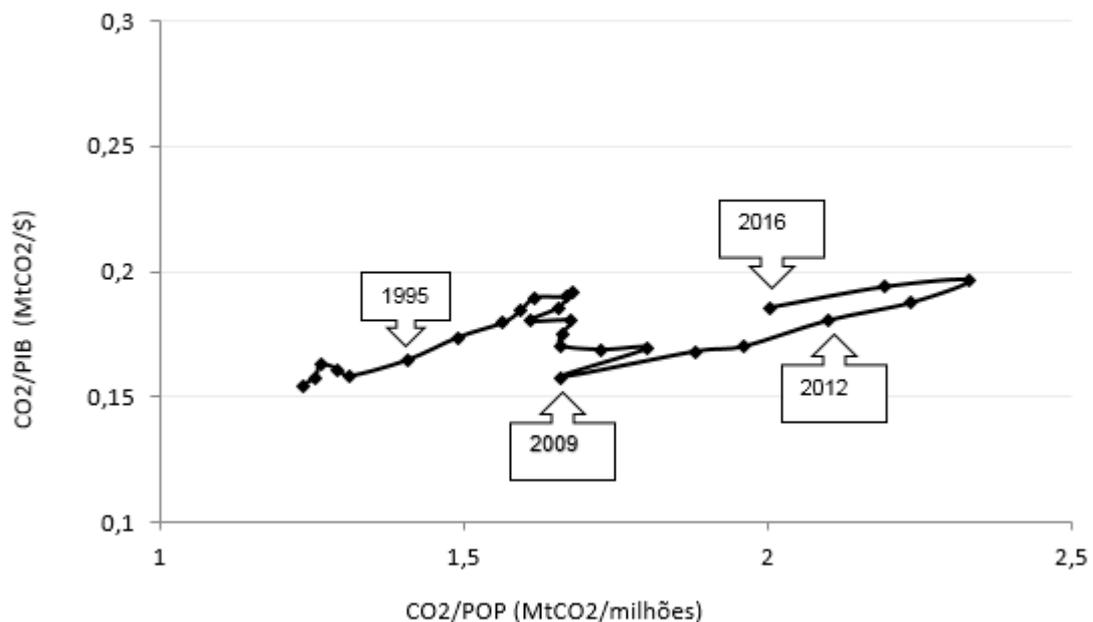
Figura 22 – Intensidade de emissões de CO₂ do Mundo e da OCDE

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

Visto que o Brasil apresenta crescimento nas relações CO₂/PIB e CO₂/população, a Figura 23 mostra a trajetória do perfil das emissões de CO₂ no país

entre o período de 1990 e 2016. Observa-se que as emissões *per capita* aumentaram até o ano de 2001. De 2002 a 2009, houve oscilação entre crescimento e decréscimo, porém, de 2008 para 2009, houve redução maior das emissões de CO₂ *per capita*. De 2010 a 2014 houve crescimento. Em 2015 e 2016, o país voltou a apresentar a situação ideal, caminhando em direção ao vértice, no entanto, este comportamento pode ser resultado de crise e não de uma alteração no padrão de crescimento econômico e populacional com descarbonização da matriz energética. Se nos próximos anos essa situação se manter, indicará eficiência energética no país. Houve um aumento de cerca 20% na intensidade das emissões de CO₂ (CO₂/PIB) no período estudado.

Figura 23 – Perfil das emissões de CO₂ no Brasil



Fonte: Elaborado pelos autores com dados da IEA, 2018.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A DISSERTAÇÃO

5.1 Conclusões

O presente trabalho realizou uma análise das seguintes forças motrizes das emissões de GEE: população, economia, intensidade energética e intensidade carbônica dos países com as maiores economias da América do Sul e que mais impactam nas emissões de CO₂ do continente, com dados da IEA do período de 1990 a 2016. São eles: Argentina, Brasil, Chile, Colômbia e Venezuela.

Para melhorar o entendimento, também foram apresentadas as seguintes relações: emissões de CO₂ x população, emissões de CO₂ *per capita* x PIB *per capita* e emissões de CO₂ *per capita* x IDH. Com a finalidade de comparar o posicionamento destes países com a média dos países desenvolvidos, os dados da OCDE foram acrescentados na relação emissões *per capita* x PIB *per capita*, além dos dados mundiais.

