



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS - ICSA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

***ECOLOGICAL FOOTPRINT* E DIVERSIFICAÇÃO DAS
EXPORTAÇÕES NA AMÉRICA DO SUL**

EDSON SILVA DOS REIS JUNIOR

MARIANA

2022

EDSON SILVA DOS REIS JUNIOR

***ECOLOGICAL FOOTPRINT E DIVERSIFICAÇÃO DAS
EXPORTAÇÕES NA AMÉRICA DO SUL***

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Ferraz

MARIANA

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R375e Reis Junior, Edson Silva Dos.
Ecological Footprint e Diversificação Das Exportações Na América Do Sul. [manuscrito] / Edson Silva Dos Reis Junior. - 2022.
54 f.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Ferraz.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Sociais Aplicadas. Graduação em Ciências Econômicas .

1. Ecologia - América do Sul. 2. Economia - América do Sul. 3. Desenvolvimento sustentável - América do Sul. I. Ferraz, Diogo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 330.3

Bibliotecário(a) Responsável: Essevalter De Sousa-Bibliotecário Coordenador
CBICSA/SISBIN/UFOP-CRB6a1407



FOLHA DE APROVAÇÃO

Edson Silva Dos Reis Junior

Ecological Footprint e Diversificação das Exportações na América Do Sul

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Ciências Econômicas

Aprovada em 20 de Outubro de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. - Diogo Ferraz - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)
Prof. Dr. - Luiz Mateus da Silva Ferreira - (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)
Me. - Guilherme Augusto Roiz - (Universidade de São Paulo - USP)

Prof. Dr. Diogo Ferraz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/10/2022



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Ferraz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/10/2022, às 20:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0419301** e o código CRC **E48E8BDF**.

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Diogo Ferraz, pela disponibilidade para com este trabalho, por dividir sua bagagem científica e humana, sou muito grato por ter você fazendo parte da minha história acadêmica.

À UFOP e aos professores do departamento de Ciências Econômicas da UFOP, pelos ensinamentos e sabedoria transmitidos ao longo de minha trajetória universitária.

Agradeço também a minha família, em especial minha noiva Rafaela, minha mãe e meu pai, meus irmãos Marcilio e Thales e minha irmã Daniela, por todo apoio e incentivo que tenho recebido. Obrigado!

RESUMO

Os países têm o duplo desafio de promover desenvolvimento econômico sem causar degradação ao meio ambiente. Autoridades têm tomado decisões acerca de questões ecológicas, por exemplo, durante a convenção sobre mudanças climáticas o Rio de Janeiro (RIO 92). Nesse sentido, a Organização das Nações Unidas (ONU) definiu 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável. O debate acerca do desenvolvimento sustentável está no centro do debate da política mundial, o que se reflete em diversos estudos internacionais sobre questões ambientais. A presente monografia tem o objetivo de analisar o impacto da diversificação das exportações sobre o indicador de pegada ecológica (*Ecological Footprint*) em 12 países da América do Sul, entre 2000 e 2014. Este trabalho adota como estratégia empírica um modelo econométrico com dados em painel, utilizando como estratégia o modelo *Feasible Generalized Least Square (FGLS)*, que corrigiu os problemas da heterocedasticidade e autocorrelação serial. O principal resultado desta monografia foi revelar a importância da diversificação das exportações e da sofisticação da estrutura produtiva, a fim de reduzir a degradação ambiental nos países emergentes da América do Sul.

Palavras-Chave: Diversificação Econômica, Pegada Ecológica, Desenvolvimento Sustentável, América do Sul.

ABSTRACT

Countries have the double challenge of promoting economic development without causing degradation to the environment. Authorities have taken decisions on ecological issues, for example, during the climate change convention in Rio de Janeiro (RIO 92). In this sense, the United Nations (UN) has defined 17 goals for sustainable development. The debate on sustainable development is at the heart of the world policy debate, which is reflected in several international studies on environmental issues. This monograph aims to analyze the impact of export diversification on the ecological footprint indicator (Ecological Footprint) in 12 South American countries, between 2000 and 2014. This work adopts an econometric model with panel data as an empirical strategy, using the Feasible Generalized Least Square (FGLS) model as a strategy, which corrected the problems of heteroscedasticity and serial autocorrelation. The main result of this monograph was to reveal the importance of export diversification and the sophistication of the productive structure, in order to reduce environmental degradation in emerging South American countries.

Keywords: Economic Diversification, Ecological Footprint, Sustainable Development, South America.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	8
CAPÍTULO 1: SUSTENTABILIDADE E ECOLOGICAL FOOTPRINT.....	13
<i>1.1 Sustentabilidade ambiental</i>	<i>13</i>
<i>1.2 Ecological Footprint: uma nova abordagem.....</i>	<i>15</i>
CAPÍTULO 2: ESTRUTURA E SOFISTICAÇÃO PRODUTIVA.....	21
<i>2.1 Estrutura produtiva e complexidade econômica</i>	<i>21</i>
<i>2.2 Índice de Complexidade Econômica.....</i>	<i>24</i>
<i>2.3 Estrutura produtiva e degradação ambiental</i>	<i>27</i>
CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E DESAFIOS DA AMÉRICA DO SUL	30
CAPÍTULO 4: MÉTODO	34
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS:	48

INTRODUÇÃO

Um dos desafios dos países é manter o desenvolvimento econômico sem impactar o meio ambiente. Autoridades internacionais têm tomado decisões acerca de questões ecológicas como, por exemplo, durante a convenção sobre as mudanças climáticas no Rio de Janeiro (RIO 92). Durante o evento, a proposta era estabilizar a concentração de gases do efeito estufa no planeta. Além disso, o Protocolo de Kyoto (1997) destacou a importância de reduzir as emissões de gases do efeito estufa para aumentar o bem estar da população mundial. Neste sentido, a Organização das Nações Unidas (ONU) definiu 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável, a fim de criar parâmetros para comparação da evolução do desenvolvimento sustentável entre os países. Vale destacar que o Acordo de Paris (2015) ainda demonstra preocupação com as mudanças climáticas pelo mundo, bem como a importância de manter o aumento da temperatura do planeta abaixo de 2 graus celsius (°C).

Note que o debate acerca do desenvolvimento sustentável está no centro do debate da política mundial, o que se reflete em diversos estudos internacionais sobre questões ambientais (Gozgor e Can., 2016; Can e Gozgor., 2017; Shahzad et al., 2020). Por exemplo, Gozgor e Can (2016) analisaram o impacto das emissões de CO₂ decorrente da produção de bens e consumo de energia de determinado país ou conjunto de países. Os autores encontraram que os principais determinantes da emissão do poluente foram a geração de energia e o crescimento econômico (Gozgor e Can, 2016). Outro estudo mensurou os fatores que influenciam o aumento do CO₂ na Turquia (Can e Gozgor, 2017). Os autores encontraram resultados similares ao estudo de Gozgor e Can (2016). Por outro lado, Shahzad et al. (2020) analisaram grupos de países em desenvolvimento e desenvolvidos. Os autores encontraram que a urbanização, o Produto Interno Bruto (PIB) e o consumo de energia aumentam a emissão de CO₂ no mundo. Entretanto, outros estudos demonstram que existem fatores estruturais capazes de diminuir a emissão de dióxido de carbono no mundo como, por exemplo, a complexidade econômica.

Complexidade econômica se refere ao conhecimento útil e disponível em uma sociedade (Hidalgo et al., 2014). Este conceito pode ser expresso por meio dos produtos fabricados regionalmente. Para representar a complexidade econômica, utiliza-se o Índice de Complexidade Econômica (ICE), que calcula a sofisticação da estrutura produtiva por meio da diversidade das exportações e quantos países são capazes de produzir estes bens. Países com

grande diversidade de *know-how* produtivo são capazes de produzir bens mais sofisticados e tecnologicamente intensivos (Neagu et al., 2021). Os produtos mais complexos e produzidos em poucos países correspondem a maquinários, eletrônicos, produtos químicos, entre outros. Por outro lado, os produtos com baixa complexidade e que são produzidos em diversos lugares correspondem às matérias-primas e *commodities* em geral (produtos agrícolas, minério de ferro, entre outros).

A Complexidade Econômica tem demonstrado impactos negativos na emissão de CO₂ (Ferraz et al., 2021; Shahzad et al., 2020). De acordo com estes estudos, os produtos mais complexos têm capacidade de intensificar bens ambientalmente sustentável por meio dos avanços tecnológicos. Entretanto, Gozgor e Can (2016) destacam que uma maior diversificação de produtos exportados pode resultar em maiores emissões de CO₂. Neagu (2019) indica que bens mais sofisticados demandam mais energia, levando a um aumento na intensidade energética e, portanto, aumentando a emissão de gases do efeito estufa. Tendo em vista a celeuma da relação complexidade econômica e emissão de CO₂, estudos recentes têm analisado a relação entre complexidade econômica e pegada ecológica (*Ecological Footprint*).

A pegada ecológica, termo conhecido em inglês como *Ecological Footprint*, é uma métrica que analisa a quantidade de recursos naturais disponíveis (biocapacidade) e a quantidade de recursos naturais utilizados pelo ser humano (*Ecological Footprint*) em determinada região. Esta medida é expressa em hectares globais (gha), o que permite analisar os padrões de consumo de recursos como, por exemplo, a terra e a água, além de demonstrar se o consumo está dentro da capacidade ecológica da região (Rafique et al., 2021; Shahzad et al., 2021). Nesse aspecto, novos estudos investigam a relação do *Ecological Footprint* com a estrutura econômica (Ikram et al., 2021), ou seja, o nível da complexidade econômica em relação à utilização dos recursos naturais de determinado país.

Os estudos apresentados anteriormente têm concentrado suas pesquisas em países desenvolvidos ou em grupos específicos, por exemplo, economias mais complexas ou países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Porém, poucos estudos têm analisado tais fatores em economias em desenvolvimento como, por exemplo a América Latina ou América do Sul. Portanto, surge a necessidade de realizar estudos em países em desenvolvimento, analisando formas de reduzir o uso dos recursos naturais e, conseqüentemente, a degradação ambiental. Ademais, os estudos focam na utilização do *Economic Complexity Index (ECI)*. Esta monografia utiliza como estratégia empírica analisar o

impacto da diversificação das exportações por meio do *Export Diversification Index*, o que pode ser considerada uma forma alternativa para analisar a sofisticação da estrutura produtiva para os países.

Os recursos naturais e o consumo de energia são fatores essenciais para promover o crescimento econômico em países em desenvolvimento. A crescente demanda por esses recursos vem impactando negativamente o meio ambiente por meio da emissão de gases de efeito estufa e degradação ambiental. Estudos recentes têm avançado em analisar a pegada ecológica (*Ecological Footprint*) ao invés da emissão de poluentes (Shahzad et al. 2021; Rafique et al., 2021; Ikram et al., 2021). Esta nova abordagem tem encorajado diversas pesquisas em analisar formas de reduzir o uso dos recursos naturais e, conseqüentemente, a degradação do meio ambiente. Nesse aspecto, uma pergunta de pesquisa relevante nesse tema é: quais são os fatores determinantes que causam o aumento/redução do uso de recursos naturais (*Ecological Footprint*) durante o processo de crescimento econômico em países em desenvolvimento? Ademais, a estrutura produtiva de um país em desenvolvimento é relevante para aumentar/diminuir o uso de recursos naturais durante o processo de desenvolvimento econômico? Estas perguntas motivam a investigação sobre os determinantes sociais e econômicos que impactam o meio ambiente e podem promover um crescimento ambientalmente sustentável.

Esta monografia apresenta o seguinte objetivo geral, a saber: analisar o impacto da diversificação das exportações sobre o indicador de pegada ecológica (*Ecological Footprint*) nos países da América do Sul. Além disso, os objetivos secundários foram:

- i. Apresentar o conceito teórico sobre pegada ecológica (*Ecological Footprint*), destacando o método de cálculo do indicador.
- ii. Discutir sobre a importância da sofisticação produtiva para o processo de desenvolvimento sustentável.
- iii. Discorrer sobre o processo de desenvolvimento econômico e questões ambientais na América do Sul.
- iv. Mensurar o impacto da diversificação das exportações sobre a pegada ecológica e destacar soluções e políticas de incentivo para reduzir os impactos ambientais.

O conceito de *Ecological Footprint* foi criado por Wackernagel e Rees (1995) no livro chamado "*Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*". A obra analisa

os impactos das atividades humanas em áreas biologicamente produtivas como, por exemplo, a água necessária e resíduos gerados durante o processo produtivo. Esta monografia se justifica porque este tema tem apresentado relevância em artigos internacionais (Neagu et al., 2021; Rafique et al., 2021) em substituição aos estudos focados em emissão de CO₂ (Can e Gozgor, 2016; Gozgor e Can, 2017) ou qualidade do ar (Shahzad et al. 2021; Ikram et al., 2021).

