



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



CRÉDITOS DE CARBONO SOB MÚLTIPLAS LENTES: DINÂMICAS CIENTÍFICAS, REGULATÓRIAS, ECONÔMICAS E AMBIENTAIS NA ERA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

GUSTAVO DOMINGOS SAKR BISINOTO

Tese apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais para obtenção do título de doutorado.

Cáceres,
Mato Grosso, Brasil
2025



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
GUSTAVO DOMINGOS SAKR BISINOTO



CRÉDITOS DE CARBONO SOB MÚLTIPLAS LENTES: DINÂMICAS CIENTÍFICAS, REGULATÓRIAS, ECONÔMICAS E AMBIENTAIS NA ERA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Tese apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais para obtenção do título de doutorado.

Orientador: Prof. Dr. Ernandes Sobreira Oliveira Junior
Co-Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Bruno Zanin

Cáceres,
Mato Grosso, Brasil
2025

Ficha catalográfica elaborada pela Supervisão de Bibliotecas da UNEMATCatalogação de Publicação na Fonte.
UNEMAT - Unidade padrão

B622c Bisinoto, Gustavo Domingos Sakr.

CRÉDITOS DE CARBONO SOB MÚLTIPLAS LENTES: DINÂMICAS
CIENTÍFICAS, REGULATÓRIAS, ECONÔMICAS E AMBIENTAIS NA ERA DAS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS / Gustavo Domingos Sakr Bisinoto. - Cáceres,
2025.

138f.: il.

Universidade do Estado de Mato Grosso "Carlos Alberto Reyes
Maldonado", Ciências Ambientais/CAC-PPGCA - Cáceres - Doutorado
Acadêmico, Campus Universitário De Cáceres "Jane Vanini".

Orientador: Ernandes Sobreira Oliveira Junior.

Coorientador: Rodrigo Bruno Zanin.

1. Governança Climática. 2. Políticas Públicas. 3. Estoque de
Carbono. 4. Sustentabilidade. I. Junior, Ernandes Sobreira
Oliveira. II. Zanin, Rodrigo Bruno. III. Título.

UNEMAT / MTSCB

CDU 502.4

GUSTAVO DOMINGOS SAKR BISINOTO

**CRÉDITOS DE CARBONO SOB MÚLTIPLAS LENTES: DINÂMICAS
CIENTÍFICAS, REGULATÓRIAS, ECONÔMICAS E AMBIENTAIS NA
ERA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Essa tese foi julgada e aprovada como parte dos requisitos para a obtenção do título de doutorado em Ciências Ambientais.

Cáceres, 30 de Outubro de 2025.

Banca examinadora

Prof. Dr. ERNANDES SOBREIRA OLIVEIRA JUNIOR

Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT (Orientador)
Presidente da Banca

Prof. Dr. RODRIGO BRUNO ZANIN

Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT (Co-Orientador)
Examinador Interno

Prof. Dr. DIONEI JOSÉ DA SILVA

Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Examinador Interno – Credenciado PPGCA

Prof. Dr. CLAUMIR CESAR MUNIZ

Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Examinador Interno – Credenciado PPGCA

Prof. Dr. ANDERSON MARQUES DO AMARAL

Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Examinador Externo ao PPGCA

Prof. Dr. WAGNER BANDEIRA ANDRIOLA

Universidade Federal do Ceará

Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa **Taciana Cristina Brasileiro de Moraes** e filha **Sara Marrie Moraes Bisinoto**, amores, luz e razão dos meus dias, que tornam cada conquista mais significativa e cada desafio mais leve; à minha mãe **Samira Sakr Bisinoto** e aos meus irmãos **Thiago Antonio Sakr Bisinoto** e **Rafael Sakr Bisinoto**, pelo apoio incondicional e pela inspiração diária; à memória do meu pai **Orgeles Antonio Bisinoto** e da minha avó **Leonildes Terezinha Zago**, que, mesmo não estando neste plano, continuam presentes em cada pensamento e decisão, deixando ensinamentos que moldaram minha vida; e a todos os meus animais de estimação, dos quais faço questão de mencionar cada um deles: **Emi, Bichano I, Madruguinha, Xuxa, Sabrino** e **Charlotte** (*in memoriam*); **Marmota, Daisy, Cuca, Chico, Chiquinha, Thormund, Minhéu** e **Wandinha**, cuja lealdade, alegria, companheirismo e ternura eternizam-se em minha lembrança e coração. Que cada um de vocês seja lembrado nesta tese como parte essencial da minha história, dos meus sonhos e das minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, à minha família e aos meus animais de estimação. Sem essa base, essa conquista não se realizaria.

Agradeço também à Universidade do Estado de Mato Grosso pelo acolhimento e ensinamentos em todas as funções das quais já ocupei: aluno (de graduação e pós-graduação), Profissional Técnico do Ensino Superior e Docente da Educação Superior.

Agradeço aos meus amigos Prof. Dr. Ernandes Sobreira Oliveira Junior e Prof. Dr. Rodrigo Bruno Zanin pelas orientações, ensinamentos e saberes compartilhados.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais pelas aulas, atividades de extensão, ensinamentos e compromisso com o Ensino de Pós-Graduação de excelência.

Agradeço à equipe da Fundação de Apoio ao Ensino Superior Público Estadual (Fundação FAESPE) e Diretoria de Educação à Distância (DEAD) pelo companheirismo e profissionalismo nas atividades desenvolvidas quando me ausentei para escrita desta tese.

Por fim, agradeço à banca examinadora pelas contribuições valiosíssimas sugeridas na qualificação e defesa.

INDICE

BISINOTO, Gustavo Domingos Sakr. **CRÉDITOS DE CARBONO SOB MÚLTIPLAS LENTES: DINÂMICAS CIENTÍFICAS, REGULATÓRIAS, ECONÔMICAS E AMBIENTAIS NA ERA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**. Cáceres: UNEMAT, 2025. 138 pp (Tese – Doutorado em Ciências Ambientais).

LISTA DE ABREVIATURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE QUADROS	11
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE EQUAÇÕES	14
RESUMO GERAL	15
ABSTRACT GENERAL	17
INTRODUÇÃO GERAL.....	18
REFERÊNCIAS	24
PANORAMA GLOBAL DAS PESQUISAS SOBRE CRÉDITO DE CARBONO: DA SEMENTE DE QUIOTO AOS VENTOS DA COP28	28
RESUMO:.....	28
ABSTRACT:	28
RESUMEN:.....	29
1 INTRODUÇÃO.....	29
2 PESQUISAS SOBRE CRÉDITO DE CARBONO	31
2.1 EVOLUÇÃO DO CRÉDITO DE CARBONO	31
2.2 O CRÉDITO DE CARBONO NA MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	32
2.3 O IMPACTO DOS CRÉDITOS DE CARBONO NA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA	33
2.4 LIMITAÇÕES E DESAFIOS ENFRENTADOS PELO MERCADO DE CARBONO.....	33
3 UM OLHAR BIBLIOMÉTRICO SOBRE CRÉDITO DE CARBONO	34
3.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	34
3.2 BASE DE DADOS	35
4 UM RETRATO DO CRÉDITOS DE CARBONO: DO TRATADO DE QUIOTO A COP28	38
5 LIÇÕES E DESAFIOS PARA O FUTURO DO CRÉDITO DE CARBONO	48
REFERÊNCIAS	49
REGULATORY CHALLENGES OF THE CARBON CREDIT MARKET IN BRAZIL	54
ABSTRACT:	54
RESUMO:.....	54
1 INTRODUCTION	55
2 MATERIAL AND METHOD.....	57
3 RESULTS AND DISCUSSIONS.....	59
3.1 HISTORICAL CONTEXT OF CARBON MARKET REGULATIONS.....	59
3.2 CARBON MARKET: VOLUNTARY VS REGULATED	64
3.3 BRAZIL'S CHALLENGES AND POTENTIAL IN THE REGULATED MARKET	66
4 CLOSING REMARKS	72
REFERENCES	73

CARTOGRAFANDO O SILÊNCIO DO SOLO: A DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO NO SOLO DE 1987 A 2023 EM MATO GROSSO..... 81

RESUMO:.....	81
ABSTRACT:	81
1 INTRODUÇÃO.....	82
2 METODOLOGIA	85
2.1. ÁREA DE ESTUDO.....	85
2.2. BASE DE DADOS	86
2.3. PROCESSAMENTO NO GOOGLE EARTH ENGINE E VISUALIZAÇÃO NO QGIS... 87	
3 RESULTADOS.....	88
3.1 ANÁLISE DAS ÁREAS DE CARBONO ESTOCADO NO SOLO DE MT	88
3.2 ANÁLISE DA DINÂMICA DO DESMATAMENTO NO SOLO DE MT.....	91
3.3 RELAÇÃO ENTRE CARBONO ESTOCADO E DESMATAMENTO EM MT	91
4 DISCUSSÕES	94
4.1 CONVERSÃO DO USO DAS TERRAS E A DIMINUIÇÃO DO CARBONO	94
4.2 POTENCIAL E LIMITES DAS PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS	96
4.3 HOTSPOTS, VULNERABILIDADE E AÇÕES RECOMENDADAS	96
4.4 PAPÉIS DAS POPULAÇÕES TRADICIONAIS E CONSERVAÇÃO ATIVA.....	97
4.5 MODELAGEM, DESAFIOS E CAMINHOS PARA O MONITORAMENTO.....	98
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
REFERÊNCIAS	101

ENCRUZILHADA CLIMÁTICA DE UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA: CRÉDITOS DE CARBONO VS. AÇÕES INTERNAS - VIABILIDADE BASEADA NA LEI 15.042/2024 E NAS DIRETRIZES DO GHG PROTOCOL..... 107

RESUMO.....	107
ABSTRACT	107
1 INTRODUÇÃO.....	108
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	112
2.1 MODELAGEM ECONÔMICA: CONCEITOS E APLICAÇÕES	112
2.2 A LEI 15.042/2024 E SUA APLICABILIDADE AO CONTEXTO DAS INSTITUIÇÕES PÚBLICAS	113
2.3 SUSTENTABILIDADE NO ENSINO SUPERIOR PÚBLICO	115
2.4 FERRAMENTAS E MÉTODOS DE MODELAGEM PARA SUSTENTABILIDADE.....	115
2.5 OS CRÉDITOS DE CARBONO COMO UMA POSSIBILIDADE DE COMPENSAÇÃO	117
3 METODOLOGIA	117
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	121
4.1 CÁLCULO DA PEGADA DE CARBONO	121
4.2 ANÁLISE ECONÔMICA	125
4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	127
4.4 PRODUTOS GERADOS	129
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	130
REFERÊNCIAS	132

CONSIDERAÇÕES FINAIS 137

LISTA DE ABREVIATURAS

CDM – Clean Development Mechanism (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo)
CH₄ – Metano
CO₂ – Dióxido de carbono
COP – Conferência das Partes (Conference of the Parties)
COS – Carbono orgânico do solo
ESG – Environmental, Social and Governance (Ambiental, Social e Governança)
ETS – Emissions Trading System (Sistema de Comércio de Emissões)
EU ETS – Sistema Europeu de Comércio de Emissões
FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
GEE – Gases de efeito estufa
GHG – Greenhouse Gas (Gás de Efeito Estufa)
GLP – Gás liquefeito de petróleo
GWP – Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
JI – Joint Implementation (Implementação Conjunta)
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
N₂O – Óxido nitroso
NDC – Nationally Determined Contributions (Contribuições Nacionalmente Determinadas)
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU – Organização das Nações Unidas
PNMC – Política Nacional sobre Mudança do Clima
R² – Coeficiente de Determinação
REDD+ – Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal
SBCE – Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões
SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões de GEE
SOC – Soil Organic Carbon (Carbono Orgânico no Solo)
UNEMAT – Universidade do Estado de Mato Grosso
UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
VCS – Verified Carbon Standard (Padrão de Carbono Verificado)
VPL – Valor Presente Líquido
WBCSD – World Business Council for Sustainable Development
WRI – World Resources Institute

LISTA DE TABELAS

PANORAMA GLOBAL DAS PESQUISAS SOBRE CRÉDITO DE CARBONO: DA SEMENTE DE QUIOTO AOS VENTOS DA COP28

TABELA 1 - PRINCIPAIS INFORMAÇÕES SOBRE A BUSCA DOS DESCRITORES DE 1997 A 2023.....	38
TABELA 2 - AS 10 FONTES DE PUBLICAÇÃO POR MAIOR FATOR DE IMPACTO	42
TABELA 3 - OS 10 AUTORES MAIS RELEVANTES - POR MAIOR FATOR DE IMPACTO PARA PUBLICAÇÕES.....	42
TABELA 4 - OS 10 DOCUMENTOS MAIS CITADOS – POR NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DE CITAÇÕES NO PERÍODO DE 1997 A 2023	44

CARTOGRAFANDO O SILÊNCIO DO SOLO: A DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO NO SOLO DE 1987 A 2023 EM MATO GROSSO

TABELA 1 – AÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS	97
--	----

LISTA DE QUADROS

PANORAMA GLOBAL DAS PESQUISAS SOBRE CRÉDITO DE CARBONO: DA SEMENTE DE QUIOTO AOS VENTOS DA COP28

QUADRO 1 - SÍNTESE DA UTILIZAÇÃO FINALÍSTICA DE CADA SOFTWARE PARA O LEVANTAMENTO BIBLIOMÉTRICO	37
--	-----------

REGULATORY CHALLENGES OF THE CARBON CREDIT MARKET IN BRAZIL

TABLE 1 - LIST OF QUANTITIES BY THEMATIC CATEGORIES AND RELEVANT WORKS	58
TABLE 2 - SUMMARY OF THE HISTORICAL EVOLUTION OF THE REGULATION OF THE CARBON CREDIT MARKET	60
TABLE 3 - SUMMARY OF THE MAIN COMMITMENTS RATIFIED IN THE PARIS AGREEMENT BY THE TOP 5 CO₂ EMITTING COUNTRIES	62
TABLE 4 - PHASES FOR IMPLEMENTING THE BRAZILIAN GREENHOUSE GAS EMISSIONS TRADING SYSTEM.....	67
TABLE 5 - ANALYSIS OF THE POSITIVE AND NEGATIVE POINTS OF THE BILLS REGULATING CARBON CREDITS IN BRAZIL	69

CARTOGRAFANDO O SILÊNCIO DO SOLO: A DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO NO SOLO DE 1987 A 2023 EM MATO GROSSO

QUADRO 1 - IDENTIFICAÇÃO DE HOTSPOTS DE ÁREAS DE RISCO E ÁREAS DE ESTOQUE DE CARBONO.....	93
--	-----------

ENCRUZILHADA CLIMÁTICA DE UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA: CRÉDITOS DE CARBONO VS. AÇÕES INTERNAS - VIABILIDADE BASEADA NA LEI 15.042/2024 E NAS DIRETRIZES DO *GHG* *PROTOCOL*

