



**ASSOCIAÇÃO DE POLITÉCNICOS DO NORTE (APNOR)  
INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA**

**A CONTRIBUIÇÃO DO MERCADO DE CARBONO VOLUNTÁRIO  
BRASILEIRO NO CUMPRIMENTO DAS METAS DE REDUÇÃO DE  
EMISSÕES DE  
DA UNIÃO EUROPEIA**

**Giuliano Bruel Recchia**

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do  
Grau de Mestre em Gestão das Organizações, Ramo de Gestão de Empresas

Orientada por

**Ana Paula Monte; Rogério Allon Duenhas**

Bragança, dezembro de 2024.



**ASSOCIAÇÃO DE POLITÉCNICOS DO NORTE (APNOR)  
INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA**

**A CONTRIBUIÇÃO DO MERCADO DE CARBONO VOLUNTÁRIO  
BRASILEIRO NO CUMPRIMENTO DAS METAS DE REDUÇÃO DE  
EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DA UNIÃO EUROPEIA**

**Giuliano Bruel Recchia**

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do  
Grau de Mestre em Gestão das Organizações, Ramo de Gestão de Empresas

Orientada por

**Ana Paula Monte; Rogério Allon Duenhas**

Bragança, dezembro de 2024.

## Resumo

Este estudo explora o potencial da contribuição do mercado voluntário de carbono brasileiro (MVC) para as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) da União Europeia (UE) estipuladas no Acordo de Paris, focando no período entre 1999 e 2023. Inicialmente, a pesquisa revisa o histórico e o funcionamento do MVC no Brasil, incluindo projetos associados ao setor AFOLU (Agricultura, Florestas e Outros Usos da Terra), destacando sua relevância para a mitigação de mudanças climáticas. Utilizando uma abordagem metodológica mista, com dados secundários e análises qualitativas e quantitativas, o estudo examina a relação entre o desempenho do MVC brasileiro e as metas de redução e compensação de emissões da UE. A análise estatística, com regressão linear e correlação, revela uma correlação significativa entre o aumento da compensação de emissões no Brasil e a redução de GEE na UE, destacando o Brasil como um parceiro estratégico para o cumprimento das metas climáticas europeias. As conclusões enfatizam que o MVC pode contribuir significativamente para a neutralidade de carbono da UE, especialmente por meio de projetos REDD, ARR, ALM de carbono, na Amazônia, Mata Atlântica e outros biomas brasileiros. Como recomendação, propõe-se o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à regulamentações para aumentar a qualidade, a quantidade e a confiabilidade dos créditos de carbono provindos do MVC brasileiro, além de futuramente aprofundar a análise com variáveis econômicas.

**Palavras-chave:** Carbono, Mercado voluntário de Carbono, Emissões, Compensação, Contribuição.

## **Abstract**

This study analyzes the potential of contribution of the Brazilian voluntary carbon market (MVC) to the European Union's (EU) greenhouse gas (GHG) emissions reduction targets set forth in the Paris Agreement, focusing on the period from 1999 to 2023. Initially, the research reviews the history and operation of the MVC in Brazil, including projects associated with the AFOLU sector (Agriculture, Forestry, and Other Land Uses), highlighting its relevance for climate change mitigation. Using a mixed-methods approach with secondary data and qualitative and quantitative analyses, the study examines the relationship between the performance of the Brazilian MVC and the EU's emissions reduction and offset goals. Statistical analysis, including linear regression and correlation, reveals a significant correlation between increased emissions compensation in Brazil and GHG reductions in the EU, positioning Brazil as a strategic partner in achieving European climate targets. Conclusions emphasize that the MVC can significantly contribute to the EU's carbon neutrality, especially through REDD, ARR, and ALM carbon projects in the Amazon, Atlantic Forest, and other Brazilian biomes. Recommendations include the development of regulations to increase the quality, quantity, and reliability of carbon credits in Brazil, as well as a deeper analysis incorporating economic variables.

**Keywords:** Carbon, Voluntary Carbon Market, Emissions, Offsetting, Contribution

# Dedicatória

*Dedico esta dissertação a minha família e amigos*

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todos que de alguma maneira me acompanharam e participaram desse processo. Sou imensamente grato a minha família por ter me incentivado e me dado todo o apoio necessário para que eu pudesse ter esse privilégio de vir para Portugal e ter essa experiência única, e que, com certeza, irei levar para a vida toda com muita consideração, carinho e boas memórias.

Agradeço também a todos os meus amigos que estão no Brasil torcendo por mim, e que mantiveram contato comigo em momentos difíceis durante essa jornada. Adicionalmente, preciso dizer que tenho muita gratidão as pessoas que conheci em Bragança, e tenho certeza que muitas dessas pessoas se tornaram amigos que eu levarei para o resto da minha vida. Dentre os amigos que fiz durante o meu tempo em Portugal, eu gostaria de deixar um agradecimento especial para a minha querida amiga Renata Kércia, que me apoiou incondicionalmente nos momentos finais dessa etapa da minha vida.

## Lista de Siglas e Acrónimos

ACOGS – *Avoided Conversion of Grasslands and Shrublands* (Conversão Evitada de Pastagens e Arbustos, em português).

AFOLU – *Agriculture, Forests and Other Land Use* (Agricultura, Florestas e Uso da Terra, em português)

ALM – *Agricultural Land Management* (Gestão de Terras Agrícolas, em português)

ARR – *Afforestation, Reforestation & Revegetation* (Florestamento, Reflorestamento & Revegetação, em português).

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

CO<sub>2</sub>eq – Dióxido de carbono equivalente

COP - *Conference of the Parties* (Conferência das Partes, em português)

CRVEs – Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões

EU ETS – *European Union Emissions Trading System* (Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia, em português)

GEE – Gases de Efeito Estufa

Eurostat – *European Statistics* (Estatísticas da União Europeia, em português)

FGV – Fundação Getúlio Vargas

IDESAM – Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia

IFM – *Improved Forest Management* (Gestão Aprimorado de Florestas, em português)

INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, em português)

LULUCF – *Land Use, Land-Use Change and Forestry* (Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas, em português)

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MVC – Mercado Voluntário de Carbono

NDCs – *Nationally Determined Contribution* (Contribuição Nacionalmente Determinada, em português)

ONU – Organização das Nações Unidas

ppm – Parte por milhão

RCEs – Reduções Certificadas de Emissões

---

REDD - *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation* (Redução das Emissões causadas pelo Desmatamento e Degradação florestal, em português)

SBCE – Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões

SWOT – *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats* (Forças, Fraquezas, Oportunidades, Ameaças, em português)

ton – Toneladas

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change* (Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas, em português)

VCS – *Verified Carbon Standard* (Padrão de Carbono Voluntário, em português)

# Índice Geral

Índice Geral .....	ix
Índice de Figuras .....	x
Índice de Tabelas .....	xi
Introdução.....	1
1. Revisão de Literatura.....	4
1.1 As Mudanças Climáticas no Antropoceno .....	4
1.2 Impactos das Mudanças Climáticas .....	6
1.3 A Necessidade da Neutralidade de Carbono .....	7
1.4 Imposto Pigouviano: Origens do Preço do Carbono .....	12
1.5 Acordos Climáticos .....	13
1.6 Contribuições Nacionalmente Determinadas .....	14
1.7 Mercados de Carbono .....	15
1.7.1 Mercado de carbono na Europa .....	16
1.7.2 Mercado de carbono no Brasil.....	17
2. Metodologia .....	20
2.1 Abordagem da Pesquisa e Fontes de Dados .....	20
2.2 Equações Utilizadas para as Análises.....	21
2.3 Hipóteses de Investigação.....	22
2.4 Métodos de Tratamentos de Dados .....	23
3. Apresentação e Análise de Resultados.....	25
3.1 Caracterização do MVC Brasileiro.....	26
3.2 MVC Brasileiro, Setor AFOLU .....	33
3.3 Perfil das emissões de GEE na União Europeia .....	39
3.4 Potencial Bruto de Contribuição do MVC Brasileiro nas Metas Europeias .....	43
3.5 Análises de Correlação e Regressão Linear .....	44
Conclusões, Limitações e Futuras Linhas de Investigação.....	49
Referências Bibliográficas .....	52

## Índice de Figuras

Figura 1: Gráfico da evolução do número de novos projetos de crédito de carbono brasileiro entre 1999 e 2023.....	27
Figura 2: Gráfico de número de projetos por categorias.....	29
Figura 3: Gráfico do potencial de redução de emissões por categoria.....	30
Figura 4: Gráfico de Status por número de projetos.....	32
Figura 5: Gráfico do número de projetos por categorias do AFOLU.....	34
Figura 6: Gráfico do potencial de redução de emissões de GEE por categoria de AFOLU.....	35
Figura 7: Gráfico do número de projetos AFOLU por status.....	36
Figura 8: Mapa indicando a localização dos projetos AFOLU no Brasil.....	37
Figura 9: Gráfico da distribuição fundiária dos projetos AFOLU brasileiros.....	38
Figura 10: Gráfico da evolução das emissões líquidas da União Europeia durante o período de 1990 a 2022.....	39
Figura 11: Gráfico da evolução das emissões de GEE per capita na união europeia.....	40
Figura 12: Gráfico do perfil de emissões da União europeia no setor AFOLU. Fonte: UNFCCC Format - EEA (2023).....	42
Figura 13: gráfico de regressão entre MVCBRLN e MIO.....	45
Figura 14:Gráfico de regressão entre MVCBRLN e PCap.....	46
Figura 15: Gráfico de regressão entre MVCBRLN e Index.....	46

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Principais Impactos das Mudanças Climáticas.....	7
Tabela 2: Principais conceitos explorados por Pigou em sua obra "The Economics of Welfare" (1920). .....	12
Tabela 3: Categorias de projetos no MVC brasileiro. ....	27
Tabela 4: Matriz SWOT do panorama do MVC brasileiro. ....	28
Tabela 5: Categorias presentes no AFOLU.....	33
Tabela 6: Comparativo entre os maiores emissores de GEE's da união europeia em 1990 e 2021 .....	41
Tabela 7: Matriz de correlação .....	44
Tabela 8: Emissões europeias e compensação do MVC Brasileiro .....	48

## Introdução

A crise climática pela qual o planeta está passando se mostra como um dos maiores desafios a serem enfrentados pela humanidade atualmente e demanda uma mudança efetiva na relação com o ambiente em que vivemos. O aquecimento global, talvez a manifestação mais perceptível e marcante das mudanças climáticas, é atribuído principalmente ao incremento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera terrestre, um fenômeno substancialmente intensificado por atividades humanas (IPCC, 2023).

De acordo com estudos do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (sigla IPCC, em inglês), dados históricos revelam uma ascensão notável na média global de temperatura, com registros apontando para um aumento de aproximadamente 1,2°C desde a era pré-industrial, o que acarreta no agravamento da frequência e da intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor e de frio, enchentes e secas. Para evitar as piores consequências é crucial limitar o aquecimento global a no máximo 1,5°C, que é o limite apontado como o máximo seguro para reduzir riscos de colapso climático (IPCC, 2023).

Simultaneamente, a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o principal gás de efeito estufa antropogênico, foi elevada significativamente, ultrapassando a marca de 400 partes por milhão, um patamar que não era atingido há milhões de anos. Este acúmulo de GEE na atmosfera, proveniente em grande parte da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento, tem exacerbado o efeito estufa natural, resultando em alterações climáticas de grande escala que ameaçam ecossistemas, economias e comunidades globais (Blunden & Boyer, 2022).

A área da gestão empresarial tem assumido cada vez mais sua responsabilidade e compromisso em relação aos esforços de adaptação e mitigação às mudanças climáticas antropogênicas. Neste contexto, os mercados de carbono emergem como mecanismos dinâmicos, capazes de conectar esforços corporativos de compensação de emissões à conservação de florestas tropicais e à sustentabilidade econômica no meio empresarial (Marques, 2022). Em particular, este estudo volta-se para o mercado de carbono voluntário brasileiro que, por apresentar um grande potencial de crescimento, devido a magnitude dos biomas florestais e áreas reflorestáveis no território do país, desponta como um componente estratégico no contexto internacional de esforços para a compensação de emissões de GEE (FGV, 2022).

Configurando-se como uma iniciativa além das obrigações regulatórias, este mercado permite que entidades privadas, principalmente empresas, compensem suas emissões através da aquisição de créditos de carbono oriundos de projetos de carbono florestal. No contexto do mercado brasileiro, a grande maioria desses créditos são gerados na Floresta Amazônica. Tais projetos contemplam não apenas a compensação de emissões, mas também a promoção da manutenção da biodiversidade e do bem-estar social, contribuindo para a preservação deste bioma único e importantíssimo, e permitindo que atores globais, incluindo empresas europeias, atinjam suas metas de compensação de emissões de GEE e de responsabilidade ambiental corporativa (Mello, 2023).

A motivação para a escolha deste tema de pesquisa reside na identificação de uma área pouco explorada: a interação entre o mercado de carbono voluntário brasileiro, e sua capacidade de contribuir para as estratégias e metas de compensação de emissões de GEE por parte de empresas residentes no território englobado pela União Europeia.

Dada a urgência global de reduzir emissões em linha com os objetivos do Acordo de Paris – acordo climático que prevê a redução de 55% das emissões de carbono até 2030, comparado ao ano de 1990, e neutralidade até 2050 – e o papel proeminente da União Europeia na vanguarda dos compromissos climáticos, o potencial do Brasil, através de seus recursos naturais e iniciativas de carbono voluntário, oferece um campo fértil para investigação. Enquanto a Europa se destaca por suas metas ambiciosas de redução de emissões, delineadas em acordos internacionais e políticas regionais, o Brasil apresenta um potencial subutilizado em termos de projetos de sequestro de carbono, especialmente aqueles situados na vasta e biodiversa Floresta Amazônica (Schumer, 2023).

O objetivo geral deste estudo é analisar a contribuição do mercado de carbono voluntário brasileiro no cumprimento das metas de redução e compensação de emissões de GEE pela União Europeia. Para tanto, com o intuito de alcançar o objetivo geral, a investigação tem os seguintes objetivos específicos:

- I) Investigar o histórico do mercado de carbono voluntário brasileiro;
- II) Avaliar o potencial econômico do mercado de carbono voluntário brasileiro;
- III) Mensurar a contribuição do mercado de carbono brasileiro no alcance das metas europeias.

Estruturalmente, a dissertação segue uma lógica sequencial e analítica. O primeiro capítulo é dedicado à revisão bibliográfica e contextualização da problemática, e visa proporcionar uma base sólida para as compreensões histórica e teórica de conceitos relacionados às mudanças climáticas, aquecimento global, mercados de carbono e mercado de carbono voluntário.

Em seguida, o segundo capítulo discute as bases metodológicas utilizadas para a realização da pesquisa, onde adotou-se uma abordagem quali/quantitativa exploratória a partir de dados secundários obtidos em relatórios de empresas privadas, organizações sem fins lucrativos, relatórios técnicos de órgãos nacionais e internacionais, além da utilização da base de dados da principal empresa certificadora de créditos de carbono, a Verra.

O terceiro capítulo, traz os resultados e discussões, apresenta as análises qualitativas e as análises estatísticas quantitativas que buscam caracterizar e mensurar o mercado de carbono voluntário brasileiro em sua totalidade, juntamente com a análise a respeito de seu potencial de contribuição para com as metas de redução de emissões de GEE europeias. Por fim, a dissertação se encerra com as considerações finais, onde são sintetizados os principais achados da pesquisa, suas limitações e também são propostas recomendações para estudos futuros.

# 1. Revisão de Literatura

Esse capítulo tem o intuito de fornecer um embasamento teórico para definir conceitos importantes relacionados às mudanças climáticas e seus impactos, assim como os esforços de mitigação, e a definição dos mercados de carbono brasileiro e europeu.

## 1.1 As Mudanças Climáticas no Antropoceno

A compreensão das mudanças climáticas e dos esforços necessários para sua mitigação constitui um desafio premente da atualidade, exigindo uma análise profunda e detalhada dos conceitos, histórico e dados pertinentes à questão (Hansen et al., 2012; Mikhaylov, 2020). De acordo com o IPCC (2023), as mudanças climáticas podem ser definidas como variações persistentes nas condições climáticas de uma região, identificáveis por alterações estatísticas em parâmetros como médias e variabilidade, que permanecem ao longo de períodos prolongados, geralmente de décadas ou mais. Essas variações podem ocorrer devido a processos internos naturais, como oscilações oceânicas, erupções vulcânicas e atmosféricas, ou devido a fatores externos, incluindo alterações

na atividade solar, e impactos resultantes de atividades humanas, como o aumento de GEE e mudanças no uso da terra, que afetam a composição da atmosfera e contribuem para o aquecimento global.

Outra definição importante é da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (sigla UNFCCC em inglês), que caracteriza mudanças climáticas como alterações no clima diretamente ligadas às atividades humanas, que modificam a composição da atmosfera global e ultrapassam as variações naturais observadas em períodos comparáveis. A UNFCCC distingue, portanto, entre alterações climáticas causadas por atividades humanas que alteram a composição da atmosfera e variabilidade climática causada por causas naturais (IPCC, 2023; UNFCCC, 1992).

As definições apresentadas do IPCC e da UNFCCC estão alinhadas com (Hegerl et al., 2007), que elucidam que mudanças climáticas referem-se a alterações duradouras nas médias e/ou variabilidade das propriedades climáticas, cuja detecção depende de análises estatísticas rigorosas e que persistem por décadas ou mais. A ênfase é dada ao fato de que tais mudanças podem advir de processos internos naturais ou de forças externas, incluindo, principalmente, atividades humanas que aumentam significativamente a concentração de GEE na atmosfera (Hegerl et al., 2007).

O efeito estufa é um fenômeno natural no qual a temperatura da superfície da Terra aumenta à medida que a parte inferior da atmosfera aquece devido ao acúmulo de GEE. Esse aquecimento da atmosfera terrestre é benéfico para a manutenção da vida no planeta, caso contrário, a superfície seria demasiadamente fria para sustentar a vida como se conhece. Entretanto, quando há um aumento exacerbado da quantidade de gases que causam o efeito estufa, as temperaturas sobem mais do que o esperado, causando consequências negativas irreversíveis nos biomas e a fomentação de eventos climáticos extremos (Huang et al., 2016).

Apesar de ser um fenômeno multifacetado, as mudanças climáticas são comumente chamadas de aquecimento global. Entre as razões naturais que acarretam em mudanças climáticas de longo prazo, cientistas destacam o papel da radiação solar, mudanças na órbita solar terrestre, vulcanismo, correntes oceânicas e placas tectônicas (Bandh, 2021). Porém, é sabido que a influência humana é a causa dominante do aquecimento global moderno observado desde meados do séc. 20 (Larminat, 2016). A partir da revolução industrial, as atividades humanas, incluindo sua cultura de consumo, estilos de vida e compartilhamento desigual de recursos, levaram a um aumento de temperatura maior do que o que ocorreu desde o início da civilização humana (Gifford et al., 2011; IPCC, 2007).

A importância do forçamento radiativo – que corresponde à alteração no balanço energético global da Terra, associado à variação na concentração atmosférica de um ou mais GEE, relativamente ao período pré-industrial – na compreensão das mudanças climáticas antropogênicas é destacada pela contribuição combinada de atividades humanas, que desde 1750 resultou em um aumento significativo no forçamento radiativo, evidenciando o papel decisivo da humanidade na alteração do sistema climático global. Este ponto é crucial para compreender a necessidade urgente de mitigação, à medida que indicadores globais de aquecimento, detectados nas temperaturas da

superfície terrestre, da troposfera e dos oceanos, apontam para um impacto antropogênico generalizado no clima terrestre (Hegerl et al., 2007).

É muito provável que o forçamento de gases com efeito de estufa tenha causado a maior parte do aquecimento global observado nos últimos 50 anos (Hegerl et al., 2007). Atividades como desmatamento, transporte, industrialização, agropecuária, e a queima de combustíveis fósseis possuem as maiores taxas de emissões de GEEs, e conseqüentemente das mudanças climáticas, que por sua vez, têm impactos irreversíveis para a humanidade, e que por isso, cada vez mais impulsionam e determinam os sistemas políticos de diversos países ao redor do mundo (Bandh, 2021; Fiske et al., 2018). O aquecimento antropogênico do clima pode ser detectado a partir de medições de temperatura da superfície terrestre, na troposfera e nos oceanos, e seu impacto é tão extenso que alterações significativas podem ser percebidas em todos os continentes (Hegerl et al., 2007).