Este novo campo de análise tem demonstrado relevância para estratégias de desenvolvimento e recomendações políticas para que os países atinjam os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (*Sustainable Development Goals - SDGs*) estipulados pela Organização das Nações Unidas (ONU) (Ikram et al. 2021; Rafique et al., 2021). Entretanto, os estudos internacionais apresentam foco em países desenvolvidos como, por exemplo, países membros da União Europeia (Neagu, 2019) e OCDE (Rafique et al., 2021). Neste aspecto, esta monografia busca contribuir com esta literatura, apresentando a relação entre *Ecological Footprint* e complexidade econômica para os países da América do Sul.

Esta análise é importante pois, os países da América do Sul têm cerca de 23% da biocapacidade mundial (World Bank, 2021), por conter no continente a maior floresta tropical do mundo, a Amazônia, com quase sete milhões de km². Apesar do continente ter pequena participação no PIB mundial, a principal produção desses países são *commodities*, que geram grandes danos ambientais devido a utilização de recursos naturais não renováveis, aumentando cada vez mais a produção desses bens e, conseqüentemente, as emissões de gases do efeito estufa, o que reduz a biocapacidade da região (Alvarado et al., 2021)

Note que o nível de complexidade dos produtos depende do consumo de recursos naturais, o que demonstra a relação entre a estrutura produtiva e o *Ecological Footprint* (Neagu, 2020). Vale destacar que os países Sul-Americanos têm baixo índice de complexidade econômica, além de consumirem muitos recursos não renováveis a produção de matérias básicas tem grandes quantidades de emissão de gases do efeito estufa e grande consumo de energia, tornando necessária uma melhoria na produção, ou transição para produzir bens de alta complexidade, mas com o desafio de reduzir o impacto da complexidade econômica na qualidade ambiental.

Como destacado por Ferraz et al. (2021) poucos estudos sobre sustentabilidade ambiental analisam o *Ecological Footprint* e outros tipos de emissões, como a poluição por dióxido de enxofre (SO₂). Destaque para os países em desenvolvimento, que demandam grande volume de recursos naturais, visto que, a maioria de suas exportações são *commodities*. Alguns

estudos, como de Kumar et al. (2021), analisam o impacto ecológico dos edifícios residenciais durante a vida útil, que impacta negativamente o *Ecological Footprint*. Chunling et al. (2021) encontraram resultados sobre as variáveis de investimento público-privado em energia, inovação tecnológica, crescimento econômico e abertura comercial, que aumentam o *Ecological Footprint* nas regiões analisadas. Entretanto, ainda há escassez de estudos que analisem a relação entre a estrutura produtiva e o *Ecological Footprint* em regiões em desenvolvimento.

Nesse sentido, a análise sobre o impacto ambiental por meio do uso do *Ecological Footprint* em relação à diversificação das exportações ou complexidade econômica é recente na literatura internacional. Boa parte dos estudos têm focado nos países desenvolvidos, sendo necessário estudos em países em desenvolvimento. Como forma de responder esta lacuna, esta monografia foca nos países da América do Sul, que possui um conjunto de países que necessitam de recomendações políticas para alcançar o desenvolvimento sustentável.

Desta forma, este projeto justifica-se pela escassez de análises especializadas acerca do tema. Além disso, a contribuição deste projeto está em mensurar como a crescente produção de bens, complexidade econômica, e outros fatores determinantes impactam o *Ecological Footprint* dos países da América do Sul. Este tipo de análise é importante para políticas públicas regionais, a fim de mitigar os danos ambientais e auxiliar *policymakers* na tomada de decisão, visando a constante melhoria para o desenvolvimento sustentável regional.

CAPÍTULO 1: SUSTENTABILIDADE E ECOLOGICAL FOOTPRINT

Muitos países vêm promovendo acordos para reduzir impactos adversos ao meio ambiente, como o Acordo de Paris (Paris, 2015). Nesse sentido, há diversas métricas para analisar a degradação ambiental no mundo. Esta monografia foca em um indicador novo, chamado *Ecological Footprint*, bem como a relação com a estrutura produtiva, que será analisada sob a ótica da Complexidade Econômica. A próxima seção apresenta o conceito de Sustentabilidade Ambiental e *Ecological Footprint* e estudos acerca dos temas. Em seguida, o conceito de Complexidade Econômica é apresentado, a fim de demonstrar a importância desta abordagem para o processo de desenvolvimento econômico sustentável.

1.1 Sustentabilidade ambiental

Sustentabilidade pode ser definido como o equilíbrio entre a disponibilidade e exploração dos recursos naturais, de modo que as próximas gerações não fiquem comprometidas (*World Commission on Environment and Development*, 1987). Desta definição são derivadas dois conceitos-chaves: 1. a necessidade de recursos, destacando a necessidade dos países subdesenvolvidos e; 2. limitação dos recursos, que necessita de estrutura produtiva e organização social para atender às necessidades do presente e futuro (Van Bellen, 2005). O termo sustentabilidade ganhou espaço e visibilidade a partir das discussões sobre fontes energéticas e recursos naturais, relacionado às interações entre humanos e meio ambiente, e, segundo Feil e Schreiber (2017), a problemas de deterioração da relação entre ecologia global e desenvolvimento econômico. Sustentabilidade, portanto, mensura a qualidade ambiental, social e econômico em relação ao sustentável. Utilizando indicadores e índices de sustentabilidade para identificar os aspectos ambientais, sociais ou econômicos, responsáveis, caso não atinja o nível sustentável desejado (Feil e Schreiber, 2017).

O conceito de *Triple Bottom Line* foi iniciado por Elkington no livro *Cannibal with fork: The triple bottom line of 21st century business* (1997), destacando-se como componente da estratégia das empresas na inovação e na geração de valor para promover um desenvolvimento sustentável (Elkington, 1997). Um método de avaliação que equilibra os três pilares: sustentabilidade ambiental para manter a qualidade do meio ambiente para conduzir atividades econômicas e manter a qualidade de vida das pessoas. Sustentabilidade social, visando garantir

os direitos humanos e a igualdade, preservação e respeito pela identidade e diversidade cultural, raça e religião. Sustentabilidade econômica para manter o capital natural, social e humano necessário para renda e os padrões de vida. São pilares conhecido como *Triple Bottom Line* (Ortiz et al. 2020). A figura 1 abaixo ilustra o ponto ideal que empresas buscam para atingir a sustentabilidade, que é quando a empresa consegue implementar em sua atividade econômica o tripé com medidas social, ambiental e economicamente sustentáveis para atingir a sustentabilidade que se encontra no centro desse diagrama.

Figura 1- Tripé da Sustentabilidade



Fonte: Berlato et al. (2018)

Devido a adesão do setor privado ao *Triple Bottom Line* empresas têm colocado em pauta os impactos ambientais, econômicos e sociais visando atingir a sustentabilidade, buscando continuidade no mercado e no crescimento da organização a partir de sua viabilidade econômica, e coexistência harmônica com o meio ambiente e sociedade. Como destacado por Benites et al. (2013) o investimento no meio ambiente pode reduzir custos de produção, evitar desperdícios e ineficiência no consumo de energia e matérias primas. Portanto, estudos vêm analisando como vários setores podem melhorar o processo de produção (Porter, 1995). Barbieri et al. (2010) analisaram a relação entre sustentabilidade e inovação, destacando a importância de a empresa inovar e respeitar as três dimensões da sustentabilidade. Mak e Peacock (2011) examinaram as características de desenvolvimento sociais sustentáveis de determinada região no Reino Unido, Estados Unidos e Austrália, demonstraram que os três empreendimentos urbanos alcançaram elos comuns para o conceito de sustentabilidade e pontos chaves para a sustentabilidade social.

Para atingir a sustentabilidade ambiental empresas têm estudado formas de implementar os pilares do *Triple Bottom Line* focando reduzir as emissões de poluentes. Mota e Monteiro

(2013) destacaram que a contínua emissão e acumulação de CO₂ na atmosfera pressiona o meio ambiente afetando o clima do planeta, e argumentam que uma possível solução para esse problema possa ser a captura, armazenagem e utilização do CO₂. Zhao et al. (2018) compararam o impacto do PIB, consumo de combustíveis fósseis, consumo de energia e estrutura econômica em cinco províncias da China e dentre os resultados encontrados destacaram que o consumo de energia de combustível fóssil é o que mais contribui para a emissão de CO₂ dentre as variáveis analisadas.

Apesar dos estudos acima terem focado em determinados pontos para mensurar a sustentabilidade de determinadas regiões os indicadores não são suficientes para medir todo o impacto no meio ambiente. Portanto, o objetivo desta monografia é mensurar o impacto ambiental por uma nova abordagem a partir do *Ecological Footprint*.

1.2 Ecological Footprint: uma nova abordagem

Wackernagel e Rees (1995) definem *Ecological Footprint* como a área de terra que seria necessária para atender o consumo da população e a capacidade de absorver os resíduos gerados. Em outras palavras, *Ecological Footprint* é baseado na ideia de que para a maioria dos tipos de consumo material e energético corresponde a uma determinada quantidade de terra e água em diversos ecossistemas que deverá fornecer os recursos naturais necessários para cada tipo de consumo e capacidade de assimilar os rejeitos gerados. Portanto, para estimar o *Ecological Footprint* é preciso considerar as implicações de cada tipo de consumo em termos de demanda por recursos naturais (Romeiro, 2003). O consumo de recursos é dividido em cinco categorias: alimentação, moradia, transporte, bens de consumo e serviços (Lenzen e Murray, 2003). O uso da terra é dividido em seis grandes categorias: área construída, terras agrícolas, área de pesca, terra de pastagem, área florestal e área necessária para absorção de carbono (Kitzes, 2008). Um *Ecological Footprint* negativo indica déficit ecológico para a região analisada, por outro lado, um indicador positivo apresenta reserva ecológica (Lenzen e Murray, 2003).

Alguns estudos relacionam o *Ecological Footprint* com diversos fatores explicativos, como a complexidade econômica, renda per capita e consumo de energia. Estudos mais recentes sobre esses impactos foram apresentados por Neagu (2020), que analisou as 48 economias mais complexas do mundo. Ikram et al. (2021) analisaram o Japão e encontraram que o PIB e a

Complexidade Econômica influenciam assimetricamente o *Ecological Footprint*. Chowdhury et al. (2020) encontraram que investimento estrangeiro direto dentre outros fatores analisados foram determinantes no impacto ao *Ecological Footprint* em um conjunto aleatório de 92 países. Rafique et al. (2021) analisaram a influência dos impostos ambientais em 29 países da OCDE como estratégia para reduzir a degradação ambiental. Os autores encontraram que as taxas ambientais são mecanismos efetivos para a redução do *Ecological Footprint* nos países analisados.

Dogan et al. (2019) investigaram a validade da hipótese da curva de Kuznets ambiental para o México, Indonésia, Nigéria e Turquia, em que empregou o *Ecological Footprint* como medida de degradação ambiental, os autores encontraram que o consumo de energia de combustíveis fósseis, exportações, urbanização e desenvolvimento financeiro são as causas mais comuns de pressão sobre o meio ambiente. Além disso, os autores destacam que urbanização tem ganhado importância nos estudos ambientais, a rápida urbanização e o estilo de vida da população podem ter implicações importantes para o *Ecological Footprint*. Qayyum et al. (2021) analisaram o impacto da urbanização e economia informal sob o *Ecological Footprint* em alguns países do sul da Ásia, e no geral, os resultados encontrados indicam que urbanização e economia informal aumentam a degradação ambiental. Tillaguango et al. (2021) analisaram o impacto da estrutura produtiva sobre o *Ecological Footprint per capita* nos países da América-Latina, examinando a convergência do *Ecological footprint per capita* na América Latina durante 1990-2016 através da abordagem proposta por Phillips e Sul (2007) e Phillips e Sul (2009), em que separam em grupos os países com características semelhantes. A convergência no *Ecological Footprint per capita* implica que a poluição ambiental entre os países é semelhante, e a divergência mostra heterogeneidade na poluição (Tillaguango et al., 2021, apud Ulucak e Apergis, 2018). Dentre os resultados encontrados, destaca que países do mesmo grupo podem aplicar políticas coordenadas em aspectos ambientais ou energético dado sua proximidade geográfica, necessidade de políticas ambientais mais rígidas e de reduzir alta dependência de recursos naturais. Por outro lado, a divergência no *Ecological Footprint per capita* do Brasil, Chile e Peru implica que esses países devem projetar e aplicar políticas ambientais separadamente para mitigar a degradação ambiental.

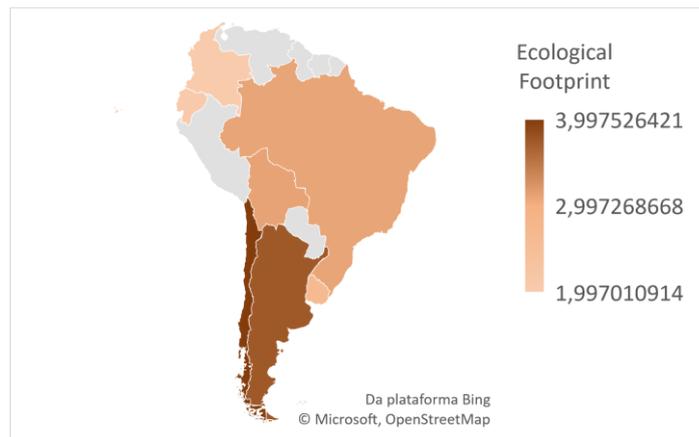
O *Ecological Footprint* (Rees e Wackernagel, 1995) foi desenvolvido pela necessidade de medir quanta biocapacidade (água, terra, etc.) é consumida em determinada região e quanto a região consegue produzir destes recursos. Este conceito fornece, portanto, uma indicação dos impactos da vida moderna no planeta. Neste sentido, esta abordagem é relevante por determinar

o *Ecological Footprint Index*, responsável por indicar o déficit ecológico dos países (Ikram et al., 2021).