QUADRO 1 – ANÁLISE DO FATOR DE EMISSÃO DE COMBUSTÍVEL AO LONGO DO PERÍODO EM ESTUDO.....	122
QUADRO 2 – ANÁLISE DO FATOR DE EMISSÃO DO GLP AO LONGO DO PERÍODO EM ESTUDO	122
QUADRO 3 - ANÁLISE DO FATOR DE EMISSÃO DE GÁS REFRIGERANTE AO LONGO DO PERÍODO EM ESTUDO.....	123
QUADRO 4 - ANÁLISE DO FATOR DE EMISSÃO DA ENERGIA ELÉTRICA AO LONGO DO PERÍODO EM ESTUDO.....	124
QUADRO 5 - VARIAÇÃO NO PREÇO DOS CRÉDITOS DE CARBONO E CUSTO TOTAL DE COMPENSAÇÃO	127
QUADRO 6 - VARIAÇÃO NO CUSTO DE TECNOLOGIAS INTERNAS E ANÁLISE DE CUSTO-EFETIVIDADE.....	128

LISTA DE FIGURAS

INTRODUÇÃO

FIGURA 1 - CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA MENSURADA SEMANALMENTE DE CO ₂ - 2010-2025 NO OBSERVATÓRIO MAUNA LOA (HAVAÍ).....	18
FIGURA 2 - CRITÉRIOS PARA ESTABELECIMENTO DE VALOR AMBIENTAL E ECONÔMICO DO CRÉDITO DE CARBONO	20
FIGURA 3 - PERGUNTAS DIRECIONAIS DA PESQUISA	21
FIGURA 4 - AS FASES DA CONCEPÇÃO DA TESE	23

PANORAMA GLOBAL DAS PESQUISAS SOBRE CRÉDITO DE CARBONO: DA SEMENTE DE QUIOTO AOS VENTOS DA COP28

FIGURA 1 - ETAPAS DA PESQUISA	37
FIGURA 2 EVOLUÇÃO QUANTITATIVA DAS PUBLICAÇÕES SOBRE CRÉDITO DE CARBONO DE 1997 A 2023	39
FIGURA 3 - PAÍSES QUE RATIFICARAM E/OU SÃO SIGNATÁRIOS DO ACORDO DE PARIS ATÉ JUNHO/2024	41
FIGURA 4 - AS 10 FONTES MAIS CITADAS POR NÚMERO DE OCORRÊNCIAS SOBRE CRÉDITO DE CARBONO DE 1997 A 2023	41
FIGURA 5 - OS 10 AUTORES QUE MAIS PUBLICARAM DOCUMENTOS CIENTÍFICOS SOBRE CRÉDITO DE CARBONO	43
FIGURA 6 - PRODUÇÃO CIENTÍFICA POR PAÍS – EM NÚMERO DE PUBLICAÇÕES	43
FIGURA 7 - FREQUÊNCIA DAS PALAVRAS MAIS USADAS DO TEMPO 1997-2023.....	44
FIGURA 8 - COOCORRÊNCIA DE PALAVRAS-CHAVE REFERENTE AO DESCRITOR “CARBON CREDIT” NO PERÍODO DE 1997 A 2023.....	45
FIGURA 9 - COAUTORIA ENTRE PAÍSES AO DESCRITOR “CARBON CREDIT” NO PERÍODO DE 1997 A 2023.....	46
FIGURA 10 - REDE DE COCITAÇÃO DE AUTORES AO DESCRITOR “CARBON CREDIT” NO PERÍODO DE 1997 A 2023.....	46
FIGURA 11 - RELAÇÃO ENTRE AUTORES, PALAVRAS-CHAVE E PERIÓDICOS AO DESCRITOR “CARBON CREDIT” NO PERÍODO DE 1997 A 2023	47

REGULATORY CHALLENGES OF THE CARBON CREDIT MARKET IN BRAZIL

FIGURE 1 - METHODOLOGICAL FLOW USED FOR SELECTION OF DOCUMENTS	58
---	----

CARTOGRAFANDO O SILÊNCIO DO SOLO: A DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO NO SOLO DE 1987 A 2023 EM MATO GROSSO

FIGURA 1 - ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO (T/HA) NOS ANOS 1987 E 2023 NO ESTADO DE MATO GROSSO.	88
FIGURA 2 - TENDÊNCIA DO ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM MATO GROSSO ENTRE 1987 E 2023.....	89

FIGURA 3 - TENDÊNCIA DE ÁREA DO ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM MATO GROSSO DE 1987 A 2023 DE ACORDO COM AS CLASSES DE CONCENTRAÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO ADOTADAS PELO MAPBIOMAS (1 A 9).	90
FIGURA 4 - DESMATAMENTO ANUAL EM MATO GROSSO DE 1987 A 2023.	91
FIGURA 5 - RELAÇÃO ENTRE O DESMATAMENTO E O ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM MATO GROSSO DE 1987 A 2023.	92
FIGURA 6 - RELAÇÃO ENTRE O DESMATAMENTO E O ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO ENTRE 1987 E 2023 POR CLASSE	93

ENCRUZILHADA CLIMÁTICA DE UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA: CRÉDITOS DE CARBONO VS. AÇÕES INTERNAS - VIABILIDADE BASEADA NA LEI 15.042/2024 E NAS DIRETRIZES DO *GHG PROTOCOL*

FIGURA 1 - CENÁRIOS DE SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS E IMPACTO NAS EMISSÕES	126
FIGURA 2 - EQUIVALÊNCIAS E COMPENSAÇÕES PARA 2.350 TCO ₂ E.ANO-1	129
FIGURA 3 - PROPOSIÇÃO DE UMA MATRIZ SWOT PARA INSERÇÃO NO PRÓXIMO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DA IES.....	129

LISTA DE EQUAÇÕES

ENCRUZILHADA CLIMÁTICA DE UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA: CRÉDITOS DE CARBONO VS. AÇÕES INTERNAS - VIABILIDADE BASEADA NA LEI 15.042/2024 E NAS DIRETRIZES DO *GHG PROTOCOL*

EQUAÇÃO 1 – CÁLCULO DO TOTAL DE EMISSÕES	119
EQUAÇÃO 2 – CÁLCULO DO CUSTO DE EFETIVIDADE.....	120

RESUMO GERAL

BISINOTO, Gustavo Domingos Sakr. **CRÉDITOS DE CARBONO SOB MÚLTIPLAS LENTES: DINÂMICAS CIENTÍFICAS, REGULATÓRIAS, ECONÔMICAS E AMBIENTAIS NA ERA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**. Cáceres: UNEMAT, 2025. 138 pp (Tese – Doutorado em Ciências Ambientais).

A atmosfera terrestre é composta por diversos gases e partículas, entre os quais se destacam o nitrogênio, o oxigênio e os gases do efeito estufa - dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). Dentre eles, o CO_2 possui a maior contribuição para as mudanças climáticas, devido à sua longa permanência na atmosfera, tornando essencial a redução de suas emissões. Nesse contexto, o crédito de carbono surge como um instrumento estratégico na transição para uma economia de baixo carbono, articulando ciência, economia e meio ambiente. Compreender suas múltiplas dimensões é fundamental para identificar potencialidades, desafios e caminhos para sua aplicação efetiva e íntegra. O objetivo geral desta tese foi analisar os créditos de carbono sob perspectivas científica, regulatória, ambiental e econômica, visando identificar seus limites, potencialidades e caminhos viáveis de implementação. Especificamente, buscou-se: (I) realizar uma revisão bibliométrica sobre créditos de carbono (1997-2023), identificando tendências, lacunas e atores-chave; (II) investigar desafios e oportunidades regulatórias do mercado de carbono no Brasil à luz da Lei nº 15.042/2024; (III) avaliar a dinâmica espaço-temporal do carbono orgânico do solo (COS) em Mato Grosso; e (IV) analisar a viabilidade econômica da aquisição de créditos de carbono frente à adoção de medidas internas de mitigação em uma universidade pública. A bibliometria revelou crescente atenção científica ao tema desde o Protocolo de Quioto, com destaque para estudos em energia renovável, reflorestamento e eficiência energética. Contudo, persistem lacunas em governança e riscos de *greenwashing*, reforçando a necessidade de marcos regulatórios robustos para legitimar o mercado como instrumento de mitigação confiável. A análise da regulação brasileira mostrou avanços relevantes, mas também fragilidades, como a ausência de metas setoriais claras e a exclusão do agronegócio, indicando que o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões dependerá de políticas integradas e monitoramento técnico rigoroso. No âmbito ambiental, a análise da dinâmica do COS em Mato Grosso (1987-2023) evidenciou vulnerabilidade associada à expansão agropecuária. Foram identificados *hotspots* de carbono em áreas preservadas - terras indígenas e unidades de conservação - e perdas significativas em áreas convertidas. O estoque total de COS apresentou aumento modesto (0,88%), acompanhado por expansão de áreas de baixo teor de carbono e redução das intermediárias, indicando degradação do solo. Confirmou-se a relação entre desmatamento e perda de COS, especialmente em solos arenosos do Pantanal e na transição Cerrado-Amazônia. Áreas intactas atuam como sumidouros estáveis de carbono, destacando a importância do monitoramento contínuo para subsidiar políticas de uso da terra e projetos de mitigação. A análise econômica demonstrou que, no curto prazo, a compra de créditos de carbono é financeiramente mais viável para instituições públicas. Contudo, a adoção de medidas internas de mitigação mostrou-se mais sustentável e alinhada aos objetivos institucionais de responsabilidade socioambiental no longo prazo. De forma integrada, a tese conclui que os créditos de carbono constituem um instrumento promissor, mas ainda frágil frente às falhas regulatórias, riscos ambientais e distorções econômicas. Sua efetividade depende da sinergia entre ciência, legislação, gestão territorial e práticas institucionais. Compensar emissões em áreas de maior estoque de carbono e priorizar ações internas de mitigação - como energia limpa e mudanças de práticas cotidianas - representa um caminho mais seguro, econômico e

justo. Assim, reafirma-se que os créditos de carbono devem ser meio, e não fim, dentro de uma estratégia mais ampla de transformação climática.

Palavras-chave: Governança Climática; Políticas Públicas; Estoque de Carbono; Sustentabilidade.

ABSTRACT GENERAL

BISINOTO, Gustavo Domingos Sakr. **CARBON CREDITS THROUGH MULTIPLE LENSES: Scientific, regulatory, economic, and environmental dynamics in the era of climate change**. Cáceres: UNEMAT, 2025. 138 pp. (Dissertation – Doctorate in Environmental Sciences).

The earth's atmosphere is composed of various gases and particles, among which nitrogen, oxygen, and greenhouse gases - carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) - stand out. Among them, CO₂ has the greatest contribution to climate change due to its long residence time in the atmosphere, making the reduction of its emissions essential. In this context, carbon credits emerge as a strategic instrument in the transition toward a low-carbon economy, integrating science, economics, and the environment. Understanding their multiple dimensions is fundamental to identifying potentialities, challenges, and pathways for their effective and transparent application. The general objective of this thesis was to analyze carbon credits from scientific, regulatory, environmental, and economic perspectives, aiming to identify their limits, potentialities, and feasible paths for implementation. Specifically, it sought to: (I) conduct a bibliometric review on carbon credits (1997-2023) to identify trends, gaps, and key actors; (II) investigate regulatory challenges and opportunities in the Brazilian carbon market in light of Law No. 15,042/2024; (III) assess the spatiotemporal dynamics of soil organic carbon (SOC) in Mato Grosso; and (IV) analyze the economic feasibility of acquiring carbon credits compared to adopting internal mitigation measures in a public university. The bibliometric analysis revealed growing scientific attention to the topic since the Kyoto Protocol, highlighting studies in renewable energy, reforestation, and energy efficiency. However, governance gaps and risks of greenwashing persist, reinforcing the need for robust regulatory frameworks to legitimize the market as a credible mitigation instrument. The analysis of Brazilian regulation showed relevant progress but also fragilities, such as the absence of clear sectoral targets and the exclusion of agribusiness, indicating that the Brazilian Emissions Trading System will depend on integrated policies and rigorous technical monitoring. From an environmental perspective, the analysis of SOC dynamics in Mato Grosso (1987-2023) revealed vulnerabilities associated with agricultural expansion. Carbon hotspots were identified in preserved areas - Indigenous Lands and Conservation Units - while significant losses occurred in converted areas. The total SOC stock showed a modest increase (0.88%), accompanied by the expansion of low-carbon areas and the reduction of intermediate ones, indicating soil degradation. The relationship between deforestation and SOC loss was confirmed, especially in sandy soils of the Pantanal and the Cerrado-Amazon transition. Intact areas act as stable carbon sinks, underscoring the importance of continuous monitoring to support land-use policies and mitigation projects. The economic analysis demonstrated that, in the short term, purchasing carbon credits is financially more viable for public institutions. However, the adoption of internal mitigation measures proved to be more sustainable and aligned with institutional goals of social and environmental responsibility in the long term. In an integrated manner, this thesis concludes that carbon credits represent a promising yet fragile instrument, given regulatory shortcomings, environmental risks, and economic distortions. Their effectiveness depends on the synergy among science, legislation, land management, and institutional practices. Offsetting emissions in high-carbon-stock areas while prioritizing internal mitigation actions - such as clean energy adoption and behavioral changes - constitutes a safer, more economical, and fairer path. Thus, it is reaffirmed that carbon credits should serve as a means, not an end, within a broader strategy of climate transformation.

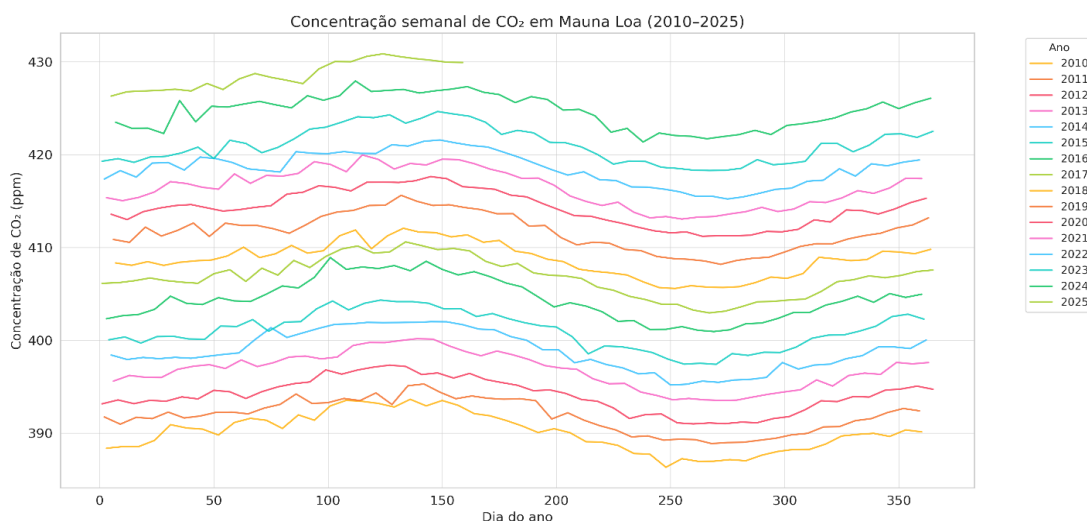
Keywords: Climate Governance; Public Policy; Carbon Stock; Sustainability.

INTRODUÇÃO GERAL

As emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) foram estimadas, para o ano de 2024, em 41,6 bilhões de toneladas, abrangendo tanto as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis (37,4 bilhões de toneladas) quanto aquelas resultantes de mudanças no uso da terra, como o desmatamento (4,2 bilhões de toneladas) (Friedlingstein *et al.*, 2023; *Global Carbon Project*, 2024). Esse volume representa um aumento de 2,4% em relação às 40,6 bilhões de toneladas emitidas em 2023, evidenciando a dificuldade global em conter o avanço das emissões e limitar o aquecimento do planeta, conforme estabelecido no Acordo de Paris (IPCC, 2023).