O consenso científico sobre o aquecimento global antropogênico foi descrito por Powell (2019), que constatou em uma análise de 11.602 artigos *peer-reviewed* (revisados por pares) publicados apenas nos primeiros sete meses de 2019, que existe um consenso de 100% entre os cientistas sobre a origem antropogênica do aquecimento global. Este consenso inquestionável destaca a necessidade de ação imediata e robusta para mitigar as mudanças climáticas antropogênicas, sublinhando a necessidade de reduzir drasticamente as emissões de GEE (Powell, 2019).

Os esforços de mitigação abrangem uma gama de estratégias destinadas a limitar ou prevenir o lançamento de GEE na atmosfera. Entre essas estratégias, o sequestro de carbono surge como um método promissor para reduzir os níveis de CO<sub>2</sub> atmosférico, essencial para o alcance de metas de mitigação ambiciosas firmadas em acordos climáticos mundiais (Bandh, 2021). No entanto, é fundamental reconhecer que, embora tais esforços de mitigação sejam vitais, a necessidade de adaptação às mudanças climáticas já em curso também se apresenta como imperativa (VijayaVenkataRaman et al., 2012). A adaptação, conforme delineada pelo IPCC (2023) e discutida por Bassett & Fogelman (2013), envolve ajustes em sistemas humanos ou naturais em resposta a estímulos climáticos, uma abordagem que reconhece a inevitabilidade de certos impactos das mudanças climáticas e a necessidade de preparação e resposta aderoas.

## 1.2 Impactos das Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas antropogênicas agravam o ambiente natural e construído, e fenômenos naturalmente ocorrentes, como tempestades, incêndios florestais, inundações e ondas de calor (Bandh, 2021). Essas mudanças têm influenciado a humanidade de forma crescente em diferentes aspectos. O que pode ser mais facilmente percebido no cotidiano, são eventos climáticos extremos, ou até então atípicos para a região, acontecendo com maior frequência e com cada vez mais intensidade (Seneviratne et al., 2012).

Como delineado por Bandh (2021), globalmente, o nível do mar subiu de 10 a 20 cm durante o século 20, principalmente devido à expansão térmica e ao derretimento de calotas polares. Esse aumento do nível do mar pode alterar a salinidade da água, provocar alagamentos de zonas úmidas

e regiões costeiras, e eliminar a abundância de vegetação nas zonas costeiras. O aumento do dióxido de carbono na atmosfera e as subsequentes mudanças climáticas, provavelmente afetarão a produtividade da agricultura global, alterando o ritmo de crescimento das plantas e facilitando o aparecimento de pragas nas plantações. Florestas já estão sendo e ainda serão ainda mais afetadas com secas, incêndios, deslizamentos de terra, espécies de animais invasoras, pestes, insetos e tempestades, que influenciarão na morfologia, estrutura e funcionamento das florestas.

É esperado que as mudanças climáticas aumentem a carga das doenças, sendo que mulheres grávidas, crianças, pessoas idosas e pessoas com deficiências e doenças crônicas são considerados as populações mais vulneráveis nesse sentido. Países subdesenvolvidos e emergentes também se apresentam como locais com maiores riscos à saúde devido às alterações climáticas. Os maiores impactos negativos na saúde das pessoas são em áreas de baixa renda, com mortalidade relacionada ao calor onde existem riscos de saúde alimentares e doenças infecciosas emergentes. O uso de materiais como concreto, e uma alta densidade populacional, aumentam a capacidade de absorção e retenção de calor, resultando no efeito das ilhas urbanas de calor, tornando as cidades e suas respectivas populações, também mais vulneráveis às mudanças climáticas (Bandh, 2021). Na Tabela 1 foram compilados alguns dos principais efeitos das mudanças climáticas em diferentes campos destacados por Bandh (2021), IPCC (2023) e Zou et al. (2021).

Tabela 1: Principais impactos das mudanças climáticas.

<b>Campo</b>	<b>Impactos</b>
<b>Ambiental</b>	Aumento da temperatura global, elevação do nível do mar, acidificação dos oceanos, intensificação de eventos climáticos extremos (ondas de calor, secas, inundações), perda de biodiversidade, desmatamento, desertificação.
<b>Social</b>	Migrações em massa, conflitos por recursos naturais, insegurança alimentar, aumento da pobreza, deslocamento de comunidades, perda de patrimônio cultural, impactos na saúde mental.
<b>Econômico</b>	Danos à infraestrutura, perdas na agricultura e pesca, aumento dos custos de produção, redução do turismo, impactos no setor energético, aumento dos gastos com saúde.
<b>Produção de Alimentos</b>	Redução da produtividade agrícola, perda de terras cultiváveis, aumento das pragas e doenças, instabilidade nos preços dos alimentos, insegurança alimentar.
<b>Saúde</b>	Aumento de doenças transmitidas por vetores (dengue, malária), ondas de calor e doenças relacionadas, desnutrição, problemas de saúde mental, aumento da mortalidade.

Fonte: Autoria própria (2024).

### 1.3 A Necessidade da Neutralidade de Carbono

A exploração de recursos não-renováveis, a forte industrialização global, e um grande volume de emissões de GEE, tem levado ao aumento da média de temperatura global, causando diversos problemas relacionados à degradação ambiental (Wang et al., 2021). Desde épocas pré-industriais,

de cerca de 1850, até o ano de 2022, a concentração média de dióxido de carbono atmosférico aumentou de 285 para 419 ppm, e as temperaturas globais aumentaram em média 1,2°C e, nas últimas quatro décadas, têm sido as mais altas para qualquer período desde 1850 (Chen et al., 2022).

Sem medidas ou tecnologias eficazes para reduzir ou controlar as emissões de CO<sub>2</sub>, a concentração média global de dióxido de carbono atmosférico e as temperaturas da superfície da superfície terrestre e dos oceanos continuarão a aumentar. A humanidade enfrentará deterioração ambiental, incluindo temperaturas globais mais altas, eventos climáticos extremos frequentes e danos significativos aos ecossistemas terrestres e marinhos (Zou et al., 2021). O aquecimento global causado por estes gases de efeito de estufa já causou graves danos ao ambiente humano, incluindo a extinção espécies, perda de biodiversidade, secas, inundações, incêndios florestais, acidificação e aumento do nível dos oceanos, e derretimento das calotas polares do Ártico e da Antártica, (Mora et al., 2018; Chen et al., 2022). Eventos climáticos extremos frequentemente resultam em colapso de casas, perdas humanas e de safras, e, por consequência, na destruição de habitats, perda de entes queridos e escassez de alimentos, afetando gravemente a ordem socioambiental existente (Chen et al., 2022).

Enfrentar as mudanças climáticas e proteger o clima global é uma questão do futuro comum da humanidade. As pessoas de todo o mundo, vivendo em uma "Aldeia Global", precisam tomar ações ativas e eficazes conjuntamente. A saúde e o desenvolvimento sustentável da humanidade também dependem das decisões que são tomadas atualmente (Pan, 2021). Sem uma ação imediata, de iniciativas, políticas e diversas outras medidas possíveis de serem tomadas por países ao redor do mundo, a deterioração do meio ambiente irá continuar, e afetará gerações futuras de maneira drástica (Tan et al., 2021).

Para conter o aquecimento global, a humanidade precisa remover barreiras e esforçar-se para acelerar a transição para um contexto de carbono líquido zero (Pan, 2021). O contexto atual remete ao início em uma era de emergência sobre o clima, e a falha na ação climática representa um risco significativo para a próxima década. É preciso reconhecer que as atuais políticas climáticas baseadas na produção não são soluções reais para a crise climática. Assim, um avanço no dilema climático estará em jogo se o público for incluído nas políticas climáticas, implicando uma mudança para responsabilidades de emissão de GEE baseadas na implementação do consumo responsável (Hong et al., 2023).

A neutralidade de carbono é uma maneira importante de controlar efetivamente o rápido aumento da temperatura global, facilitar a transformação para a utilização de energia verde e promover o progresso em tecnologias verdes e de baixo carbono (Caineng et al., 2021). Ela visa estabelecer um equilíbrio entre a quantidade de GEE emitidos e as iniciativas para sua compensação ou remoção. O objetivo é atingir um balanço no qual o total de emissões geradas por um país, empresa, produto ou pessoa, em um dado período, seja igualado por esforços de sequestro de carbono, como reflorestamento ou tecnologias de captura de carbono. Em um sentido mais restrito, a neutralidade de carbono aplica-se a emissões de CO<sub>2</sub> que são neutralizadas dentro de um prazo específico,

ênfatizando a importância de atitudes sustentáveis e ações concretas para alcançar "emissões líquidas zero" (Masson-Delmotte, 2020; Zhang et al., 2022).

Desenvolver tecnologias de baixo e zero carbono, incluindo tecnologias de energia renovável, como solar, hidrelétrica, bioenergia, eólica, geotérmica e marítima, juntamente com armazenamento de energia e tecnologias eficientes, poderia resolver o aquecimento global a partir da fonte. No entanto, os combustíveis fósseis ainda cobrem cerca de 80% das necessidades energéticas mundiais atuais (Fu et al., 2022). Além do mais, para alcançar a neutralidade de carbono através do desenvolvimento sustentável, deve ser promovido a captura e remoção de carbono em ecossistemas terrestres e marinhos (Cheng et al., 2020).

O esforço global para alcançar a neutralidade de carbono implica um impacto econômico significativo, exigindo uma mudança nos modelos de desenvolvimento econômico e nos padrões de produção e consumo de energia, bens e serviços. Tais mudanças estão alinhadas com um crescimento que favorece tecnologias sustentáveis e de baixo carbono, promovendo um futuro mais verde e resiliente. À medida que a comunidade internacional avança na promoção da neutralidade de carbono, a pesquisa focada em questões científicas torna-se crucial. Esta área de produção de conhecimento não é apenas teórica, abrangendo áreas como "ciência da energia" e "ciência da neutralidade de carbono", mas também prática, lidando com o uso humano de energia e do solo, e com o desenvolvimento sustentável dentro do ecossistema terrestre (Caineng et al., 2021; Ji et al., 2021).

O principal e mais direto benefício de alcançar a neutralidade de carbono é a mitigação dos impactos ambientais negativos, causados pela crise climática atual e a redução da taxa crescente de temperatura global. Dessa forma, alcançar a neutralidade de carbono tornou-se um objetivo crítico para diversos países, representando uma das soluções possíveis para o problema das mudanças climáticas (Udemba, 2021). Atingir a neutralidade de carbono reduziria a frequência de desastres catastróficos, preservando a ordem social existente e promovendo a evolução da sociedade humana. Os impactos positivos da neutralidade de carbono no meio ambiente, na sociedade e na economia são evidentes, pois pode contribuir significativamente para reverter a degradação ambiental ocorrida nos últimos anos e promover o desenvolvimento de um ambiente sustentável para as gerações futuras (Chen et al., 2022).

A neutralidade de carbono representa um marco distintivo no progresso humano, análogo a uma nova revolução industrial sustentável, redefinindo o futuro da humanidade em direção a uma existência livre de carbono. Tal movimento sinaliza um impacto abrangente e profundo nas esferas ambiental, social e econômica, indicando um deslocamento em direção a práticas de desenvolvimento que resguardecam a integridade do nosso planeta e promovam o equilíbrio ecológico (Caineng et al. 2021; Fawzy et al., 2021). Esta transição histórica reflete um afastamento das fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, tradicionalmente dominantes, para um paradigma energético onde predominam as fontes renováveis, delineando uma nova arquitetura de consumo energético destinada a enfrentar a crise climática vigente (Caineng et al., 2021).

Paralelamente, o advento da neutralidade de carbono como um imperativo global sinaliza um avanço significativo, instigando a inovação tecnológica como um vetor essencial para o progresso da sociedade. Sob a égide da Quarta Revolução Industrial (referente a era da tecnologia da inteligência artificial, robótica e internet das coisas) e da Sexta Revolução Tecnológica (referente a inovações no campo da sustentabilidade, biotecnologia e energias renováveis), emerge um cenário caracterizado pela fusão entre tecnologias nucleares, inteligência artificial, exploração espacial e biotecnologia. Tal convergência visa não apenas aprimorar a eficiência energética, mas também harmonizar a dinâmica socioeconômica com os princípios ecológicos, pavimentando o caminho para uma humanidade que aspira um desenvolvimento consonante com a sustentabilidade (Wang et al., 2021).

De maneira geral, existem duas principais abordagens exploradas na literatura referente ao alcance da neutralidade de carbono. A primeira é pautada por iniciativas, políticas e tecnologias para reduzir emissões de CO<sub>2</sub>. A segunda abordagem possui um foco maior na remoção ativa de CO<sub>2</sub> da atmosfera, que também pode ser referida como emissões negativas, promovidas por uma série de novas tecnologias emergentes e soluções baseadas na natureza. A transição de fontes de energia atreladas à combustíveis fósseis, para fontes de energia renováveis são extremamente importantes para que a neutralidade de carbono seja alcançada (Chen et al., 2022). A descarbonização será uma tarefa enorme que envolverá todos os setores de produção (Tirelli & Besana, 2023).

No âmbito do combate às mudanças climáticas, a transição para a neutralidade de carbono emerge como uma prioridade global urgente. Este esforço envolve alcançar um equilíbrio entre as emissões de GEE geradas por atividades humanas e a capacidade do planeta de absorver esses gases, seja através de sumidouros naturais de carbono ou tecnologias avançadas. Zhang et al. (2022) oferecem uma definição abrangente de neutralidade de carbono, destacando-a como um processo pelo qual as emissões de GEE são compensadas por meio de sumidouros de carbono e outras intervenções técnicas, alcançando emissões líquidas zero na atmosfera. Esta definição sublinha o conceito de neutralidade de carbono como derivado de metas de emissões líquidas zero, refletindo a crescente severidade do aquecimento global causado pela emissão de GEE resultantes de atividades humanas. A significância de atingir a neutralidade de carbono é reforçada pela sua identificação como a mais recente exigência para o cumprimento da meta de limitação do aumento da temperatura global em no máximo 2°C, mas com foco em esforços para limitar em 1,5°C, conforme estabelecido pelo Acordo de Paris (Zhang et al., 2022).

A importância da neutralidade de carbono no contexto global é amplamente reconhecida, dado o agravamento das mudanças climáticas. a neutralidade de carbono como um balanço dinâmico entre sistemas emissores de carbono e sistemas sumidouros. A aspiração global de alcançar a neutralidade de carbono até meados do século XXI, conforme comprometido por 126 países, reflete uma conscientização global sobre a necessidade de controlar o aumento da temperatura global, promover a transição energética e impulsionar o desenvolvimento de tecnologias verdes e de baixo carbono (Zou et al., 2021).

Por fim, a humanidade precisa prontamente criar e implementar estratégias para alcançar uma sociedade de carbono neutro. É importante evidenciar que a neutralidade de carbono pode ser alcançada através de um amplo espectro de medidas socioeconômicas, ambientais e tecnológicas. Essas estratégias incluem não só a redução de emissões de CO<sub>2</sub> mas também a remoção de desse gás da atmosfera, sublinhando a complexidade e a necessidade de uma abordagem multifacetada para atingir emissões líquidas zero ou negativas de carbono (Chen et al., 2022).

Consequentemente, no âmbito do combate às mudanças climáticas, faz-se necessário explorar os conceitos e nuances da captura de carbono. Para que se tenha uma neutralidade climática, é necessário alcançar um equilíbrio entre as emissões de GEE geradas por atividades humanas e a capacidade do planeta de absorver esses gases, seja através de sumidouros naturais de carbono, ou a partir de tecnologias de emissão negativa (Fu et al., 2022).

A captura de carbono refere-se a um conjunto de tecnologias e processos que visam remover o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera ou das emissões geradas por atividades humanas. Os mecanismos de captura de carbono podem ser classificados em duas categorias principais: captura artificial e captura natural.

A captura artificial envolve tecnologias que removem o CO<sub>2</sub> das emissões de fontes industriais ou diretamente do ar. Entre as tecnologias de captura artificial, destacam-se a captura pós-combustão, a captura pré-combustão e a captura direta de ar. Cada uma dessas abordagens apresenta métodos distintos para isolar e armazenar o carbono, contribuindo para a descarbonização de diversos setores industriais (Benson & He, 2018; Gibbins & Chalmers, 2017). Essas tecnologias de emissão negativas representam ferramentas vitais para não apenas reduzir as emissões atmosféricas de CO<sub>2</sub>, mas também para reciclar o excesso desse gás (Fu et al., 2022).

Já a captura natural ocorre através de processos biológicos, como a fotossíntese, na qual as plantas, especialmente as árvores, absorvem CO<sub>2</sub> e o convertem em biomassa. A captura natural de carbono está intrinsecamente ligada aos conceitos de "carbono verde" e "carbono azul". O "carbono verde" refere-se ao carbono capturado e armazenado em ecossistemas terrestres, como florestas e solos, enquanto o "carbono azul" se refere ao carbono armazenado em ecossistemas aquáticos, como manguezais e recifes de coral. Ambos os tipos de carbono desempenham papéis essenciais na regulação do clima, pois ajudam a mitigar a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. A preservação e a restauração desses ecossistemas são, portanto, fundamentais para maximizar a captura natural de carbono (Singh et al., 2015; Hilmi et al., 2021).

A captura de carbono por árvores é um dos exemplos mais evidentes de captura natural. As árvores absorvem CO<sub>2</sub> durante a fotossíntese e armazenam o carbono em sua biomassa, incluindo troncos, folhas e raízes. Este processo é especialmente importante em florestas tropicais, que são altamente eficientes em capturar carbono. Além disso, a captura de carbono pelas árvores está diretamente relacionada ao mercado de créditos de carbono voluntário, que permite que empresas e indivíduos compensem suas emissões de CO<sub>2</sub> investindo em projetos de reflorestamento e conservação florestal (Schimel, 2014).

## 1.4 Imposto Pigouviano: Origens do Preço do Carbono

O imposto pigouviano é uma ferramenta fiscal concebida para atenuar externalidades negativas associadas a atividades econômicas e de produção, que geram impactos prejudiciais ao meio ambiente ou à sociedade. A ideia fundamental é que, quando os agentes econômicos não internalizam os custos sociais de suas ações, ocorre uma alocação ineficiente de recursos, resultando em subprodução e superconsumo desses bens ou serviços. Esta abordagem foi desenvolvida pelo economista britânico Arthur Cecil Pigou, como parte de sua obra "*The Economics of Welfare*", lançada em 1920 (Pigou, 1920).

A aplicação desse imposto, requer que o governo imponha uma taxa sobre a produção ou consumo de determinados bens e serviços que geram externalidades negativas. Essa taxa é calculada de forma a internalizar o custo socioambiental dessas externalidades, incentivando os agentes econômicos a considerar tais custos em suas decisões de produção e consumo. Dessa forma, o imposto pigouviano busca corrigir a distorção de mercado e promover uma alocação mais eficiente de recursos, alinhando os interesses privados e públicos com o bem-estar socioambiental (Buchanan, 1969).

Uma aplicação contemporânea do conceito de imposto pigouviano é encontrada nos mercados de carbono, que surgiram como resposta à necessidade de combater as emissões de GEE e mitigar as mudanças climáticas. Nesse contexto, os governos estabelecem limites para as emissões de carbono e emitem permissões de emissão correspondentes a esses limites. As empresas que excedem suas emissões permitidas podem adquirir permissões adicionais de empresas que conseguiram reduzir suas emissões abaixo do limite (Taticchi et al., 2013).

Essas permissões de emissão podem ser compradas e vendidas no mercado de carbono, onde o preço é determinado pela oferta e demanda percebidas no mercado. Teoricamente, o imposto pigouviano é implicitamente incorporado no preço das permissões de emissão, refletindo o custo das emissões de carbono para o meio ambiente e a sociedade. Ao internalizar esse custo, o mercado de carbono incentiva as empresas a reduzirem suas emissões de forma eficiente, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono de maneira mais econômica e sustentável (Nordhaus, 2013).

Portanto, a relação entre o imposto pigouviano e os mercados de carbono reside na aplicação do princípio de internalização de externalidades negativas para abordar os impactos ambientais das atividades econômicas, visando promover uma alocação mais eficiente de recursos e mitigar os danos ao meio ambiente e à sociedade. Os principais pontos abordados por Pigou (1920) na sua obra "*The Economics of Welfare*" está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Principais conceitos explorados por Pigou em sua obra "*The Economics of Welfare*" (1920).