O *Ecological Footprint Index* (EFI) pode ser medido em hectares globais (gha), analisando os recursos que são consumidos pela população de determinada região como terras agrícolas, pastagens, produtos florestais, áreas de pesca, área construída e infraestrutura e a capacidade de determinada região para absorver CO₂ (Ikram et al.,2021). Para o cálculo deste índice é analisado o consumo de biocapacidade resultante do processo de produção, biocapacidade consumida por meio da exportação e importação. Em outras palavras, quanto maior o EFI de determinada região maior a sua demanda sobre a biosfera, gerando, portanto, maior degradação ambiental. Este índice é relevante para analisar o impacto do processo produtivo na biocapacidade mundial, demonstrando o possível avanço da degradação ambiental.

Na figura abaixo é mostrado o *Ecological Footprint per capita* dos países Sul-Americanos, com Argentina e Chile com os piores índices, ou seja, com maior nível de degradação ambiental, por outro lado, Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador e Uruguai com os melhores, o que indica pouca utilização das reservas naturais quando se leva em conta a capacidade dessas regiões de gerar os mesmos recursos que são consumidos, os demais países não apresentaram dados.

Figura 2 – Ecological Footprint per capita na América do Sul



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do data.footprintnetwork.org

O *Ecological Footprint* na sua forma mais básica pode ser calculado pela seguinte forma:

$$EF = \frac{D_{anual}}{Y_{anual}}$$

Em que, EF é abreviação para *Ecological Footprint*, D é a demanda anual de um produto e Y é o rendimento anual deste mesmo produto. O rendimento é expresso em hectares globais, que são estimados com ajuda de dois fatores: 1. fatores de rendimento, que compara rendimento médio nacional com o rendimento médio mundial levando em consideração o mesmo tipo de terreno e, 2. fatores de equivalência, verifica a produtividade relativa entre os vários tipos de áreas terrestres e marítimas. Então a fórmula passa a ser:

$$EF = \frac{P}{Y_N} \cdot YF \cdot EQF$$

Onde, P é a quantidade de produto colhido ou resíduos emitidos, Y_N , o rendimento médio nacional para P, YF representa o fator de rendimento médio e EQF o fator de equivalência, respectivamente, para o país e tipo de terreno em análise. A demanda anual por produtos manufaturados ou derivados são convertidos em equivalentes de produtos primários através do uso de taxas de extração. As quantidades equivalentes de produtos primários são traduzidas para o *Ecological Footprint*, incluindo a energia necessária para o processo de fabricação. Portanto, pela diferença entre consumo ecológico e produção ecológica podemos obter a formula final desse indicador, e como é calculado a biocapacidade da região, ambos apresentados a seguir:

$$EF_C = EF_P + EF_I - EF_E$$

$$BC = A \cdot YF \cdot EQF$$

Tem-se que, EF_C *Ecological Footprint* consumo para medir a biocapacidade exigida pelo consumo final de todos os residentes do país, EF_P refere-se à produção para medir todos os recursos colhidos e resíduos gerados dentro do país, EF_I e EF_E são, respectivamente, *commodity* importadas e exportadas. BC representa a biocapacidade, enquanto A é a área disponível para determinado tipo de terreno.

As limitações destacadas no *Ecological footprint atlas 2010* podem ser divididas em quatro categorias: escopo, abrangência, implementação e extensão de suas aplicações. Em

relação as limitações de escopo o índice não aborda a disponibilidade ou esgotamento de recursos não renováveis, não inclui atividades inerentemente insustentáveis, não fornece um bom meio de avaliar o uso e manejo de ecossistemas, degradação da terra e do ecossistema, perturbação do ecossistema ou sua resiliência, e não abrange o uso ou contaminação de água doce. As limitações da metodologia e dos dados refere-se ao que o índice não mede bem, a exemplo, a biocapacidade necessária para a absorção de emissões de dióxido de carbono, bioprodutividade ocupada por reservatórios hidrelétricos e outra infraestrutura, trocas ecológicas de conversão de terras, e a produção da agricultura. Dentre os possíveis erros de implementação são destacados: erros sistemáticos na avaliação da demanda global da natureza, erros de alocação, erros de dados em fontes estatísticas para um ano específico, deturpação sistemática dos dados relatados nas estatísticas da ONU, omissão sistemática de dados nas estatísticas da ONU. E por último a interpretação dos resultados, pois o indicador não é uma proxy apropriada para pressões humanas sobre a biodiversidade. Venetoulis e Talberth (2010) destacaram cinco críticas que foram elencadas por van den Bergh e Verbruggen (1999): 1. Não reconhecem a natureza interdependente de todos os ecossistemas; 2. EQF não leva em conta as disparidades ecológicas e bioregionais; 3. Terra multiuso é excluída; 4. O cálculo do *Footprint* energético é baseado somente nas taxas de sequestro de carbono florestal; 5. Não há distinção entre uso sustentável e insustentável da terra (Venetoulis e Talberth, 2010).

Por outro lado, estudos destacam a importância dessa nova métrica como indicador de sustentabilidade. White (2007) argumenta que o *Ecological Footprint* ajuda a ilustrar o impacto das atividades de produção e consumo têm sobre o meio ambiente e fornece uma medida ampla do impacto do uso de recursos que pode ser usada para informar as pessoas sobre a escala da atividade econômica em relação ao ambiente natural (White, 2007). Wiedmann e Barrett (2010) a partir de uma pesquisa enviada para 55 especialistas que estão envolvidos no uso e/ou desenvolvimento do *Ecological Footprint* e obtiveram resposta de 34. Os autores mostraram os pontos fortes dessa nova métrica, e confirmado pela pesquisa, que o indicador é capaz de condensar o tamanho da pressão humana em diferentes tipos de bioprodutividade em um único número, em outras palavras, o benefício de um indicador agregado é a produção de um único número, tornando seu uso para tomada de decisão mais simples (Costanza, 2000). Além disso, consegue fornecer algum senso de consumo excessivo e consegue comunicar os resultados para um público amplo (Wiedmann e Barret, 2010).

O *Ecological Footprint* é uma medida mais ampla para analisar a degradação ambiental, sendo uma ferramenta poderosa para alcançar e comunicar-se com ampla gama de audiências

para promover uma compreensão de como as atividades das pessoas têm impacto no meio ambiente. Além de ser relevante politicamente porque indica a demanda global de recursos das sociedades em comparação com a disponibilidade de recursos (Destek et al., 2018).

CAPÍTULO 2: ESTRUTURA E SOFISTICAÇÃO PRODUTIVA

Este capítulo apresenta o conceito básico da estrutura e sofisticação produtiva a partir da complexidade econômica, abordagem que será utilizada para determinar a complexidade dos países Sul-Americanos a fim de verificar sua matriz produtiva. Apresenta ainda o cálculo do Índice de Complexidade Econômica (*Economic Complexity Index – ECI*), destacando o passo a passo utilizado e como se chega ao índice de cada país a partir dos bens que produz. Por fim, destaca a relação entre estrutura produtiva e a degradação ambiental, no intuito de mostrar a importância da matriz produtiva e seus impactos no meio ambiente.

2.1 Estrutura produtiva e complexidade econômica

A revolução industrial, que teve início na Inglaterra e se espalhou pelo mundo desde 1760 impulsionou o desenvolvimento tecnológico transformando o sistema econômico em modelos baseados em indústrias e serviços sofisticados e complexos (Kim, 2018). O surgimento da indústria causou grandes transformações na economia mundial, acelerando a produção de mercadorias e a exploração de recursos naturais, sendo responsável por transformações no processo produtivo e nas relações de trabalho (Hobsbawm, 2015). Durante primeira revolução industrial foi consolidado o sistema capitalista, o que representa um processo de aumento considerável de organizações industriais e da produtividade no uso dos recursos físicos (Hobsbawm, 2015). Porém, com menos emprego disponível no campo, o homem precisa buscar novas oportunidades de trabalho, dando início ao processo de êxodo rural e urbanização (Rodrigues, 2015). Esse processo foi facilitado pela constante evolução do sistema de transporte, com objetivo inicial de transportar volume maior de mercadorias, e consequentemente, facilitando a locomoção de pessoas (Hobsbawm, 2015). O processo de desenvolvimento cada vez mais moderno desencadeado pela revolução industrial está em constante evolução, tendo apresentado nos últimos anos boa integração entre ciência e tecnologia. A aproximação dessas áreas possibilitou a melhora em diversos campos, portanto, aumentando as interações entre setores de uma economia.

A complexidade de uma economia pode ser considerada como o resultado de um processo de desenvolvimento que amplia as interações dentro do sistema econômico (Sonis e Hewings, 1998). As mudanças que ocorrem na estrutura produtiva de um país, tornam as

interações econômicas e sociais mais complexas no ambiente analisado. Neste sentido, o setor da indústria tende a aumentar a participação relativa na composição do PIB regional, sendo que a pauta exportadora apresenta maior relevância de bens tecnologicamente sofisticados, do mesmo modo que os bens mais sofisticados serão importados para auxiliar no processo de transformação da estrutura produtiva. Estudos recentes têm colocado a mudança estrutural como um dos fatores do desenvolvimento econômico, destacando que a capacidade de crescimento de um país reside na diversidade de sua estrutura produtiva (Hausman e Hidalgo, 2011). Hidalgo et al. (2007) descrevem o desenvolvimento econômico dos países como um processo de aprendizado em constante evolução e que possibilita a produção e exportação de bens mais complexos. Em outras palavras, a acumulação de conhecimento proporciona a evolução da estrutura produtiva do país. Portanto, a complexidade econômica é um método para analisar aspectos acerca do conhecimento disponível, a partir dos bens que a sociedade é capaz de produzir (Hausmann e Hidalgo, 2011).

A divisão de trabalho destacada por Adam Smith (1776) se mostrou responsável por aumentar a produtividade e melhorar o nível técnico, permitindo que indivíduos se especializassem em sua área de atuação. Hausmann et al. (2014) fizeram uma interpretação mais moderna, destacando que a divisão de trabalho proporcionou a humanidade acessar uma quantidade de conhecimento que nenhum ser humano poderia ter individualmente, logo, a humanidade se torne mais sábia coletivamente. Os autores ainda destacam que, além da quantidade de conhecimento em uma sociedade é importante que este conhecimento seja diversificado entre os indivíduos, e que sejam capazes de utilizá-lo por meio de interações mais complexas, permitindo que se especializem e que compartilhem o conhecimento entre si. Desta forma, essa economia seria capaz de produzir bens cada vez mais complexos, conforme o conhecimento adquirido seja aplicado em diversos setores produtivos de determinado país. Por exemplo, o ECI foi associado ao processo de crescimento econômico em diversos países do mundo (Hidalgo, 2021). Outro exemplo, verificou-se que o crescimento econômico em diversas regiões do México é explicado pela sofisticação da estrutura produtiva regional (Chávez et al, 2017). Outros estudos demonstram a correlação entre complexidade econômica e desigualdade de renda e desenvolvimento humano (Hartmann, 2014; Hartmann et al. 2015; Ferraz et al., 2018; Fawaz, 2019). Portanto, o conhecimento produtivo é necessário para o desenvolvimento. Hausmann et al. (2014) argumentaram que, conforme o conhecimento produtivo aumenta é necessário aumento proporcional na complexa interação humana, denominando tal processo de complexidade econômica.

Hidalgo e Hausmann (2011) destacam que a complexidade de uma economia está relacionada à multiplicidade de conhecimento inseridos na rede de interações entre várias áreas produtivas da economia. Gala (2017) destacou dois conceitos básicos para verificar a complexidade de uma economia, isto é, a diversidade dos produtos exportados, quantos tipos diferentes de bens o país é capaz de fabricar; e a ubiquidade, uma análise de quantos países são capazes de fabricar determinado bens, ou seja, sua onipresença. Portanto, para conseguir produzir bens de forma diversificada e com determinado grau de raridade é necessário que a economia acumule conhecimento para expandir a produtividade do país.

Durante a última década as métricas do EC têm sido utilizadas para formalizar o impacto das estruturas econômicas em resultados como o crescimento econômico (Hidalgo e Hausmann, 2014; Mosqueda, 2017), desigualdade de renda (Hartmann et al. 2017; Fawaz et al. 2019) e emissões de efeito estufa (Neagu e Teodoru, 2019; Can e Gozgor, 2017).