Em seguida, analisou o desacoplamento das emissões de CO₂ e PIB destes países através do Método de Tapio, que mostrou que nenhum dos países estudados apresentou desacoplamento forte nos últimos anos. Apenas a Colômbia chegou a esta situação, no período de 2001 a 2006, porém não conseguiu manter.

Por último, este trabalho apresentou a relação da intensidade de emissões de CO₂ (CO₂/PIB) e emissões de CO₂ *per capita* destes países. Além disso, foi explorada a trajetória do perfil das emissões de CO₂ do Brasil, de 1990 a 2016. Apesar de ter uma matriz energética limpa e diversificada, o Brasil é o país que possui maiores emissões dos países selecionados e enfrenta dificuldades para reduzi-las. O país segue em direção contrária da ideal, o que ameaça seu destaque se não houver uma melhora.

Os seguintes resultados foram observados nesta pesquisa:

Chile, Colômbia e Argentina precisam reduzir suas emissões, pois foram os únicos países dentre os estudados que continuaram aumentando suas emissões de CO₂ no ano de 2016.

Nenhum dos países apresentou queda na intensidade energética em 2016, uma vez que o crescimento econômico pressiona o meio ambiente, pois demanda um gasto maior de energia.

Venezuela, Brasil e Chile apresentaram uma queda na intensidade carbônica em 2016. Dos países selecionados, a Venezuela apresenta menor crescimento das emissões em comparação com o ano inicial.

No geral, este estudo demonstrou que os países analisados da América do Sul precisam reduzir as emissões de dióxido de carbono e investirem em fontes de energia mais limpas.

5.2 Limitações do Trabalho

Uma limitação para este trabalho foi o fato de que na IEA não consta os dados de todos os países que constituem a América do Sul, por menor que sejam os valores. Além disso, a base disponibiliza dados de 2 anos anteriores ao ano corrente. Por fim, estes dados apenas levam em consideração as emissões de origem fóssil.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se para futuros trabalhos uma análise mais profunda sobre o porquê que o IDH e o PIB *per capita* refletem de forma tão distintas nas emissões de CO₂ *per capita*.

5.4 Produções Originadas neste Trabalho

A ser submetido para a revista *Sustainable Cities and Society*

REFERÊNCIAS

Alvarenga, S. M.; Sobrinho, V. G. Indutores de impactos ambientais: uma análise comparativa entre BRICS e G7 (1992-2013). **Revista Economia Ensaios**, Uberlândia, v. 32, n. 2, p. 125-147, 2018.

Chen, J.; Wang, P.; Cui, L.; Huang, S.; Song, M. Decomposition and decoupling analysis of CO₂ emissions in OECD. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 231, p. 937-950, 2018.

Costa, H. G. Modelo para webibliomining: proposta e caso de aplicação. **Revista da FAE**, Curitiba, v. 13, n. 1, p. 115-126, 2010.

Dai, S.; Zhang, M.; Huang, W. Decomposing the decoupling of CO₂ emission from economic growth in BRICS countries. **Natural Hazards**, Berlin, v. 84, n. 2, p. 1055-1073, 2016.

Dong, F.; Li, J.; Zhang, Y. J.; Wang, Y. Drivers analysis of CO₂ emissions from the perspective of carbon density: The case of Shandong Province, China. **International journal of environmental research and public health**, Basel, v. 15, n. 8, p. 1762, 2018.

Ehrlich, P. R.; Holdren, J. P. Impact of population growth. **Science**, Washington, v. 171, n. 3977, p. 1212-1217, 1971.

Engo, J. Decomposing the decoupling of CO₂ emissions from economic growth in Cameroon. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 25, n. 35, p. 35451-35463, 2018.

Feijó, G. D. R.; Rangel, J. J. de A. Analysis of behaviour in the emissions of carbon dioxide of Brazil and other countries based on the Kaya Identity and the Emission Profile. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 46, p. 1-22, 2018.

Finel, N.; Tapio, P. Decoupling transport CO₂ from GDP. Finland: Finland Future Research, 2012. E-book.