Contribuição	Descrição
--------------	-----------

<b>Externalidades e Intervenção Governamental</b>	Pigou argumenta que o mercado, em determinadas situações, falha em alocar recursos de forma eficiente devido à presença de externalidades (como a poluição). Ele propõe a intervenção do governo, por meio de instrumentos como impostos ou subsídios, para corrigir essas falhas de mercado.
<b>Equilíbrio Competitivo e Bem-Estar Social</b>	O autor explora como o equilíbrio competitivo, embora eficiente em termos de produção, pode não resultar no melhor bem-estar social. Pigou analisa as distorções causadas por externalidades e monopólios, destacando a importância de políticas corretivas para otimizar o bem-estar da sociedade.
<b>Redistribuição de Renda e Justiça Social</b>	Pigou também aborda questões relacionadas à distribuição de renda e justiça social, explorando o papel do governo na promoção de um sistema econômico mais equitativo e inclusivo.
<b>Teoria dos Custos de Produção e Utilidade Marginal</b>	Pigou contribuiu para a teoria dos custos de produção e utilidade marginal, fornecendo insights sobre a relação entre os custos e benefícios individuais e o bem-estar social agregado.

Fonte: Adaptado de Pigou (1920).

## 1.5 Acordos Climáticos

Os acordos climáticos são instrumentos formais que visam coordenar ações entre países para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Esses acordos são essenciais para a mobilização de esforços globais, já que as mudanças climáticas não respeitam fronteiras nacionais e exigem uma resposta coletiva. Esses compromissos podem variar de acordos vinculativos, que estabelecem obrigações legais para os países, a compromissos não vinculativos que buscam fomentar a cooperação voluntária entre nações (Bodansky, 2016). De acordo com o IPCC (2023), esses acordos são fundamentais para a redução das emissões de GEE e a adaptação às consequências das mudanças climáticas.

Um panorama histórico dos acordos climáticos revela um progresso significativo, embora desafiador. A Conferência das Partes (COP) realizada em 1992 na cidade do Rio de Janeiro, Brasil, resultou na criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), que estabeleceu uma plataforma para as negociações climáticas internacionais. Desde então, várias reuniões se destacaram, incluindo a COP3 em Quioto, em 1997, que resultou no Protocolo de Quioto. Este protocolo estabeleceu metas de redução de emissões para países desenvolvidos, mas enfrentou críticas pela sua falta de inclusão de economias em desenvolvimento (Bodansky, 2016; Oberthür, 2018).

Em um marco histórico para a cooperação internacional, a COP21, realizada em Paris em 2015, resultou na adoção do Acordo de Paris. Após quase duas décadas de impasse, as 197 partes da UNFCCC chegaram a um consenso, estabelecendo um novo tratado internacional com o objetivo de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima, no contexto do desenvolvimento sustentável e da erradicação da pobreza (UNFCCC, 2015).

O Acordo de Paris representa um ponto de inflexão na luta global contra as mudanças climáticas, definindo metas ambiciosas para limitar o aumento da temperatura média global a níveis significativamente inferiores a 2°C em relação aos níveis pré-industriais e de envidar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C. No entanto, além das metas numéricas, o acordo reconhece a importância da justiça climática, ou seja, a distribuição equitativa dos ônus e benefícios relacionados às mudanças climáticas, considerando as responsabilidades históricas e as diferentes capacidades dos países (IPCC, 2023).

A questão da justiça climática é central para o Acordo de Paris, pois os países em desenvolvimento, que contribuíram menos para as mudanças climáticas, são os que mais sofrem com seus impactos. Esses países são mais vulneráveis a eventos extremos, e possuem menos recursos para se adaptar às novas condições climáticas. Nesse sentido, o Acordo de Paris estabelece mecanismos para apoiar os países em desenvolvimento na mitigação e adaptação às mudanças climáticas, através do financiamento climático e da transferência de tecnologia (UNFCCC, 2015).

Um dos pilares do Acordo de Paris são as Contribuições Nacionalmente Determinadas (sigla NDCs em inglês), que representam os compromissos individuais de cada país para reduzir suas emissões de GEE e adaptar-se aos impactos das mudanças climáticas. As NDCs são um instrumento fundamental para garantir a participação de todos os países no esforço global de combate às mudanças climáticas, refletindo suas diferentes capacidades e responsabilidades. No entanto, para que as NDCs sejam justas e ambiciosas, é necessário que os países desenvolvidos honrem seus compromissos de financiamento climático e que os países em desenvolvimento recebam o apoio necessário para implementar suas ações (Bulkeley & Newell, 2015).

## **1.6 Contribuições Nacionalmente Determinadas**

As Contribuições Nacionalmente Determinadas são compromissos assumidos por cada país signatário do Acordo de Paris para reduzir suas emissões de GEE e promover ações de adaptação às mudanças climáticas. As NDCs são um componente central da estrutura de tal acordo climático, pois representam os esforços individuais e voluntários de cada país em direção ao objetivo comum de limitar o aumento da temperatura global (IPCC, 2023; Rogelj et al., 2019). Cada país define suas próprias metas de mitigação e adaptação, considerando suas realidades econômicas, sociais e ambientais específicas, o que garante que as NDCs sejam adaptáveis e possam refletir as circunstâncias e prioridades de cada nação (UNFCCC, 2015).

O principal objetivo das NDCs é reduzir as emissões globais de GEE para mitigar as mudanças climáticas e aumentar a capacidade de adaptação dos países aos impactos adversos decorrentes do aquecimento global. Além disso, esses compromissos incluem metas relacionadas à conservação de ecossistemas, desenvolvimento de energias renováveis, proteção de recursos hídricos e promoção de justiça climática, entre outras iniciativas. Em cada ciclo de cinco anos, os países são incentivados a revisar e atualizar suas NDCs para aumentar a ambição climática, o que inclui o fortalecimento das metas de redução de emissões e o aperfeiçoamento de suas estratégias de implementação. Esse mecanismo de revisão periódica reflete a natureza progressiva e

cumulativa das NDCs, pois cada nova versão deve ser mais ambiciosa do que a anterior (Dimitrov, 2016).

Todos os 196 países signatários do Acordo de Paris estão envolvidos na formulação e implementação de NDCs. Essa ampla adesão torna as NDCs um dos mais abrangentes compromissos de cooperação internacional no campo climático. Entre os países participantes, destacam-se as economias de grande emissão, como Estados Unidos, China e Índia, cujas metas têm grande impacto na eficácia global do Acordo de Paris. Países em desenvolvimento e de baixa emissão também participam do processo de forma ativa, muitas vezes com o apoio financeiro e técnico de países desenvolvidos, para que possam alcançar suas metas e contribuir para os objetivos climáticos globais (Bodansky, 2016).

A União Europeia e o Brasil são dois dos principais atores no contexto das NDCs. A UE, que é historicamente uma das regiões de maior emissão, estabeleceu compromissos ambiciosos em suas NDCs, como reduzir suas emissões em pelo menos 55% até 2030 em relação aos níveis de 1990. Esse compromisso reflete o papel da UE como líder em governança climática e incentiva outros países a aumentarem sua ambição (European Commission, 2020). Já o Brasil, com uma das maiores florestas tropicais do mundo e uma rica biodiversidade, comprometeu-se a reduzir suas emissões em 37% até 2025 e 43% até 2030, tomando como base os níveis de 2005. A conservação da Amazônia e a redução do desmatamento são fundamentais para o cumprimento das metas brasileiras, o que coloca o país em uma posição estratégica, porém desafiadora, no contexto global (MMA Brasil, 2020).

## 1.7 Mercados de Carbono

O mercado de carbono ganhou destaque a partir da assinatura do Protocolo de Quioto, em 1997, e sua implementação em 2005. O Protocolo estipulou que países desenvolvidos aderentes deveriam elaborar metas de redução de emissões de GEE, e que países em desenvolvimento poderiam contribuir para que os países desenvolvidos conseguissem atingir suas metas de forma mais custo-efetiva. Foi estabelecido um arranjo no qual países até então sem metas legais de redução de emissões poderiam desenvolver projetos geradores de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), as quais poderiam ser negociadas com países que tivessem metas de redução definidas pelo Protocolo (Prolo et al., 2021; FGV, 2022).

A dinâmica de colaboração entre os países em desenvolvimento e desenvolvidos para que os últimos cumprissem as metas de redução estabelecidas, foi nomeado como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), cujas metas deveriam ser atingidas dentro do período previsto pelo Protocolo de Quioto, que por sua vez teve seu término em 2021 e não conseguiu cumprir com quase nenhuma das metas estabelecidas. A partir desse mecanismo, criou-se um mercado internacional de créditos de carbono, onde a demanda por créditos se origina nos países obrigados pelo acordo ao cumprimento das suas metas, e a oferta é proveniente de países onde existem os projetos de redução de emissões de GEE (ICC Brasil & WayCarbon, 2021; FGV 2022).

Apesar de ser considerado como o principal marco na criação do mercado regulado de créditos de carbono, o mercado criado a partir do Protocolo de Quioto possuía restrições relacionadas aos tipos de metodologias implementadas para o desenvolvimento dos projetos e aos escopos setoriais de atuação, o que provocou a exclusão de alguns participantes e projetos que não atendiam às regras do MDL (Souza et al., 2014). Assim, paralelamente ao mercado de créditos de carbono, surgiram iniciativas no mercado internacional não vinculadas a esse acordo climático global, denominadas de Mercado Voluntário de Carbono (MVC). Nesse ambiente, com regras e metodologias específicas, empresas e instituições que não possuíam obrigações legais de reduzir as emissões, mas que desejavam compensá-las, poderiam adquirir créditos de carbono nesse novo mercado (Prolo et al., 2021).

Os elevados custos de transação e de desenvolvimento de projetos no MDL inviabilizavam a participação de muitas empresas como proponentes de projetos. O mercado voluntário surgiu com a proposta de abrir espaço para o desenvolvimento de projetos com escala que não seriam economicamente viáveis no mercado regulado de créditos de carbono. Nesse sentido, ao estabelecer as diretrizes que permitiram moldar a infraestrutura do comércio de créditos no campo regulado por meio do MDL, o Protocolo de Quioto também contribuiu indiretamente para a determinação dos primeiros padrões para metodologias de compensação de carbono no campo voluntário (Souza et al., 2014).

Em relação ao mecanismo de funcionamento do MVC, cada crédito de carbono representa a redução ou remoção de uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq) – que representa uma medida padrão para expressar o impacto climático de diferentes GEE em relação ao dióxido de carbono – da atmosfera e pode ser negociado entre quem produz e quem deseja compensar emissões, criando um mercado onde a demanda por créditos está atrelada aos compromissos voluntários de organizações para compensar seu impacto ambiental (Kollmuss et al., 2010).

A certificação e registro dos créditos no mercado de carbono voluntário são fundamentais para garantir a transparência e evitar a duplicidade de vendas. Embora o mercado voluntário de carbono não seja regulado por governos nacionais, ele conta com padrões internacionais e é supervisionado por organizações independentes que desenvolvem metodologias e critérios de conformidade para as transações. Essas normas, em grande parte influenciadas pelas diretrizes do Acordo de Paris, promovem a credibilidade dos créditos ao seguir princípios como adicionalidade (assegurando que a redução de emissões ocorre por causa do projeto), permanência e ausência de dupla contagem (Peters-Stanley et al., 2013; World Bank, 2016).

### **1.7.1 Mercado de carbono na Europa**

O mercado de carbono na Europa é estruturado para impulsionar a redução das emissões de GEE através de mecanismos regulados e voluntários. O principal pilar desse sistema é o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (siglas EU ETS em inglês), implementado em 2005, que estabelece um regime de “licença de emissão” no qual os setores com grandes emissões, como energia, transporte e indústrias têm limites de emissões e podem negociar permissões entre si.

Cada permissão representa uma tonelada de CO<sub>2</sub>eq, e as empresas que conseguem reduzir suas emissões abaixo do limite podem vender as permissões excedente (European Commission, 2020).

A estrutura do EU ETS é regulada pela Comissão Europeia, que define o teto de emissões e a alocação inicial de permissões, promovendo um mercado que tem como cumprir o que foi estabelecido no Acordo de Paris (European Commission, 2021). O EU ETS é o maior e mais estabelecido sistema de comércio de emissões no mundo, regulando cerca de 40% das emissões de GEE da União Europeia, que se concentram nos setores industriais e centrais elétricas principalmente. Em 2021, o volume total de transações nesse sistema atingiu aproximadamente 36 bilhões de dólares (Iberdrola, 2024).

Além do EU ETS, a Europa conta com um mercado de carbono voluntário que permite a empresas e indivíduos compensarem emissões através da compra de créditos de carbono gerados por projetos que evitam ou sequestram GEE. Esses créditos são originados em projetos variados, incluindo reflorestamento, energia renovável e agricultura sustentável, que seguem normas rigorosas de certificação para garantir a autenticidade das reduções. O mercado voluntário é regulado por padrões como o *Gold Standard* e o *Verified Carbon Standard (VCS)*, e os créditos gerados são rastreados em bancos de dados como o *Markit Registry*, onde são registrados para evitar duplicidade de transações e para promover transparência (Iberdrola, 2024).

As florestas da União Europeia absorvem anualmente apenas o equivalente a quase 7% das emissões totais de GEE na UE. Em março de 2023, o Parlamento e o Conselho aprovaram novas regras que regem o uso do solo, a alteração do uso do solo e o setor florestal, com o intuito de aumentando os sumidouros de carbono da UE em 15% até 2030 (European Parliament, 2024). Nesse sentido, o investimento em outras regiões do planeta, onde o potencial florestal é maior e pode complementar o alcance das metas europeias, se mostra como sendo uma alternativa viável para o cumprimento do Acordo de Paris.

### **1.7.2 Mercado de carbono no Brasil**

Assim como ocorre na União Europeia, o mercado de carbono brasileiro é composto por duas vertentes principais: o mercado regulado e o mercado voluntário. No entanto, ao contrário do mercado europeu, o Brasil ainda está apenas no início da regulamentação do mercado de carbono. Embora tenha sido aprovado um projeto de lei no final do ano passado que trata sobre o mercado de carbono regulado, ainda falta regulamentar as ações propostas (Câmara dos Deputados, 2023).

O mercado voluntário, por outro lado, já existe há mais tempo, tem crescido substancialmente e opera principalmente com créditos de carbono oriundos de projetos de conservação, regeneração florestal e redução ao desmatamento, com grande foco na região englobada na Amazônia legal. No cenário global, é estimado que a demanda por créditos de carbono possa aumentar 15 vezes ou mais até 2030, e até 100 vezes até 2050. O mercado de créditos de carbono deve saltar de aproximadamente USD 1 bilhão em 2021 para um mercado de pelo menos USD 50 bilhões em 2030 (Mckinsey, 2022). Logo, esse é um nicho onde o investimento tende a ser rentável.

Cerca de 15% de todo o potencial global de captura de carbono por meios naturais está em território nacional do Brasil. Entretanto, a oferta de créditos de carbono no mercado brasileiro ainda é baixa: emite-se atualmente menos de 1% do potencial anual do país, majoritariamente com créditos de projetos de conservação e geração de energia a partir de resíduos. Em relação a adesão das corporações, das 80 principais empresas que atuam no Brasil, 77% já publicaram alguma meta de redução de emissões e 56% ainda não estão alinhadas às recomendações da comunidade científica para atingir o limite de 1,5°C, o que reflete o potencial de demanda nacional do MVC (McKinsey, 2022).

Projetos de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (sigla REDD em inglês) são um dos tipos mais comuns no Brasil, considerando a vasta extensão de floresta tropical que ainda existe no território nacional. Além de evitarem a emissão de GEE provenientes do desmatamento, esses projetos promovem benefícios sociais e econômicos para as comunidades locais, fator que agrega valor para compradores internacionais interessados em apoiar a sustentabilidade. Esse mercado voluntário já atraiu investimentos de grandes corporações globais, especialmente aquelas comprometidas com metas de neutralidade de carbono e que não possuem acesso ao mercado regulado (WWF Brasil, 2021; Terra, 2020).

No final do ano de 2023 o governo federal do Brasil aprovou uma proposta que regulamenta o mercado de carbono regulado no Brasil (PL 2148/15). O texto cria o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) de GEE, que estabelece tetos para emissões e um mercado de venda de títulos, inspirado no sistema europeu EU ETS. A ideia do projeto é criar um limite de emissões de gases do efeito estufa para as empresas. Aquelas que mais poluem, que nesse contexto reflete as empresas com emissões entre 10 mil toneladas de CO<sub>2</sub>eq e 25 mil toneladas de CO<sub>2</sub>eq deverão compensar suas emissões com a compra de títulos. Já as que não atingiram o limite ganharão cotas a serem vendidas no mercado (Câmara dos Deputados, 2023).

A proposta de regulamentação do mercado de carbono brasileiro também trata sobre o MVC. Para os créditos de carbono comercializados fora do mercado regulado, foram criados os Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVEs). Dessa forma, esses créditos de carbono poderão ser emitidos a partir de projetos ou programas de conservação, reflorestamento ou outras estratégias para captura de GEE. Para a conversão de créditos de carbono já existentes em CRVEs será permitida somente mediante a comprovação de que a redução ou remoção de carbono foi realizada de acordo com uma metodologia devidamente aprovada. Esses créditos deverão também ser cadastrados no registro central do SBCE para garantir conformidade com as exigências regulatórias (Câmara dos Deputados, 2023).

Essa implementação de um mercado regulado permitirá que o Brasil, o maior detentor de florestas tropicais do mundo, se integresse ao mercado global de carbono com mais força, contribuindo para o cumprimento dos compromissos nacionais de redução de emissões de GEE, definidos nas NDCs (IBRAM, 2021; IPAM, 2019).

---

---

## 2. Metodologia

O presente capítulo detalha a metodologia empregada na pesquisa, a fim de garantir a transparência do processo e a replicabilidade do estudo. A investigação, de natureza mista, combina abordagens qualitativas e quantitativas para analisar a contribuição do mercado de carbono voluntário brasileiro no cumprimento das metas de redução e compensação de emissões de GEE pela União Europeia no período compreendido entre 1999 e 2023.

Além disso, a metodologia também abrange análises estatísticas de regressão linear e correlação para compreender como se configura a interação entre o mercado voluntário de carbono brasileiro e as evoluções de emissões de GEE da UE ao longo do tempo.

### 2.1 Abordagem da Pesquisa e Fontes de Dados

A escolha por uma abordagem exploratória mista se justifica pela complexidade do objeto de estudo, onde foram realizadas análises qualitativas e quantitativas a fim de proporcionar uma compreensão holística do tema. A análise quantitativa, baseada em dados provenientes de relatórios da Estatísticas da União Europeia (sigla Eurostat em inglês) (2024), Fundação Getúlio Vargas (FGV) (2022) e bem como da base de dados do Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia (IDESAM) (2024), permitiram a identificação de padrões, tendências e quantificação da relação entre as variáveis escolhidas.

Sendo assim, por meio de uma análise estatística bivariada, utilizando-se da metodologia de regressão linear simples, foi possível testar a hipótese da existência de uma correlação entre o aumento da compensação/redução de emissões de GEE por parte do mercado de carbono voluntário brasileiro, e a evolução das emissões por parte da União Europeia, ao longo do período escolhido para a análise (1999 a 2022). Por outro lado, a parcela qualitativa da pesquisa, realizada a partir da análise documental dos mesmos relatórios, possibilitou o aprofundamento e a compreensão das dinâmicas do mercado de carbono voluntário brasileiro e sua interação com as metas europeias, além do entendimento das perspectivas de oportunidades e desafios desse setor, assim como das motivações dos stakeholders envolvidos.

O levantamento de dados secundários em relatórios da Eurostat, e da bases de dados do IDESAM e da Verra *VCS-registry*, forneceram informações detalhadas para a caracterização do mercado de carbono voluntário brasileiro, incluindo a categoria, quantidade e o tamanho dos projetos, e o volume das emissões compensadas. Sobre as emissões da União Europeia, utilizando-se da plataforma Eurostat, foi possível verificar as emissões líquidas dos países membros e a média das emissões per capita ao longo do período escolhido para a análise.

Para que a pesquisa mantenha seu enfoque em projetos de carbono florestal situados exclusivamente na região contemplada pela floresta amazônica, foram analisados somente os que estejam listados nas bases de dados Verra *VCS-registry*, assim como os presentes no painel de projetos de carbono voluntário do mercado de carbono na base de dados do IDESAM – que por sua vez também utiliza dados provenientes da Verra – com filtros aplicados para o Brasil e a região amazônica.