Hidalgo e Hausmann (2014) mostram em seu artigo que EC previu o crescimento econômico futuro, em outras palavras, a renda futura de uma economia estava correlacionado com o EC, após controlar os níveis iniciais de renda dentre outros fatores. Portanto, se mostrando um importante preditor de crescimento econômico de longo prazo. A EC ainda tem sido associada a variações na desigualdade de renda. Hartmann et al. (2017) mostram que regiões com mesmas característica, em termos de renda, educação, entre outros, apresentam menor desigualdade de renda quando são mais complexas. No âmbito ambiental, o ECI é relacionado à sustentabilidade e mudança climática. Can e Gozgor (2017) utilizam dados relacionados a emissão de CO₂ e concluem que economias complexas estão associadas com baixa emissão de CO₂.

A complexidade de um país pode ser mensurada por meio da cesta de produtos que exporta, analisando a diversidade ou concentração desses bens (Hidalgo, 2021). Hidalgo (2021) reitera que o EC não se trata de exportações ou comércio, e sim de uma técnica de redução de dimensionalidade, a fim de resumir os vetores que melhor explicam a geografia de milhares de atividades econômicas. O indicador responsável por tal medida é o *Economic Complexity Index* (ECI), ou Índice de Complexidade Econômica, será apresentado no próximo tópico.

2.2 Índice de Complexidade Econômica

O ECI destaca o nível de complexidade econômica dos países. O rank é definido pela comparação entre países, utilizando dois indicadores como parâmetros: a diversificação produtiva, como conhecimento que o país/região possui; e a raridade dos bens produzidos, representando a capacidade produtiva. Isto representa o conhecimento, as habilidades e a sofisticação da matriz produtiva das regiões analisadas (Can and Gozgor, 2017). Em outros termos, países com elevado *know-how* produtivo, são capazes de produzir bens mais sofisticados e tecnologicamente intensivos (Neagu et al., 2021). Para estimar ECI de cada país Hausmann et al. (2014) utilizam o *International Trade Database* (2019), que fornece mais de 1,8 bilhões de dados comerciais de 230 países. Hausmann et al. (2014) destacaram que a base de dados apresenta algumas limitações: não inclui a produção, ou seja, o país pode não exportar toda a produção de determinado bem; não considera o setor de serviço (Stojkosko et al. 2016), que é uma parte crescente do comércio internacional; não incluem informações sobre atividades não comercializáveis, e que não há conjunto de dados para essas informações.

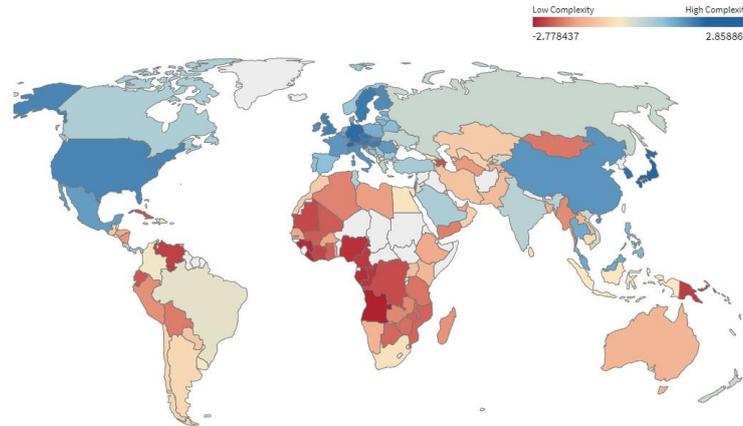
Na figura abaixo é mostrado o nível de complexidade de cada país na América do Sul, exceto Suriname, Guiana e Guiana francesa por falta de dados, o Brasil apresenta o maior nível de complexidade no continente, seguido por Colômbia e Uruguai, por outro lado Equador e Venezuela apresentam menor nível de complexidade econômica.

Figura 3 – *Economic Complexity Index* para países Sul-Americanos em 2014



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do *Atlas of Economic Complexity*

É possível notar que a América do Sul, assim como o continente Africano, são um dos continentes com os menores níveis de EC, isso se dá pela baixa diversificação produtiva desses países, cuja cesta de bens produzidos são majoritariamente *commodities*.

Figura 4 - *Economic Complexity Index* em 2022

Fonte: *Atlas of Economic Complexity*

O EC mede a capacidade econômica usando métodos relacionados à redução de dimensionalidade, podendo ser utilizado para medir a presença de múltiplos fatores econômicos e o que esses fatores poderiam ser (Hidalgo, 2021). Esse processo começa com duas equações para representar a complexidade:

1. $K_c = f(M_{cp}, K_p)$
2. $K_p = g(M_{cp}, K_c)$

A complexidade (K) de determinado local (c), e a complexidade de determinado produto (p). Afirmando que a complexidade de um local é função da complexidade das atividades que estão presentes nele (Hidalgo, 2021). O que é equivalente ao conjunto de equações consistentes e desacopladas:

3. $K_c = f(M_{cp}, g(M_{cp}, K_c))$
4. $K_p = g(M_{cp}, f(M_{cp}, K_p))$

A ideia de medir a complexidade usando conjunto de equações foi introduzida em 2009, usando média de f e g, resultando no ECI (K_c) ou *Product Complexity Index* (PCI; K_p), e são definidos como:

5. $K_c = \frac{1}{M_c} \sum_p M_{cp} K_p$
6. $K_p = \frac{1}{M_p} \sum_c M_{cp} K_c$

Ambas as equações são lineares, portanto, implicando em equações auto consistentes descritas a seguir:

$$7. K_c = \tilde{M}_{cc'} K_{c'} \text{ com } \tilde{M}_{cc'} = \sum_p \frac{M_{cp} K_{c'p}}{M_c M_p}$$

$$8. K_p = \tilde{M}_{pp'} K_{p'} \text{ com } \tilde{M}_{pp'} = \sum_c \frac{M_{cp} K_{c'p'}}{M_c M_p}$$

Solucionando esse sistema são os autovetores de $\tilde{M}_{cc'}$ e $\tilde{M}_{pp'}$, os principais componentes de M_{cp} . Sendo os dois vetores matrizes tecnicamente estocásticas, seu primeiro autovetor é um vetor do primeiro, tornando o segundo autovetor a principal métrica de complexidade econômica (Hidalgo, 2021). O segundo autovetor de uma matriz estocástica é a principal correção para a distribuição de equilíbrio e representa uma partição dos dados, ou seja, o ECI é o vetor que melhor divide as economias em grupos com base nas atividades que estão presentes neles (Hidalgo, 2011). Para eliminar fatores constantes, as métricas de complexidade econômica são normalmente normalizadas usando uma transformação Z, chegando ao ECI e o PCI:

$$ECI_c = \frac{K_c - \text{média}(K_c)}{\text{desvio padrão}(K_c)}$$

$$PCI_p = \frac{K_p - \text{média}(K_p)}{\text{desvio padrão}(K_p)}$$

Os valores de $ECI > 0$ representam locais com complexidade maior que a localização média no conjunto de dados, o mesmo é válido para PCI.

Hidalgo (2011) destaca que uma das vantagens do índice é que ele não considera somente capital e mão-de-obra, como na abordagem de produção tradicional. Inclui também variáveis como as capacidades, que engloba bens e serviços não negociáveis, infraestrutura, direitos de propriedade, regulamentos e mão-de-obra qualificada (Hidalgo e Hausmann, 2009). Portanto, este indicador visa demonstrar as características de produção do sistema econômico, levando em conta as capacidades de um país (Hausmann et al. 2011). Além disso, o ECI, pode ser usado por países com economias não diversificadas com intuito de medir o sucesso de seus esforços para crescer e para diversificar suas exportações, a fim de sustentar seu desenvolvimento econômico (Alqurtas, 2018). Entretanto, o índice é distorcido para países com economias pouco diversificadas que são fortemente dominadas por alguns setores, como o caso

da Arábia Saudita com o setor de petróleo (Alqurtas, 2018). Antes da ampla utilização do ECI existiam outros métodos para verificar a complexidade dos países.

Hartmann et al. (2017) destaca alguns desses métodos. Os autores argumentam que durante o século XX os estudiosos não foram além de abordagens quantitativas mais simples, e aponta alguns deles: medindo a fração de uma economia empregada nos setores de agricultura, manufatura ou serviços; usando medidas agregadas de diversidade e concentração; e, olhando para a diversificação em variedades relacionadas e não relacionadas, em outras palavras, diversificação em produtos similares ou diferentes.

2.3 Estrutura produtiva e degradação ambiental

A estrutura produtiva de um país pode aumentar as emissões de gases do efeito estufa (Neagu, 2019). Porém, Neagu (2019) destacou que uma estrutura produtiva mais complexa proporciona aos países a possibilidade de iniciar atividades de alta produtividade levando a um desenvolvimento mais rápido, podendo reduzir os impactos ambientais. Deng et al. (2020) analisaram como o uso de energia de fontes renováveis e o PIB per capita se relacionam com a emissão de poluentes em 10 países Sul-Americanos, o período analisado foi 1971 a 2014. Os autores agruparam os países de acordo com sua estrutura produtiva e acrescentando as mudanças estruturais de cada país nas estimativas econométricas para melhor compreender as fontes dos gases de efeito estufa (Deng et al. 2020). Os autores encontram que o consumo de energia não renovável e o PIB estão relacionados aos poluentes das emissões de gases. A existência de causalidade do tipo Granger¹ na Bolívia, Equador, Peru e Uruguai sugere que esses países poderiam reduzir sua produção se reduzirem o consumo de energia não renovável, enquanto os demais países poderiam aumentar gradualmente o consumo de energia renovável sem limitar o crescimento econômico (Deng et al. 2020). A relação entre estrutura produtiva e meio ambiente é relevante para combater os danos ambientais. Uma forma de analisar tais impactos é por meio da curva ambiental de Kuznets descrita a seguir.

Os estudos de Grossman e Krueger (1991, 1995) construíram a base para a hipótese da curva ambiental de Kuznets (*Environmental Kuznets Curve - EKC*). De acordo com essa

¹ O teste de causalidade de Granger procura determinar o sentido causal entre duas variáveis, estipulando que X "Granger-cause" Y se valores passados de X ajudam a prever o valor presente de Y.

hipótese, o nível de degradação ambiental aumenta conforme o país alcance determinado nível de desenvolvimento, reduzindo a pressão ambiental após este nível de desenvolvimento ser atingido (Chu, 2020). Em outras palavras, EKC apresenta uma relação no formato de "U" invertido entre desenvolvimento econômico e degradação ambiental (Chu, 2020). Dinda (2004) argumenta que a pressão ambiental aumenta mais rapidamente do que a renda nos estágios iniciais de desenvolvimento e desacelera em relação ao crescimento do PIB em níveis de renda mais elevadas. Pata e Aydin (2020) investigaram a relação entre consumo de energia hidrelétrica, EF, e crescimento econômico para os seis principais consumidores de energia por essa fonte utilizando EKC, dentre os resultados encontrados os autores destacam que a hipótese EKC não é válida para Brasil, China, Canada, Índia, Noruega e Estados Unidos, e, portanto, sustentabilidade não pode ser alcançada por meio do crescimento econômico nesses países (Pata e Aydin, 2020). Destek, Ulucak e Dogan (2018) testaram a hipótese EKC utilizando como *proxy* para degradação ambiental o EF por ser uma medida mais ampla, e comparando com os efeitos do uso de energia renovável e não renovável em 15 países da União Europeia, os autores encontraram uma relação em forma de U entre renda real e EF é válida em sete países, enquanto a hipótese de EKC em forma de U invertido foi encontrada somente em Portugal (Destek, Ulucak e Dogan, 2018). Chu (2020) quantificou a relação entre a transformação estrutural econômica e o desempenho ambiental, o autor usou o ECI para mensurar a transformação estrutural e emissões de CO₂ para quantificar a degradação ambiental, os resultados encontrados demonstram que complexidade econômica está associado a maiores emissões de CO₂ e apenas quando atinge certo ponto mostra-se eficaz na limitação da degradação ambiental (Chu, 2020). Existem diversos indicadores ambientais que são plausíveis para serem utilizados na hipótese EKC para poluentes que envolvem custo local de curto prazo, entretanto, o mesmo não pode ser confirmado para estoques acumulados de resíduos ou poluentes que envolvem custos de longo prazo e mais dispersos (Dinda, 2004).

O ECI é uma medida capaz de explicar diversos fenômenos econômicos e sociais. Ademais, alguns estudos têm analisado relação positiva entre ECI e sustentabilidade e mudanças climáticas, analisando *green jobs* (Britto, 2016). Estudos ainda apontaram para a possibilidade de aumentar o consumo de energia e emissão de gases via o processo de industrialização (Can e Gozgor, 2017; Dogan et al., 2019; Neagu e Teodoru, 2019). Can e Gozgor (2017) destacaram que uma maior complexidade econômica pode suprir o nível de emissões de CO₂ a longo prazo. Porém, Dogan et al. (2019) encontraram que a complexidade econômica aumentou a degradação ambiental em países com nível de renda baixa/média e

controlou as emissões de CO₂ em países com alto nível de renda, não necessariamente reduziu o volume de emissões. Note que a sociedade moderna possui o desafio de lidar com a degradação ambiental e demanda por energia, mantendo o crescimento econômico. Nesse sentido, o desafio que se coloca é desenvolver análises técnicas capazes de explicar este tipo de fenômeno, o uso de novos indicadores é importante para complementar a literatura acerca da sustentabilidade ambiental, por exemplo o EF.