Freitas, L. C. de; Kaneko, S. Decomposing the decoupling of CO₂ emissions and economic growth in Brazil. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 70, n. 8, p. 1459-1469, 2011.

Grigoroudis, E.; Kanellos, F.; Kouikoglou, V. S.; Phillis, Y. A. The challenge of the Paris Agreement to contain climate change. **Intelligent Automation & Soft Computing**. London: Taylor&Francis, 2017.

International Energy Agency – IEA. **World Energy Investment 2018**. Disponível em: <http://www.iea.org/wei2018>. Acesso em: 11 out. 2018.

Lima, F.; Nunes, M. L.; Cunha, J.; Lucena, A. F. A cross-country assessment of energy-related CO₂ emissions: An extended Kaya Index Decomposition Approach. **Energy**, Amsterdam, v. 115, p. 1361-1374, 2016.

Lin, S. J.; Beidari, M.; Lewis, C. Energy consumption trends and decoupling effects between carbon dioxide and gross domestic product in South Africa. **Aerosol and Air Quality Research**, Taoyuan, v. 15, p. 2676-2687, 2015.

Liu, Y.; Wang, F.; Zheng, J. Estimation of Greenhouse Gas Emissions from the EU, US, China, and India up to 2060 in Comparison with Their Pledges under the Paris Agreement. **Sustainability**, Basel, v. 9, n. 9, p. 1587, 2017.

Ma, X.; Wang, C.; Dong, B.; Gu, G.; Chen, R.; Li, Y.; Li, Q. Carbon emissions from energy consumption in China: Its measurement and driving factors. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 648, p. 1411-1420, 2019.

Montgomery, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

Piaggio, M.; Padilla, E.; Román, C. The long-term relationship between CO₂ emissions and economic activity in a small open economy: Uruguay 1882–2010. **Energy Economics**, Amsterdam, v. 65, p. 271-282, 2017.

Programa das Nações Unidas Para o Desenvolvimento – PNUD. **Relatório de Desenvolvimento Humano 2015**. Disponível em: <http://www.br.undp.org>. Acesso em: 11 ago. 2018.

Robalino-López, A.; García-Ramos, J. E.; Golpe, A. A.; Mena-Nieto, A. CO₂ emissions convergence among 10 South American countries. A study of Kaya components (1980–2010). **Carbon Management**, London, v. 7, n.1-2, p. 1-12, 2016.

Robalino-López, A.; Mena-Nieto, Á.; García-Ramos, J. E.; Golpe, A. A. Studying the relationship between economic growth, CO₂ emissions, and the environmental Kuznets curve in Venezuela (1980–2025). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Amsterdam: Elsevier, v. 41, p. 602-614, 2015.

Robalino-López, A.; Mena-Nieto, A.; García-Ramos, J. E. System dynamics modeling for renewable energy and CO₂ emissions: A case study of Ecuador. **Energy for Sustainable Development**, Amsterdam, v. 20, p. 11-20, 2014.

Rüstemoglu, H.; Andrés, A. R. Determinants of CO₂ emissions in Brazil and Russia between 1992 and 2011: A decomposition analysis. **Environmental Science & Policy**, Amsterdam, v. 58, p. 95-106, 2016.

Santos, I. E. dos. **Manual de métodos e técnicas de pesquisa científica**. Niterói: Impetus, 2009.

Schutte, G. R. Energia e desenvolvimento sustentável no Brasil – Trajetórias recentes e perspectivas. **Friedrich Ebert Stiftung**, São Paulo. p. 1-23, 2014.

Song, Y.; Zhang, M.; Zhou, M. Study on the decoupling relationship between CO₂ emissions and economic development based on two-dimensional decoupling theory: A case between China and the United States. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 102, p. 230-236, 2019.

Tavakoli, A. A journey among top ten emitter country, decomposition of “Kaya Identity”. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v. 38, p. 254-264, 2018.

Timma, L.; Vilgerts, J.; Vanaga, R.; Kļavenieksd, K.; Blumberga, D. Decomposition analysis based on IPAT and Kaya identity for assessment of hazardous waste flow within enterprise. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, 27., 2014. **Proceedings** [...]. Finland: ECOS, 2014, p. 15-19.