Para complementar, a escolha dessas fontes de dados se justifica pela sua relevância, confiabilidade e abrangência na produção de dados que dizem respeito ao mercado de carbono internacional e suas respectivas áreas de influência. Ademais, nesse contexto, a Verra como fonte principal de dados sobre o MVC brasileiro, se deve pelo fato dessa organização representar a maior autoridade no que se diz respeito a criação de um standard para a verificação de origem e validade de créditos de carbono em todo o mundo. Os dados utilizados para a pesquisa, presentes na base da Verra, foram baixados no dia 23 de outubro de 2024, no site: <https://registry.verra.org/app/search/VCS>.

## 2.2 Equações Utilizadas para as Análises

A mensuração das compensações de emissões de CO<sub>2</sub>eq potenciais totais do MVC brasileiro foram feitas a partir da somatória do acumulado do potencial de redução de emissões de cada projeto por categoria, de acordo com seus respectivos períodos de creditação, de acordo com a Equação (1):

$$\text{Compensação Total de CO}_2 = \sum_{c=1}^c \sum_{i=1}^{n_c} \text{Potencial de Redução}_{i,c} \quad (1)$$

Onde:

- Compensação Total de CO<sub>2</sub>, representa o total de emissões compensadas pelo MVC brasileiro;
- C é o número total de categorias;
- N<sub>c</sub> é o número de projetos dentro da categoria c;
- Potencial de Redução<sub>i,c</sub> é o potencial de redução de emissões do projeto *i* dentro da categoria c.

Já para a realização da estimativa voltada a mensurar o potencial bruto de contribuição do mercado de carbono voluntário brasileiro, a fim de proporcionar uma noção da escala desse setor no país, foi realizado um cálculo para obtenção da porcentagem remanescente faltante para alcançar a meta de redução de emissões almejada, a partir da aferição do valor absoluto de emissões europeias em 2021 – ano em que a Lei Europeia do clima foi aprovada – e quanto isso representa em relação ao valor base do ano de 1990. Como a lei prevê uma redução de 55% das emissões a partir desse período, e a meta atingida até 2021 foi de 30%, foi então calculado o remanescente de emissões que precisam ser reduzidas até 2030.

Dessa maneira, foi realizado o cálculo com base na porcentagem remanescente de 25%, equivalente a uma redução necessária de 1173 mi ton/CO<sub>2</sub>eq., que representa 36,65% do valor observado em 2021. Esse valor foi então dividido pelo número de anos faltantes de 2021 até 2030. O resultado obtido é a média de redução de emissões que teoricamente deveriam ser alcançadas anualmente pela UE. Na sequência, o valor do potencial de redução de missões do MVC brasileiro, em sua totalidade e somente os projetos referentes a Agricultura, Florestas e Uso da Terra (AFOLU), foram divididos pela média previamente encontrada, como demonstrado na Equação (2).

$$\text{Redução Anual Necessária} = \frac{E_{2021} \times 0,3665}{2030 - 2021} \quad (2)$$

Onde:

- $E_{2021}$  é o valor absoluto das emissões europeias em 2021;
- 0,3665 representa, proporcionalmente, o remanescente da meta de redução de 55%, para o período de 2021 a 2030.

Para calcular o potencial de contribuição do MVC brasileiro, o cálculo foi feito dividindo o valor total do potencial de redução do MVC Brasil (ou do setor AFOLU, conforme aplicável) pela Redução Anual Necessária encontrada, e o resultado é multiplicado por 100, para o valor em porcentagem ser obtido, conforme demonstrado na Equação (3) a seguir:

$$\text{Contribuição MVC Brasil} = \frac{\text{Potencial de Redução Anual MVC Brasil}}{\text{Redução Anual Necessária}} \times 100 \quad (3)$$

Já para o setor específico do AFOLU (2021 a 2024), foi utilizada a Equação (4):

$$\text{Contribuição do MVC Brasil (AFOLU)} = \frac{\text{Potencial de Redução do MVC Brasil (AFOLU)}}{\text{Redução Anual Necessária}} \times 100 \quad (4)$$

## 2.3 Hipóteses de Investigação

De maneira a analisar a relação entre o mercado de carbono voluntário brasileiro e o cumprimento das metas de redução de emissões de GEE da União Europeia, foram formuladas as seguintes hipóteses:

**Hipótese 1:** Existe uma correlação estatística positiva entre o valor acumulado da redução de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente no Brasil e o índice de diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente na União Europeia.

**Hipótese 2:** Não existe correlação estatisticamente significativa entre o valor acumulado da redução de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente no Brasil e o índice de diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente na União Europeia.

### Justificativa das Hipóteses:

A literatura sobre mercados de carbono voluntários, Comissão Europeia, FGV e McKinsey & Company, sugere que a expansão desse mercado pode contribuir para a redução global das

emissões de GEE. A escolha de uma relação negativa entre as variáveis é fundamentada na expectativa de que o aumento das compensações de emissões no Brasil, possa influenciar na diminuição das emissões na União Europeia, ambas quantificadas em toneladas métricas de CO<sub>2</sub> equivalente.

#### **Operacionalização das Variáveis:**

Para testar as hipóteses propostas, serão utilizadas as seguintes variáveis:

*Variável independente:* Índice de diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente na União Europeia, emissões europeias líquidas e per capita, calculado com base nos dados da Eurostat.

*Variável dependente:* Somatória do valor acumulado da redução de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente no Brasil, obtido a partir da base de dados do IDESAM.

## **2.4 Métodos de Tratamentos de Dados**

Os dados coletados foram tratados e analisados com o uso da função de análise de dados do software Excel. Primeiramente, aplicou-se a estatística descritiva para caracterizar as variáveis principais e identificar possíveis tendências ou padrões nos dados. Em seguida, foram realizadas análises de correlação e uma regressão linear simples, a fim de explorar a relação entre as variáveis de interesse.

Para investigar a força e direção das associações entre as variáveis, aplicou-se o coeficiente de correlação de Pearson, que fornece uma medida da intensidade e da direção da relação linear. Esse coeficiente varia entre -1 e 1, indicando correlações positivas, negativas ou a ausência de correlação, respectivamente, sendo utilizado um  $n$  de 24 (1990 a 2022), a um nível de significância de 95%.

O modelo de regressão linear simples foi estruturado para investigar a relação entre a redução das emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil, representada pela variável dependente MVCBR, e três variáveis independentes: MIO (emissões em milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente), PCap (emissões per capita da União Europeia) e Index (índice de variação de emissões na europa). Para tanto, foram aplicadas técnicas de regressão linear simples e logarítmica, além de testes complementares para validar os pressupostos estatísticos e a adequação dos modelos ajustados.

A validação dos pressupostos da regressão linear incluiu a análise da normalidade dos resíduos. Foram aplicados os testes de Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors para avaliar se os resíduos seguiam uma distribuição normal. Os resultados indicaram que, na maioria dos modelos, os resíduos não apresentaram normalidade estatística ( $p < 0,05$ ), especialmente nos modelos logarítmicos. Essa falta de normalidade é um comportamento esperado em estudos com dados ambientais e econômicos, que frequentemente apresentam variabilidade alta e padrões complexos.

Adicionalmente, foram analisados gráficos de resíduos padronizados para verificar a presença de heterocedasticidade e possíveis padrões não capturados pelos modelos. Observou-se que os modelos logarítmicos reduziram significativamente a variabilidade residual, evidenciando sua superioridade na modelagem das relações estudadas.

A relação entre as variáveis foi investigada por meio dos modelos de regressão linear simples, conforme descrito na Equação 5, 6 e 7:

$$\begin{aligned} \text{Redução de Emissões (MVC brasileiro)} & \quad (5) \\ & = \beta_0 + \beta_1 \times (\text{Emissões Europeias líquidas}) \end{aligned}$$

Onde:

- $\beta_0$  representa o intercepto do modelo, indicando o valor esperado da redução de emissões do MVC brasileiro quando as emissões europeias são zero;
- $\beta_1$  representa o coeficiente angular ou inclinação, indicando a variação esperada na redução de emissões do MVC brasileiro para cada unidade adicional de emissões europeias.

$$\begin{aligned} \text{Redução de Emissões (MVC brasileiro)} & \quad (6) \\ & = \beta_0 + \beta_1 \times (\text{Emissões Europeias per capita}) \end{aligned}$$

Onde:

- $\beta_0$  representa o intercepto do modelo, indicando o valor esperado da redução de emissões do MVC brasileiro quando as emissões europeias são zero;
- $\beta_1$  representa o coeficiente angular ou inclinação, indicando a variação esperada na redução de emissões do MVC brasileiro para cada unidade de variação das emissões europeias per capita

$$\text{Redução de Emissões (MVC brasileiro)} = \beta_0 + \beta_1 \times (\text{índice base de emissões}) \quad (7)$$

Onde:

- $\beta_0$  representa o intercepto do modelo, indicando o valor esperado da redução de emissões do MVC brasileiro quando as emissões europeias são zero;
- $\beta_1$  representa o coeficiente angular ou inclinação, indicando a variação esperada na redução de emissões do MVC brasileiro para cada unidade de variação do índice.

### **3. Apresentação e Análise de Resultados**

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da metodologia aplicada para essa pesquisa. Conforme delineado no capítulo de introdução, esta pesquisa buscou, de forma geral, analisar a contribuição do mercado de carbono voluntário brasileiro no cumprimento das metas de redução e compensação de emissões de GEE pela União Europeia. Para isso, buscou caracterizar historicamente o mercado voluntário brasileiro, avaliando seu potencial econômico e mensurando sua contribuição para o alcance das metas europeias, a fim de compreender as possíveis motivações de empresas em investir no MVC brasileiro.

Para o cumprimento dos objetivos do estudo foram também elaboradas hipóteses sobre a existência de uma correlação estatisticamente significativa entre a redução/compensação do mercado de carbono voluntário brasileiro e a evolução das emissões de GEE da União Europeia ao longo do tempo.

A revisão da literatura indicou que a comunidade global necessita de uma mudança urgente de paradigma, para que os esforços de adaptação e mitigação à crise climática ajam da maneira mais

rápida e eficiente possível. A interação entre o setor privado, representado por empresas e corporações, e iniciativas de compensação e redução de emissões, por meio de investimento em projetos que geram créditos de carbono no âmbito do mercado de carbono voluntário, se mostra imperativa para que as metas delineadas em acordos climáticos internacionais sejam alcançadas. Consequentemente, isso também reflete para que os cumprimentos das contribuições nacionalmente determinadas sejam efetivamente alcançados em seus respectivos períodos de tempo pré-estabelecidos.

Os resultados serão apresentados em três seções, seguindo a ordem das questões da pesquisa:

- **Seção 1:** Caracterização do Mercado Voluntário de Carbono brasileiro, seguindo uma abordagem qualitativa e utilizando-se de estatística descritiva;
- **Seção 2:** Levantamento das emissões de GEE por parte da União Europeia;
- **Seção 3:** Análise estatística de regressão linear simples, e diagramas de correlação.

É fundamental destacar que este estudo reconhece a presença de outros serviços ecossistêmicos que também contribuem para a redução das emissões de carbono e/ou sua remoção da atmosfera, como aqueles previstos no mecanismo de pagamento por serviços ambientais. No entanto, as análises realizadas neste trabalho focam especificamente nas atividades voltadas à geração de créditos de carbono no mercado voluntário, o qual é regido por padrões internacionais rigorosos de monitoramento e certificação de projetos e créditos.

### 3.1 Caracterização do MVC Brasileiro

Os resultados dessa pesquisa têm início com uma caracterização geral do mercado de carbono voluntário brasileiro, que embora promissor, enfrenta diversos desafios relacionados à sua estrutura, reputação, à metodologia de cálculo de créditos de carbono e à demanda por projetos de alta qualidade. Dessa maneira, este estudo busca contribuir para o avanço do conhecimento e entendimento sobre esse setor emergente, apresentando, primeiramente, uma caracterização detalhada do MVC brasileiro.

O mercado brasileiro de créditos de carbono apresenta um grande potencial de crescimento, impulsionado por fatores como o compromisso do país com as metas do Acordo de Paris, o desenvolvimento de novas políticas públicas, o aumento da demanda por produtos e serviços sustentáveis e necessidade global de transacionar para uma economia de baixo carbono. Netto & Ludena (2015) já apontavam para um grande potencial de geração de créditos de carbono no país, especialmente em setores como a agricultura e o florestal. Espera-se que o mercado continue a se expandir nos próximos anos, com a entrada de novos projetos e a diversificação dos setores envolvidos. De acordo com a McKinsey & Company (2022), em uma de suas publicações a respeito do MVC brasileiro, é exposto que as perspectivas de crescimento para esse setor são um tanto promissoras. É esperado que o valor desse mercado possa atingir, até 2030, a marca dos 200 milhões de dólares, de acordo com as estimativas mais conservadoras, e de 1,5 a 6 bilhões de dólares em cenários mais otimistas.

A partir da análise do gráfico da Figura 1, é possível visualizar a evolução do número de novos projetos de crédito de carbono brasileiro ao longo dos anos.

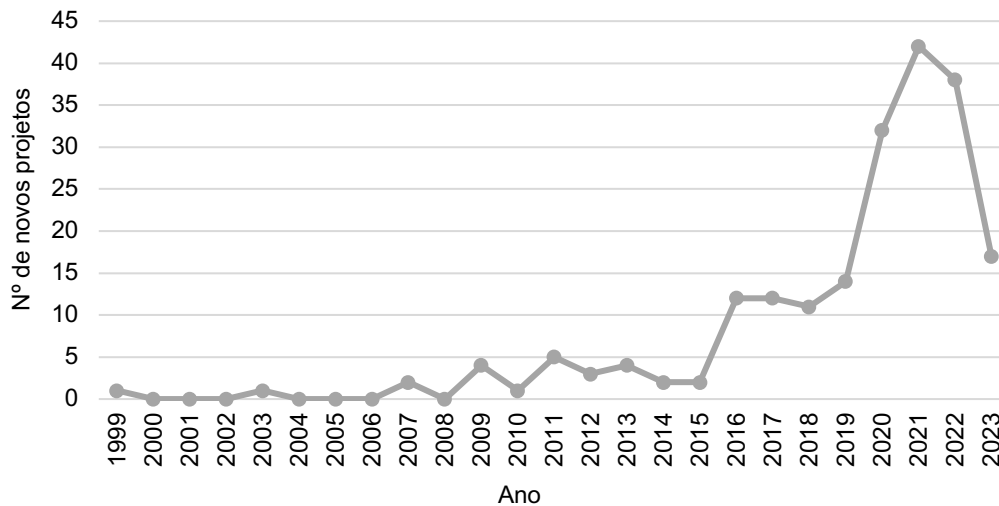


Figura 1: Gráfico da evolução do número de novos projetos de crédito de carbono brasileiro entre 1999 e 2023.

Fonte: Autoria própria (2024).

O gráfico acima ilustra a evolução do número de novos projetos por ano desde a criação do primeiro projeto de carbono voluntário no Brasil, em 1999. É perceptível que após a implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, em 2005, foi quando começaram a surgir mais projetos nesse contexto. Mais marcante ainda, é o salto do número de projetos após o firmamento do acordo de Paris, em 2015. A queda observada de 2020 para 2021, pode ser explicada como uma consequência da pandemia de Covid-19, por mudanças em políticas públicas e pela postura geral das empresas e da comunidade em relação ao mercado voluntário de carbono como um todo, que muitas vezes enfrenta problemas de confiabilidade e de comprometimento com uma gestão adequada desses projetos por parte das empresas inseridas nesse contexto.

No âmbito do Brasil, que possui seu mercado de carbono funcionando no regime voluntário, as empresas interessadas em compensarem suas emissões possuem uma vasta gama de opções de projetos que podem gerar créditos de carbono. As categorias de projetos presentes no MVC brasileiro atualmente estão apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3: Categorias atuais de projetos no MVC brasileiro.

Nome	Tradução PT
<i>Agriculture, Forestry and Other Land Use</i>	Agricultura, Floresta e uso do solo
<i>Energy demand</i>	Demanda energética
<i>Energy industries</i>	Indústria energética
<i>Livestock, enteric fermentation and manure management</i>	Pecuária, fermentação entérica e manejo de esterco
<i>Transport</i>	Transporte
<i>Waste handling and Disposal</i>	Manuseio e descarte de resíduos

Fonte: Autoria própria (2024).

A matriz SWOT apresentada na Tabela 4 em sequência, ajuda a esclarecer alguns aspectos estratégicos centrais que devem ser levados em consideração para um bom entendimento as situação atual do MVC brasileiro.

Tabela 4: Matriz SWOT do panorama do MVC brasileiro.

<b>FATORES INTERNOS</b>	
<b>PONTOS FORTES</b>	<b>PONTOS FRACOS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riqueza de recursos naturais</li> <li>- Reconhecimento internacional</li> <li>- Experiência em projetos sustentáveis</li> <li>- Alinhamento com demandas globais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regulação insuficiente</li> <li>- Infraestrutura e capacidade técnica limitada</li> <li>- Desconfiança e dificuldade de verificação</li> <li>- Dependência de investimento externo</li> </ul>
<b>FATORES EXTERNOS</b>	
<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>AMEAÇAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento da demanda global por créditos de carbono</li> <li>- Inovação e desenvolvimento Tecnológico</li> <li>- Expansão da regulação</li> <li>- Parcerias internacionais e acordos bilaterais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desmatamento e pressões agrícolas</li> <li>- Concorrência internacional</li> <li>- Volatilidade do mercado</li> <li>- Critérios e padrões de qualidade mais rigorosos</li> </ul>

Fonte: Autoria própria (2024).

Resumindo a matriz SWOT acima, o mercado de carbono voluntário brasileiro tem grande potencial devido à sua riqueza natural e crescente demanda global por sustentabilidade, mas enfrenta desafios de regulação, desconfiança e competição. A criação de uma estrutura regulatória clara, como a PL 2148/15 – proposta de regulamentação do mercado de carbono do governo federal brasileiro – e investimentos em inovação e monitoramento podem fortalecer sua posição e atração no mercado internacional.

É válido ressaltar que, como é possível observar no gráfico da Figura 2, existem diversos projetos que pode contemplar mais de uma única categoria, o que demanda uma atenção para que não haja duplicidade nas análises.

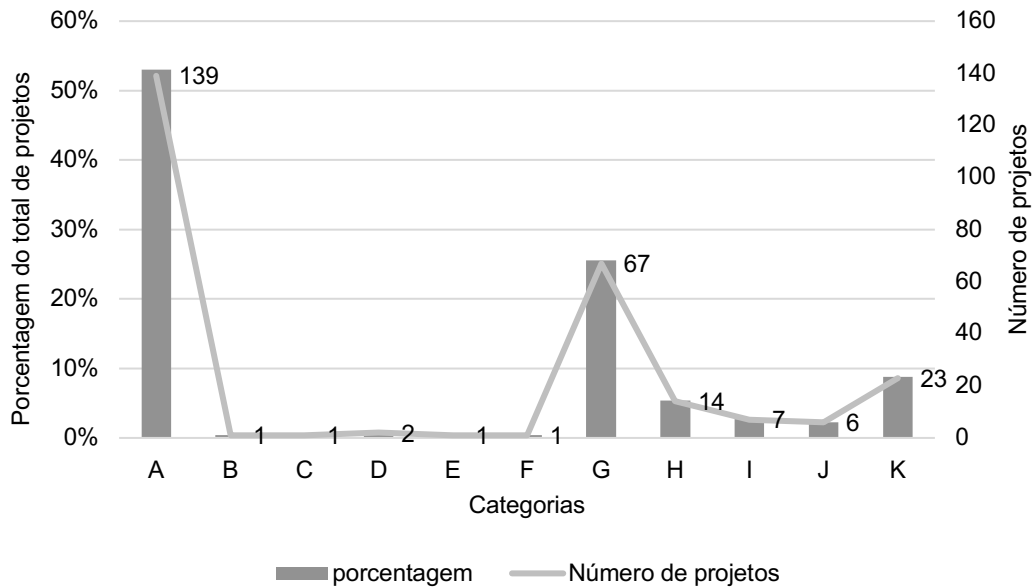


Figura 2: Gráfico de número de projetos por categorias.