Estudos que utilizam o EF junto a outras variáveis podem completar a literatura para melhores análises do impacto da estrutura produtiva na degradação ambiental. Rafique et al. (2021) analisou a associação entre complexidade econômica, capital humano, geração de energia renovável, urbanização, crescimento econômico, qualidade das exportações, comércio e EF para as 10 mais complexas economias. Encontrou que o capital humano e a geração de energia renovável podem ajudar a reduzir o EF, enquanto os demais fatores elevam o EF nos países analisados. Em estudo realizado por Alvarado et al. (2021) constataram que a complexidade econômica aumenta o EF per capita em países de alta e média/alta renda, entretanto, em países média/baixa renda a complexidade econômica reduz o EF. Nathaniel (2021) analisou a associação de países do Sudeste asiático, encontrando que a complexidade econômica, o consumo de energia e o crescimento econômico aumentam EF e as emissões de CO₂, porém destaca que a globalização reduz o EF enquanto aumentando a qualidade ambiental.

CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E DESAFIOS DA AMÉRICA DO SUL

A América do Sul é um arquipélago de sociedades e economias separadas por obstáculos geográficos e pela herança das políticas coloniais. O continente é rico em recursos naturais, com quase 18 milhões de km² e ambientes bem diversificado, a oeste existe extensa cadeia montanhosa dos Andes, o Norte majoritariamente tomado pela densa e úmida floresta amazônica, a região central se encontram o pantanal brasileiro e haco boliviano, ao sul planícies e cerrados, no Leste, a floresta costeira deu lugar à ocupação industrial e agrícola. A região tem aproximadamente 400 milhões habitantes, com origens africanas, indígenas, europeias e asiáticas. A religião predominante é o catolicismo, porém a influência das igrejas evangélicas nas camadas mais pobres da população, e recentemente nas classes médias, em especial no Brasil, está em ascensão. A população se encontra em grande parte nas cidades e metrópoles, periferias com demasiado grau de pobreza, mortalidade infantil, violência, drogas, desintegração familiar, subnutrição, elevado grau de desemprego e subemprego, doenças e analfabetismo. São essas populações que correspondem a maioria da população de cada país Sul-Americano, se tornando o continente mais desigual do planeta. (Guimarães, 2010)

Tabela 1. Dados dos países Sul-Americanos em 2020

País	População	Área (Km ²)	Pop. Urb (%)
Guiana	786.552,00	196,85	27%
Paraguai	7.132.538,00	397,30	62%
Suriname	586.632,00	156,00	65%
Colômbia	50.882.891,00	1.109.500,00	81%
Argentina	45.195.774,00	2.736.690,00	93%
Uruguai	3.473.730,00	175,02	96%
Peru	32.971.854,00	1.280.000,00	79%
Guiana Francesa	298.682,00	82,20	87%
Venezuela	28.435.940,00	882,05	N.A.
Brazil	212.559.417,00	8.358.140,00	88%
Chile	19.116.201,00	743.532,00	85%
Equador	17.643.054,00	248,36	63%
Bolívia	11.673.021,00	1.083.300,00	69%

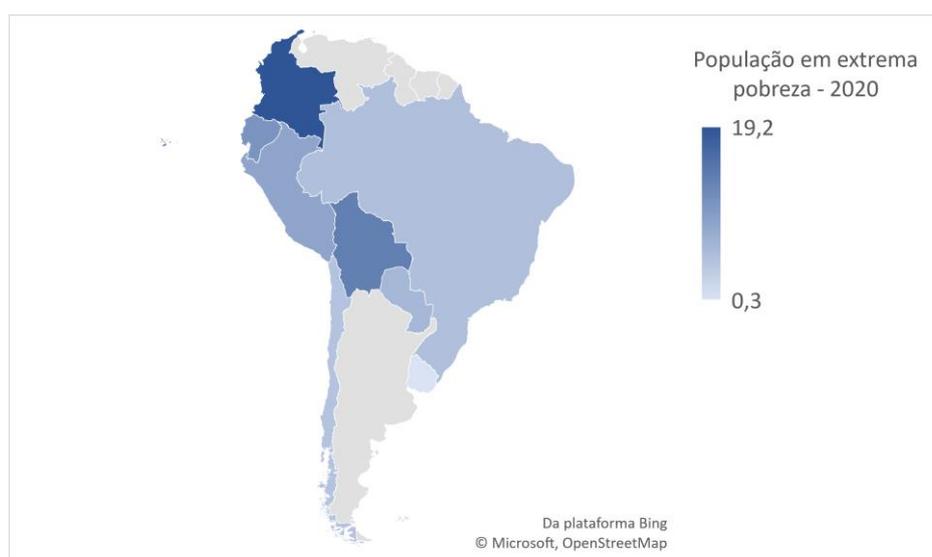
Fonte: Worldometers

Na tabela acima é destacado a população de cada país Sul-Americano no ano de 2020, suas respectivas extensões territoriais, população urbana e a participação na população mundial.

Os dados mostram que cinco países, sendo eles, Argentina, Bolívia, Brasil, Colômbia e Peru, ocupam cerca de 80% da Área territorial e mesma proporção em relação a população da América do Sul. O continente tem aproximadamente 6% de toda população mundial e representa quase 12% da superfície terrestre.

Os países Sul-Americanos apresentam algumas características econômicas bem desafiadoras, a região apresenta um PIB pouca acima de 6 trilhões de dólares, e apresentam um elevado grau de concentração de riqueza e renda. Para mostrar essa discrepância, entre 20% e 60% da população do Chile e Uruguai se encontram abaixo da linha de pobreza, contribuindo para baixos níveis de renda per capita e pouca produção de bens mais complexos (Guimarães, 2010). A economia da região é caracterizada por grandes complexos exportadores de *commodities* e, com algumas indústrias de pequeno porte que se dedicam ao comércio local, exceção para a Argentina e Brasil que têm parques industriais amplos e complexos em alguns setores de suas economias. Porém, os Sul-Americanos lidam frequentemente com desafios internos e externos, com políticas que prejudicam o planejamento a longo prazo por parte das empresas, além da crescente concorrência com um mercado chinês cada vez mais competitivo (Guimarães, 2010). Alguns fatores como baixo investimento em infraestrutura, educação, saúde podem ser motivo e consequência da desigualdade de renda e dos constantes desafios que os setores produtivos na América do Sul enfrentam.

Figura 4 – Taxa da população em extrema pobreza



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do Worldometers

Em 2020, segundo a Cepal, 13,5% da população boliviana, 10,8% dos equatorianos e 19,2% dos colombianos se encontravam nas condições de extrema pobreza. O Brasil tem cerca

de 5% da população nessa situação, apesar de ter um dos menores índices o país é o mais populoso, portanto seriam mais de 10 milhões de pessoas na extrema pobreza. Por outro lado, menos de 0,5% da população do Uruguai vivem na extrema pobreza.

Os Sul-Americanos apresentam sérios problemas sociais. Grande parte da população se encontra em grandes e médios centros urbanos, com periferias com alto índice de pobreza, mortalidade infantil, violência, drogas, desintegração familiar, subnutrição, desemprego e analfabetismo (Guimarães, 2010). Os países enfrentam grande dificuldade em lidar com esses problemas, pois lidam com grande dívida interna e externa, enquanto fazem poucos investimentos em setores chaves da economia para reverter a situação. O índice de desenvolvimento humano (IDH) analisa três áreas relevantes para analisar a qualidade de vida da população de determinada região a partir de dados referente à saúde, educação e renda. No geral os países Sul-Americanos apresentam IDH entre 0,711 e 0,85, entre médio e alto desenvolvimento humano (Costa, 2019). Entretanto o mesmo não se concretiza ao fazer a análise por regiões dentro de cada país, demonstrando o nível de desigualdade na região.

Tabela 2. IDH dos países Sul-Americanos

HDI rank	País	2010	2015	2018	2019	2020	2021
42	Chile	0,813	0,846	0,856	0,861	0,852	0,855
47	Argentina	0,834	0,848	0,850	0,852	0,840	0,842
58	Uruguai	0,787	0,811	0,819	0,821	0,821	0,809
84	Peru	0,725	0,759	0,776	0,780	0,762	0,762
87	Brazil	0,723	0,753	0,764	0,766	0,758	0,754
88	Colômbia	0,726	0,754	0,763	0,768	0,756	0,752
95	Equador	0,736	0,765	0,762	0,760	0,731	0,740
99	Suriname	0,723	0,744	0,755	0,755	0,743	0,730
105	Paraguai	0,685	0,723	0,727	0,732	0,730	0,717
108	Guiana	0,656	0,684	0,701	0,708	0,721	0,714
118	Bolívia	0,662	0,690	0,714	0,717	0,694	0,692
120	Venezuela	0,755	0,767	0,738	0,721	0,695	0,691

Fonte: United Nations Development Programme - UNDP

Na tabela acima é destacado a evolução do IDH dos países Sul-Americanos entre 2010 e 2021. Chile, Argentina e Uruguai apresentam índice muito alto de desenvolvimento humano.

O continente Sul-Americano é abundante em recursos naturais, tem a maior floresta tropical do mundo com quase 7 milhões de km² distribuída entre 9 países, o Brasil tem cerca de 60% da floresta em seu território. Logo, segundo o banco de dados do EF a região Sul-Americana contém de cerca de 23% da biocapacidade mundial. Por outro lado, por ser uma

região com países em desenvolvimento, a necessidade de recursos naturais para aumentar a produção é crescente, o que impacta negativamente o meio ambiente, aumentando o desmatamento, elevando o nível de emissões de gases do efeito estufa entre outros. Surge então, o desafio para os países da região para mitigar os danos ao meio ambiente enquanto crescem e se desenvolvem economicamente.

CAPÍTULO 4: MÉTODO

Os países analisados são: Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Equador e Uruguai. Esses países representam aproximadamente 80% do território Sul-Americano e mesma proporção em relação a população do continente. O período a ser analisado será de 2000 a 2014. O período e os países analisados foram selecionados a partir da disponibilidade de dados no Banco Mundial (2021) e demais fontes destacadas conforme Tabela 3. As variáveis a serem utilizadas são apresentadas na tabela a seguir com as respectivas descrições e fonte de coleta.

Tabela 3. Descrição das variáveis analisadas

Variáveis	Descrição	Fonte
<i>Ecological Footprint per capita</i>	<i>Ecological Footprint</i> dividido pela população de determinado país em hectares globais.	Footprint Network (2021)
<i>Export Diversification Index</i>	Indicador que demonstra a sofisticação da estrutura produtiva, por meio da diversificação das exportações.	World Bank (2021)
<i>Human Capital Index</i>	Contribuição da saúde e da educação para a produtividade.	Pen World Table (2021)
Investimento Estrangeiro Direto	Fluxo de investimento estrangeiro no país.	World Bank (2021)
Urbanização	Número de habitantes em grandes centros	World Bank (2021)
PIB per capita	Produtos e serviços divididos pela população do país.	World Bank (2021)
<i>Coal Fuel</i>	Consumo de combustíveis fósseis.	World Bank (2021)
Consumo de Energia	Consumo de energia total	World Bank (2021)
Energia Renovável	Energia produzida por fontes renováveis	World Bank (2021)

A principal variável explicativa será o *Export Diversification Index* (EDI), proxy para a sofisticação produtiva da região. Note que este tipo de relação foi investigado por outros estudos

com diferentes recordes regionais e temporais (Neagu, 2020; Ikram et al., 2021; Shahzad et al., 2021; Rafique et al., 2021). Ademais, outras variáveis de controle serão analisadas, a saber: o índice de capital humano, ou *Human Capital Index* (HCI), que se baseia na educação e na taxa de retorno da educação, podendo reduzir o EF uma vez que as questões ambientais são induzidas pelo homem (Ahmed e Wang, 2019).

O investimento estrangeiro direto supostamente deveria melhorar a qualidade do ambiente ajudando os empresários a introduzirem tecnologias sustentáveis e também pode ser usado como uma *proxy* das trocas internacionais entre países (Liu e Kim, 2018). Urbanização, pois, pode aumentar a demanda por transporte e industrialização aumentando o consumo de energia de combustível fóssil (Ulack et al., 2020). PIB per capita, um alto nível de renda per capita possibilita uma melhoria tecnológica podendo reduzir custos de produção ou provocar surgimento de novos produtos (Can e Gozgor, 2017). O avanço da complexidade econômica é acompanhado por uma maior demanda de energia e uma das principais fontes de poluição é o setor de produção de energia, o que justifica o uso da variável energia elétrica (Neagu, 2019). Por outro lado, a produção de energia elétrica por fontes renováveis junto à eficiência energética pode ajudar a reduzir as emissões de gases do efeito estufa (Neagu e Teodoru, 2019). A alta dependência de consumo de combustíveis fósseis representa um risco ao meio ambiente, à saúde e ao aquecimento global (Shahzad et al., 2021). Todas estas variáveis foram selecionadas com base na literatura internacional do tema.