A Figura 01 apresenta a concentração atmosférica de CO₂ no período de janeiro de 2010 a maio de 2025, expressa em partes por milhão (ppm) e mensurada semanalmente pelo Observatório de Mauna Loa, a mais antiga estação de monitoramento contínuo de CO₂ do mundo e principal referência global para medição desse gás (Assad *et al.*, 2019). Apesar das inúmeras discussões e acordos internacionais voltados à redução das emissões de gases de efeito estufa, a concentração atmosférica de CO₂ continua a crescer ano após ano, com picos mais elevados entre os meses de maio e setembro, em razão da intensa atividade fotossintética no verão boreal. Observa-se um aumento médio anual de aproximadamente 1,96 ppm de CO₂, o que equivale a 0,52% de incremento médio na concentração atmosférica global do gás.

Figura 1 - Concentração atmosférica mensurada semanalmente de CO₂ - 2010-2025 no observatório Mauna Loa (Havai)



Fonte: elaborado pelo autor com base nos dados NOAA - *Global Monitoring Laboratory* (2025)

O Brasil contribui de forma significativa para esse cenário. Em 2023 e 2024, as emissões líquidas do país foram estimadas em cerca de 2,3 bilhões de toneladas de gases de efeito estufa, o que coloca o Brasil como o sexto maior emissor do mundo (Seeg, 2024). Esse valor representa aproximadamente 5,5% das emissões globais de CO₂ em 2024 (*Global Carbon Project*, 2024). No caso brasileiro, a maior parte das emissões está associada ao desmatamento e às mudanças no uso da terra, diferentemente de outros grandes emissores, nos quais predominam as emissões dos setores energético e industrial (Seeg, 2024).

Para conter esse avanço, é necessário mitigar as emissões. O termo “mitigação” tornou-se central no debate climático porque, diante do volume já acumulado de gases de efeito estufa na atmosfera, não é mais possível evitar completamente o aquecimento global, apenas limitar sua intensidade e os impactos futuros. Mesmo que as emissões fossem drasticamente reduzidas hoje, os gases de efeito estufa (GEE) já presentes continuarão a influenciar o clima por décadas ou até séculos, tornando inevitáveis algumas mudanças climáticas (IPCC, 2014).

Diversas estratégias de mitigação vêm sendo debatidas nas últimas décadas. Entre elas, destaca-se o crédito de carbono, um importante instrumento de política climática, especialmente após o estabelecimento do Protocolo de Quioto, em 1997, que formalizou mecanismos como o ETS – *Emissions Trading System* (Comércio de Emissões), a JI – *Joint Implementation* (Implementação Conjunta), válidos apenas para os 39 países do Anexo I do Protocolo de Quioto (países industrializados) e o mecanismo de flexibilização CDM – *Clean Development Mechanism* ou MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) (Patel *et al.*, 2020; Zupic e Čater, 2015). Esses instrumentos foram criados para auxiliar na mitigação do aquecimento global. Desde então, a consolidação do mercado de carbono tem sido influenciada por transformações normativas, avanços tecnológicos e mudanças nos padrões de governança climática global (Aria; Cuccurullo, 2017).

A governança climática emerge como um campo normativo e operativo que busca articular múltiplos atores – estatais, privados e da sociedade civil - em torno da formulação e implementação de respostas eficazes à crise climática. Mais do que um problema técnico, a mudança do clima representa um desafio ético e distributivo, pois afeta de forma desigual diferentes regiões, grupos sociais e gerações (Biermann; Boas, 2010; Bulkeley *et al.*, 2014), como exemplificam eventos recentes, a exemplo das ondas de calor na Sibéria em 2020, das inundações no Paquistão em 2022 e das cheias no Rio

Grande do Sul em 2024. A justiça climática torna-se, assim, um princípio fundamental para orientar políticas públicas e mecanismos de mercado, assegurando que os ônus e benefícios da transição ecológica sejam distribuídos de maneira equitativa (Schlosberg; Collins, 2014; Raworth, 2017).

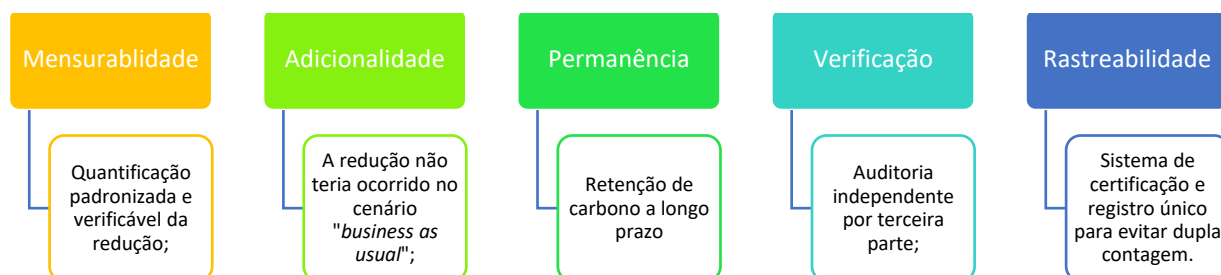
Nos últimos anos, as alterações climáticas decorrentes das emissões de carbono têm recebido destaque crescente por parte de nações em todo o mundo. Diversos países e regiões têm implementado políticas voltadas à restrição das emissões de carbono, sendo o comércio de emissões a estratégia mais amplamente adotada entre elas (Dias, 2016).

O crédito de carbono é um mecanismo de precificação das emissões de GEE, concebido a partir do reconhecimento de que a atmosfera possui uma capacidade limitada de absorção de carbono sem causar desequilíbrios climáticos significativos. Há um limite máximo de emissões acumuladas que pode ser lançado à atmosfera para manter o aquecimento global abaixo de 1,5 °C ou 2 °C. Esse limite é denominado *carbon budget* e fundamenta a necessidade de limitar e redistribuir as emissões globais (IPCC, 2023).

Como o impacto climático dos GEE é global, uma tonelada de CO₂ evitada em um país tem o mesmo efeito ambiental de uma tonelada emitida em outro, desde que seja adicional e permanente (Sachs, 2013). Esse princípio sustenta o comércio internacional de créditos de carbono. Dessa forma, um crédito de carbono só é considerado válido se resultar de uma ação que não ocorreria na ausência de incentivo econômico, o que exige rigor metodológico para garantir que a redução seja real, mensurável e adicional (Wara, 2007).

Cames *et al.* (2016) destacam que para que o crédito de carbono tenha valor ambiental e econômico, deve atender aos critérios de mensurabilidade, adicionalidade, permanência, verificação e rastreabilidade, conforme figura 2.

Figura 2 - Critérios para estabelecimento de valor ambiental e econômico do Crédito de carbono



Fonte: CAMES *et al.* (2016) com adaptações pelo autor.

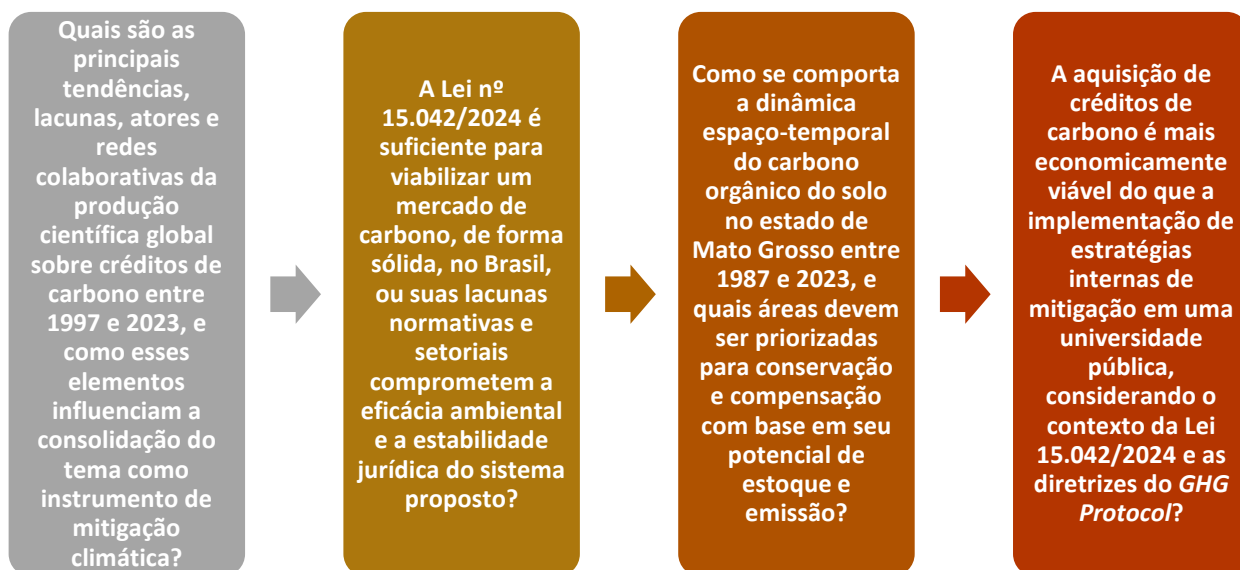
O comércio de créditos de carbono opera sob duas modalidades: os mercados voluntários, baseados em compromissos espontâneos, nos quais organizações compensam suas emissões com base em padrões como o *GHG Protocol* (WRI; WBCSD, 2004), e os mercados regulados, estruturados por obrigações legais que envolvem mecanismos de punição e recompensa, como o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS) e o recém-criado, ainda em fase de implementação, Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024 (Brasil, 2024).

Entre os exemplos de sucesso, destacam-se sistemas como o *European Union Emissions Trading System (EU ETS)* e o *California Cap-and-Trade*, que demonstram reduções setoriais de 5% a 21% quando associados a regulamentações robustas (Probst *et al.*, 2024; Döbbeling-Hildebrandt *et al.*, 2024). Em contrapartida, observa-se que diversos projetos derivados do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), frequentemente financiaram iniciativas que seriam implementadas mesmo sem a existência de créditos, caracterizando falta de adicionalidade. Análises indicam que cerca de 85% dos projetos de energia eólica e hidrelétrica superestimaram reduções, resultando na emissão de créditos sem lastro real (Probst *et al.*, 2024; Carbon Market Watch, 2024).

Mathews (2008), Han *et al.* (2022) e Krause (2023) destacam que as pesquisas sobre créditos de carbono buscam desenvolver estratégias e práticas voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), principais responsáveis pelo aquecimento global e pelas mudanças climáticas.

Considerando esse contexto, propõe-se a seguinte questão central de pesquisa: os créditos de carbono, analisados sob as perspectivas científica, regulatória, ambiental e econômica, podem ser aplicados de forma efetiva na mitigação das mudanças climáticas no Brasil, considerando seus limites, potencialidades e caminhos de aprimoramento? A partir dessa indagação central, derivam-se as demais questões científicas, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Perguntas direcionais da pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor.

Para responder a essas indagações, estabeleceu-se como objetivo geral analisar os créditos de carbono sob múltiplas lentes – científica, regulatória, ambiental e econômica - a fim de identificar limites, potencialidades e caminhos viáveis para sua efetiva aplicação na mitigação das mudanças climáticas.

Como desdobramentos, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

I) realizar uma revisão bibliométrica das publicações sobre crédito de carbono entre 1997 e 2023, identificando tendências, lacunas e atores-chave da produção científica global;

II) investigar os desafios e oportunidades regulatórios do mercado de carbono no Brasil à luz da Lei nº 15.042/2024;

III) avaliar a dinâmica espaço-temporal do carbono orgânico do solo em Mato Grosso, destacando *hotspots* e áreas críticas de emissão que apresentem potencial para estímulo a projetos de crédito de carbono;

IV) analisar a viabilidade econômica da aquisição de créditos de carbono frente à adoção de medidas internas de mitigação em uma universidade pública.

Ao abordar os créditos de carbono sob múltiplas perspectivas, esta tese busca subsidiar aspectos técnicos e críticos para o fortalecimento da governança climática no Brasil, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, especialmente:

ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima, meta 13.2: “Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais”, ao discutir estratégias necessárias de mitigação e compensação;

ODS 12 – Consumo e produção responsáveis, meta 12.2: “Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais”, ao propor estratégias institucionais sustentáveis que envolvem análise de custo-benefício na gestão de emissões;

ODS 15 – Vida terrestre, meta 15.3: “Até 2030, combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradado, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo”, ao mapear áreas de estoque de carbono e sugerir ações voltadas à conservação de solos e florestas tropicais.

Esta tese reúne quatro artigos que analisam diferentes dimensões do mercado de carbono – científica, regulatória, ecológica e econômica – e foi estruturada em seis fases, conforme apresentado na Figura 04.

Figura 4 - As fases da concepção da tese



Fonte: elaborado pelo autor.

O primeiro artigo realiza uma ampla análise bibliométrica da produção científica sobre créditos de carbono de 1997 a 2023, identificando os principais autores, redes de colaboração, países líderes na produção acadêmica e lacunas temáticas.

O segundo artigo examina o arcabouço legal brasileiro, com foco na Lei nº 15.042/2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE). Apresenta o histórico de discussão dos projetos de lei que antecederam sua sanção e analisa os aspectos positivos e negativos da norma, oferecendo sugestões de aprimoramento para as fases seguintes de regulação.

O terceiro artigo analisa a dinâmica espaço-temporal do carbono orgânico do solo (COS) em Mato Grosso, no período de 1987 a 2023, com base em dados do MapBiomass Solo e no uso de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. O estudo identifica *hotspots* de carbono em áreas preservadas, como terras indígenas e unidades de conservação, reforçando sua relevância na manutenção dos estoques de carbono e na mitigação das mudanças climáticas.

O quarto artigo investiga a viabilidade econômica da aquisição de créditos de carbono em comparação à implementação de estratégias internas de redução de emissões em uma universidade pública, utilizando como referência o *GHG Protocol* e a Lei nº 15.042/2024, a partir de dados institucionais coletados entre 2018 e 2022.

Ao integrar perspectivas científicas, legais, ambientais e econômicas, esta tese propõe uma leitura reflexiva sobre o mercado de carbono, contribuindo para a construção de um sistema de governança climática mais robusto. Os resultados apresentados podem subsidiar gestores públicos, formuladores de políticas e a comunidade acadêmica no desenvolvimento de estratégias mais eficazes, sustentáveis e equitativas para o enfrentamento da crise climática.

REFERÊNCIAS

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. *Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis*. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. Disponível em: Doi: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>. Acesso em: 11 abr. 2024.

ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; CORDEIRO, L. A. M.; EVANGELISTA, B. A. Sequestro de carbono e mitigação das emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. ILPF : inovação com integração de lavoura, pecuária e Floresta. Davi José Bungenstab ... [et al.], editores técnicos. Brasília, DF : **Embrapa**, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/202386/1/ILPF-inovacao-com-integracao-de-lavoura-pecuaria-e-floresta-2019.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2024.

BIERMANN, F.; BOAS, I. Preparing for a Warmer World: Towards a Global Governance System to Protect Climate Refugees. **Global Environmental Politics**, v. 10, n. 1, p. 60–88, feb. 2010. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.1162/glep.2010.10.1.60>. Acesso em: 20 mai. 2024.

BRASIL. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2024.