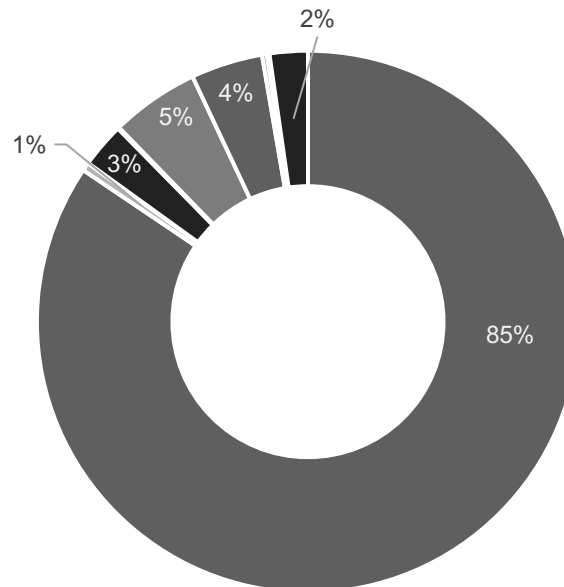
Nota: A legenda do eixo Categorias deve ser interpretada como:

- A) *Agriculture Forestry and Other Land Use* (Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra, em português).
- B) *Agriculture Forestry and Other Land Use; Energy industries (renewable/non-renewable sources)* (Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra; Indústrias de Energia (fontes renováveis/não renováveis), em português).
- C) *Agriculture Forestry and Other Land Use; Livestock, enteric fermentation, and manure management* (Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra; Pecuária, fermentação entérica e gerenciamento de esterco, em português).
- D) *Agriculture Forestry and Other Land Use; Waste handling and disposal* (Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra; Manuseio e descarte de resíduos, em português).
- E) *Energy demand* (Demanda energética, em português).
- F) *Energy industries (renewable/non-renewable sources)* (Indústrias de energia (fontes renováveis/não renováveis), em português).
- G) *Energy industries (renewable/non-renewable sources); Waste handling and disposal* (Indústrias de energia (fontes renováveis/não renováveis); Manuseio e descarte de resíduos, em português).
- H) *Livestock, enteric fermentation, and manure management* (Pecuária, fermentação entérica e gerenciamento de esterco, em português).
- I) *Transport* (Transporte, em português).
- J) *Waste handling and disposal* (Manuseio e descarte de resíduos, em português).

Fonte: Autoria própria (2024).

Dentre os tipos de projetos presentes no mercado brasileiro, os englobados pela categoria *Agriculture Forestry and Other Land Use*, estão em maior número, representando 53,05% do total de projeto, seguido pelas categorias *Energy industries* (25,57%), *Waste Handling and Disposal* (8,78%), *Livestock, enteric fermentation and manure management* (2,67%) e *Trasnport* (2,29%). As demais frequências representam projetos que estão inseridos em mais de uma categoria, são eles: *Energy industries (renewable/non-renewable sources); Waste handling and disposal* (5,34%), *Agriculture Forestry and Other Land Use; Livestock, enteric fermentation, and manure management* (0,76%), *Agriculture Forestry and Other Land Use; Energy industries (renewable/non-renewable sources)* (0,38%), *Agriculture Forestry and Other Land Use; Energy industries (renewable/non-renewable sources); Waste handling and disposal* (0,38%), *Agriculture Forestry and Other Land Use; Waste handling and disposal* (0,38%) e *Energy demand* (0,38%).

O Status dos projetos na base de dados Verra *VCS-registry* também fora levado em consideração para a elaboração da pesquisa. Nem todos os projetos listados estão em fase de execução, e muito menos gerando créditos de carbono, como descrito no gráfico abaixo. Sendo assim, foi delineado apenas o potencial anual de redução de emissões de cada categoria de projetos cadastrados atualmente no MVC brasileiro, o que não reflete necessariamente na quantidade de créditos de carbono que está efetivamente sendo gerada atualmente. O valor total do potencial das reduções de emissões, corresponde a somatória das emissões acumuladas dos projetos por categoria, está apresentado na Figura 3.



- Agriculture Forestry and Other Land Use
- Agriculture Forestry and Other Land Use; Energy industries (renewable/non-renewable sources)
- Agriculture Forestry and Other Land Use; Energy industries (renewable/non-renewable sources); Waste handling and disposal
- Agriculture Forestry and Other Land Use; Livestock, enteric fermentation, and manure management
- Agriculture Forestry and Other Land Use; Waste handling and disposal
- Energy demand
- Energy industries (renewable/non-renewable sources)
- Energy industries (renewable/non-renewable sources); Waste handling and disposal
- Livestock, enteric fermentation, and manure management
- Transport
- Waste handling and disposal

Figura 3: Gráfico do potencial de redução de emissões por categoria.

Fonte: Autoria própria (2024).

As reduções estimadas de emissões anuais estão distribuídas entre diferentes setores, conforme observado nos dados apresentados. O setor de Agricultura, Florestas e Outros Uso da Terra (AFOLU) representa a maior contribuição, com uma redução estimada de 86.828.210 toneladas, o

que corresponde a 84,46% do total das reduções. Esse valor expressivo destaca a importância desse setor nas estratégias de mitigação de emissões de GEE.

O setor de Indústrias de Energia (fontes renováveis e não renováveis) apresenta uma contribuição significativa, com 5.426.006 toneladas de redução, correspondendo a 5,28% das reduções totais. Além disso, a combinação desse setor com a Gestão de Resíduos resulta em uma redução adicional de 4.402.746 toneladas, ou 4,28%.

A combinação de Agricultura, Florestas e Uso da Terra com a Gestão de Animais, Fermentação Entérica e Manejo de Estercos contribui com uma redução de 2.754.605 toneladas, equivalente a 2,68% do total. A Gestão de Resíduos, por sua vez, é responsável por uma redução de 2.339.893 toneladas, o que representa 2,28% do total.

A combinação entre AFOLU e as Indústrias de Energia (fontes renováveis e não renováveis) apresenta uma redução de 500.000 toneladas, correspondendo a 0,49% do total. A Gestão de Animais, Fermentação Entérica e Manejo de Estercos, de forma isolada, contribui com 304.233 toneladas, representando 0,30% das reduções.

O setor de Transporte adiciona 151.460 toneladas, equivalente a 0,15% do total. Em termos de demanda energética, a redução estimada é de 47.404 toneladas, representando 0,05%. Já a combinação entre AFOLU e a Gestão de Resíduos resulta em uma redução de 40.267 toneladas, o que corresponde a 0,04%.

Por fim, a combinação de AFOLU, Indústrias de Energia (fontes renováveis e não renováveis) e Gestão de Resíduos apresenta uma redução estimada de 24.279 toneladas, correspondendo a 0,02% do total.

No total, as reduções anuais estimadas somam 102.819.103 toneladas de emissões, distribuídas entre os diferentes setores e subcategorias, com destaque para a predominância do setor de AFOLU.

O gráfico apresentado na Figura 4 denomina a situação em que os projetos se encontram, de acordo com o que consta na base Verra *VCS-registry*.

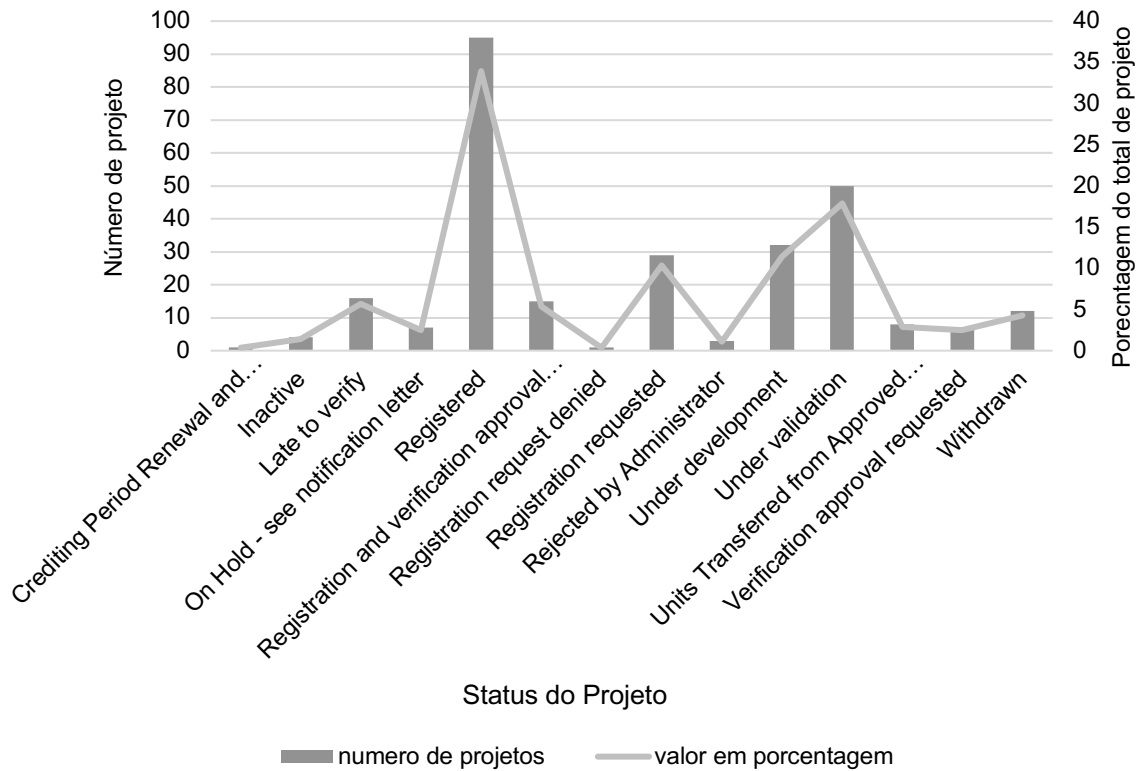


Figura 4: Gráfico de Status por número de projetos.

Fonte: Autoria própria (2024).

A distribuição dos projetos entre diferentes status revela que a maioria se encontra na fase de *Registered* (Registrado, em português), com 95 projetos, o que corresponde a 33,93% do total. Este é o status mais frequente, indicando que mais de um terço dos projetos já foi formalmente registrado e está em conformidade com as exigências estabelecidas. Em seguida, o status de *Under validation* (Em validação, em português) possui 50 projetos, representando 17,86% do total. Isso sugere que uma parte significativa dos projetos ainda está passando pelo processo de validação, etapa crucial para garantir a conformidade com os padrões necessários antes da implementação final. O status de *Under development* (Em desenvolvimento, em português) é o terceiro mais frequente, com 32 projetos, o que corresponde a 11,43%. Este grupo de projetos está em fase de desenvolvimento, ainda preparando-se para as etapas de validação e registro. O status *Registration requested* (Solicitação de registro, em português), conta 29 projetos, que representam 10,36% do total. Tais projetos estão aguardando aprovação formal para seguirem para a etapa de registro.

Os projetos em *On Hold - see notification later* (Em espera - ver carta de notificação, em português) somam 16 projetos, correspondendo a 5,71% do total. Esses projetos estão temporariamente suspensos aguardando resoluções de questões específicas. A categoria *Registration and verification approval requested* (Solicitação de aprovação de registro e verificação, em português) inclui 15 projetos, equivalentes a 5,36%. Esses projetos estão aguardando tanto a aprovação de registro quanto a verificação. Os status de *Withdrawn* (Retirado, em português) e *Verification approval requested* (Solicitação de aprovação de verificação, em português) contam cada um com

12 e 7 projetos, representando 4,29% e 2,50% do total, respectivamente. O primeiro grupo envolve projetos retirados do processo, enquanto o segundo está na fase de aprovação de verificação.

Além disso, a categoria *Units Transferred from Approved GHG Program* (Unidades transferidas de programas aprovados de GEE, em português) inclui 8 projetos, ou 2,86% do total, indicando transferência de unidades de programas de GEE aprovados. A categoria de *Late to verify* (Atraso na verificação, em português) conta com 4 projetos, representando 1,43%. Esses projetos estão com o processo de verificação atrasado. O status de *Rejected by Administrator* (Rejeitado pelo administrador, em português) inclui 3 projetos, o que equivale a 1,07%. Por fim, tanto a categoria *Crediting Period Renewal and Verification Approval Requested* (Renovação do Período de Crédito e Solicitação de Aprovação de Verificação, em português) quanto a *Registration request denied* (Solicitação de registro negada, em português) possuem 1 projeto cada, correspondendo a 0,36% do total. Esses dois grupos representam situações pontuais, onde o primeiro aguarda a renovação do período de crédito e aprovação da verificação, e o segundo teve a solicitação de registro recusada.

### 3.2 MVC Brasileiro, Setor AFOLU

Como visto no capítulo de revisão bibliográfica, o setor AFOLU engloba um conjunto de atividades humanas que interagem diretamente com o uso da terra e, conseqüentemente, exercem um papel crucial no ciclo do carbono e nas mudanças climáticas. Esse setor abrange desde a produção agrícola e pecuária até o manejo florestal e as mudanças no uso do solo, como o desmatamento e a conversão de áreas naturais para fins agrícolas.

Como um dos principais focos de análise dessa pesquisa são os projetos de carbono florestal do mercado de carbono voluntário brasileiro, essa seção busca destacar, no contexto do MVC brasileiro, as respectivas categorias dos projetos que estão inclusas no setor denominado AFOLU. Os projetos podem ser denominados como, ACOGS, ALM, ARR, IFM e REDD, e são explicados na Tabela 5:

Tabela 5: Categorias presentes no setor Agricultura, Florestas e Outros Uso da Terra (AFOLU).

<b>Categoria</b>	<b>Significado</b>	<b>Tradução PT</b>
ACOGS	<i>Avoided Conversion of Grasslands and Shrublands</i>	Conversão evitada de pastagens e arbustos
ALM	<i>Agricultural Land Management</i>	Gestão de terras agrícolas
ARR	<i>Afforestation, Reforestation &amp; Revegetation</i>	Florestamento, Reflorestamento & Revegetação
IFM	<i>Improved Forest Management</i>	Gestão melhorada de florestas
REDD	<i>Reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries</i>	Redução das emissões causadas pelo desmatamento e degradação florestal em países em desenvolvimento

Fonte: Autoria própria (2024).

No MVC brasileiro atualmente existem 159 projetos brasileiros listados na base de dados Verra VCS-registry, suas categorias seguem a distribuição apresentada no gráfico da Figura 5:

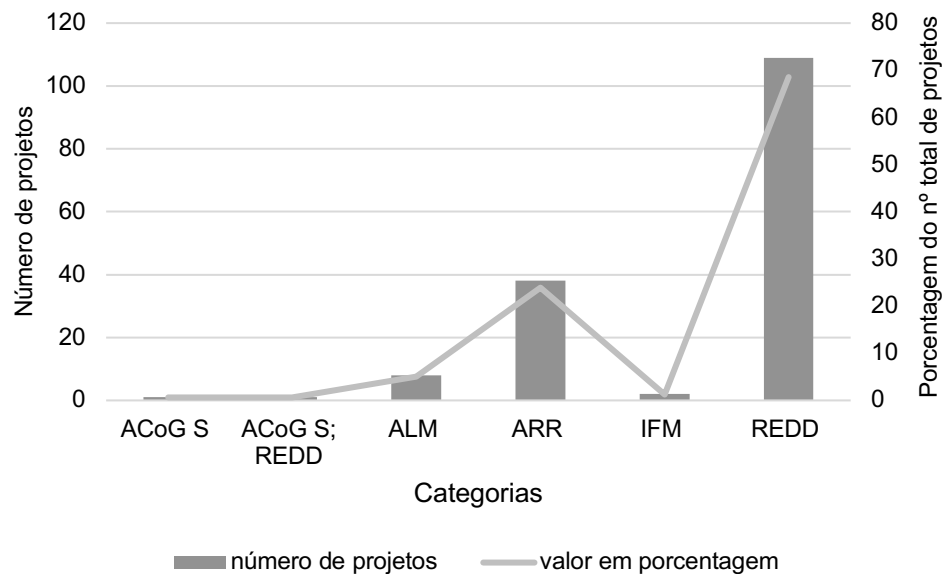


Figura 5: Gráfico do número de projetos por categorias do AFOLU.

Fonte: Autoria própria (2024).

Os dados presentes sobre o número de projetos AFOLU no Brasil por categoria mostram que há um total de 159 projetos distribuídos em seis categorias principais. A categoria mais representativa é REDD (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação), com 109 projetos, o que corresponde a 68,55% do total, destacando-se como a abordagem mais adotada no país. Em seguida, temos a categoria ARR (Reflorestamento e Recuperação de Áreas Degradadas), com 38 projetos que representam 23,90% do total. Isso indica um foco muito perceptível em iniciativas de recuperação de áreas e prevenção do desmatamento.

A categoria ALM (Gestão de terras agrícolas) conta com 8 projetos, equivalendo a 5,03% do total, refletindo uma menor, mas significativa presença de projetos relacionados ao manejo de terras agrícolas. A categoria IFM (Gestão melhorada de florestas) possui 2 projetos, correspondendo a 1,26% do total, destacando práticas de manejo florestal aprimoradas. As categorias ACOGS (Conversão evitada de pastagens e arbustos) e ACOGS; REDD apresentam cada uma apenas 1 projeto, correspondendo individualmente a 0,63% do total. Esses dados refletem uma menor concentração de iniciativas nessas áreas específicas.

Em síntese, observa-se que a maior parte dos projetos AFOLU no Brasil está concentrada em REDD, seguida por ARR, enquanto as demais categorias apresentam uma participação menos expressiva. Essa diferença expressiva pode ser explicada pelo fato de que o Brasil possui o maior potencial do mundo para atividades ligadas à prevenção do desmatamento e recuperação de áreas degradadas. De acordo com dados da McKinsey & Company (2022), o Brasil possui cerca de 15% de todo o potencial global de captura de carbono por meios naturais.

A seguir, na Figura 6 é demonstrado, exclusivamente, qual é o potencial de redução de emissões dos projetos inclusos no setor AFOLU.

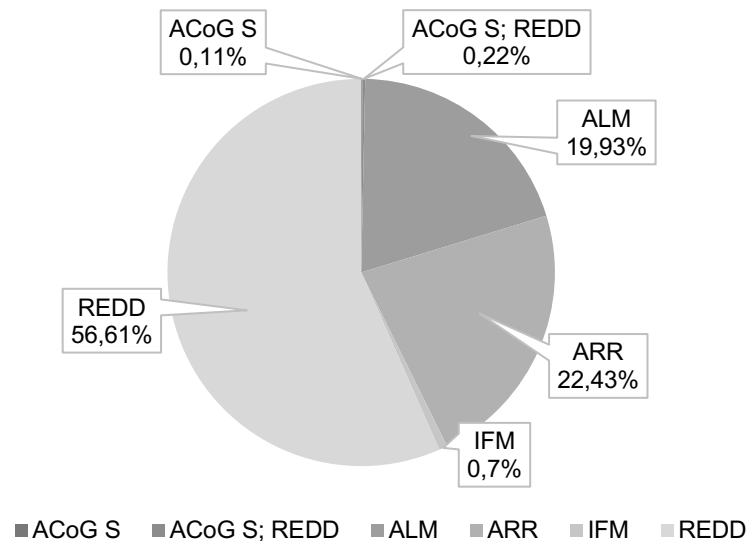


Figura 6: Gráfico do potencial de redução de emissões de GEE por categoria de AFOLU.

Fonte: Autoria própria (2024).

A análise do gráfico demonstra que dentre os projetos presentes no MVC brasileiro, dentro das várias categorias de projetos AFOLU no Brasil, a categoria Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação é a mais proeminente com 56,61%, resultando em uma redução estimada de 51.032.415 de CO<sub>2</sub>eq. por ano. Em seguida está a categoria Reflorestamento e Recuperação de Áreas Degradadas, que contribui com 22,43% das reduções totais correspondendo a 20.217.940 toneladas de CO<sub>2</sub>eq. Na terceira posição está o Gestão de Terras Agrícolas, com 17.968.224 toneladas de emissões de CO<sub>2</sub>eq. evitadas, que correspondem a 19,93 % do total de emissões reduzidas. Outras áreas contribuem com uma parcela menor do total de reduções de emissões. Os projetos de Gestão Florestal Aprimorada, que representa 0,70% e uma diminuição estimada de 628.782 toneladas de CO<sub>2</sub>eq. Já as categorias Conversão evitada de pastagens e arbustos e ACOGS; REDD somam reduções de 100.000 e 200.000 toneladas de CO<sub>2</sub>eq., respectivamente, o que representa 0,11% e 0,22% do total de emissões evitadas.

Estas informações indicam que as atividades de REDD têm o maior impacto em termos de capacidade de redução de emissões, seguidas ARR e ALMs. Enquanto outras categorias podem ser menos significativas em termos absolutos, elas ainda assim contribuem para os esforços de redução das emissões no contexto do MVC brasileiro. De maneira geral, é esperado que o setor AFOLU represente um total de redução de emissões correspondente a 90.147.361 de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. para o ano de 2024, essa estimativa leva em conta todos os projetos que tenham atividades AFOLU em sua execução, mesmo que combinado a outras categorias como: Demanda energética; Indústria energética; Pecuária, fermentação entérica e manejo de esterco; e manuseio e transporte de resíduos.