Os dados coletados serão apresentados conforme técnica de dados em painel (Gujarati e Porter, 2011; Wooldridge, 2018). Este tipo de técnica avalia a mesma unidade em corte transversal ao longo de determinado período. Em outros termos, este trabalho adota como estratégia empírica um modelo econométrico com dados em painel, o que auxilia no aumento do tamanho da amostra e garante maior confiabilidade nos resultados estatísticos (Wooldridge, 2018).

Como estratégia inicial, o método de mínimos quadrados ordinários (MQO) para dados empilhados será utilizado. Nesse modelo ocorre o empilhamento das observações e faz-se a estimação de uma regressão, desprezando a natureza de corte transversal e de séries temporais dos dados obtidos (Gujarati e Porter, 2011). O problema do modelo é que ele não faz distinção entre os dados analisados, que é considerado uma forma de camuflar a heterogeneidade nos dados em análise. Sendo possível que o termo do erro do modelo esteja correlacionado com

algum regressor. Essa correção acarreta problemas durante a estimação de coeficientes tendenciosos e inconsistentes (Gujarati e Porter, 2011).

O modelo seguinte a ser utilizado será o de mínimos quadrados com variáveis *dummies* para efeitos fixos (MQVD). Cada unidade de corte transversal terá sua própria variável *dummy*, ou seja, um intercepto para cada variável. Neste modelo a variável *dummy* será fixa, portanto, não irá variar no tempo. Alguns problemas deste modelo decorrem, pois, quanto maior o número de variáveis *dummies* maior o consumo de graus de liberdade, possibilidade de multicolinearidade, e algumas situações em que o modelo possa não identificar o impacto das variáveis fixas ao longo do tempo. Por último, o erro do modelo talvez necessite ser modificado, pois não correspondem às hipóteses clássicas dos modelos de regressão linear múltipla (Gujarati e Porter, 2011).

O modelo de efeitos fixos dentro de um grupo (DG), é feita a combinação de todas as observações, entretanto, cada variável irá obter seu respectivo desvio de valor médio, para então estimar uma regressão de MQO contra esses valores corrigidos pela média. Possibilitando à eliminação do efeito fixo. Este modelo produz estimativas consistentes dos coeficientes angulares, porém com alta variância, logo, ineficientes. Os problemas que este modelo apresenta são: eliminação das variáveis fixas no tempo devido a diferenciações; distorção dos valores de parâmetro podendo ocasionar na eliminação do efeito a longo prazo (Gujarati e Porter, 2011).

Modelo de efeitos aleatórios (MEA), ao contrário do modelo MQVD, este modelo pressupõe que os valores dos interceptos sejam extraídos aleatoriamente de uma população maior, e com valor médio comum para o intercepto. Em que a variável erro é composta, podendo ter dois ou mais erros, chamado também de modelo de componentes dos erros (MCE). Os componentes de erro individual não estão correlacionados entre si, nem com unidades de corte transversal e de série temporal (Gujarati e Porter, 2011).

O teste de Hausman (Wooldridge, 2008) irá informar se o erro composto está correlacionado com as variáveis explanatórias, isto é, se o MCE é o modelo adequado. Portanto, o teste de Hausman será aplicado para decidir entre os efeitos do resultado fixo e as regressões de efeito aleatório, e qual deles apresentam resultados confiáveis. A premissa é que se a hipótese nula for rejeitada, o MCE não é adequado, pois os efeitos aleatórios estariam correlacionados com um ou mais regressores. Adota-se, então, o modelo de efeitos fixos. Outro teste para

verificar a ausência de efeitos aleatórios é o teste de Breusch-Pagan, com distribuição de qui-quadrado (Wooldridge, 2008).

Para detectar possível multicolinearidade será utilizado o fator de inflação de variância (FIV). Partindo do ponto que as variâncias amostrais dos estimadores de inclinação de MQO, respeitando as Hipóteses RLM.1 a RLM.5, são condicionados aos valores amostrais das variáveis independentes temos,

$$VAR(\hat{\beta})_j = \frac{\sigma^2}{SQT_j} FIV_j$$

em que, o termo $VAR(\hat{\beta})_j$, que depende de três fatores σ^2 , SQT , R_j^2 , é determinado pela correlação entre x_j e as outras variáveis explicativas. O FIV do coeficiente j é:

$$FIV_j = 1/(1 - R_j^2)$$

Mostrando que o FIV_j é o fator pelo qual $VAR(\hat{\beta})_j$ são mais alto pois, x_j não está correlacionado com as demais variáveis explicativas (Woodridge, 2018).

As hipóteses descritas pelo modelo clássico de regressão linear (MCRL) são um referencial para analisar a qualidade de modelos econométricos (Woodridge, 2018). Dentre elas, três de suma importância para modelos de regressão múltipla: Hipótese 4, analisa a homoscedasticidade ou variância constante, caso contrário o modelo irá apresentar o problema de heterocedasticidade ou variância desigual, matematicamente: $E(u_i^2) = \sigma_i^2$, em que, as variâncias de u_i não são mais constantes (Gujarati e Porter, 2011). Portanto, a heterocedasticidade pode ocorrer devido alguns fatores, sendo eles: *outliers* ou dados discrepantes, omissão de alguma variável relevante, assimetria de um ou mais regressores, durante a transformação dos dados e forma funcional incorreta. Hipótese 8, modelo não deve apresentar multicolinearidade entre os regressores. Hipótese 9, verificar possíveis problemas de especificação (Gujarati e Porter, 2011).

Para analisar a heterocedasticidade será utilizado o teste de Breusch-Pagan-Godfrey, que é aplicado quando se supõe que a variância heterocedástica σ_i^2 relaciona-se com uma ou mais variáveis explanatórias no modelo de regressão. Portanto, a ideia básica é testar se σ_i^2 é homocedástico, testando a hipótese de que $\alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_m = 0$. Para analisar a heterocedasticidade é necessário calcular a equação de MQO para obter os resíduos $\hat{u}_1, \hat{u}_2, \dots, \hat{u}_n$ e então obter o estimador de máxima verossimilhança (Gujarati e Porter, 2011).

A autocorrelação pode ser definida como a correlação entre integrantes de séries de observações ordenadas no tempo ou no espaço (Gujarati e Porter, 2011). Os estimadores de MQO habituais, lineares, não tendenciosos e assintoticamente distribuídos de modo normal, não apresentam variância mínima entre estimadores lineares não tendenciosos. Em suma, não são eficientes em relação a outros estimadores lineares e não tendenciosos. Portanto, os testes t, F e X^2 podem não ser válidos. O modelo clássico de regressão linear pressupõe que essa autocorrelação não existe nos termos de erro, então

$$cov(u_i u_j | x_i x_j) = E(u_i u_j) = 0, \quad i \neq j$$

Logo, pressupõe que o termo de erro relacionado a qualquer uma das observações não é influenciado pelo termo de erro de qualquer outra observação (Gujarati e Porter, 2011).

O modelo geral será dado por:

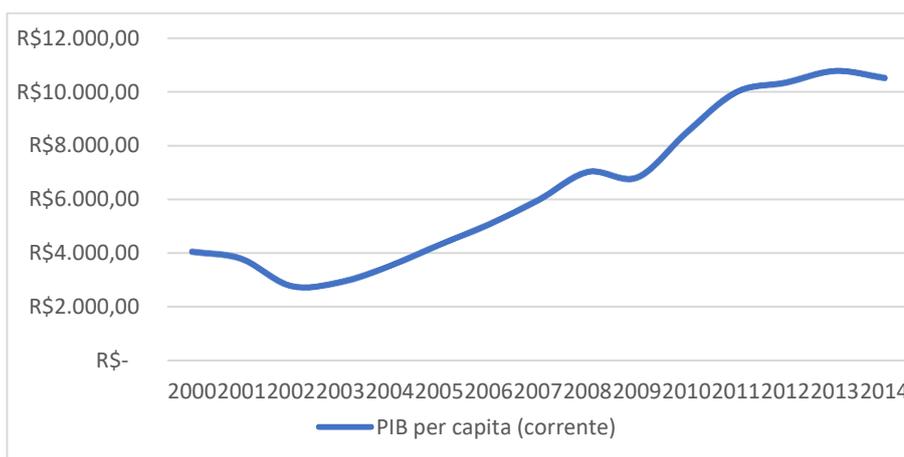
$$\ln(EF)_{it} = \beta_0 + \beta_1 EDI_{it} + \beta_2 \ln(HCI)_{it} + \beta_3 \ln(PIB)_{it} + u_{it}$$

Neste modelo foi aplicado o modelo log-log (Wooldridge, 2018), com intuito de eliminar possíveis vieses no modelo, suavizando a variância das variáveis e evitar a linearidade. As variáveis são: EF, *Ecological Footprint* per capita, dado em hectares globais; EDI, *Export Diversification Index*, índice de diversificação das exportações de determinado país; HCI, índice de capital humano é a contribuição da saúde e educação para a produtividade; PIB per capita, Produtos e serviços dividido pela população; u é o erro do modelo.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção discute os resultados econométricos obtidos para sete países da América do Sul, a partir dos dados coletados no banco mundial (2021). Os países analisados foram: Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Equador e Uruguai. Inicialmente será feita a análise da evolução média dos principais indicadores dos países analisados. A Figura 5 ilustra a evolução média do PIB per capita agregado para os sete países Sul-Americanos analisados. É possível notar uma evolução considerável no PIB, apresentando crescimento econômico considerável no período entre 2002 e 2014. Por conseguinte, mostra a evolução da geração de riqueza, dado que, o PIB per capita passou de \$ 2.776,11 de dólares em 2002 para \$ 10.503,38 em 2014, representando um aumento de 378% neste período.

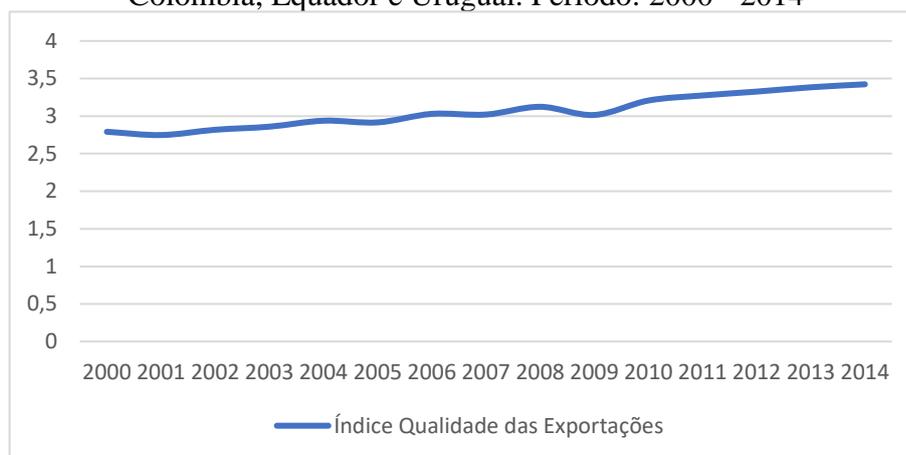
Figura 5 – Evolução do Crescimento Econômico entre 2000 e 2014



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do Banco Mundial (2021)

Devido ao crescimento econômico destacado acima é necessário verificar a qualidade das exportações, em outras palavras, a evolução da estrutura produtiva. A Figura 6 mostra a melhora ocorrida na qualidade das exportações dos países em análise, mostrando que a evolução do PIB per capita ocorreu via sofisticação produtiva. Em outros termos, os países analisados exportaram bens mais diversos. O resultado demonstra que os países têm conseguido trazer algum grau de diversificação na matriz produtiva, embora a matriz exportadora ainda seja dependente das *commodities*, o que explica a baixa evolução do Índice de Qualidade das Exportações.

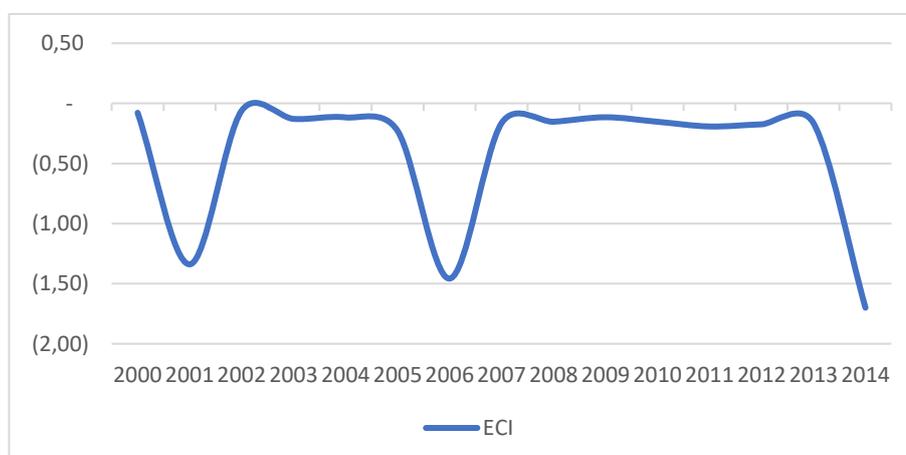
Figura 6- Índice qualidade das exportações para Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Equador e Uruguai. Período: 2000 - 2014



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do Banco Mundial (2021)

Por outro lado, o ECI, Figura 7, mostra que os países não apresentaram uma melhora na matriz produtiva, sendo que a média do ECI no período analisado não apresentou evolução como demonstrado na Figura 7. Isso revela a piora no índice de complexidade econômica e uma oscilação considerável entre 2000 e 2014. Vale destacar que, o índice apresentou quedas expressivas em 2001, 2006 e 2014. Os possíveis motivos podem ser, respectivamente, atentado das torres gêmeas nos Estado Unidos, crise do subprime e crise brasileira. Que podem ser fatores que afetam a taxa de exportação dos países da América do Sul. Em outras palavras, os países não têm conseguido produzir bens de alta complexidade. Vale destacar que, as *commodities* têm forte participação relativa na pauta de exportação desses países, além do baixo valor agregado com alta oscilação no mercado internacional.