BULKELEY, H.; ANDONOVA, L. B.; BETSILL, M. M.; COMPAGNON, D.; HALE, T.; HOFFMANN, M. J.; NEWELL, P.; PETERSON, M.; ROGER, C. and VANDEVEER, S. D.: Transnational Climate Change Governance. Cambridge: **Cambridge University Press**, 2014. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107706033>. Acesso em: 12 abr. 2024.

CAMES, M.; HARTHAN, O.; FÜSSLER, J.; LAZARUS, M.; LEE, C. M.; ERICKSON, P. and SPALDING-FECHER, R.: How additional is the Clean Development Mechanism? Analysis of the integrity of CDM projects. **Öko-Institut e.V.**, 2016. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23258.54728>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CARBON MARKET WATCH. ***Cooking the climate books: New peer-reviewed study finds carbon credit impact vastly overstated.*** (website) 2024. Disponível em: <https://carbonmarketwatch.org/2024/11/14/cooking-the-climate-books-new-peer-reviewed-study-finds-carbon-credit-impact-vastly-overstated/>. Acesso em: 05 mar. 2025.

DIAS, A. L. A. **Mercado Mundial dos Créditos de Carbono: Histórico e Estado da Arte**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. 2016. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/78552596.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2024.

DÖBBELING-HILDEBRANDT, N.; MIERSCH, K.; KHANNA, T.M.; BACHELET, M.; BRUNS, S. B.; CALLAGHAN, M.; EDENHOFER, O.; FLACHSLAND C.; FORSTER, P. M.; KALKUHL, M.; KOCH, N.; LAMB, W. F.; OHLENDORF, N.; STECKEL, J. C. and MINX, J.C.: Systematic review and meta-analysis of ex-post evaluations on the effectiveness of carbon pricing. **Nature Communications** 15, 4147 (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48512-w>. Acesso em: 08 ago. 2024.

FRIEDLINGSTEIN, P.; O'SULLIVAN, M.; JONES, M. W.; ANDREW, R. M.; BAKKER, D. C. E.; HAUCK, J.; LANDSCHÜTZER, P.; LE QUÉRE, C.; LUIJKX, I. T.; PETERS, G. P.; PETERS, W.; PONGRATZ, J.; SCHWINGSHACKL, C.; SITCH, S.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; ALIN, S. R.; ANTHONI, P.; BARBERO, L.; BATES, N. R.; BECKER, M.; BELLOUIN, N.; DECHARME, B.; BOPP, L.; BRASIKA, I. B. M.; CADULE, P.; CHAMBERLAIN, M. A.; CHANDRA, N.; CHAU, T.-T.-T.; CHEVALLIER, F.; CHINI, L. P.; CRONIN, M.; DOU, X.; ENYO, K.; EVANS, W.; FALK, S.; FEELY, R. A.; FENG, L.; FORD, D. J.; GASSER, T.; GHATTAS, J.; GKRTZALIS, T.; GRASSI, G.; GREGOR, L.; GRUBER, N.; GÜRSSES, Ö.; HARRIS, I.; HEFNER, M.; HEINKE, J.; HOUGHTON, R. A.; HURTT, G. C.; IIDA, Y.; ILYINA, T.; JACOBSON, A. R.; JAIN, A.; JARNÍKOVÁ, T.; JERSILD, A.; JIANG, F.; JIN, Z.; JOOS, F.; KATO, E.; KEELING, R. F.; KENNEDY, D.; KLEIN GOLDEWIJK, K.; KNAUER, J.; KORSBAKKEN, J. I.; KÖRTZINGER, A.; LAN;

X.; LEFÈVRE; N.; LI; H.; LIU; J.; LIU; Z.; MA; L.; MARLAND; G.; MAYOT; N.; MCGUIRE; P. C.; MCKINLEY; G. A.; MEYER; G.; MORGAN; E. J.; MUNRO; D. R.; NAKAOKA; S.-I.; NIWA; Y.; O'BRIEN; K. M.; OLSEN; A.; OMAR; A. M.; ONO; T.; PAULSEN; M.; PIERROT; D.; POCOCK; K.; POULTER; B.; POWIS; C. M.; REHDER; G.; RESPLANDY; L.; ROBERTSON; E.; RÖDENBECK; C.; ROSAN; T. M.; SCHWINGER; J.; SÉFÉRIAN; R.; SMALLMAN; T. L.; SMITH; S. M.; SOSPEDRA-ALFONSO; R.; SUN; Q.; SUTTON; A. J.; SWEENEY; C.; TAKAO; S.; TANS; P. P.; TIAN; H.; TILBROOK; B.; TSUJINO; H.; TUBIELLO; F.; VAN DER WERF; G. R.; VAN OOIJEN; E.; WANNINKHOF; R.; WATANABE; M.; WIMART-ROUSSEAU; C.; YANG; D.; YANG; X.; YUAN; W.; YUE; X.; ZAEHLE; S.; ZENG; J. AND ZHENG; B.: Global Carbon Budget 2023. **Earth System Science Data**, v. 15, p. 5301–5365, 2023. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>. Acesso em: 05 abr. 2025.

GLOBAL CARBON PROJECT. **Global Carbon Budget 2024**. Disponível em: <https://www.globalcarbonproject.org/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

HAN, J.; KONG, L.; WANG, W. and XIE, J. (2022), Motivating individual carbon reduction with saleable carbon credits: policy implications for public emission reduction projects. **Industrial Management & Data Systems**, vol. 122, n. 5, p. 1268-1305. Disponível em: DOI: <https://doi-org.ez181.periodicos.capes.gov.br/10.1108/IMDS-12-2021-0764>. Acesso em: 14 fev. 2025.

IPCC, 2014: **Sumário para os tomadores de decisão do Quinto relatório de avaliação** (2014). Traduzido por Iniciativa Verde, São Paulo, 2015. Disponível em: http://www.iniciativaverde.org.br//lib/php/download.php?cfg=1&arq=produtos/37_2015_05_04_relatorio_ipcc_portugues.pdf&mde=ProdItem&cod=37. Acesso em: 25 ago. 2024.

IPCC. 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. Geneva: **IPCC**, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 17 abr. 2025.

KRAUSE, B. C. Considerações pungentes ao mercado de crédito de carbono. Perspectivas Sociais, **Pelotas**, vol. 09, nº 01, p. 14-39, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.15210/rps.v9i01.22375>. Acesso em: 12 mai. 2024.

MATHEWS, J. A. How carbon credits could drive the emergence of renewable energies. **Energy Policy**, Volume 36, Issue 10, 2008, Pages 3633-3639. DOI: Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.05.033>. Acesso em: 14 abr. 2024.

NOAA. Global Monitoring Laboratory – Publications. **National Oceanic and Atmospheric Administration**. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/publications/browse.php>. Acesso em: 12 jun. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova Iorque: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>. Acesso em: 12 out. 2024.

PATEL, D.; BRITTO B.; SHARMA, S.; GAIKWAD, K.; DUSING, Y. AND GUPTA, M. Carbon Credits on Blockchain. **2020 International Conference on Innovative Trends in Information Technology (ICITIIT)**, Kottayam, India, 2020, p. 1-5, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITIIT49094.2020>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9071536>. Acesso em: 27 fev. 2024.

PROBST, B.; TOETZKE, M.; KONTOLEON, A.; ANADÓN, L. D.; MINX, J. C.; HAYA, B. K.; SCHNEIDER, L.; TROTTER, P. A.; WEST, T. A. P.; GILL-WIEHL, A. and HOFFMANN, V. H.: Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 1-13, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53645-z>. Acesso em: 28 nov. 2024.

RAWORTH, K. *Doughnut Economics: seven ways to think like a 21st-century economist*. **Chelsea Green Publishing**, 2017. Disponível em <https://doi.org/10.33568/rbs.2409>. Acesso em: 12 jun. 2024.

SACHS, Jeffrey D. The age of sustainable development. New York: **Columbia University Press**, 2013. Disponível em: <https://www.project-syndicate.org/commentary/jeffrey-d--sachs-proposes-a-new-curriculum-for-a-new-era>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SCHLOSBERG, D.; COLLINS, L. From environmental to climate justice: climate change and the discourse of environmental justice. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 5, n. 3, p. 359–374, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wcc.275>. Acesso em: 14 ago. 2024.

SEEG – **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Emissões totais do Brasil. 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 30 mar. 2025.

WARA, M. Is the global carbon market working? **Nature**, v. 445, p. 595–596, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/445595a>. Acesso em: 14 fev. 2024.

WRI; WBCSD. The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised edition. Geneva: **World Resources Institute**; World Business Council for Sustainable Development, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34895.33443>. Acesso em: 02 mar. 2024.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>. Acesso em: 15 jul. 2024.

Artigo I¹

PANORAMA GLOBAL DAS PESQUISAS SOBRE CRÉDITO DE CARBONO: DA SEMENTE DE QUIOTO AOS VENTOS DA COP28²

Global panorama of carbon credit research: from the seed of Kyoto to the winds of COP28

Panorama global de la investigación sobre créditos de carbono: de la semilla de Kioto a los vientos de la COP28

RESUMO: Este artigo analisa a evolução científica e prática do conceito de crédito de carbono, desde a implementação do Protocolo de Quioto em 1997 até a COP 28. O estudo objetiva identificar padrões, tendências e lacunas na pesquisa global sobre o tema, com base nas publicações científicas de 1997 a 2023, utilizando dados da base Scopus e ferramentas como Bibliometrix e VOSviewer, que foram aplicadas para analisar citações, palavras-chave e redes de colaboração, mapeando os principais pesquisadores, instituições e países envolvidos, como Estados Unidos, China, Austrália e Brasil. Atualmente os créditos são usados, com maior frequência, em projetos de energia renovável, reflorestamento, eficiência energética e captura de carbono. Tecnologias emergentes, como blockchain, estão sendo exploradas para aumentar a transparência e rastreabilidade do mercado, que ainda enfrenta riscos como greenwashing, fraudes nos mercados voluntários e a falta de padronização global para medir e verificar reduções de emissões. Destacam-se como fontes relevantes a Journal of Cleaner Production e a Sustainability (Switzerland), de forma a colocar o crédito de carbono como uma ferramenta essencial na transição para uma economia de baixo carbono, mas isso requer mecanismos de governança robustos para assegurar integridade ambiental e eficácia. Este estudo oferece uma visão abrangente e atualizada sobre o tema, sendo útil para formuladores de políticas, empresas e pesquisadores interessados em soluções sustentáveis e no fortalecimento da cooperação global para enfrentar as mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, Sustentabilidade, Mitigação.

ABSTRACT: This article analyzes the scientific and practical evolution of the carbon credit concept, from the implementation of the Kyoto Protocol in 1997 to COP 28. The study objective identifies patterns, trends and gaps in global research on the topic, based on scientific publications from 1997 to 2023, using data from the Scopus database and tools such as Bibliometrix and VOSviewer, which were applied to analyze citations, keywords and collaboration networks, mapping the main researchers, institutions and countries involved, such as the United States, China, Australia and Brazil. Credits are

¹.Artigo publicado em a Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana – Qualis A4 ISSN: 1696-8352.

² BISINOTO, G. D. S.; VIANA, C. R. S.; PEREIRA, T. F.; NASCIMENTO, N. T. A.; ZANIN, R. B.; OLIVEIRA JUNIOR, E. S. Panorama global das pesquisas sobre crédito de carbono: da semente de Quioto aos ventos da COP28. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, [S. l.], v. 23, n. 1, p. e8540, 2025. DOI: 10.55905/oelv23n1-031 Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/8540>. Acesso em: 6 out. 2025.

currently used more frequently in renewable energy, reforestation, energy efficiency and carbon capture projects. Emerging technologies such as blockchain are being explored to increase transparency and traceability in the market, which still faces risks such as greenwashing, fraud in voluntary markets and the lack of global standardization for measuring and verifying emissions reductions. The Journal of Cleaner Production and Sustainability (Switzerland) stand out as relevant sources, in order to place carbon credit as an essential tool in the transition to a low-carbon economy, but this requires robust governance mechanisms to ensure environmental integrity and effectiveness. This study offers a comprehensive and up-to-date overview of the topic, being useful for policymakers, companies and researchers interested in sustainable solutions and strengthening global cooperation to address climate change.

Keywords: Climate Change, Sustainability, Mitigation.

RESUMEN: Este artículo analiza la evolución científica y práctica del concepto de crédito de carbono, desde la implementación del Protocolo de Kioto en 1997 hasta la COP 28. El estudio identifica patrones, tendencias y vacíos en la investigación global sobre el tema, con base en publicaciones científicas de 1997 a 2023, utilizando datos de la base de datos Scopus y herramientas como Bibliometrix y VOSviewer, que se aplicaron para analizar citas, palabras clave y redes de colaboración, mapeando los principales investigadores, instituciones y países involucrados, como Estados Unidos, China, Australia y Brasil. Actualmente los créditos se utilizan con mayor frecuencia en proyectos de energía renovable, reforestación, eficiencia energética y captura de carbono. Se están explorando tecnologías emergentes como blockchain para aumentar la transparencia y la trazabilidad en el mercado, que aún enfrenta riesgos como el lavado verde, el fraude en mercados voluntarios y la falta de estandarización global para medir y verificar las reducciones de emisiones. El Journal of Cleaner Production and Sustainability (Suiza) se destacan como fuentes relevantes, con el fin de colocar el crédito de carbono como una herramienta esencial en la transición hacia una economía baja en carbono, pero esto requiere mecanismos de gobernanza robustos para asegurar la integridad y efectividad ambiental. Este estudio ofrece una visión general completa y actualizada del tema, siendo útil para formuladores de políticas, empresas e investigadores interesados en soluciones sostenibles y fortalecer la cooperación global para abordar el cambio climático.

Palabras clave: Crédito de Carbono; Cambio Climático; Sostenibilidad; Mitigación.

1 INTRODUÇÃO

Desde sua criação em 1997, o crédito de carbono tem se destacado como ferramenta crucial na mitigação das mudanças climáticas (Landrigan *et al.*, 2018). Este mecanismo, concebido como parte do Protocolo de Quioto, busca incentivar a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao possibilitar a negociação e comercialização de créditos resultantes de projetos de redução de emissões (Verra, 2021). Ao longo das décadas, o crédito de carbono tem passado por diversas

transformações, impulsionadas por mudanças políticas, econômicas e tecnológicas globais, moldando o panorama da sustentabilidade e do combate às mudanças climáticas (Zupic; Čater, 2015).

É essencial compreender o funcionamento prático desse mecanismo e suas ramificações sociais, econômicas e políticas, a fim de avaliar sua eficácia e identificar oportunidades para seu aprimoramento (Bursztyn; Bursztyn, 2012). O relatório *Renewables* (2024), da *International Energy Agency* apontou que as emissões globais de CO₂ provenientes da energia registraram um aumento de 1,1% em 2023, alcançando um nível recorde. Esse aumento foi atribuído, principalmente, à reduzida produção hidrelétrica causada pela seca e ao crescimento econômico na China. As emissões energéticas representam 90% das emissões por ação humana e aumentaram 410 milhões de toneladas CO₂ equivalente em 2023.

Dessa forma, como objetivo geral, realizou-se uma análise bibliométrica sobre o crédito de carbono desde sua concepção em 1997, identificando sua evolução ao longo do tempo e buscando compreender quais foram as pesquisas, instituições, países e pesquisadores mais relevantes para o avanço científico sobre o tema. No trabalho foram delineados os seguintes objetivos específicos: identificar a evolução histórica da produção científica sobre o crédito de carbono (1997-2023); mapear os principais periódicos científicos que publicam sobre crédito de carbono; identificar os países que mais produzem pesquisas sobre crédito de carbono; analisar as redes de colaboração entre instituições e países; identificar os pesquisadores e artigos mais influentes no campo, utilizando métricas como o h-index; identificar as lacunas de pesquisa sobre crédito de carbono.