A estimativa realizada nessa pesquisa está ligeiramente acima da estimativa realizada pelo IDESAM, que estima que o número total de redução de emissões seja de 88.691.177 toneladas de CO<sub>2</sub>eq. A diferença de aproximadamente 1.5 milhões de toneladas pode ser explicada pelo fato de que essa pesquisa utiliza dados ligeiramente mais atualizados, uma vez que o IDESAM, no momento de elaboração dessa pesquisa, aponta a última atualização do seu painel de projetos de carbono florestal do setor AFOLU com os dados da Verra VCS-registry, como sendo no dia 10 de outubro de 2024, enquanto os dados utilizados para as análises da presente pesquisa foram retirados da mesma base de dados no dia 24 de outubro de 2024.

Como nem todos os projetos estão em fase de execução, assim como no tópico anterior, foram delineados os status dos projetos que estão dentro do setor AFOLU, no gráfico da Figura 7.

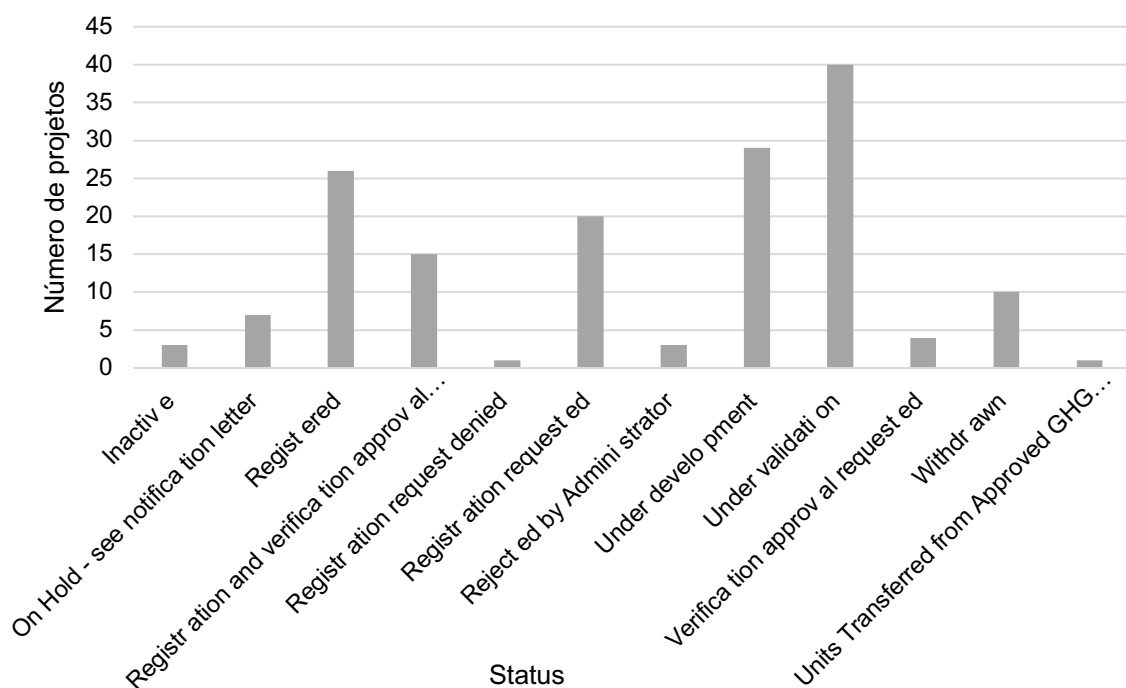


Figura 7: Gráfico do número de projetos AFOLU por status.

Fonte: Autoria própria (2024).

A análise dos dados sobre os projetos do setor AFOLU no mercado de carbono voluntário no Brasil mostra que há uma grande concentração em algumas etapas. A categoria *Under validation* é a maior, com 40 projetos, que corresponde a 25,16% do total. A categoria *Under development* vem em seguida, com 29 projetos, ou 18,24% do total. O status *Registered* também tem um número considerável, somando 26 projetos, ou 16,35% do total de projetos AFOLU.

Outros status, como *Registration requested* e *Registration and verification approval requested*, têm 20 e 15 projetos, respectivamente, equivalendo a 12,58% e 9,43%. A categoria *Withdrawn* compreende 10 projetos, ou 6,29%, enquanto *On Hold - see notification letter* e *Verification approval requested* têm, respectivamente, 7 e 4 projetos, que representam 4,40% e 2,52%. Os outros status são menos expressivos, como *Inactive* e *Rejected by Administrator*, ambos com 3 projetos cada, o que é 1,89%. Por fim, as categorias *Registration request denied* e *Units Transferred from Approved*

GHG Program têm apenas 1 projeto cada, representando 0,63% do total. Essa distribuição mostra que a maioria dos projetos ainda está em desenvolvimento ou validação, indicando um mercado em crescimento, com projetos em vários estágios.

O mapa da Figura 8, retirado da base de dados do IDESAM, no link <https://idesam.org/en/painelprojetoscarbonoflorestal/>, no dia 24 de outubro de 2024, traz uma representação visual da distribuição geográfica dos projetos de carbono que cumprem as premissas necessárias para serem categorizados como pertencentes ao setor AFOLU no território brasileiro.



Figura 8: Mapa indicando a localização dos projetos AFOLU no Brasil.

Fonte: IDESAM (2024).

O mapa demonstra que existe uma grande concentração de projetos na área denominada como Amazônia legal, predominantemente nos estados do norte do país, presente nos Estados do Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia, e Região norte do estado no Mato Grosso. As regiões Sul e Sudeste apresentam também certa variedade de projetos, muitos deles presentes próximos ao litoral, região onde é possível de se encontrar os últimos remanescentes de Mata Atlântica preservada. Os estados do Paraná e São Paulo, juntos, possuem a maior faixa de Mata Atlântica preservada atualmente. O Pantanal, outro bioma brasileiro que enfrenta grande perigo, presente nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul também possui alguns projetos. Também nota-se que a região brasileira com menor número de projetos está localizada no nordeste, onde o bioma predominante é a caatinga.

Também é válido que seja feita uma análise a respeito da categoria fundiária em que os projetos de carbono voluntário se enquadram. Como o regime do mercado de carbono brasileiro, até então, é voluntário, ele depende de empresas firmarem parcerias com o governo, com outras empresas e

até mesmo com pessoas físicas que possuem áreas onde existe a intenção de preservação, restauração, ou qualquer outra atividade que possa gerar créditos de carbono. A seguir, o gráfico apresentado na Figura 9 expõe em quais categorias fundiárias os projetos se encontram.

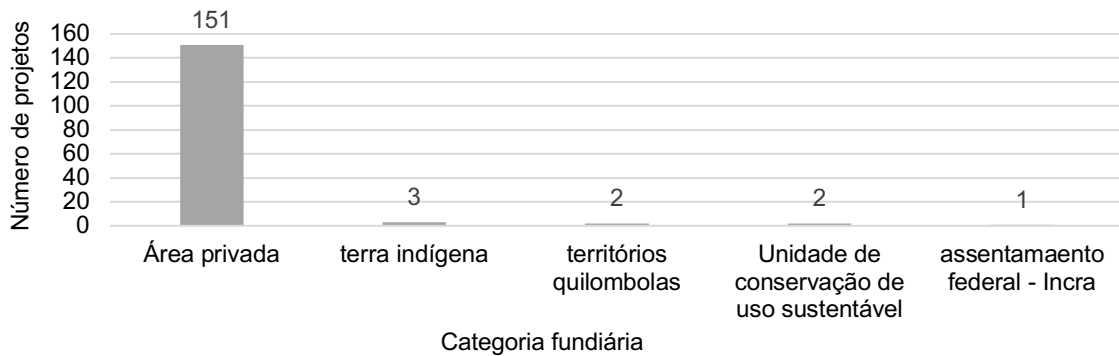


Figura 9: Gráfico da distribuição fundiária dos projetos AFOLU brasileiros.

Fonte: Autoria própria (2024).

O gráfico apresentado detalha a distribuição de projetos no mercado voluntário de carbono brasileiro, classificados por categoria fundiária. A categoria fundiária que concentra a maior parte dos projetos no mercado voluntário de carbono brasileiro é a área privada, com um total de 151 projetos, representando 95% do total. Essa predominância indica que a maior parte das iniciativas de redução de emissões e geração de créditos de carbono está sendo desenvolvida em propriedades particulares.

Em contrapartida, as demais categorias fundiárias apresentam uma participação significativamente menor. Terras indígenas e territórios quilombolas concentram 3 e 2 projetos, respectivamente, correspondendo a 1,9% e 1,3% do total. Unidades de conservação de uso sustentável e assentamentos federais INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) possuem 2 e 1 projeto, equivalendo a 1,3% e 0,6% do total, respectivamente.

Os resultados evidenciam uma concentração expressiva de projetos em áreas privadas, sugerindo que o mercado voluntário de carbono brasileiro está mais desenvolvido em propriedades particulares. Essa concentração pode ser explicada por diversos fatores, como maior acesso a recursos financeiros, maior conhecimento sobre as oportunidades do mercado e maior facilidade para implementar projetos nessas áreas.

A baixa participação de terras indígenas, territórios quilombolas, unidades de conservação e assentamentos indica a necessidade de políticas públicas e iniciativas e incentivos específicos para fomentar o desenvolvimento de projetos de carbono nessas áreas. Essas categorias fundiárias possuem um importante papel na conservação da biodiversidade e na mitigação das mudanças climáticas, e sua inclusão no mercado de carbono pode gerar benefícios socioambientais significativos. Outro aspecto importante que deve ser levado em consideração, é que tais áreas estão sob domínio público, o que dificulta a criação de projetos em termos de mercado voluntário de carbono. Além disso, muitas das áreas públicas de preservação ambiental no norte do Brasil

passam por disputas fundiárias ou se encontram sob uma gestão precária, o que dificulta ainda mais a implementação de projetos de MVC.

### 3.3 Perfil das emissões de GEE na União Europeia

Para enriquecer a análise dessa pesquisa, e procurar identificar a contribuição do MVC brasileiro para o cumprimento das metas de redução de emissões da União Europeia, é necessário quantificar as emissões de GEE. A análise dessas emissões, ao longo das últimas décadas, é essencial para compreender as transformações implementadas em sua política ambiental e de transição energética para uma economia de baixo carbono.

O gráfico da Figura 10, representa a evolução das emissões líquidas da União Europeia durante o período analisado de 1990 a 2022, onde as barras representam o índice que começa em 1990, representando 100%, e a linha de tendência representa as emissões líquidas da UE.

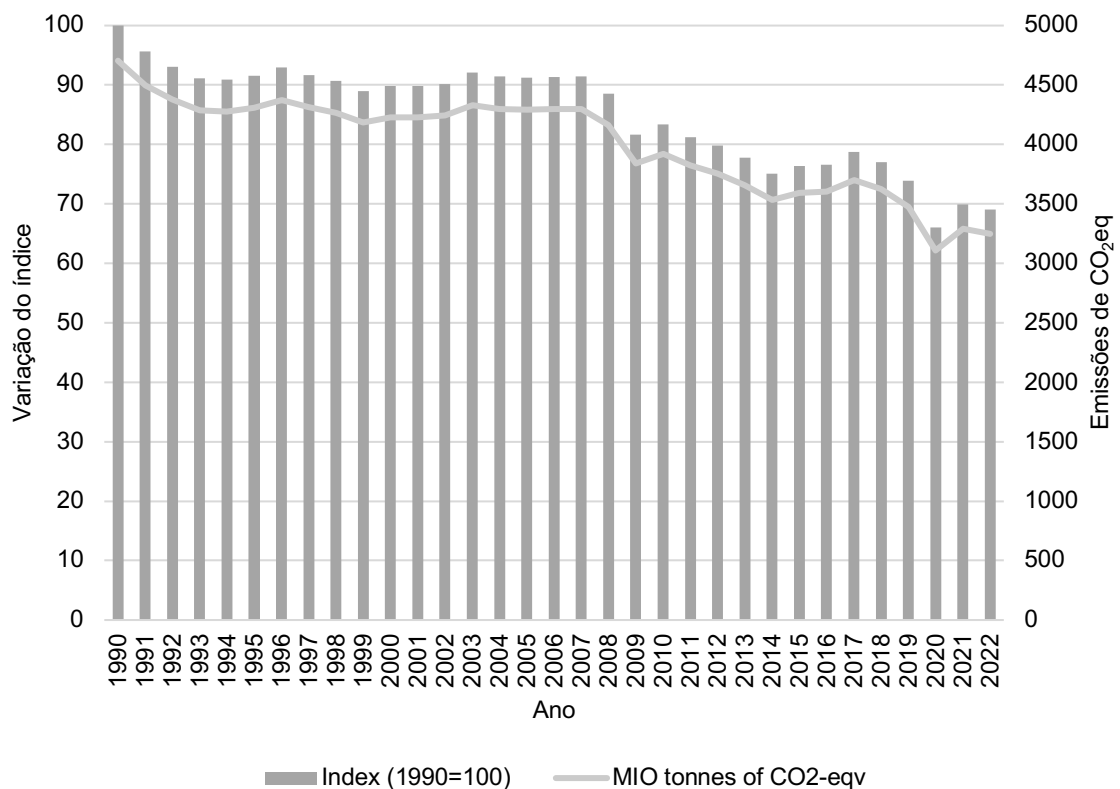


Figura 10: Gráfico da evolução das emissões líquidas da União Europeia durante o período de 1990 a 2022.

Fonte: Autoria própria (2024).

O gráfico acima mostra a evolução das emissões líquidas de GEE (CO<sub>2</sub> equivalente) na União Europeia entre 1990 e 2022. Observa-se que o índice de emissões, tomando 1990 como referência (100), segue uma tendência de queda ao longo dos anos, com oscilações pontuais. Em 1990, o total de emissões era de aproximadamente 4704 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq., e o índice era 100. Já em 2022, o índice caiu para cerca de 69,04, e as emissões diminuíram significativamente, alcançando 3248 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq.. Isso representa uma redução de aproximadamente 30,94% no índice de emissões em relação a 1990. Em termos absolutos, as

emissões de CO<sub>2</sub>eq. caíram cerca de 31% no período, de 4704 milhões para 3248 milhões de toneladas. Este declínio nas emissões totais reflete políticas e medidas ambientais que foram sendo aprimoradas ao longo dos anos. As maiores reduções ocorrem em momentos específicos, como em 2008-2009, período da crise financeira global, e em 2020, durante a pandemia do COVID-19, eventos que reduziram temporariamente as atividades econômicas, especialmente as de setores mais intensivos em carbono.

O gráfico da Figura 11 aborda a variação das emissões anuais per capita, em toneladas de CO<sub>2</sub>eq., dos habitantes da União Europeia ao longo do período de 1990 até 2022, combinado ao mesmo índice utilizado no gráfico anterior

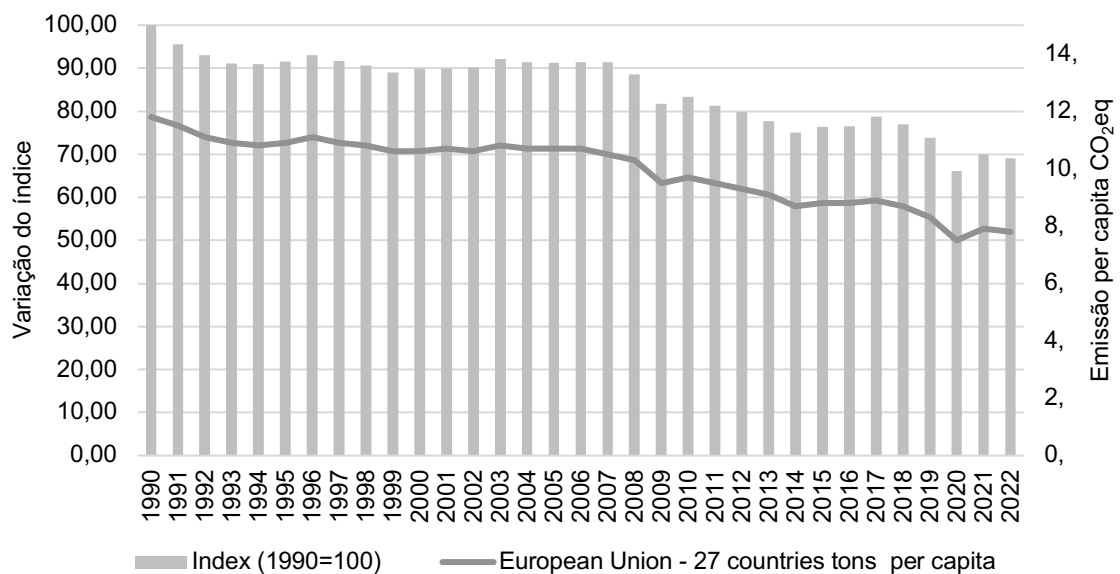


Figura 11: Gráfico da evolução das emissões de GEE per capita na união europeia.

Fonte: Autoria própria (2024).

A partir dos dados sobre a evolução das emissões de CO<sub>2</sub>eq. per capita na União Europeia, nota-se uma redução contínua nas emissões ao longo do período analisado, com flutuações pontuais. Em 1990, as emissões per capita eram de 11,8 toneladas, marcando o início da série temporal. De lá, até 2022, os dados apresentam uma tendência de queda, atingindo 7,8 toneladas per capita em 2022. Ao observar o índice relativo ao ano base de 1990 (Index 1990=100), verifica-se que ele também mostra uma tendência de redução ao longo do período. Em 1990, o índice inicia com o valor de 100,0. Em 2022, esse índice registra 69,04, refletindo a redução significativa nas emissões em comparação ao início da série. Esses índices e os valores absolutos de emissões mostram que as políticas e as iniciativas da União Europeia voltadas para a redução de emissões tiveram efeito, especialmente com quedas mais acentuadas a partir de 2008, coincidindo com períodos de crise econômica e intensificação de políticas ambientais.

Assim, observa-se uma redução total de aproximadamente 33,90% nas emissões de CO<sub>2</sub>eq. per capita da União Europeia entre 1990 e 2022. Essa redução significativa reflete os esforços contínuos

da região para mitigar o impacto ambiental e diminuir a intensidade de carbono na economia ao longo das últimas três décadas.

De maneira a aprofundar a compreensão em relação ao perfil das emissões de GEE da União Europeia, a Tabela 6 traz um levantamento comparativo dos anos 1990 e 2021, expondo quais as quantidades dos principais gases atrelados às mudanças climáticas antropogênicas, divididos entre os principais setores emissores de GEE, na economia europeia. A escala usada para quantificar o volume de emissões é milhões de toneladas.

Tabela 6: Comparativo entre os maiores emissores de GEE da União Europeia em 1990 e 2021.

<b>Fonte</b>	<b>Ano</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>Gases fluorados</b>	<b>Total (CO<sub>2</sub>eq.)</b>
Uso de energia	1990	3545,6	178,3	23,3	0,0	3747,1
	2021	2570,2	69,9	22,7	0,0	2662,7
Processos industriais	1990	310,0	1,8	83,1	49,7	444,7
	2021	231,7	1,7	6,6	77,9	317,9
Agricultura	1990	14,2	296,1	174,3	0,0	484,6
	2021	9,8	232,1	136,5	0,0	378,4
Resíduo	1990	3,8	172,2	81	0,0	184,2
	2021	2,7	98,0	8,6	0,0	109,3
<b>Total excluindo Uso da terra, mudança no uso da terra e silvicultura</b>	<b>1990</b>	<b>3880,0</b>	<b>648,4</b>	<b>288,8</b>	<b>49,7</b>	<b>4867,0</b>
	<b>2021</b>	<b>2817,7</b>	<b>401,7</b>	<b>174,4</b>	<b>77,9</b>	<b>3471,7</b>
Uso da terra, mudança no uso da terra e silvicultura	1990	- 234,4	14,2	11,4	0,0	- 208,8
	2021	- 253,5	12,9	10,6	0,0	- 230,0
<b>Total</b>	<b>1990</b>	<b>3645,6</b>	<b>662,6</b>	<b>300,2</b>	<b>49,7</b>	<b>4658,2</b>
	<b>2021</b>	<b>2564,2</b>	<b>414,6</b>	<b>185,0</b>	<b>77,9</b>	<b>3241,7</b>

Fonte: UNFCCC format-EEA (2023).