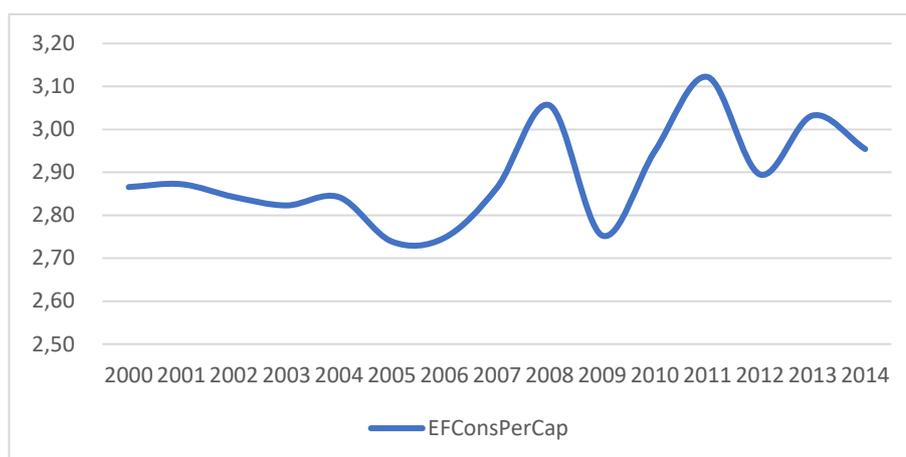
Figura 7 – Média do Economic Complexity Index para Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Equador e Uruguai. Período: 2000 - 2014



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do Banco Mundial (2021)

A Figura 8 mostra a média do Ecological Footprint em hectares globais dividido pela população dos sete países analisados, Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Equador e Uruguai. Apesar de mostrar uma leve queda do indicador no início do período analisado, entre 2000 e 2005, no período restante, entre 2005 e 2014, é possível notar um aumento no índice, o que pode significar um crescimento na demanda sobre recursos naturais e, portanto, o aumento da degradação ambiental na região.

FIGURA 8 - Média do *Ecological Footprint* em hectares globais dividido pela população



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do data.footprintnetwork.org

A Tabela 4 apresenta a estatística descritiva das variáveis utilizadas e os respectivos valores da média, o máximo, o mínimo e o desvio padrão da amostra. Note que a média do EF foi de 2,891 com desvio padrão de 0,731. O HC apresentou média de 2,608 e desvio padrão de 0,231, apresentando pouca variabilidade entre os países analisados, o que mostra a semelhança entre eles, com valor mínimo de 2,045 e máximo de 3,052. O PIB per capita apresentou média de \$ 6.420 e desvio padrão de 4.274. O menor PIB com \$ 904,2 e o maior PIB dos países analisados com \$ 16.974. A Qualidade das exportações dos países são bem semelhantes, apresentando média de 3,059 e desvio padrão de 0,727. Apesar de, o valor mínimo ser de 1,882 e o valor máximo 4,386, demonstrando a semelhança na matriz produtiva dos países

TABELA 4 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Variável	Observações	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
EF	105	2,891	0,731	1,759	4,323
HC	105	2,608	0,231	2,045	3,052
PIBpc	105	6.420	4.274	904,2	16.974
Qualidade das Exportações	105	3,059	0,727	1,882	4,386

Fonte: Elaborado pelo autor

Para verificar a existência de multicolinearidade no modelo econométrico foi utilizado o *Variance Inflation Factor (VIF)*, recomendado por Wooldridge (2018). O VIF aprestou média de 1,46, conforme a Tabela 5, o que indica a não existência de multicolinearidade entre as variáveis explicativas.

TABELA 5 - VARIANCE INFLATION FACTOR

Variáveis	VIF	1/VIF
HC	1,54	0,648809
LN_PIBpc	1,44	0,695897
<i>Export Diversification Index</i>	1,40	0,715250
Média VIF	1,46	

Fonte: Elaborado pelo autor

Para verificar se o modelo econométrico deve ser tratado por meio de dados *pooled* ou dados em painel, foi utilizado o Teste de Breusch-Pagan (Tabela 6) (GUJARATI; PORTER, 2011). O resultado do teste indica rejeição da hipótese nula, como consequência a análise dos dados deve ser feita por meio da técnica de dados em painel.

TABELA 6 – TESTE DE BREUSCH-PAGAN

	Variância	Desvio Padrão
ef	0,534631	0,7311846
e	0,0705572	0,265626
u	0,2454675	0,4954468

$$\chi^2(1) = 227,36$$

$$\text{Prob} > \chi^2 = 0,0000$$

Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida foi feito o teste de Hausmann (1978), os resultados obtidos são apresentados pela Tabela 7. O objetivo desse teste é decidir a utilização entre o modelo em painel com efeito fixo (FE) ou efeito aleatório (RE). O teste não foi estatisticamente significativo, portanto, não se rejeita a hipótese nula. Logo, o teste de Hausmann indica que o modelo de efeito aleatório é o mais indicado para o fenômeno analisado.

TABELA 7 – TESTE DE HAUSMANN

	Coeficientes			Raiz Quadrada
	(b) fixo	(B)	(b-B)	
HC	0,8304266	1,044248	-0,2138218	0,1716013
LN_PIBpc	0,0116326	0,0370833	-0,0254507	0,0495416
<i>Export Diversification Index</i>	-0,1128145	-0,2432745	0,1304599	0,0741169
$\chi^2 (3) = 3,98$				
Prob > $\chi^2 = 0,2635$				

Fonte: Elaborado pelo autor

É preciso considerar o pressuposto da homocedasticidade e da ausência de autocorrelação nos resíduos para validar as estimações (WOOLDRIDGE, 2018). Foi utilizado o teste de Wald para verificar se o modelo possui heterocedasticidade, em que a hipótese nula garante homocedasticidade para o modelo econométrico. O resultado do teste foi estatisticamente significativo ao nível de 1%, apresentando resultado de $\chi^2 = 2159,45$ e Prob > 0. Portanto, a hipótese nula é rejeitada, o que indica a existência de heterocedasticidade no modelo. Ademais, foi realizado o teste Wooldridge para detectar a existência de autocorrelação nos resíduos, em que a hipótese nula pressupõe a inexistência de autocorrelação no modelo. O resultado do teste foi $F(1,6) = 3,580$ e estatisticamente significativo. A partir dos resultados obtidos, a conclusão é que a hipótese nula foi rejeitada, indicando a existência de autocorrelação nos resíduos. Neste aspecto, dos modelos econométricos foram escolhidos. O primeiro modelo corresponde à técnica *Driscoll-Kraay* de estimação (FE-DK). Este modelo apresenta resultados robustos contra heterocedasticidade e autocorrelação serial. Vale destacar que este modelo utiliza a técnica do Efeito Fixo, o que foi utilizado estrategicamente nesta monografia como um modelo de controle. O segundo modelo é o *feasible generalized least square (FGLS)*, que também apresenta resultados robustos contra heterocedasticidade e autocorrelação serial, além de apresentar estimativas para efeito aleatório, conforme recomendado pelo teste de Hausmann.

A Tabela 8 traz as estimativas econométricas para a relação entre diversificação das exportações e EF nos sete países Sul-Americanos analisados por esta monografia. O coeficiente de determinação do modelo ordinary least square (OLS) foi igual a 0,645, ou seja, as variáveis independentes explicam 64,5% da variabilidade do EF na América do Sul.

TABELA 8 – MODELOS BÁSICOS

Variáveis	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	OLS	FE	RE	FE-DK	FGLS
HC	2,316*** (-0,221)	0,830* (-0,452)	1,044** (-0,419)	0,830* (-0,403)	1,381*** (-0,315)
LN_PIBpc	0,041 (-0,0538)	0,0116 (-0,107)	0,0371 (-0,0953)	0,0116 (-0,0678)	0,137* (-0,0762)
Export Diversification Index	-0,628*** (-0,0729)	-0,113 (-0,15)	-0,243* (-0,13)	-0,113 (-0,0934)	-0,290*** (-0,0867)
Constante	-1,577** (-0,624)	0,971 (-0,648)	0,596 (-0,649)	0,971 (-0,501)	-1,073 (-0,795)
Observações	105	105	105	105	105
R²	0,645	0,086			
Número de Países		7	7	7	7
Países EF		SIM	NÃO		
Ano EF		SIM	NÃO		

Estatisticamente significativo: (***) ao nível de 1%; (**) ao nível de 5%; (*) ao nível de 10%
Fonte: Elaborado pelo autor

A segunda coluna apresenta os resultados econométricos para o modelo de efeitos fixos, em que somente o HC foi significativo. A terceira coluna traz estimativas econométricas para o modelo de efeitos aleatórios. Note que a variável HC e EDI foram estatisticamente significativas, respectivamente, a 5% e 10%. Assim como o modelo discutido anteriormente, não foi tratado os problemas econométricos de heterocedasticidade e autocorrelação.

A quarta coluna traz os resultados econométricos robustos para o fenômeno analisado. O modelo *Driscoll-Kraay* (FE-DK) revelou que as variáveis EDI e PIB não foram estatisticamente significativas para explicar o EF na América do Sul. Por outro lado, HC teve significância estatística de 10%, indicando que sua variação em 1% no capital humano causa um aumento de 0,83% no EF.

A quinta coluna da Tabela 8 traz os resultados econométricos robustos por meio do modelo *feasible generalized least square (FGLS)*. Este é o modelo econométrico mais apropriado para analisar a relação entre EF e diversificação das exportações na América do Sul. Note que, neste modelo, a variável EDI foi estatisticamente significativa ao nível de 1%. Em outros termos, este modelo releva que a diversificação das exportações dos países da América do Sul é uma variável relevante para explicar o EF. Note que o EDI impactou negativamente o EF. Em outros termos, o aumento de 1% na diversificação das exportações causa a diminuição de 0,29% a degradação ambiental na América do Sul. Isto é um resultado relevante, pois demonstra que as políticas públicas podem utilizar a diversificação das exportações como forma de diminuir a degradação ambiental na região.

Ademais, o modelo demonstrou que a variável HC foi estatisticamente significativa ao nível de 1%. O modelo mostra que a variação de 1% no capital humano causa aumento de 1,38% no EF. Este é um resultado inesperado, pois demonstra que capital humano maior na América do Sul não é capaz de diminuir a degradação ambiental. Este resultado deve ser analisado com maior profundidade por estudos futuros. Entretanto, este resultado pode ser explicado pela decisão do consumidor sul-americano, que não tem propensão em consumir produtos ambientalmente amigáveis ou adotar práticas sustentáveis, a fim de diminuir a degradação ambiental.

O PIB per capita também foi estatisticamente significativo ao nível de 10%. Note que o aumento de 1% no PIB per capita aumenta em 0,137% o EF. Em outros termos, com o aumento da renda da população gera maior degradação ambiental, o que está em linha com resultados científicos prévios para o mundo.

Em resumo, a principal contribuição desta monografia foi demonstrar a importância da diversificação das exportações como determinante da degradação ambiental. Isto revela que os formuladores de políticas públicas devem escolher estratégias de desenvolvimento via diversificação produtiva para garantir o desenvolvimento sustentável na região.

CONCLUSÃO

Um dos objetivos dos países é manter o desenvolvimento econômico sem impactar o meio ambiente. Portanto, diversos estudos têm analisado a relação entre estrutura produtiva e meio ambiente. Buscou-se contribuir com a literatura por meio da análise sobre o impacto da diversificação das exportações sobre a pegada ecológica na América do Sul. Logo, esse trabalho parte do pressuposto de que a diversificação das exportações contribui para a redução da degradação ambiental na região. A análise é importante, pois a maioria dos países Sul-Americanos estão em processo de desenvolvimento econômico, o que demanda grande quantidade de recursos naturais, impactando negativamente o meio ambiente.

A economia Sul-Americana é caracterizada por grandes complexos exportadores de *commodities* e indústrias de pequeno porte que se dedicam ao comércio local. Alguns fatores, como baixo investimento em infraestrutura, educação e saúde, podem ser o motivo e consequência da baixa evolução da matriz produtiva na região. Surge, então, o desafio para os países da região mitigarem os danos ao meio ambiente, enquanto crescem e se desenvolvem economicamente.