A justificativa para o estudo do crédito de carbono reside na sua importância como um dos instrumentos de política ambiental global, pois desde a sua implementação, este mecanismo tem sido uma peça fundamental no esforço coletivo para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os impactos das mudanças climáticas (Sanquetta, 2023). Apesar dos avanços alcançados, persistem desafios significativos, incluindo questões relacionadas à eficácia, equidade, transparência, conflitos de terra, instabilidade política e integridade ambiental dos projetos de crédito de carbono (Oliveira, 2022; Alves *et al.*, 2024).

2 PESQUISAS SOBRE CRÉDITO DE CARBONO

Uma parte significativa da pesquisa sobre créditos de carbono tem se concentrado na avaliação de sua eficácia como instrumento de política climática. Estudos como o de Freitas *et al.* (2016) destacam a importância de considerar os efeitos distribucionais das políticas de tributação de emissões, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil. Fearnside (2013) investigou os potenciais impactos das represas hidrelétricas na emissão de gases de efeito estufa, destacando os desafios de atribuir créditos de carbono a projetos desse tipo.

O avanço da tecnologia e da modelagem quantitativa tem permitido uma análise mais detalhada dos mercados de crédito de carbono. Estudos como o de Cobo *et al.* (2011) e Oyewola e Dada (2022) utilizaram ferramentas de mapeamento científico e abordagens de cientometria para analisar as tendências e os padrões de pesquisa nesse campo.

Zhang, Wang e Zhou (2016) investigaram as interações estratégicas regionais entre investimentos em proteção ambiental e emissões na China, destacando a complexidade das dinâmicas entre desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental, evidenciando a necessidade de uma abordagem integrada na formulação de políticas de crédito de carbono, que leve em consideração não apenas os aspectos ambientais, mas também os econômicos e sociais.

2.1 EVOLUÇÃO DO CRÉDITO DE CARBONO

O Protocolo de Quioto foi um marco na história das políticas climáticas globais, estabelecendo metas vinculativas para redução das emissões de GEE para países industrializados e introduzindo o conceito de créditos de carbono como uma forma de mitigar essas emissões (Patel *et al.*, 2020).

Estudos têm explorado diferentes aspectos dessa evolução, incluindo as interações entre o crédito de carbono e outros instrumentos financeiros, como demonstrado por Sun e Gao (2022) em sua análise sobre financiamento bancário e financiamento comercial baseado em negociação de emissões de carbono. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para avaliar e mensurar os créditos de carbono em diversos setores e regiões, sendo o trabalho proposto por Monteiro *et al.* (2015) para a suinocultura brasileira, um exemplo interessante. A dinâmica evolutiva do mercado de

crédito de carbono também é influenciada por fatores socioeconômicos e políticos, como destacado por Wade *et al.* (2022) em seu estudo sobre o impacto desses fatores nas emissões de gases de efeito estufa e no sequestro de carbono na agricultura e silvicultura nos Estados Unidos.

Essas pesquisas demonstram a complexidade e a interconexão de diversos aspectos envolvidos na dinâmica evolutiva do crédito de carbono. À medida que o mundo continua a enfrentar desafios climáticos urgentes, compreender e analisar essas dinâmicas é fundamental para informar políticas eficazes e promover a transição para uma economia de baixo carbono.

2.2 O CRÉDITO DE CARBONO NA MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A implementação de mecanismos de crédito de carbono tem sido um ponto focal nas discussões sobre mitigação das mudanças climáticas. Estes mecanismos, incluindo o Protocolo de Quioto e seus sucessores, visam incentivar a redução das emissões de GEE's por meio da criação de um mercado de carbono onde as empresas podem comprar e vender créditos de carbono (Zhang; Wang; Zhou, 2016). Este sistema de compensação financeira tem sido adotado como uma ferramenta-chave para promover a redução das emissões de carbono em diversas indústrias e setores da economia global (Zupic; Čater, 2015).

No entanto, apesar dos esforços contínuos para implementar e aprimorar esses mecanismos, a falta de transparência e o potencial para práticas consideradas fraudulentas no mercado voluntário de carbono podem comprometer a integridade desses mecanismos e minar sua capacidade de promover a redução genuína das emissões de carbono, pois sem uma supervisão adequada (fundamentada em uma regulamentação), existe o risco de que os créditos de carbono se tornem uma forma de "lavagem verde", permitindo que as empresas continuem poluindo sem fazer esforços significativos para reduzir suas emissões (Cobo *et al.*, 2011; Khan *et al.*, 2019). Mesmo com esses riscos, organizações públicas e privadas continuam a aderir voluntariamente a esses mecanismos, como parte de seus compromissos com a redução das emissões de carbono e a luta contra as mudanças climáticas (Zupic; Čater, 2015).

2.3 O IMPACTO DOS CRÉDITOS DE CARBONO NA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

O sistema de créditos de carbono tem sido objeto de intenso escrutínio e pesquisa em relação ao seu impacto na redução das emissões de GEE. A discussão sobre a eficácia desses mecanismos tem sido explorada na literatura, com análises bibliométricas (Guleria; Kaur, 2021). O sistema de créditos de carbono, como definido pelo Protocolo de Quioto, introduziu um mercado para transações de emissões, permitindo que empresas e países comprem e vendam permissões para emitir gases de efeito estufa. Essa abordagem baseada no mercado foi concebida como um meio de incentivar a redução das emissões, fornecendo um valor econômico para a mitigação do carbono (Aria; Cuccurullo, 2017).

Projetos de créditos de carbono têm sido implementados em uma variedade de setores e regiões, resultando em reduções mensuráveis nas emissões de GEE (Aria; Cuccurullo, 2017). Neste contexto, os créditos de carbono devem ser vistos como uma ferramenta complementar dentro de um conjunto de políticas e medidas destinadas a reduzir as emissões de GEE, incluindo políticas como a precificação do carbono, investimentos em energias renováveis e eficiência energética e a promoção de práticas agrícolas sustentáveis (Khan *et al.*, 2019).

2.4 LIMITAÇÕES E DESAFIOS ENFRENTADOS PELO MERCADO DE CARBONO

Uma das principais limitações do mercado de carbono reside na questão da mensuração e verificação das reduções de emissões. Como apontado por Austin *et al.* (2020), calcular com precisão as emissões evitadas ou reduzidas por determinado projeto ou ação é uma tarefa complexa e muitas vezes sujeita a incertezas. A falta de padrões globais uniformes para medição e relato de emissões também contribui para essa limitação (Chen; Ibekwe-Sanjuan; Hou, 2010). Essas incertezas e inconsistências podem minar a confiança dos participantes do mercado de carbono, prejudicando sua credibilidade e eficácia, como relatado em Capirazi (2023).

Outro desafio significativo enfrentado pelo mercado de carbono é a questão da integridade ambiental dos créditos de carbono. Embora esses créditos sejam emitidos com base na premissa de que representam uma redução genuína das emissões de GEE, há preocupações legítimas sobre a validade dessas reduções (Giesel; Nobre, 2021). Existem casos de projetos que recebem créditos de carbono sem realmente implementar

medidas de redução de emissões ou que se baseiam em práticas questionáveis de contabilidade de carbono (Austin *et al.*, 2020).

Como observado por Austin *et al.* (2020) cada jurisdição pode ter suas próprias regras e requisitos para participar do mercado de carbono, o que dificulta a integração e a interoperabilidade entre diferentes sistemas de comércio de carbono. Essa falta de coordenação pode levar a distorções de preços e redundâncias administrativas, prejudicando a eficiência do mercado e dificultando a consecução de metas globais de redução de emissões (Farias *et al.*, 2013).

3 UM OLHAR BIBLIOMÉTRICO SOBRE CRÉDITO DE CARBONO

A presente pesquisa caracteriza-se como descritiva, de abordagem quantitativa com procedimentos de revisão bibliométrica, a qual consistiu na análise numérica da produção científica em determinada área do conhecimento, utilizando indicadores bibliométricos para identificar padrões, tendências e lacunas de pesquisa (Marconi; Lakatos, 2017).

Para a realização desta revisão bibliométrica, foi utilizada a base de dados *Scopus* como local de busca primário. A *Scopus* é reconhecida como uma das bases de índices de citações científicas mais confiáveis e prestigiadas do mundo (Volpato, 2013).

A pesquisa abrangeu o período de 27 anos, entre os anos de 1997 a 2023. Este intervalo temporal permitiu uma análise atualizada e relevante da evolução do tema em questão, considerando os avanços e mudanças ocorridos no campo de estudo ao longo do tempo.

Para a análise estatística da produção de publicações e tendências de crescimento, utilizou-se da regressão linear simples, analisando a correlação entre as variáveis tempo e número de publicações. Na análise estatística e apresentação gráfica utilizou-se o software *Python*. biblioteca *pandas*, versão 2.2.3.

3.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica é uma ferramenta que permite compreender a evolução e a relevância de determinado tema ao longo do tempo, por meio da quantificação e análise de dados bibliográficos. Nesse sentido, no contexto do crédito de carbono desde 1997, a aplicação dessa metodologia permite uma compreensão mais profunda do

desenvolvimento do mercado de carbono e suas implicações ambientais, econômicas e sociais.

Marconi e Lakatos (2017) salientam que a análise bibliométrica também é útil para identificar o impacto das publicações, por meio de indicadores como o fator de impacto dos periódicos e o número de citações recebidas por determinado artigo. No contexto do crédito de carbono, essa análise pode revelar quais estudos têm maior influência na área e quais são as principais fontes de informação utilizadas pelos pesquisadores.

Ademais, a análise bibliométrica possibilita a identificação de redes de colaboração entre pesquisadores e instituições, contribuindo para o estabelecimento de parcerias e o fortalecimento da comunidade científica que se dedica ao estudo do crédito de carbono. Conforme Gil (2019), essa abordagem permite mapear a coautoria entre pesquisadores, instituições de pesquisa e países, revelando padrões de colaboração e possíveis áreas de intersecção entre diferentes disciplinas.

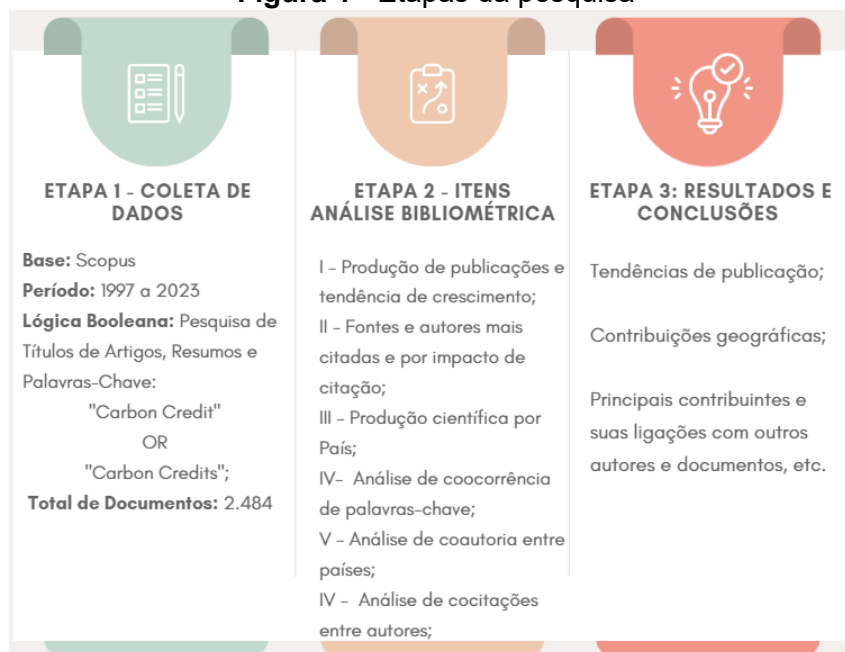
Para realizar a análise bibliométrica, neste trabalho, utilizou-se os *softwares* Bibliometrix (versão 4.1 acessada pelo R-Studio versão 2024.09.0+375 de 23/09/2024 com o comando *bibliometrix::biblioshiny()*); VOSviewer versão 1.6.20 de 31/10/2023. Conforme Arruda *et al.* (2022) e Dervis (2020), os *softwares* VOSviewer e o Bibliometrix são adequados para fornecer visualização de domínio, mas cada um oferece um conjunto distinto de recursos e requisitos. O VOSviewer oferece simplicidade, flexibilidade e capacidade de resposta às demandas do usuário, bem como maior qualidade gráfica ao preço de limitar alternativas às suas funções pré-programadas e exigir análises repetidas devido à sua incapacidade de combinar dados de diferentes fontes. O Bibliometrix é mais robusto e versátil, sendo capaz de maior personalização pelos usuários. Dessa forma, o Bibliometrix foi utilizado para demonstrar as principais informações sobre a busca, as fontes mais citadas (por número de ocorrências e por fator de impacto), os autores mais relevantes (por número de publicações e por fator de impacto), a produção científica por país, os documentos mais citados, a frequência das palavras mais usadas do tempo e a relação entre autores, palavras-chave e periódicos. Já o VOSviewer foi utilizado para demonstrar a coocorrência de palavras-chave, coautoria entre países e rede de cocitação entre autores.

3.2 BASE DE DADOS

Para este estudo, utilizou-se como base de dados a principal coleção da *Scopus*, acessada em 26 de março de 2024. A pesquisa foi conduzida com os termos em inglês “*Carbon Credit*” **OR** “*Carbon Credits*”, procurando por correspondências aproximadas nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos. Este processo considerou um período de vinte e sete anos, de 1997 a 2023. Por se tratar de uma pesquisa abrangente, optou-se por não incluir mais palavras-chave, visto que poderiam reduzir a amplitude das buscas. Além disso, a expressão Crédito de Carbono não possui derivação equivalente a outro termo ou sinônimo. Uma síntese das etapas da pesquisa está demonstrada na Figura 1. A escolha criteriosa das palavras-chave foi fundamental para garantir a precisão e abrangência dos resultados obtidos na busca bibliográfica (Gil, 2019).

Os critérios de inclusão e exclusão foram definidos de forma a garantir a seleção de estudos relevantes e apropriados para a análise. Foram incluídos artigos científicos, revisões sistemáticas e meta-análises que abordassem diretamente o tema do crédito de carbono e sua evolução desde seu estabelecimento pelo Protocolo de Quioto em 1997. Foram excluídos trabalhos que não continham todas estas palavras-chave em seus títulos, resumos ou palavras-chave.

Para garantir a integridade e parametrização da base de dados, utilizou-se o editor de texto “Bloco de Notas” versão 11.2407.9.0 e os comandos de “localizar” e “substituir” para tratar as palavras de mesmo significado que se diferenciavam entre singular e plural, convertendo-as todas em singular. As palavras foram: “*carbon credits*” e “*carbon credit’s*” em “*carbon credit*”; “*biofuels*” em “*biofuel*”; “*carbon emissions*” em “*carbon emission*”; “*carbon markets*” em “*carbon market*”; “*cost-benefit analysis*” em “*cost benefit analysis*”; “*ecosystems*” em “*ecosystem*”; “*ecosystem services*” em “*ecosystem service*”; “*fossil fuels*” em “*fossil fuel*”; “*greenhouse gases*” em “*greenhouse gas*”; “*renewable energies*” em “*renewable energy*”.