Os dados setoriais e por tipo de gás, apresentados na Tabela 6, detalham as fontes de emissões e sua evolução comparando os anos de 1990 e 2021, facilitando a compreensão das variações e dos principais contribuintes para as emissões totais da união europeia. Os setores analisados incluem o uso de energia, processos industriais, agricultura e gestão de resíduos, além das remoções líquidas de emissões pelo setor de Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas (LULUCF), que é uma outra nomenclatura para denominar o setor AFOLU. Abaixo são apresentadas as análises de cada uma dessas fontes de emissões.

**Uso de Energia:** Este setor se mantém como o maior emissor de GEE, totalizando 3747,1 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. em 1990, com uma queda para 2662,7 milhões em 2021. A redução de cerca de 28,9% é impulsionada pela transição para fontes de energia renováveis e pelo aumento da eficiência energética na região.

**Processos Industriais:** As emissões nesse setor caíram de 444,7 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. em 1990 para 317,9 milhões em 2021, uma redução de aproximadamente 28,5%. Esse declínio é atribuído à adoção de tecnologias mais limpas e à implementação de regulamentos ambientais rigorosos que restringem o uso de processos industriais altamente emissores.

**Agricultura:** As emissões do setor agrícola reduziram-se de 484,6 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. em 1990 para 378,4 milhões em 2021. A diminuição de 21,9% reflete mudanças nas práticas agrícolas e na adoção de técnicas sustentáveis para mitigar a liberação de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), gases que dominam as emissões do setor.

**Resíduos:** Emissões provenientes da gestão de resíduos também registraram declínio, passando de 184,2 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. em 1990 para 109,3 milhões em 2021, representando uma redução de aproximadamente 40,7%. Este resultado é um reflexo da melhora na gestão de resíduos e da maior adoção de práticas de reciclagem e compostagem.

**LULUCF:** O setor de Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas, também chamado de AFOLU, tem desempenhado um papel importante na captura de emissões, com uma remoção líquida de CO<sub>2</sub> de 208,8 milhões de toneladas em 1990, aumento para 230 milhões em 2021. Esse aumento reflete as políticas de reflorestamento e conservação de áreas verdes na União Europeia, que ajudam a absorver emissões de dióxido de carbono da atmosfera.

De maneira complementar, é interessante que sejam analisadas as emissões do setor AFOLU, no contexto da união europeia, pois esse setor apresenta emissões negativas, conforme explicitado pelo gráfico da Figura 12.

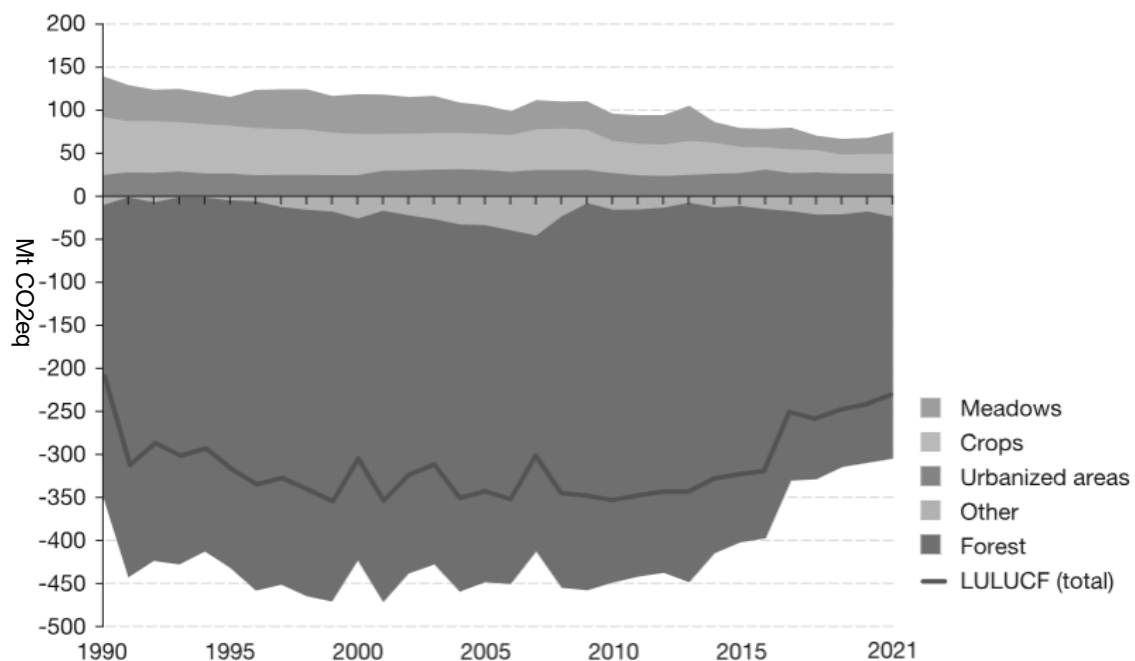


Figura 12: Gráfico do perfil de emissões da União Europeia no setor AFOLU.

Fonte: UNFCCC Format - EEA (2023).

A análise das emissões do setor AFOLU na União Europeia, conforme exposto no gráfico acima, revela o papel singular desse setor na mitigação das emissões de GEE na região. Diferentemente de outros setores que tipicamente contribuem positivamente para o total de emissões, o setor AFOLU caracteriza-se, no contexto da UE, por apresentar emissões líquidas negativas. Essa característica implica que as atividades de uso da terra, especialmente o manejo florestal e o reflorestamento, contribuem para a remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera, compensando parte das emissões geradas por outros setores.

O gráfico da Figura 12 indica que, ao longo do período analisado, o setor AFOLU mantém uma contribuição negativa consistente, atuando como um sumidouro de carbono, com algumas variações pontuais. Esse resultado sugere que práticas de uso da terra e florestamento na União Europeia têm sido progressivamente adaptadas para otimizar a capacidade de captura de carbono, com apoio de políticas ambientais focadas em reflorestamento, conservação de florestas e gestão sustentável dos recursos naturais. A permanência das emissões negativas no setor AFOLU é essencial para a estratégia climática da União Europeia, permitindo avanços em direção às metas de neutralidade climática e às obrigações delineadas pelo Acordo de Paris, ao mesmo tempo que fortalece o papel da UE como líder global em práticas sustentáveis de mitigação de GEE.

### **3.4 Potencial Bruto de Contribuição do MVC Brasileiro nas Metas Europeias**

Nessa seção, é explorada, em números absolutos e percentuais, qual pode ser a contribuição total do mercado de carbono brasileiro - em sua integridade e somente do projetos inclusos no setor AFOLU - para o cumprimento das metas de redução da UE. Para isso é estabelecida uma relação de proporcionalidade, englobando as metas de redução das emissões de carbono, e o potencial de compensação de emissões do MVC brasileiro, conforme demonstrado pelo cálculos a seguir:

Levando em conta a estimativa previamente realizada para o potencial de redução de emissões para o ano de 2024 de 1,173 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq., a porcentagem alvo de 36,65%, e o horizonte temporal de 9 anos, foi possível obter o valor médio de emissões que a UE precisa reduzir anualmente a partir do uso da Equação (2), citada na metodologia.

O valor encontrado que a União Europeia, em média, deve reduzir suas emissões em 47.767.167 de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. anualmente até 2030. Levando em consideração que é estimado que o mercado de carbono brasileiro, em sua totalidade, compense 102.819.103 toneladas de CO<sub>2</sub>eq., e a partir da aplicação da Equação (3), citada anteriormente na metodologia, foi possível obter a porcentagem da possível contribuição do MVC brasileiro para as metas de redução de emissões da UE.

O resultado encontrado demonstra que o mercado de carbono voluntário brasileiro tem capacidade total para suprir, aproximadamente 215,3% das necessidades anuais de compensação de emissões da UE para o ano de 2024, em linha com as metas estabelecidas pela Lei Europeia do Clima.

A análise, agora, é voltada somente ao setor AFOLU, que possui a maior quantidade de projetos e de potencial de redução de emissões do MVC brasileiro. De acordo com o IDESAM, para os anos de 2021 a 2023, e de acordo com a estimativa presente no trabalho para o ano de 202, foi compensado 45.560.191 toneladas de CO<sub>2</sub>eq. em 2021; 63.583.974 toneladas de CO<sub>2</sub>eq. em 2022; 70.138.938 toneladas de CO<sub>2</sub>eq. em 2023; e foi estimado uma compensação de 90.147.361 toneladas de CO<sub>2</sub>eq. em 2024.

A partir da utilização da Equação (3) novamente, mas com os valores citados acima, foi possível obter as porcentagens do setor AFOLU de contribuição do MVC brasileiro

$$\text{Contribuição MVC Brasil (AFOLU2021)} = \frac{45.560.191}{47.767.167} \times 100$$

$$\text{Contribuição MVC Brasil (AFOLU2022)} = \frac{63.583.974}{47.767.167} \times 100$$

$$\text{Contribuição MVC Brasil (AFOLU2023)} = \frac{70.138.938}{47.767.167} \times 100$$

$$\text{Contribuição MVC Brasil (AFOLU2024)} = \frac{90.147.361}{47.767.167} \times 100$$

Os resultados constataram que o MVC brasileiro poderia suprir, respectivamente: 95,38%, 133,08%, 146,79% e 188,69%, para os anos de 2021 a 2024, levando em consideração a necessidade média anual encontrada anteriormente, e o potencial de projetos incluso no setor AFOLU.

Os cálculos aqui realizados possuem o intuito de ilustrar a dimensão e o potencial bruto do Mercado Voluntário de Carbono Brasileiro, utilizando como elemento de comparação as necessidades, baseadas em metas, de redução de emissões de GEE na União Europeia. Portanto os valores aqui expostos não devem ser levados como previsões, ou estimativas reais.

### 3.5 Análises de Correlação e Regressão Linear

Nesse item foram realizadas análises estatísticas de regressão linear para aferir qual o nível e a natureza da relação entre a evolução das emissões da união europeia ao longo do tempo, e o crescimento das reduções de emissões por parte do mercado de carbono voluntário brasileiro.

Primeiramente é realizada uma análise de correlação de Pearson apresentada na Tabela 7, que permite a identificação da natureza da interação presente entre as variáveis analisadas. Para essa análise, foram utilizados os dados referentes a somatória do acumulado do potencial de redução de emissões, por categorias de projetos no MVC brasileiro, em conjunto com a evolução das emissões líquidas europeias, no período compreendido entre 1999 e 2022 (  $n=24$ ) e um nível de significância de 95%.

Tabela 7: Matriz de correlação

	MIO toneladas de CO <sub>2</sub> eq.	Redução de Emissões
MIO toneladas de CO <sub>2</sub> eq.	1	
Redução de Emissões	-0,9484111	1

Fonte: Elaboração própria (2024).

É possível de se observar que existe uma relação inversamente proporcional entre as duas variáveis analisadas, isto é, ao passo em que uma delas aumenta, a outra apresenta tendência de queda. Nesse caso, o coeficiente de  $-0,9484111$ , indica que existe uma forte correlação negativa.

A análise de regressão, explora a relação entre a redução de emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil, representada pela variável dependente MVCBR, e três variáveis independentes: MIO (emissões líquidas europeias em milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente), PCap (emissões europeias per capita) e Index (índice representativo de emissões europeias). Para investigar a influência dessas variáveis sobre o MVCBR, foram construídos modelos de regressão linear, testando diferentes configurações, como a transformação logarítmica do MVCBR (MVCBRLN).

Para cada variável independente, dois modelos principais foram ajustados:

1. **MVCBR MIO, PCap, ou Index:** modelo linear simples.
2. **MVCBRLN MIO, PCap, ou Index:** modelo linear simples após transformação logarítmica de MVCBR.

A transformação logarítmica (LN), foi realizada para melhorar o ajuste dos modelos, resultando em R<sup>2</sup> ajustado consideravelmente mais alto, principalmente nos modelos MVCBRLNMIO, na Figura 13, e MVCBRLNPCap, na Figura 14, cujos R<sup>2</sup> ajustados atingiram 0,87 e 0,90, respectivamente. Esses valores sugerem uma alta capacidade explicativa das variáveis independentes sobre a variação no MVCBR, indicando que o comportamento da redução de emissões no Brasil é melhor representado em uma escala logarítmica.

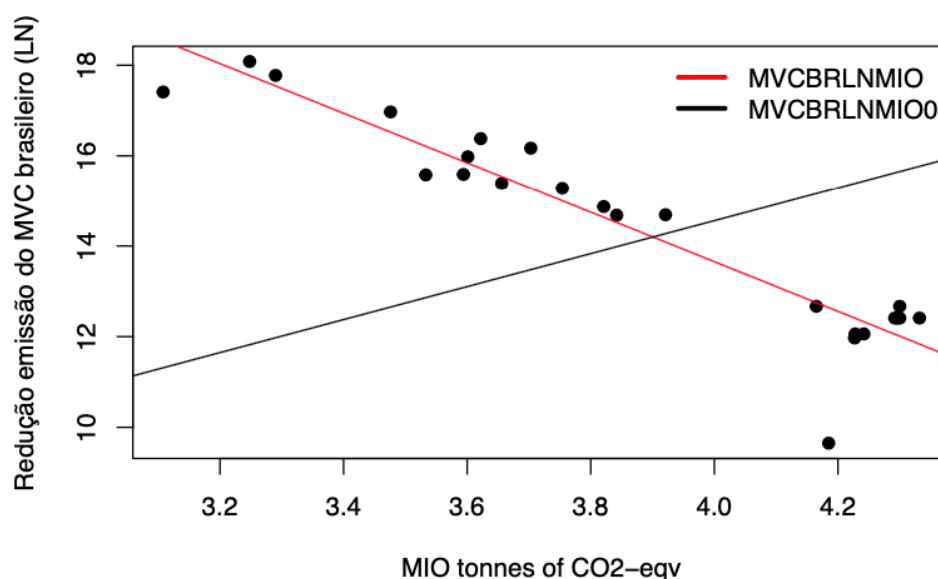


Figura 13: gráfico de regressão entre MVCBRLN e MIO.

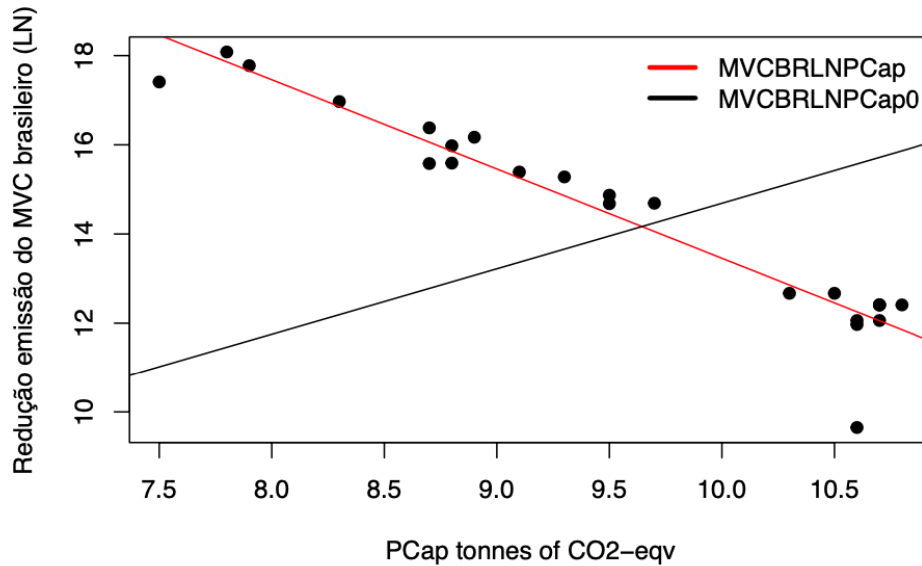


Figura 14: Gráfico de regressão entre MVCBRLN e PCap.

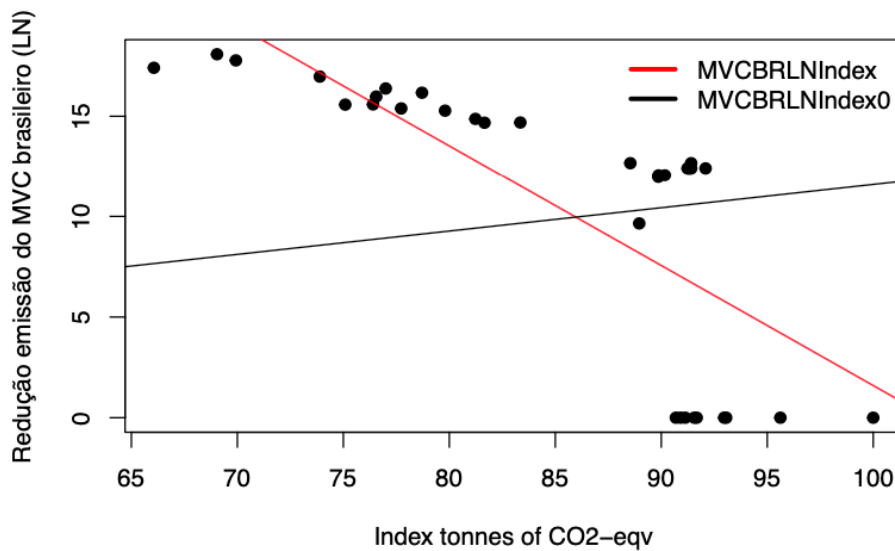


Figura 15: Gráfico de regressão entre MVCBRLN e Index.

A análise dos coeficientes angulares e lineares dos modelos oferece insights sobre a direção e a intensidade das relações entre MVCBR e cada variável independente. Em todos os modelos, os coeficientes angulares foram negativos, o que reforça uma relação inversa entre as variáveis: conforme MIO, PCap e Index diminui, a redução de emissões (MVCBR) tende a aumentar. Por exemplo, o modelo MVCBRPCap apresentou um coeficiente angular de  $-1,30 \times 10^7$  na escala linear, indicando que para cada variação de uma unidade em PCap, observa-se uma redução de emissões de aproximadamente 13 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq em MVCBR. Tais resultados reforçam a hipótese de que a diminuição das emissões, ou dos índices de emissões tende a incrementar a redução de emissões de CO<sub>2</sub>, por meio de projetos no MVC brasileiro.

Além disso, foram realizados testes de normalidade (Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors) para avaliar a distribuição dos resíduos dos modelos. Os resultados indicaram uma ausência de normalidade, com valores-p inferiores a 0,05 para a maioria das variáveis. Essa falta de normalidade justifica a aplicação da transformação logarítmica no MVCBR, com o intuito de estabilizar a variabilidade e aprimorar o ajuste dos modelos.

A análise sugere, conforme a Figura 14, a variável PCap possui um desempenho levemente superior em relação a MIO (Figura 13), na e Index (Figura 15), na figura, na como preditora da variabilidade no MVCBR, o que é evidenciado pelo maior valor de  $R^2$  ajustado (0,907) no modelo logarítmico MVCBRLNPCap. A transformação logarítmica do MVCBR foi particularmente eficaz em melhorar o ajuste dos modelos e em proporcionar uma representação mais coerente das relações entre as variáveis.

Dessa forma, os resultados indicam que a redução e compensação de emissões no MVC no Brasil é influenciada de maneira significativa pela variação das emissões europeias per capita (PCap), emissões líquidas da União Europeia (MIO) e o índice utilizado (Index), com uma tendência de melhor explicação em escalas logarítmicas.

A Tabela 8 serve como referência para que seja feita a análise de regressão linear, onde são relacionados os anos de 1999, até 2022, com o potencial anual de redução de emissões do mercado de carbono voluntário brasileiro, com a variação do índice atrelado à evolução das emissões de GEE da União Europeia, Assim como as emissões Líquidas e per capita da União europeia. Para fins de facilitar a notação, os valores de redução de emissões foram convertidos para logaritmo natural, conforme explicitado na Tabela 8.