Xie, P.; Gao, S.; Sun, F. An analysis of the decoupling relationship between CO₂ emission in power industry and GDP in China based on LMDI method. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 211, p. 598-606, 2019.

APÊNDICE 1

| Método de Tapio - Brasil | | | | |
|---------------------------------|-----------------|----------------|----------|-------------------------------------|
| Anos | ΔPIB (%) | ΔCO2(%) | e | Categorias de desacoplamento |
| 1991-2016 | 86% | 118% | 1,38 | Desacoplamento negativo fraco |
| 1991- 1996 | 17,09% | 28,80% | 1,684625 | Desacoplamento negativo fraco |
| 1996-2001 | 10,01% | 21,54% | 2,151437 | Desacoplamento negativo fraco |
| 2001-2006 | 18,27% | 5,02% | 0,2746 | Desacoplamento fraco |
| 2006-2011 | 24,50% | 24,20% | 0,987966 | Acoplamento expansivo |
| 2011-2016 | -2,13% | 6,92% | -3,24537 | Desacoplamento negativo forte |

| Método de Tapio - Chile | | | | |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------|-------------------------------------|
| Anos | ΔPIB(%) | ΔCO2(%) | e | Categorias de desacoplamento |
| 1991-2016 | 231% | 204% | 0,88 | Acoplamento expansivo |
| 1991- 1996 | 51,85% | 53,57% | 1,033163 | Acoplamento expansivo |
| 1996-2001 | 21,14% | 9,30% | 0,440072 | Desacoplamento fraco |
| 2001-2006 | 29,53% | 19,15% | 0,648453 | Desacoplamento fraco |
| 2006-2011 | 20,21% | 33,93% | 1,679029 | Desacoplamento negativo fraco |
| 2011-2016 | 15,52% | 13,33% | 0,859259 | Acoplamento expansivo |

| Método de Tapio - Colômbia | | | | |
|-----------------------------------|-----------------|----------------|----------|-------------------------------------|
| Anos | ΔPIB (%) | ΔCO2(%) | e | Categorias de desacoplamento |
| 1991-2016 | 142% | 79% | 0,56 | Desacoplamento fraco |
| 1991- 1996 | 22,52% | 12,50% | 0,555147 | Desacoplamento fraco |
| 1996-2001 | 5,95% | 1,85% | 0,311448 | Desacoplamento fraco |
| 2001-2006 | 25,00% | -1,82% | -0,07273 | Desacoplamento forte |
| 2006-2011 | 24,90% | 20,37% | 0,818154 | Acoplamento expansivo |
| 2011-2016 | 19,61% | 32,31% | 1,647692 | Desacoplamento negativo fraco |

| Método de Tapio - Argentina | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------|--------------------------------------|
| Anos | ΔPIB (%) | ΔCO2(%) | e | Categorías de desacoplamiento |
| 1991-2016 | 103% | 82% | 0,79 | Desacoplamiento fraco |
| 1991- 1996 | 28,77% | 19,05% | 0,662132 | Desacoplamiento fraco |
| 1996-2001 | 2,84% | 3,20% | 1,128 | Acoplamiento expansivo |
| 2001-2006 | 24,14% | 23,26% | 0,963455 | Acoplamiento expansivo |
| 2006-2011 | 24,72% | 13,84% | 0,559678 | Desacoplamiento fraco |
| 2011-2016 | -0,89% | 5,52% | -6,20166 | Desacoplamiento negativo fuerte |

| Método de Tapio - Venezuela | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------|--------------------------------------|
| Anos | ΔPIB (%) | ΔCO2(%) | e | Categorías de desacoplamiento |
| 1991-2016 | 26% | 37% | 1,43 | Desacoplamiento negativo fraco |
| 1991- 1996 | 7,75% | 21,95% | 2,831707 | Desacoplamiento negativo fraco |
| 1996-2001 | 7,55% | 6,00% | 0,794286 | Desacoplamiento fraco |
| 2001-2006 | 20,40% | 16,98% | 0,832354 | Acoplamiento expansivo |
| 2006-2011 | 13,89% | 8,06% | 0,580645 | Desacoplamiento fraco |
| 2011-2016 | -20,98% | -16,42% | 0,782714 | Desacoplamiento negativo recessivo |