Figura 1 - Etapas da pesquisa

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Durante este período da análise, foram identificados 2.484 arquivos relacionados aos descritores mencionados. Cabe salientar que este quantitativo pode variar aproximadamente em 1% (um por cento) para mais em caso de publicações indexadas a partir de 2024, mas com competência de anos anteriores ou para menos em caso de publicações revisadas ou excluídas da base de indexação, a partir de 2024. O Quadro 1 apresenta uma síntese sobre a utilização e aplicação de cada *software* para o desenvolvimento da pesquisa.

Quadro 1 - Síntese da utilização finalística de cada *software* para o levantamento bibliométrico

Softwares	Usado para
Python versão 3.13.0 biblioteca pandas, versão 2.2.3	Análise estatística e apresentação gráfica da evolução das pesquisas sobre crédito de carbono.
R-Studio versão 2024.09.0+375	Criação de scripts de comando para o Bibliometrix.
Bibliometrix versão 4.1	Análise bibliométrica em gráficos ou tabelas sobre as fontes mais citadas, fontes de publicação por maior fator de impacto, autores mais relevantes, autores que mais publicaram documentos científicos, produção científica por país, documentos mais citados e frequência das palavras mais usadas ao longo do tempo.
VOSviewer versão 1.6.20	Análise bibliométrica com demonstração gráfica da coocorrência de palavras-chave, coautoria entre países, rede de cocitação de autores e relação entre autores, palavras-chave e periódicos.
Bloco de Notas versão 11.2407.9.0	Parametrização da base de dados, a fim de ajustar a base para evitar a duplicidade de termos de pesquisas sinônimos e/ou no plural.
Microsoft Excel via Office 365 - Versão 2410 - 64 bits	Criação do mapa dos países que ratificaram e/ou são signatários do Acordo de Paris.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

4 UM RETRATO DO CRÉDITOS DE CARBONO: DO TRATADO DE QUIOTO A COP28

Nos últimos anos, a temática da sustentabilidade tem recebido uma atenção crescente na literatura científica, refletindo a urgência global em abordar questões ambientais e socioeconômicas (Nunes, 2012). Neste contexto, o estudo dos Créditos de Carbono e os modelos, incentivos e políticas relacionadas tem sido essencial para compreender e promover práticas sustentáveis.

Utilizando a plataforma *Scopus*, o total de documentos encontrados, nessa pesquisa, foi de 2.484. Esta busca englobou diversos tipos de documentos, como artigos de revisão, artigos de acesso antecipado, artigos de acesso fechado, artigos de acesso aberto e referências citadas enriquecidas.

A Tabela 1 demonstra a quantidade de documentos e fontes encontrados, sendo que os artigos possuem uma prevalência de dois terços do total de documentos encontrados. Isso sugere que a questão da redução ou da mitigação das emissões de gases de efeito estufa, que representam o foco principal do Crédito de Carbono, continua sendo um tema de interesse e foco de investigação científica, tal como corroborado também por Lyra, Cordeiro e Santos (2023).

Tabela 1 - Principais informações sobre a busca dos descritores de 1997 a 2023.

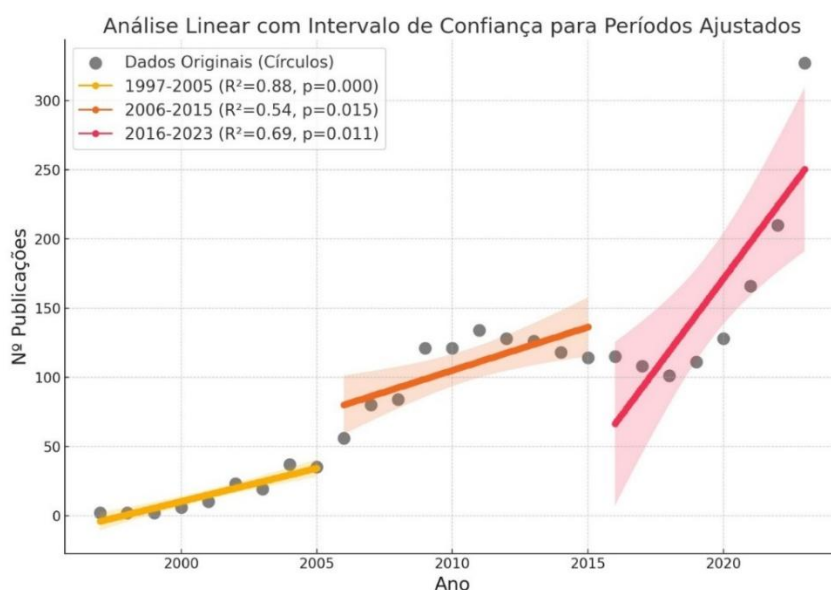
ITEM	RESULTADO	FREQ. %
Período da Busca	1997:2023	-
Total de Documentos	2.484	-
Total de Fontes (revistas, livros, etc.)	1.225	-
Referências	87.574	-
Autores	6.923	-
Autoria Única	426	-
Média de Coautores por documento	3,43	-
Artigos	1.636	65,86
Artigos de Conferência	439	17,67
Capítulos de Livro	168	6,76
Análises	132	5,31
Observações	48	1,93
Resumos	22	0,89
Livros	11	0,44
Errata	03	0,12
Outros	25	1,02

Fonte: Bibliometrix (2024) gerado a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

A Figura 2 apresenta a análise da regressão linear simples em 3 períodos, demonstrando que o número de publicações cresceu de forma não-linear ao longo dos

anos, com fases distintas de evolução. A escolha dos 3 períodos se deu em razão dos fatores normativos e políticos de relevância que influenciaram cada um dos períodos. Todos os p-valores são menores que 0,05, indicando que as relações entre o ano e o número de publicações são estatisticamente significativas.

Figura 2 Evolução quantitativa das publicações sobre Crédito de Carbono de 1997 a 2023



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Quanto ao Período 1 (1997 – 2005 - linha amarela) nota-se uma tendência de crescimento linear lento, onde a produção de publicações cresce de forma estável e consistente, mas ainda em níveis baixos. Deve-se ao fato de caracterizar o início gradual das investigações científicas. Nota-se um R^2 alto (0,88).

No Período 2 (2006 – 2015 - linha laranja) observa-se um crescimento moderado, mas com maior dispersão. O número de publicações aumenta, mas há mais variabilidade, o que se reflete no menor $R^2 = 0,54$. O intervalo de confiança ampliou-se, refletindo maior incerteza na tendência, sugerindo flutuações na produção ano a ano. Nota-se mudança no comportamento por volta de 2006, possivelmente, ocasionado pelo fato de que o Protocolo de Quioto deveria reunir no mínimo, 55% do total de países-membros da Convenção e que fossem responsáveis por, pelo menos, 55% do total das emissões de gases do efeito estufa, o que só aconteceu depois que a Rússia o ratificou, em novembro de 2004, fazendo com que as metas estabelecidas iniciassem a vigência em fevereiro de 2005, ocasionando alterações no padrão de publicações.

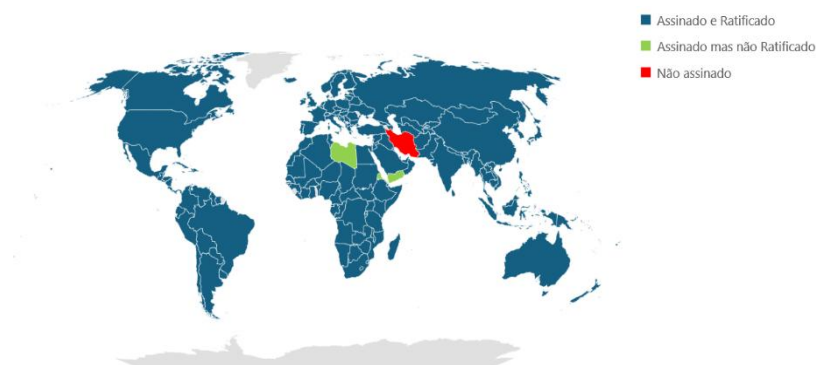
Destaca-se também que o protocolo de Quioto vigorou, efetivamente, de 2005 a 2012, porém, começou a perder força, uma vez que os Estados Unidos não ratificaram o protocolo e o Canadá renunciou ao acordo em 2011, a fim de escapar de multas por não ter conseguido cumprir o acordo. Dessa forma, durante o período de 2012 a 2017 sugere-se que houve desmotivação científica quanto ao crédito de carbono, possivelmente, ocasionado pela desconfiança das nações, com relação a efetividade ambiental da ferramenta.

No Período 3 (2016 – 2023 - linha vermelha) nota-se uma aceleração significativa ($R^2 = 0,69$) em comparação com os demais períodos. Há um crescimento rápido e consistente no número de publicações a partir de 2018, visível na inclinação mais acentuada da linha. Há maior dispersão do que no período 1997–2005 e um largo intervalo de confiança, podendo sinalizar uma expansão global da área de pesquisa, impulsionada pelo aumento na participação de novos pesquisadores ou países, possivelmente, ocasionado pelo Acordo de Paris (2015) e COP-24 (2018) que estabeleceu o regramento para implementação do Acordo de Paris. Isto se deu, pois houve um novo olhar para o mundo, deixando os países se manifestarem sobre quanto podiam contribuir para a redução de suas emissões por meio das NDCs, que deviam passar pelos congressos e parlamentos de cada país (Armstrong, 2021).

O Brasil em sua NDC, apresentada em 2015, estabeleceu suas metas que contribuem para mitigação das mudanças climáticas. Oficialmente, o Brasil se comprometeu reduzir em 37% suas emissões até 2025 e em 50% até o ano de 2030 com base em suas emissões de 2005, a partir de medidas de mitigação e adaptação (UNFCCC, 2023). A Figura 3 demonstra que a maioria dos países já ratificaram o Acordo de Paris, e outros, ainda, configuram como simples signatários.

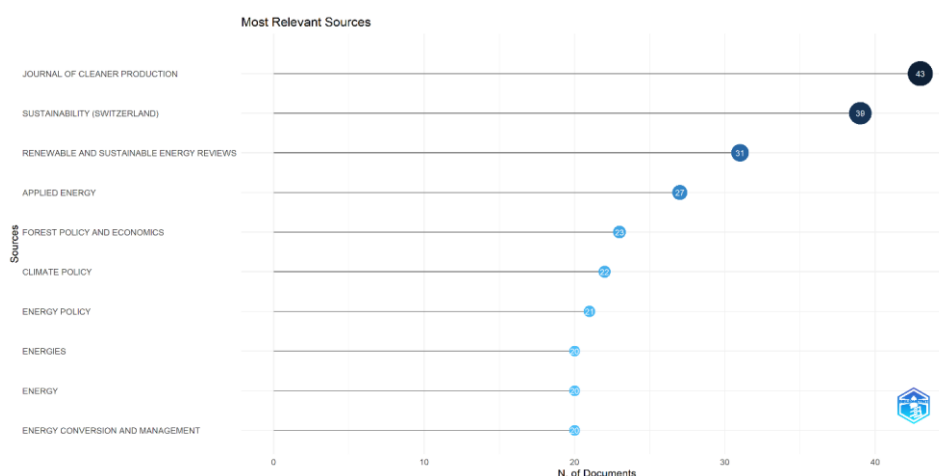
Com relação ao número de *Sources* (bases como revistas, livros para publicações) encontrou-se um total de 1.218 fontes. A Figura 4 demonstra as 10 fontes com maior número de publicações, tendo destaque o *Journal of Cleaner Production* com 43 documentos publicados, seguida pela *Sustainability (Switzerland)* e *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, com 39 e 31 documentos respectivamente. Ressalta-se que outras 858 fontes tiveram 1 publicação.

Figura 3 - Países que ratificaram e/ou são signatários do Acordo de Paris até junho/2024



Fonte: Elaborado pelos próprios autores (2024)³

Figura 4 - As 10 fontes mais citadas por número de ocorrências sobre Crédito de Carbono de 1997 a 2023



Fonte: Bibliometrix (2024) gerado a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

Ainda com relação as *Sources*, é possível observar na Tabela 2 a relevância das publicações pelo fator de impacto, que consiste em estabelecer uma métrica que avalia a importância relativa e a influência dessa revista em sua área de estudo, sendo calculado com base no número médio de citações recebidas pelos artigos publicados nessa revista durante um período específico, geralmente, de dois anos. O cálculo básico do fator de impacto envolve dividir o número total de citações recebidas pelos artigos publicados na revista nos dois anos anteriores pelo número total de artigos publicados nesse mesmo período (Thomaz; Assad; Moreira, 2011). O fator de impacto é frequentemente utilizado como uma medida da qualidade e relevância de uma revista científica em um determinado campo (Oyewola; Dada, 2022).

³ Dados disponíveis em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2016/04/parisagreementsingatures/>. Acesso em: 28 jun. 2024.

Tabela 2 - As 10 Fontes de Publicação por maior fator de impacto

Fonte de Publicação	h_index	g_index	m_index	TC	NP	PY_start
APPLIED ENERGY	20	27	1,25	1381	27	2009
RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REV.	20	31	1,25	2439	31	2009
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	19	34	1,357	1212	43	2011
ENERGY	15	20	1	798	20	2010
ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT	15	20	0,682	953	20	2003
ENERGY POLICY	14	21	0,737	717	21	2006
CLIMATE POLICY	13	22	0,542	773	22	2001
SOLAR ENERGY	13	15	0,813	857	15	2009
BIOMASS AND BIOENERGY	12	13	0,462	1281	13	1999
ECOLOGICAL ECONOMICS	12	13	0,5	512	13	2001

Fonte: Bibliometrix (2024) gerado a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

Nota-se pela Tabela 2 um ranqueamento diferente da Figura 4. Ainda que as fontes *Journal of Cleaner Production* e *Renewable And Sustainable Energy Reviews* figurem no Top-3, a revista *Applied Energy* é a que possui maior relevância por fator de impacto. A Tabela 3 apresenta o *ranking* dos 10 autores mais relevantes pelo fator de impacto e a Figura 5 demonstra os dez autores com maior número de publicações.