Tabela 8: Emissões Europeias de GEE e compensação do MVC brasileiro.

ano	Index (1990=100)	MIO tonnes of CO <sub>2</sub> -eqv (milhões de toneladas)	European Union - 27 countries tons per capita	redução emissão do MVC brasileiro(LN)
1999	88,96	4.185	10,6	9,65
2000	89,86	4.227	10,6	11,97
2001	89,87	4.228	10,7	12,06
2002	90,17	4.242	10,6	12,06
2003	92,09	4.332	10,8	12,41
2004	91,41	4.300	10,7	12,41
2005	91,24	4.292	10,7	12,41
2006	91,32	4.296	10,7	12,41
2007	91,41	4.300	10,5	12,67
2008	88,54	4.165	10,3	12,67
2009	81,66	3.842	9,5	14,68
2010	83,35	3.921	9,7	14,69
2011	81,23	3.821	9,5	14,87
2012	79,8	3.754	9,3	15,28
2013	77,73	3.656	9,1	15,39
2014	75,09	3.533	8,7	15,58
2015	76,4	3.594	8,8	15,59
2016	76,55	3.601	8,8	15,98
2017	78,71	3.703	8,9	16,17
2018	77	3.622	8,7	16,38
2019	73,89	3.476	8,3	16,97
2020	66,06	3.108	7,5	17,41
2021	69,93	3.290	7,9	17,78
2022	69,04	3.248	7,8	18,08

(Fonte: Elaboração própria)

---

## **Conclusões, Limitações e Futuras Linhas de Investigação**

Este estudo exploratório alcança seu objetivo de investigar o potencial do mercado de carbono voluntário (MVC) brasileiro para contribuir com as metas de redução e compensação de emissões de GEE da União Europeia. Ao longo da pesquisa, evidenciou-se que o Brasil ocupa uma posição estratégica e de destaque no cenário global de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, agora comumente abordadas como uma "crise climática" em virtude de sua gravidade crescente. Em particular, a vasta biodiversidade e a presença de grandes biomas, como a Amazônia, Mata Atlântica, Pantanal e Cerrado, reforçam a relevância do Brasil na manutenção da estabilidade climática global e na preservação da biodiversidade.

O estudo indica que o território brasileiro, que concentra aproximadamente 15% do potencial global de captura de carbono por meio de mecanismos naturais, oferece inúmeras possibilidades para o crescimento do MVC. O país apresenta áreas extensas onde o desmatamento pode ser evitado e regiões que poderiam ser restauradas para maximizar a captura de carbono. O desenvolvimento de projetos de qualidade no mercado voluntário de carbono permite ao Brasil participar de maneira significativa da transição para uma economia de baixo carbono. A proximidade de prazos críticos, como 2030 e 2050, estabelecidos em acordos internacionais (como o Acordo de Paris), coloca pressão adicional sobre a União Europeia para a redução de suas emissões, o que potencializa a demanda por créditos de carbono de fontes confiáveis, entre as quais, o Brasil surge como um ator potencialmente central.

Foi observada uma relação inversamente proporcional entre a diminuição das emissões líquidas da União Europeia e o crescimento do MVC brasileiro. Essa correlação sugere que, à medida que a União Europeia busca compensar suas emissões, o MVC brasileiro poderá emergir como um destino atrativo para investimentos, especialmente diante das políticas europeias de neutralidade de carbono. Essa dinâmica delinea o papel do Brasil como um parceiro relevante para a União Europeia, um fator que também reflete a crescente importância do setor AFOLU (Agricultura, Florestas e Outros Usos da Terra) no MVC brasileiro, dada a preponderância de projetos nesse setor.

Os projetos presentes no mercado de carbono voluntário brasileiro abrangem uma ampla gama de iniciativas, especialmente voltadas para a preservação e recuperação de áreas florestais. Esses projetos se concentram, majoritariamente, nas regiões com alta capacidade de captura de carbono, incluindo biomas criticamente ameaçados, como a Floresta Amazônica, a Mata Atlântica, o Cerrado e o Pantanal. Cada um desses biomas oferece um potencial singular para a geração de créditos de carbono, o que confere ao Brasil um papel crucial na mitigação das emissões globais de GEE.

Entre os principais tipos de projetos do MVC no Brasil, destacam-se os projetos REDD (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação florestal), os projetos de ARR (Aflorestamento, Reflorestamento e Revegetação), e os projetos de ALM (Gestão de Terras Agrícolas). Estes projetos não apenas ajudam a evitar a liberação de GEE associada ao desmatamento, mas também promovem a captura de CO<sub>2</sub> por meio da recuperação de vegetação nativa. Os projetos de REDD têm sido particularmente relevantes, pois atuam diretamente na proteção de florestas ameaçadas pelo desmatamento e degradação que, se mantidas intactas, continuam a capturar e estocar grandes quantidades de carbono.

A potencialidade desses projetos vai além da compensação de emissões de carbono. Eles representam também uma oportunidade para um agenda robusta de desenvolvimento econômico sustentável, a partir do envolvimento das comunidades locais em atividades de conservação, o que gera emprego e renda, especialmente em áreas com baixo acesso a oportunidades econômicas. O impacto social desses projetos é relevante, pois algumas dessas iniciativas engajam comunidades indígenas e quilombolas, promovendo o respeito à biodiversidade e preservando saberes tradicionais enquanto contribuem para a sustentabilidade local.

Esses projetos têm demonstrado um impacto crescente na capacidade do Brasil de gerar créditos de carbono com credibilidade e rastreabilidade. Com a aplicação de padrões internacionais de certificação, como o Verified Carbon Standard (VCS) e o Gold Standard, os créditos gerados no Brasil são validados e verificados, conferindo segurança aos investidores internacionais interessados em apoiar iniciativas sustentáveis. Assim, o MVC brasileiro não apenas colabora para o cumprimento das metas climáticas globais, mas também estabelece um modelo de mercado que valoriza a integridade ambiental e a inclusão social.

Entretanto, o estudo identifica limitações que devem ser consideradas. A dependência de dados secundários, provenientes de fontes como Eurostat, Verra VCS-registry e IDESAM, representa uma barreira ao acesso a informações detalhadas e atualizadas. As limitações dos dados impediram a inclusão de variáveis que poderiam enriquecer a análise, como o Produto Interno Bruto (PIB) dos países envolvidos e políticas ambientais específicas. Adicionalmente, o desafio de obter dados consistentes e comparáveis entre as fontes pode comprometer a generalização dos resultados.

Como agenda para pesquisas futuras, sugere-se uma investigação mais abrangente, que incorpore variáveis macroeconômicas, como o impacto direto do PIB dos países sobre o mercado de carbono, além de uma análise segmentada dos biomas brasileiros com maior detalhamento dos tipos de projetos implementados. Técnicas estatísticas mais sofisticadas, como modelos de regressão avançados e análise de séries temporais, podem contribuir para um exame mais acurado da correlação entre o MVC brasileiro e as metas europeias. Ainda, seria relevante investigar como ampliar a participação de comunidades indígenas e quilombolas no MVC, o que não apenas aumentaria a eficiência do mercado, mas também promoveria justiça climática e a preservação das identidades culturais.

Por fim, a criação de políticas públicas e regulamentações que consolidem a credibilidade e integridade dos créditos de carbono no Brasil é essencial. O desenvolvimento de uma estrutura regulatória clara e robusta poderia atrair ainda mais investimentos internacionais, fortalecendo o posicionamento do Brasil como um líder em sustentabilidade e transição para uma economia de baixo carbono. O MVC brasileiro, assim, configura-se não apenas como um instrumento de compensação de emissões, mas como um eixo potencial de desenvolvimento sustentável, contribuindo para os esforços globais de mitigação das mudanças climáticas.

## Referências Bibliográficas

- Bandh, S. A., Shafi, S., Peerzada, M., Rehman, T., Bashir, S., Wani, S. A., & Dar, R. (2021). Multidimensional analysis of global climate change: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(20), 24872–24888. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13139-7>
- Bassett, T. J., & Fogelman, C. (2013). Déjà vu or something new? The adaptation concept in the climate change literature. *Geoforum*, 48, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.04.010>
- Blunden, J. & Boyer, T. (2022). State of the Climate in 2021. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 103 (8), S1–S465, <https://doi.org/10.1175/2022BAMSStateoftheClimate.1>
- Bodansky, D. (2016). The Legal Character of the Paris Agreement. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 25(2), 142–150. <https://doi.org/10.1111/reel.12154>
- Buchanan, J. M. (1969). Externality. In *The New Palgrave Dictionary of Economics* (1987). Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S., Fennell, P. S., Fuss, S., Galindo, A., Hackett, L. A., Hallett, J. P., Herzog, H. J., Jackson, G., Kemper, J., Krevor, S., Maitland, G. C., Matuszewski, M., Metcalfe, I. S., Petit, C., . . . Mac Dowell, N. (2018). Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1062–1176. <https://doi.org/10.1039/c7ee02342a>
- Cainenga, Z., Huaqing, X., Boa, X., et al. (2021). Connotation, innovation and vision of “carbon neutrality”. *ScienceDirect. Natural Gas Industry B* 8, p. 523e537. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.009>
- Câmara dos deputados – Brasil. (2023). Câmara aprova projeto que regulamenta o mercado de carbono no Brasil. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1029046-CAMARA-APROVA-PROJETO-QUE-REGULAMENTA-O-MERCADO-DE-CARBONO-NO-BRASIL>
- Chen, L., Msigwa, G., Yang, M., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., & Yap, P. (2022). Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2277–2310. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8>
- Cheng, Y., Sinha, A., Ghosh, V., Sengupta, T., Luo, H. (2021). Carbon tax and energy innovation at crossroads of carbon neutrality: Designing a sustainable decarbonization policy. *Journal of Environmental Management*. Vol 294, 112957. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112957>
- Dimitrov, R. S. (2016). The Paris Agreement on Climate Change: Behind Closed Doors. *Global Environmental Politics*, 16(3), 1–11. [https://doi.org/10.1162/GLEP\\_a\\_00361](https://doi.org/10.1162/GLEP_a_00361)
- European Commission. (2020). EU 2030 Climate & Energy Framework. Disponível em: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en)
- European Parliament. (2018). Redução das emissões de carbono: objetivos e políticas da União Europeia. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20180305STO99003/reducao-das-emissoes-de-carbono-metas-e-politicas-da-ue>.
- Fawzy, S., Osman, A.I., Yang, H. et al. (2021). Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review. *Environ Chem Lett* 19, 3023–3055. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01210-1>
- FGV – Fundação Getúlio Vargas (2022). Mercado de carbono voluntário no Brasil na realidade e na prática. In *mercado de carbono voluntário no brasil na realidade e na prática*. Vargas, D. B., Delazeri, L. M. M., & Ferreira, V. H. P. (Eds).

- Fiske, S., Hubacek, K., Jorgenson, A., Li, J., McGovern, T., Rick, T., Schor, J., Solecki, W., York, R., Zycherman, A. (2018). Drivers and responses: Social science perspectives on climate change, part 2. Washington, DC: USGCRP Social Science Coordinating Committee.
- Fu, J., Li, P., Lin, Y., Du, H., Liu, H., Zhu, W., & Ren, H. (2022). Fight for carbon neutrality with state-of-the-art negative carbon emission technologies. *Eco-Environment & Health*, 1(4), 259–279. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2022.11.005>
- Gifford, R., Kormos, C., McIntyre, A. (2011). Behavioral dimensions of climate change: drivers, responses, barriers, and interventions. *Wires Climate Change*. v.2. Is 6. p. 801-827. <https://doi.org/10.1002/wcc.143>
- Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (2012). Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(37). <https://doi.org/10.1073/pnas.1205276109>
- Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y. (2007). Understanding and Attributing Climate Change. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp., 2007. hal-03375749
- Hilmi, N., Chami, R., Sutherland, M.D., Hall-Spencer, J.M., Lebleu, L., Benitez, M.B., Levin, L.A. (2021). The Role of Blue Carbon in Climate Change Mitigation and Carbon Stock Conservation. *Front. Clim.* 3:710546. doi: 10.3389/fclim.2021.710546
- Hong, Y., Lee, C., Kuo, T. (2023). Operationalizing Carbon-Neutral Living: A Case Study of A Business Model for Carbon-Negative Products. *Sustainability*. 15, 11315. <https://doi.org/10.3390/su151411315>
- Huang, J., Yu, H., Guan, X. et al. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Clim Change* 6, 166–171 (2016). <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
- Iberdrola (2024). Como são regulados os mercados de direito emissão e créditos de carbono?. Mercados de Carbono. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/meio-ambiente/gestao-ambiental/mercados-carbono-direitos-emissao-co2>. Acesso em out, 2024.
- ICC Brasil - International Chamber of Commerce Brasil & WayCarbon (2021). Oportunidades para o Brasil em Mercados de Carbono – Relatório 2021. Disponível em: [https://www.iccbrasil.org/media/uploads/2021/09/27/oportunidades-para-o-brasil-em-mercados-de-carbono\\_icc-br-e-waycarbon\\_29\\_09\\_2021.pdf](https://www.iccbrasil.org/media/uploads/2021/09/27/oportunidades-para-o-brasil-em-mercados-de-carbono_icc-br-e-waycarbon_29_09_2021.pdf)
- IPAM – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. (2021). Atividades 2019, 2020. Tempos desafio resiliência. Disponível em: <https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2021/10/relatorio-IPAM-2019-2020.pdf>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

- Ji, X., Zhang, Y., Mirza, N., Umar, M., Rizvi, S. (2021). The impact of carbon neutrality on the investment performance: Evidence from the equity mutual funds in BRICS. *Journal of Environmental Management*. Vol 297, 1 November 2021, 113228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113228>
- Kollmuss, A., Lazarus, M., Lee, C., LeFranc, M., Polycarp, C. (2010). *Handbook of Carbon Offset Programs: Trading Systems, Funds, Protocols and Standards*. 1 Ed. Londres. <https://doi.org/10.4324/9781849774932>
- Larminat, P. (2016). Earth climate identification vs. anthropic global warming attribution. *Annual Reviews in Control*, 42, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.09.018>
- Marques, M. I. M. (2022). Financiamento Ambiental, Mudanças Climáticas E O Agronegócio no Brasil. In Miola et al., (Ed.). *Finanças Verdes no Brasil: perspectivas multidisciplinares sobre o financiamento da transição verde*. p 143-170. Blucher editora.
- Masson-Delmotte, V. (2020). Global warming, state of scientific knowledge, challenges, risks and options for action. *Comptes Rendus. Géoscience, Facing climate change, the range of possibilities*, Volume 352 (2020) no. 4-5, pp. 251-277. DOI: 10.5802/crgeos.29
- Mckinsey & Company. (2022). Mercado voluntário de carbono tem potencial gigantesco no Brasil. Blaufelder, C., Ceotto, H., Sawaya, A., Tayar, G., Dore, F., Frank, M., Djanian, M., & Kansy, T. (Eds). Disponível em: <https://www.mckinsey.com.br/our-insights/all-insights/mercado-voluntario-de-carbono-tem-potencial-gigantesco-no-brasil>
- Mello, C. A. (2023). Compartilhamento de Benefícios em Projetos REDD: Desafios para uma Implementação Justa e Inclusiva na Amazônia Brasileira. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Economia. Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento (PPED/IE).
- Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897–2913. [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
- Ministério do Meio Ambiente do Brasil. (2020). Brazil's Nationally Determined Contribution (NDC) to the Paris Agreement. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/>
- Mora, C., Spirandelli, D., Franklin, E.C. et al. (2018). Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions. *Nature Clim Change* 8, 1062–1071. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0315-6>
- Newell, P., Bulkeley, H., Turner, K., Shaw, C., Caney, S., Shove, E., Pidgeon N. (2015). Governance traps in climate change politics: re-framing the debate in terms of responsibilities and rights. *Wires Climate Change*. Vol 6, Issue 6, pp. 535-540. <https://doi.org/10.1002/wcc.356>
- Nordhaus, W. D. (2013). *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*. Yale University Press. Estados Unidos. ISBN 978-0-300-18977-3
- Oberthür, S. (2018). The European Union's Role in Global Climate Governance: The Case of the Paris Agreement. *Climate Policy*, 18(3), 320-333. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1460176>
- Pan, J. (2021). Lowering the Carbon Emissions Peak and Accelerating the Transition Towards Net Zero Carbon. *Chinese Journal of Urban and Environmental Studies*, 09(03). <https://doi.org/10.1142/s2345748121500135>
- Pearce, D. W. (2003). *The Role of Market-Based Instruments in Environmental Policy. Incentives for the Sustainable Development of the Environment*. United Nations Environment Programme.

- Peters-Stanley, M., Hamilton, K., Yin, D. (2013). Leveraging the landscape: state of the forest carbon markets 2012. Vol xiv. pp 86.
- Pigou, A. C. (1920). The Economics of Welfare. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA06951880>
- Powell, J. (2019). Scientists Reach 100% Consensus on Anthropogenic Global Warming. *Bulletin of Science Technology & Society*, 37(4), 183–184. <https://doi.org/10.1177/0270467619886266>
- Prolo, C. D., Penido, G., Santos, I. T., La Hoz Theuer, S. (2021). Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris. Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade. Disponível em: <https://laclima.org/files/explicando-mercados-rev.pdf>
- Rogelj, J., Huppmann, D., Krey, V. et al. (2019). A new scenario logic for the Paris Agreement long-term temperature goal. *Nature* 573, 357–363. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1541-4>
- Schimel, D. (2014). Forests in the Global Carbon Cycle. In: Fenning, T. (eds) *Challenges and Opportunities for the World's Forests in the 21st Century*. Forestry Sciences, vol 81. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7076-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7076-8_10)
- Schumer, C. (2023). 10 conclusões do Relatório do IPCC sobre Mudanças Climáticas de 2023. World Resources Institute Brasil. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/10-conclusoes-do-relatorio-do-ipcc-sobre-mudancas-climaticas-de-2023>. Acesso em: set, 2024.
- Seneviratne, S.I., et al. (2012) Changes in Climate Extremes and Their Impacts on the Natural Physical Environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, 109-230.
- Singh, S., Thawale, P., Sharma, J., Gautam, R. (2015). Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems. In *Hydrogen Production and Remediation of Carbon and Pollutants*. pp.99-131. DOI:10.1007/978-3-319-19375-5\_3
- Souza, A. L. R., Andrade, J. C. (2014). Análise do mercado de carbono voluntário no Brasil: um estudo sobre o perfil dos projetos de redução de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE). *Revista Metropolitana de Sustentabilidade*, v. 4, n. 1, pp. 52-75.
- Tan, X., Zhu, K., Meng, X., Gu, B., Wang, Y., Meng, F., Liu, G., Tu, T., Li, H. (2021). Research on the status and priority needs of developing countries to address climate change. *Journal of Cleaner Production*. Vol 289, 20 March 2021, 125669. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125669>
- Taticchi, P., Carbone, P., Albino, V. (2013). *Corporate Sustainability*. Springer Ed. CSR, Sustainability, Ethics and Governance.
- Tirelli, D., & Besana, D. (2023). Moving toward Net Zero Carbon Buildings to Face Global Warming: A Narrative Review. *Buildings*, 13(3), 684. <https://doi.org/10.3390/buildings13030684>
- Udemba, E. N. (2021). Nexus of ecological footprint and foreign direct investment pattern in carbon neutrality: new insight for United Arab Emirates (UAE). *Environmental Science and Pollution Research*. Volume 28, pages 34367–34385. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12678-3>
- UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. (1992). Convention text. Disponível em: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/background\\_publications\\_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf)
- UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Paris Agreement. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

- Verra. (2022). Verified Carbon Standard. Disponível em: <https://registry.verra.org/app/search/VCS>. Acesso em: out, 2024.
- VijayaVenkataRaman, S., Iniyan, S., & Goic, R. (2011). A review of climate change, mitigation and adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 878–897. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.009>
- Wang, C., Geng, L., Rodríguez-Casallas, J. D. (2021). How and when higher climate change risk perception promotes less climate change inaction. *Journal of Cleaner Production*. v 321. 128952. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128952>
- World Bank. (2023). C High Integrity, High Impact: The World Bank Engagement Roadmap for Carbon Markets. Disponível em: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/12facd8b391a1eafa5dd53e7ddc5eeb5-0020012023/original/COP28-World-Bank-Engagement-Roadmap-for-Carbon-Markets.pdf>
- WWF Brasil - World Wildlife Fund Brasil. (2021). Relatório Annual 2021. Disponível em: [https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/ra\\_2021\\_completo\\_final\\_pt.pdf](https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/ra_2021_completo_final_pt.pdf)
- Zhang, D., Mohsin, M., Taghizadeh-Hesary, M. (2022). Does green finance counteract the climate change mitigation: Asymmetric effect of renewable energy investment and R&D. *Energy Economics*. Vol 113, September 2022, 106183. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106183>
- Zou, C., Xue, H., Xiong, B., Zhang, G., Pan, S., Jia, C., Wang, Y., Ma, F., Sun, Q., Guan, C., & Lin, M. (2021). Connotation, innovation and vision of “carbon neutrality.” *Natural Gas Industry B*, 8(5), 523–537. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.009>