A partir dos resultados encontrados, destaca-se que a diversificação das exportações dos países analisados é uma variável relevante para explicar a degradação ambiental. Isto porque, a maior diversificação de bens exportados impacta negativamente o EF. Em outros termos, o aumento na diversificação das exportações diminui a degradação ambiental na América do Sul. O resultado é relevante, pois, indica que os formuladores de políticas precisam focar em diversificação produtiva como estratégia para o desenvolvimento sustentável.

A principal contribuição desta monografia foi demonstrar a importância da diversificação das exportações como determinante da degradação ambiental. Contudo, este trabalho apresenta algumas limitações, que podem ser analisadas em detalhe por estudos futuros. Primeiro, este estudo não analisou a totalidade dos países da América do Sul. Foi analisado um conjunto de sete países, Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Equador e Uruguai que representam 80% do PIB no continente, e também mais de 80% da extensão territorial da América do Sul, outros estudos podem realizar análises individuais dos países Sul Americanos. Segundo, foi analisado o período entre 2000 e 2014. Porém uma análise com horizonte temporal maior auxiliaria a interpretação da estrutura produtiva no meio ambiente. Terceiro, a falta de dados disponíveis para o mesmo horizonte de tempo entre os países

analisados dificultou a inclusão de quantidade maior de variáveis de controle. Portanto, sugere-se que estudos futuros analisem países da América do Sul com maior número de variáveis, a fim de verificar a relação entre a diversificação das exportações e o EF, bem como utilizar outros indicadores, a exemplo, emissão de gases de efeito estufa.

REFERÊNCIAS:

GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C. *Econometria Básica*. 5. ed. Porto Alegre: Amgh Editora, 2011.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. *Introdução à econometria: uma abordagem moderna*. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2018. Tradução da 6ª edição norte-americana 3ª edição brasileira.

Gozgor G, Can M (2016) Export product diversification and the environmental Kuznets curve: evidence from Turkey. *Environ Sci Pollut Res* 23(21):21594–21603

Can M, Gozgor G (2017) The impact of economic complexity on carbon emissions: evidence from France. *Environ Sci Pollut Res* 24:16364-16370

Dogan, B., Saboori, B., Can, M., 2019. Does economic complexity matter for environmental degradation? An empirical analysis for different stages of development. *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 1995 <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06333-1>.

Neagu, O., Teodoru, M.C., 2019. The relationship between economic complexity, energy consumption structure and greenhouse gas emission: heterogeneous panel evidence from the EU countries. *Sustain. Times* 11. <https://doi.org/10.3390/su11020497>.

Neagu, O., 2019. The link between economic complexity and carbon emissions in the European Union countries: a model based on the Environmental Kuznets Curve (EKC) approach. *Sustain. Times* 11. <https://doi.org/10.3390/su11174753>.

Neagu, O. Economic complexity and ecological footprint: evidence from the most complex economies in the world. *Sustain Times* 2020. <https://doi.org/10.3390/su12219031>.

M. Ikram et al. Exploring the nexus between economic complexity, economic growth and ecological footprint: Contextual evidences from Japan. *Sustain Times* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101460>

M. Z. Rafique, Z. Fareed, D. Ferraz et al. Exploring the heterogenous impacts of environmental taxes on environmental footprints: An empirical assessment from developed economies. *Energy* <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121753>

U. Shahzad, D. Ferraz, B. Dogan et al. Export product diversification and CO₂ emissions: Contextual evidences from developing and developed economies. *Journal of Cleaner Production* 276 (2020) 124146

U. Shahzad, Z. Fareed, F. Shahzad, K. Shahzad. Investigating the nexus between economic complexity, energy consumption and ecological footprint for the United States: New insights from quantile methods. *J. Clean Prod.* 2021;279:123806. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123806>.

U. Shahzad et al. Investigating the nexus between economic complexity, energy consumption and ecological footprint for the United States: New insights from quantile methods. *J. Clean Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123806>

Chávez, J. C., Mosqueda, M. T. & Gómez-Zaldívar, M. Economic complexity and regional growth performance: evidence from the Mexican economy. *Rev. Reg. Stud.* 47, 201–219 (2017).

Fawaz, F. & Rahnama-Moghadamm, M. Spatial dependence of global income inequality: The role of economic complexity. *Int. Trade J.* 33, 542–554 (2019).

Britto, G., Romero, J., Freitas, E. & Coelho, C. The great divide: economic complexity and development paths in Brazil and South Korea. *Blucher Eng. Proc.* 3, 1404–1425 (2016).

PATA UK. Renewable and non-renewable energy consumption, economic complexity, CO₂ emissions, and ecological footprint in the USA: testing the EKC hypothesis with a structural break. *Environ Sci Pollut Res* 2021;28(1):846–61. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10446-3>.

PATA, Ugur Korkut; AYDIN, Mucahit. Testing the EKC hypothesis for the top six hydropower energy-consuming countries: evidence from Fourier Bootstrap ARDL procedure. *Journal of Cleaner Production*, v. 264, p. 121699, 2020.

Van Bellen, Hans Michael. *Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa*. FGV editora, 2005.

ELKINGTON, John. Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. *California management review*, v. 36, n. 2, p. 90-100, 1994.

ELKINGTON, J. *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Oxford: Capstone, 1997.

VENTURINI, Lauren Dal Bem. *O modelo triple bottom line e a sustentabilidade na administração pública: pequenas práticas que fazem a diferença*. 2015.

ROMEIRO, Ademar Ribeiro. *Economia ou economia política da sustentabilidade*. *Economia do meio ambiente*. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 1-29, 2003.

FEIL, Alexandre André; SCHREIBER, Dusan. *Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: desvendando as sobreposições e alcances de seus significados*. *Cadernos Ebape*. BR, v. 15, p. 667-681, 2017.

CAPORAL, Francisco Roberto; COSTABEBER, José Antônio. *Análise multidimensional da sustentabilidade*. *Agroecología e desenvolvimento rural sustentável*, v. 3, n. 3, p. 70-85, 2002.

BARBIERI, José Carlos et al. *Inovação e sustentabilidade: novos modelos e proposições*. *Revista de administração de empresas*, v. 50, n. 2, p. 146-154, 2010.

MICHAEL, Y. M. A. K.; PEACOCK, Clinton J. *Social sustainability: A comparison of case studies in UK, USA and Australia*. In: *17th Pacific Rim Real Estate Society Conference*, Gold Coast. 2011. p. 16-19.

PONCE, Pablo et al. *Financial development, clean energy, and human capital: roadmap towards sustainable growth in América Latina*. *Energies*, v. 14, n. 13, p. 3763, 2021.

MOTA, Claudio JA; MONTEIRO, Robson S. *Química e sustentabilidade: novas fronteiras em biocombustíveis*. *Química Nova*, v. 36, p. 1483-1490, 2013.

AZIMI, Mohaddeseh; FENG, Feng; YANG, Yang. *Air pollution inequality and its sources in SO₂ and NO_x emissions among Chinese provinces from 2006 to 2015*. *Sustainability*, v. 10, n. 2, p. 367, 2018.

ZHAO, Haoran; GUO, Sen; ZHAO, Huiru. *Impacts of GDP, fossil fuel energy consumption, energy consumption intensity, and economic structure on SO₂ emissions: A multi-variate panel data model analysis on selected Chinese provinces*. *Sustainability*, v. 10, n. 3, p. 657, 2018.

GAVIÃO, Luiz Octávio et al. Avaliação de eficiência a partir de indicadores de sustentabilidade. *Conhecimento & Diversidade*, v. 8, n. 16, p. 68-83, 2017.

KITZES, Justin et al. Shrink and share: humanity's present and future Ecological Footprint. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 363, n. 1491, p. 467-475, 2008.

LENZEN, Manfred; MURRAY, Shauna A. The ecological footprint—issues and trends. *ISA research paper*, v. 1, n. 3, 2003.

DOGAN, Eyup; TASPINAR, Nigar; GOKMENOGLU, Korhan K. Determinants of ecological footprint in MINT countries. *Energy & Environment*, v. 30, n. 6, p. 1065-1086, 2019.

QAYYUM, Unbreen; SABIR, Samina; ANJUM, Sohail. Urbanization, informal economy, and ecological footprint quality in South Asia. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 47, p. 67011-67021, 2021.

CHOWDHURY, Mohammad Ashraf Ferdous et al. Does foreign direct investments impair the ecological footprint? New evidence from the panel quantile regression. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 12, p. 14372-14385, 2021.

MARTÍNEZ-ZARZOSO, Inmaculada; MARUOTTI, Antonello. The impact of urbanization on CO₂ emissions: evidence from developing countries. *Ecological Economics*, v. 70, n. 7, p. 1344-1353, 2011.

TILLAGUANGO, Brayan et al. Convergence of the ecological footprint in Latin America: the role of the productive structure. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 42, p. 59771-59783, 2021.

CYPHER, James. *The process of economic development*. Routledge, 2014.

FELIPE, Jesus et al. Product complexity and economic development. *Structural Change and Economic Dynamics*, v. 23, n. 1, p. 36-68, 2012.

DENG, Qiushi et al. Greenhouse gas emissions, non-renewable energy consumption, and output in South America: the role of the productive structure. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 13, p. 14477-14491, 2020.

ALVARADO, Rafael et al. Ecological footprint, economic complexity and natural resources rents in Latin America: Empirical evidence using quantile regressions. *Journal of Cleaner Production*, v. 318, p. 128585, 2021.

GUIMARÃES, Samuel P. A América do Sul em 2022. *Carta Maior*, v. 28, n. 07, p. 2010, 2010.

COSTA, Geovanna Dias et al. Análise multivariada de países da América do Sul por meio de Indicadores socioeconômicos. 2019.

ALVARADO, Rafael et al. Ecological footprint, economic complexity and natural resources rents in Latin America: Empirical evidence using quantile regressions. *Journal of Cleaner Production*, v. 318, p. 128585, 2021.

ORTIZ, Fernanda Viana; ZACHARIAS, Leonardo Poltronieri; KODAMA, Lucas Eduardo. Avaliação de sustentabilidade sob a perspectiva do triple bottom line. 2020.

Fontoura Berlato, Larissa & Merino, Giselle & Figueiredo, Luiz. (2018). A Contribuição da Gestão de Design para a Sustentabilidade Empresarial. 1-15. 10.5151/cid2017-01.

BENITES, Lira Luz Lazaro; POLO, Edison Fernandes. A sustentabilidade como ferramenta estratégica empresarial: governança corporativa e aplicação do Triple Bottom Line na Masisa. *Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria*, v. 6, p. 827-841, 2013

Kim, J. (2018). Technological forecasting & social change are countries ready for the new meso revolution ? Testing the waters for new industrial change in Korea. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 34–39.

HOBBSAWM, Eric. *A era das revoluções: 1789-1848*. Editora Paz e Terra, 2015.

RODRIGUES, Auro Jesus et al. a urbanização no mundo e no Brasil sob um enfoque Geográfico. *Caderno de Graduação-Ciências Humanas e Sociais-UNIT-SERGIPE*, p. 95-106, 2015.

NETWORK, Global Footprint. *Ecological footprint atlas 2010*. Retrieved May, v. 25, p. 2014, 2010.

VENETOULIS, Jason; TALBERTH, John. Refining the ecological footprint. In: Sustainable Development. CRC Press, 2010. p. 83-120.

WHITE, Thomas J. Sharing resources: The global distribution of the Ecological Footprint. *Ecological economics*, v. 64, n. 2, p. 402-410, 2007.

WIEDMANN, Thomas; BARRETT, John. A review of the ecological footprint indicator—perceptions and methods. *Sustainability*, v. 2, n. 6, p. 1645-1693, 2010.

COSTANZA, Robert. The dynamics of the ecological footprint concept. *Ecological economics*, v. 32, n. 3, p. 341-345, 2000.

AHMED, Zahoor; WANG, Zhaohua. Investigating the impact of human capital on the ecological footprint in India: an empirical analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 26, p. 26782-26796, 2019.

LIU, Hongbo; KIM, Hanho. Ecological footprint, foreign direct investment, and gross domestic production: Evidence of belt & road initiative countries. *Sustainability*, v. 10, n. 10, p. 3527, 2018.

ULUCAK, Recep et al. Determinants of the ecological footprint: role of renewable energy, natural resources, and urbanization. *Sustainable Cities and Society*, v. 54, p. 101996, 2020.

HAUSMANN, Ricardo et al. The atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity. Mit Press, 2014.

Hartmann, D., Guevara, M. R., Jara-Figueroa, C., Aristarán, M. & Hidalgo, C. A. Linking economic complexity, institutions, and income inequality. *World Dev.* 93, 75–93 (2017).

ALQURTAS, Abdulrahman M. A New Indicator of Economic Complexity to Guide Industrial Policies. 2018. Tese de Doutorado. The George Washington University.

HARTMANN, Dominik et al. Linking economic complexity, institutions, and income inequality. *World development*, v. 93, p. 75-93, 2017.

HAUSMAN, Jerry A. Specification tests in econometrics. *Econometrica: Journal of the econometric society*, p. 1251-1271, 1978.

GRANGER, Clive WJ. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, p. 424-438, 1969.