Tabela 3 - Os 10 autores mais relevantes - por maior fator de impacto para publicações

Element	h_index	g_index	m_index	TC	NP	PY_start
TIWARI GN	25	36	1,471	1687	36	2008
KUMAR A	21	38	0,955	1500	38	2003
FEARNSIDE PM	10	11	0,385	612	11	1999
KUMAR M	10	12	1,667	165	13	2019
CHEL A	7	8	0,438	514	8	2009
VAN KOOTEN GC	7	7	0,35	262	7	2005
WANG Y	7	16	0,304	368	16	2002
KUMAR S	6	8	0,375	185	8	2009
LAL R	6	7	0,316	179	7	2006
PRAKASH O	6	7	0,545	233	7	2014

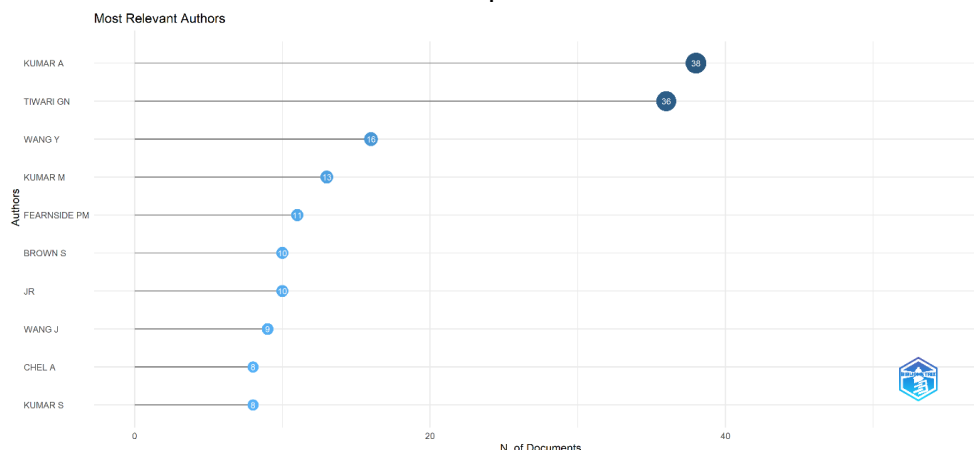
Fonte: Bibliometrix (2024) gerado a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

Nota-se que os autores Tiwari G.N. e Kumar A. figuram entre os principais autores, com um total de 36 e 38 publicações, respectivamente. Porém, pelo fator de impacto, tem-se o autor Tiwari G.N. como maior pontuador. Vale salientar que outros 5.978 autores aparecem com 1 publicação e destes, 4.937 possuem o índice *h_index* de 1.

Quanto a produção científica por país, demonstra-se na Figura 6 os 10 países que mais publicaram documentos científicos no período. Dentre os 4 primeiros que mais publicaram constam os 3 países que, juntos emitiram mais de 51% CO₂ em 2022 (IPCC,

2023). Isto sugere que os países demonstram preocupação científica e estão buscando soluções para mitigar o problema.

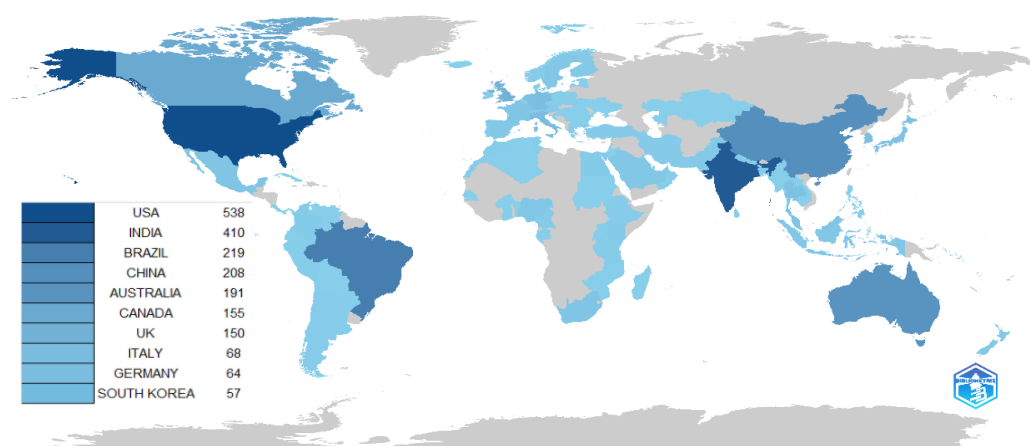
Figura 5 - Os 10 autores que mais publicaram documentos científicos sobre crédito de



Fonte: Bibliometrix (2024) a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

A Tabela 4 apresenta os dez documentos mais citados globalmente. O autor Joshi S. V., do periódico *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, ficou em primeiro lugar com 1879 citações totais seguido por SOHI SP (2010), do *Advances in Agronomy*, com 1691 citações totais. Dos dez documentos globais mais citados, apenas o periódico *Renewable and Sustainable Energy Reviews* é listado 2 vezes. Importante destacar também que Estados Unidos, França e Canadá aparecem 2 vezes dentre os dez documentos mais citados sobre a temática. Em leitura dos resumos, constata-se que os trabalhos estão relacionados ao modo de vida, modo de produção e consumo.

Figura 6 - Produção científica por país – em número de publicações



Fonte: Bibliometrix (2024) a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

A Figura 7 demonstra a frequência das palavras mais usadas ao longo do tempo. Destaca-se que o termo “*carbon credit*” possui as maiores frequências em 2015 (COP-21 Acordo de Paris) e 2018 (COP-24 que estabeleceu o regramento para implementação do Acordo de Paris).

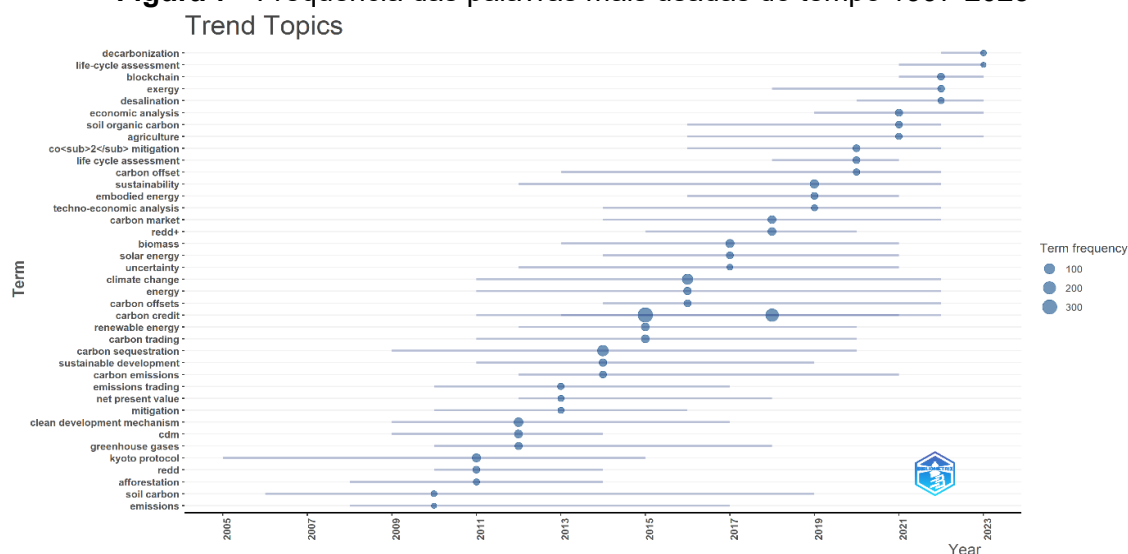
Tabela 4 - Os 10 documentos mais citados – por número de ocorrências de citações no período de 1997 a 2023

PAPER	DOI	TC	COUNTRY
JOSHI SV, 2004, COMPOS PART A APPL SCI MANUF	10.1016/j.compositesa.2003.09.016	1879	USA
SOHI SP, 2010, ADV AGRON	10.1016/S0065-2113(10)05002-9	1691	U. K.
BELLON-MAUREL V, 2010, TRAC TRENDS ANAL CHEM	10.1016/j.trac.2010.05.006	683	France
TIMILSINA GR, 2012, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY REV	10.1016/j.rser.2011.08.009	485	USA
LAMLON SH, 2003, BIOMASS BIOENERGY	10.1016/S0961-9534(03)00033-3	475	Canada
VARUN, 2009, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY REV	10.1016/j.rser.2008.08.004	426	Índia
BELLON-MAUREL V, 2011, SOIL BIOL BIOCHEM	10.1016/j.soilbio.2011.02.019	374	France
OYEDEPO SO, 2012, ENERGY SUSTAINABILITY SOC	10.1186/2192-0567-2-15	310	Nigeria
KUMAR A, 2003, BIOMASS BIOENERGY	10.1016/S0961-9534(02)00149-6	276	Canada
HANJRA MA, 2012, INT J HYG ENVIRON HEALTH	10.1016/j.ijheh.2011.10.003	247	Australia

Fonte: Bibliometrix (2024) gerado a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

Nota-se também o desuso do termo “*Kyoto protocol*” a partir de 2015 e o aparecimento dos termos “*economic analysis*”, “*descarbonization*” e “*blockchain*”, termos estes relacionados ao aspecto de viabilidade econômica e segurança/rastreabilidade do crédito de carbono. Chama a atenção também a quantidade de aparecimento dos termos ligados à energia ou produção de energia como “*exergy*”, “*embodied energy*”, “*solar energy*”, “*energy*”, “*renewable energy*”.

Figura 7 - Frequência das palavras mais usadas do tempo 1997-2023

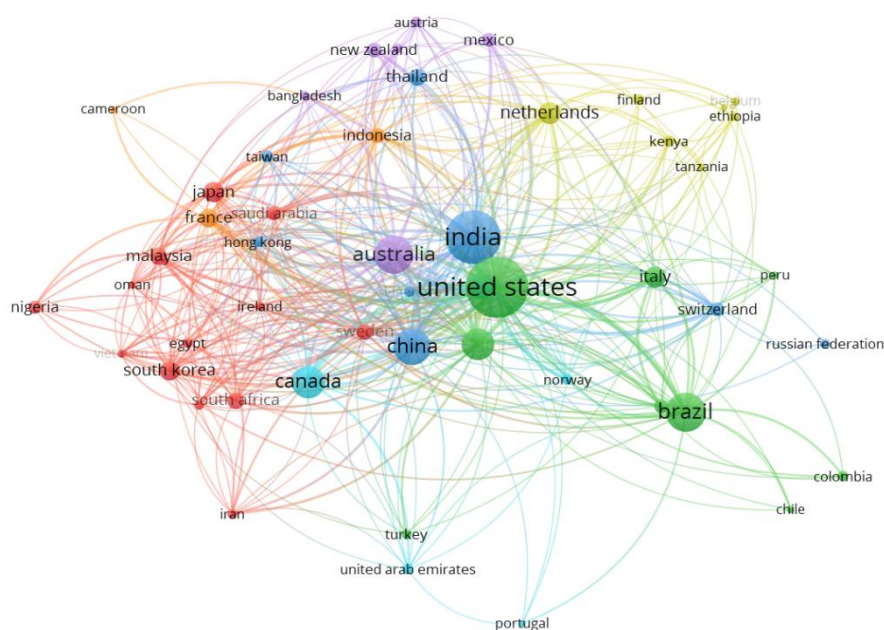


Fonte: Bibliometrix (2024) gerado a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

colaboração. Os nós maiores representam os países mais produtivos em pesquisas na área de Créditos de Carbono, sendo que a espessura e o comprimento das ligações entre os nós representam a relação de cooperação entre os países.

Os países com as maiores coautorias foram os Estados Unidos da América com 530 documentos/13407 citações e força de link de 262 seguido da China com 191 documentos/3887 citações e força de *link* de 157. A Austrália ficou na terceira posição com 206 documentos/7227 citações e força total de *link* de 133. Já o Brasil ficou na sétima posição com 218 documentos/3394 citações e força de *link* de 77.

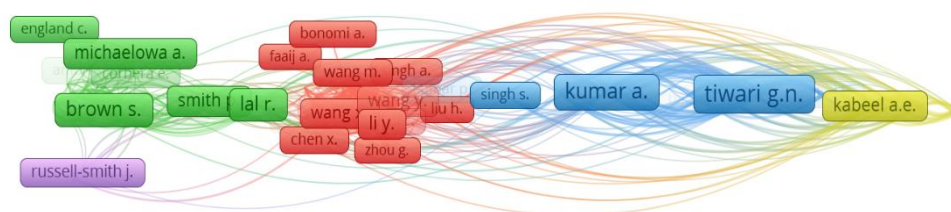
Figura 9 - Coautoria entre países ao descritor “carbon credit” no período de 1997 a 2023



Fonte: VOSviewer (2023) gerado a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

A figura 10 mostra a rede de cocitação de autores. A cocitação de artigos permite aos pesquisadores interpretar a natureza dos artigos citados no *cluster* e as interligações entre os *clusters* (Chen; Ibekwe-Sanjuan; Hou, 2010).

Figura 10 - Rede de Cocitação de autores ao descritor “carbon credit” no período de 1997 a 2023



Fonte: VOSviewer (2023) gerado a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

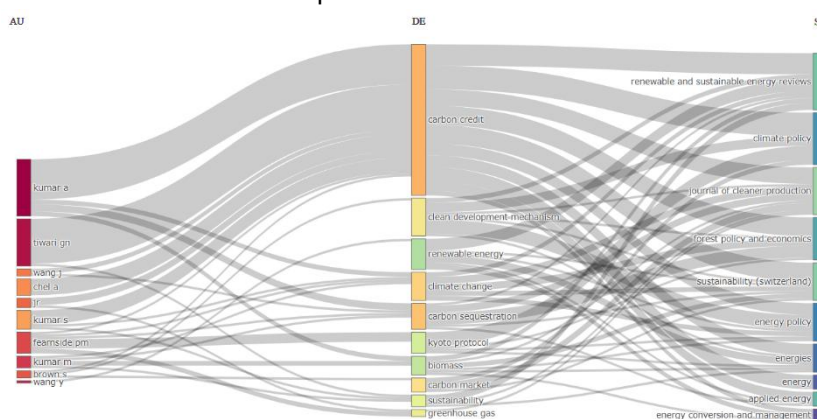
Os achados da rede de cocitação, extraída do VOSviewer, mostram que o par de artigos altamente cocitados são aqueles conectados com arcos mais espessos. Um par de artigos cocitados ocorre quando dois artigos são citados juntos em um único artigo.

Os arcos grossos indicam uma forte relação entre esses artigos e sugerem semelhanças em relação a tópicos específicos dentro do campo de “Créditos de Carbono”. Por outro lado, arcos finos significam uma fraca associação de cocitação entre artigos cocitados e a falta de semelhanças de conteúdo.

Deste modo, é possível identificar a frequência com que dois ou mais autores foram mais citados juntos em um mesmo artigo (cocitação). Essa medida tem como premissa o fato de que quanto mais determinados itens são citados em conjunto, mais provável é que o conteúdo entre eles seja relacionado. À vista disso, dos 110.671 autores encontrados definiu-se no VOSviewer o número mínimo de 50 cocitações, tendo como retorno 172 autores. Assim, os cinco principais autores cocitados são: *twari g.n.* (623); *kumar a.* (478); *kabeel a.e.* (201), *li y.* (225) e *wang. y.* (217).

A Figura 11 demonstra um gráfico do tipo *Three-Field Plot* baseado no diagrama de *Sankey* (Riehmman; Hanfler; Froehlich, 2005) que contém a relação entre autores, palavras-chave e periódicos. Cada fluxo conecta os três elementos, mostrando quem são os autores, quais palavras-chave eles usam e onde eles publicam. Do autor para a palavra-chave demonstra-se a associação entre autores e os temas de pesquisa que eles abordam em seus artigos. A largura da linha indica quantos artigos esse autor publicou com uma determinada palavra-chave. Da palavra-chave para o periódico apresenta-se a relação entre os tópicos de pesquisa e os periódicos em que são publicados. A largura da linha indica quantos artigos sobre determinado tema foram publicados em um periódico específico (Firmينو, 2020).

Figura 11 - Relação entre autores, palavras-chave e periódicos ao descritor “carbon credit” no período de 1997 a 2023



Fonte: Bibliometrix (2024) gerado a partir de dados coletados pelo autor na base da Scopus (2024).

Por fim, destaca-se que o nome e temática da maioria dos periódicos se refere a energia e políticas e que o crédito de carbono possui preocupações que giram em torno da eficácia em realmente reduzir as emissões, a equidade na distribuição dos benefícios e o risco de *greenwashing*, onde as empresas podem usar créditos de carbono como uma maneira de mascarar suas verdadeiras pegadas de carbono. Além disso, questões relacionadas à integridade ambiental dos projetos de compensação de carbono têm sido levantadas, destacando a importância de garantir que esses projetos, realmente, resultem em reduções reais e mensuráveis nas emissões e que os créditos gerados contenham lastros de rastreabilidade.

O crédito de carbono tem sido uma ferramenta relevante na busca por soluções para enfrentar a crise climática global. Segundo Milson *et al.* (2024) o valor financeiro emergente dos serviços ecossistêmicos fornecidos pela fauna da floresta tropical destaca a necessidade de pagamentos baseados em carbono para criação de serviços ecossistêmicos que incluem a proteção da vida selvagem. Dessa forma, ao longo das últimas décadas, este mecanismo tem evoluído e se adaptado às mudanças no panorama ambiental, político e econômico, desempenhando um papel crucial na redução das emissões de gases de efeito estufa e na promoção do desenvolvimento sustentável em todo o mundo, desde que atrelado às metas de estagnação ou redução de emissões.

Durante a COP29 foi decidido um marco global para operacionalizar o mercado de carbono no âmbito do Artigo 6 do Acordo de Paris e houve a aprovação da Lei nº 15.042 de 11 de dezembro de 2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Houve também na COP29 um consenso para os países estabelecerem as bases sobre mercado de carbono global. Esse mecanismo será administrado pela ONU e prevê a redução do custo de implementação dos planos climáticos nacionais em US\$ 250 bilhões ao ano.

5 LIÇÕES E DESAFIOS PARA O FUTURO DO CRÉDITO DE CARBONO

A análise bibliométrica das pesquisas sobre crédito de carbono revelou que a evolução das pesquisas sobre o crédito de carbono aumentou nos últimos anos, possivelmente, em razão da maior evidência de catástrofes climáticas relacionadas às emissões líquidas de CO₂, uma vez que as emissões possuem como causa relevante a produção e aplicação da energia.

Este trabalho mostra que as principais pesquisas (por fator de impacto e citações) estão relacionadas ao modo de vida, produção e consumo, e dessa forma, o crédito de carbono tem enfrentado na ciência e na aplicação prática, críticas e desafios significativos. Preocupações giram em torno da eficácia em realmente reduzir as emissões, o risco de *greenwashing* e a dificuldade de rastreabilidade, principalmente, nos mercados voluntários. Além disso, questões relacionadas à integridade ambiental dos projetos de compensação de carbono têm sido levantadas, destacando a importância de garantir que esses projetos, realmente, resultem em reduções reais e mensuráveis nas emissões.

Apesar desses desafios, o crédito de carbono continua a ser uma ferramenta a ser considerada na luta contra as mudanças climáticas, desde que associado às metas de redução de emissões ou sequestro de carbono. Sua flexibilidade e capacidade de estimular a inovação em tecnologias limpas e práticas sustentáveis oferecem oportunidades para avançar em direção a uma economia de baixo carbono. Além disso, o crédito de carbono pode vir a desempenhar um papel na promoção do financiamento para o desenvolvimento de projetos de energia renovável, conservação florestal, eficiência energética e outras iniciativas que contribuem para a mitigação das mudanças climáticas e a adaptação aos seus impactos.

À medida que se caminha para o futuro, é necessário que o crédito de carbono seja aprimorado e aperfeiçoado para enfrentar os desafios emergentes. Isso inclui a necessidade de maior transparência e *accountability* em todos os aspectos do mercado de carbono, desde a implementação de projetos até a compensação de emissões. Além disso, é fundamental que o crédito de carbono seja integrado a políticas climáticas mais amplas e abrangentes, como precificação de carbono, regulações ambientais e incentivos para a adoção de tecnologias limpas.

Em última análise, o crédito de carbono deve representar mais do que apenas uma transação financeira; é um símbolo do compromisso coletivo da humanidade em proteger o planeta para que as próximas gerações possam ter um futuro.

REFERÊNCIAS

ALVES, L.L.M.; ANGELO, H.; ALMEIDA, A.N.; SILVA, G.F.; MATRICARDI, E.A.T.; NUNES, A.; SOUZA JÚNIOR, C.V.N. Strategic Analysis of the Forest Carbon Market in Brazil. *Sustainability*, 16(16), 6898, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16166898>. Acesso em: 15 set. 2024.

ARMSTRONG, M. **The State of the Paris Agreement**. 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/chart/9656/the-state-of-the-paris-agreement/>. Acesso em: 15 nov. 2023.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: AnR-tool for comprehensive science mapping analysis, **Journal of Informetrics**, v. 11(4), p 959-975, 2017. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>. Acesso em: 12 fev. 2024.

ARRUDA, H.; SILVA, E. R.; LESSA, M.; PROENÇA Jr., D.; BARTHOLO R. Resource Review VOSviewer and Bibliometrix. **Journal of the Medical Library Association**, vol. 110, n. 3, July 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5195/jmla.2022.1434>. Acesso em: 15 ago. 2024.

AUSTIN, K. G.; BAKER, J. S.; SOHNGEN, B. L.; WADE, C. M.; DAIGNEUALT, A.; OHREL, S. B.; RAGNAUTH, S. and BEAN, A. The economic costs of planting, preserving, and managing the world's forests to mitigate climate change. **Nat Commun**, v. 11, 5946, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19578-z>. Acesso em: 13 fev. 2024.

CHEN, C.; IBEKWE-SANJUAN, F.; HOU, J. The structure and dynamics of cocitation clusters: A multiple-perspective cocitation analysis. **J. Am. Soc. Inf. Sci.**, v. 61, p. 1386-1409, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/asi.21309>. Acesso em: 07 jun. 2024.

BRASIL. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), nº 6.385, de 7 de dezembro de 1976 (Lei da Comissão de Valores Mobiliários), e nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). Seção 1, ed. 239, p. 4. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-15.042-de-11-de-dezembro-de-2024-601124199>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BURSZTYN, M. A.; BURSZTYN, M. **Fundamentos de Política e Gestão Ambiental: caminhos para a sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Garamond. 2012.

CAPIRAZI, B. Primeira bolsa de crédito de carbono do Brasil aponta tentativa de listagem de créditos falsos. **Estadão**. São Paulo, ano 144, nº 47433, 30 ago. 2023. Economia & Governança. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/economia/governanca/bolsa-credito-carbono-tentativa-listagem-creditos-falsos/>. Acesso em: 31 ago. 2023.

COBO, M.J.; LÓPEZ-HERRERA, A.G.; HERRERA-VIEDMA E.; HERRERA, F. Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study a mong tools. **J. Am. Soc. Inf. Sci.**, v.62, ed. 7, p. 1382-1402, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/asi.21525>. Acesso em: 28 jun. 2024.

DA SILVA FREITAS, L. F.; DE SANTANA RIBEIRO, L. C.; DE SOUZA, K. B.; HEWINGS, G. J. D. The distributional effects of emissions taxation in Brazil and the implications for climate policy. **Energy Economics**, v. 59(C), p. 37-44, 2016. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/eneeco/v59y2016icp37-44.html>. Acesso em: 31 jul. 2024.

DERVIŞ, H. Bibliometric Analysis using Bibliometrix an R Package. **Journal of Scientometric Research**, v. 8(3), p. 156–160, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5530/jscires.8.3.32>. Acesso em: 24 jul. 2024.

FARIAS, L. G. Q.; VENTURA, A. C.; PAIVA, D. S.; GOMES, G. A. M. M.; ANDRADE, J. C. S. Mercado global de carbono e governança global do clima: desafios e oportunidades. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 28, p. 11-27, jul./dez. 2013. Editora UFPR. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/download/29927/21655>. Acesso em: 24 jul. 2024.

FEARNSIDE, P. M. Carbon credit for hydroelectric dams as a source of greenhouse gas emissions: The example of Brazil's Teles Pires Dam. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v.18(5), p. 691-699, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11027-0129382-6>. Acesso em: 01 ago. 2024.

FIRMINO, D. A. **Diagrama de Sankey: o que é, e como fazer no Excel**. 2020. Disponível em: <https://www.opuspesquisa.com/blog/tecnicas/diagramasankey/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

GIESEL, H. D.; NOBRE, F. S. M. Implications of Blockchain and Transparency for Business Sustainability: An Integrative Review. RAM. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 22, n. 6, p. eRAMD210033, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-6971/eRAMD210033>. Acesso em: 08 mar. 2024.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2019.

GULERIA D.; KAUR G. Bibliometric analysis of ecopreneurship using VOSViewer and RStudio bibliometrix, 1989–2019. **Library Hi Tech**, v. 39(4), p. 1001–1024. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/LHT-09-2020-0218>. Acesso em: 08 jul. 2024.

IEA. **Renewables 2023**. IEA, Paris, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Licença: CC BY 4.0. Acesso em: 08 dez. 2024.

IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). Resumo para formuladores de políticas. Em Mudanças Climáticas 2023: Relatório de Síntese: Um Relatório do Plano Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **IPCC**: Genebra, Suíça, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acesso em: 07 jan. 2024.

KHAN M.K.; TENG J.Z.; KHAN, M.I.; KHAN, M.O. Impact of globalization, economic factors and energy consumption on CO2 emissions in Pakistan. **Sci Total Environ**, v. 688, p. 424-436, 2019. Disponível em: <https://10.1016/j.scitotenv.2019.06.065>. Acesso em: 20 jun. 2024.

LANDRIGAN, P. J.; FULLER, R.; ACOSTA, N. J. R.; ADEYI, O.; ARNOLD, R.; BASU, N.; BALDÉ, A. B.; BERTOLLINI, R.; BOSE-O'REILLY, S.; BOUFFORD, J. I.; BREYSSE, P. N.; CHILES, T.; MAHIDOL, C.; COLL-SECK, A. M.; CROPPER, M. L.; FOBIL, J.; FUSTER, V.; GREENSTONE, M.; HAINES, A.; HANRAHAN, D.; HUNTER, D.; KHARE, M.; KRUPNICK, A.; LANPHEAR, B.; LOHANI, B.; MARTIN, K.; MATHIASSEN, K. V.; MCTEER, M. A.; MURRAY, C. J. L.; NDAHIMANANJARA, J. D.; PERERA, F.;

POTOČNIK, J.; PREKER, A. S.; RAMESH, J.; ROCKSTRÖM, J.; SALINAS, C.; SAMSON, L. D.; SANDILYA, K.; SLY, P. D.; SMITH, K. R.; STEINER, A.; STEWART, R. B.; SUK, W. A.; VAN SCHAYCK, O. C. P.; YADAMA, G. N.; YUMKELLA, K.; ZHONG, M. The Lancet Commission on pollution and health. **The lancet**, v. 391, n. 10119, p. 462-512, 2018. Disponível em: [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(17\)32345-0/abstract](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(17)32345-0/abstract). Acesso em 10 set. 2024.

LYRA, N. M.; CORDEIRO, L. F. A.; SANTOS, L. A. Créditos de carbono e tributos ambientais: uma análise bibliométrica, no contexto da problemática dos gases causadores do efeito estufa. **Rev. Bras. Gest. Amb. Sustent.**, vol. 10, n. 24, p. 449-467, 2023. Disponível em: [https://10.21438/rbgas\(2023\)102428](https://10.21438/rbgas(2023)102428) . ISSN 2359-1412. Acesso em: 12 out. 2024.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2017.

MILSON, C. E.; LIM, J. Y.; INGRAM, D. J.; EDWARDS, D. P. The need for carbon finance schemes to tackle overexploitation of tropical forest wildlife. **Conservation Biology**, e14406, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/cobi.14406>. Acesso em: 25 out. 2024.

MONTEIRO, M. K.D.; VIEIRA, A.S.; ARAGÃO, J. M.C.; SOARES, J. de F. Proposta de um modelo matemático para mensuração dos créditos de carbono da suinocultura brasileira. **Revista De Gestão Social E Ambiental – RGSA**, v. 9(1), p. 82–96, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v9i1.1017>. Acesso em: 10 jan. 2024.

NUNES, S. V. C. **Gestão de recursos humanos e sustentabilidade organizacional: Contributo para a competitividade das empresas** [Dissertação de mestrado, Iscte - Instituto Universitário de Lisboa]. Repositório Iscte, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10071/6656>. Acesso em: 12 mar. 2024.

OLIVEIRA, Y. P. L. O. Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma revisão. **Meio ambiente** (Brasil). v. 4(1), p. 02–20, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6302409>. Acesso em: 15 out. 2024.

OYEWOLA, D. O.; DADA, E. G. Exploring machine learning: as cientometrics approach using bibliometrix and VOSviewer. **SN applied sciences**, v. 4(5), 143, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05027-7>. Acesso em: 10 mar. 2024.

PATEL, D.; BRITTO, B.; SHARMA, S.; GAIKWAD, K.; DUSING, Y.; GUPTA, M. Carbon Credits on Blockchain. **International Conference on Innovative Trends in Information Technology (ICITIIT)**. p. 1-5, 2020. Disponível em: <https://10.1109/ICITIIT49094.2020.9071536>. Acesso em: 20 out. 2024.

RIEHMANN, P.; HANFLER, M.; FROEHLICH, B. Interactive Sankey diagrams. IEEE Symposium on Information Visualization. **INFOVIS**, p. 233 – 240, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/INFVIS.2005.1532152> . Acesso em: 15 jan. 2024.

SANQUETTA, C. R. **Créditos de carbono avançado** [livro eletrônico]. 1. ed. Curitiba, PR: 2023.

SECRETARIA DA COMUNICAÇÃO SOCIAL. **COP29: compromissos do Brasil marcam avanço global na luta contra a mudança do clima**. Secretaria da Comunicação Social, 11 nov. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2024/11/cop29-compromissos-do-brasil-marcam-avanco-global-na-luta-contra-a-mudanca-do-clima>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SUN, H.; GAO, G. Bank Credit Financing and Trade Credit Financing Based on Carbon Emission Trading. **Hindawi Mathematical Problems in Engineering**, v. 2022, 6781650, p. 11, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/6781650>. Acesso em: 12 out. 2024.

THOMAZ, P. G.; ASSAD, R. S.; MOREIRA, L. F. P. Uso do Fator de impacto e do índice H para avaliar pesquisadores e publicações. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, v. 96, n. 2, p. 90–93, fev. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0066-782X2011000200001>. Acesso em: 26 abr. 2024.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. FCCC/CP/1997/L.7/Add.1. 10 dez. 1997. Disponível em: <http://unfccc.int/cop4/l07a01.pdf>. Acesso em: 12 out. 2023.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Adoption of the paris agreement (report). FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Homepage da UNFCCC (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima) 2023**. Disponível em: <https://unfccc.int/decisions>. Acesso em: 29 nov. 2023.

VERRA. **The VCS Program**. 2021. Disponível em: <https://verra.org/project/vcs-program/>. Acesso em: 10 set. 2024.

VOLPATO, G. L. Editorial: Fortalecendo as citações para avaliação da qualidade científica. **RFO UPF**, vol.18, n.2, pp. 138-139, 2013. ISSN 1413-4012 [online]. Disponível em: http://revodonto.bvsalud.org/scielo.php?pid=S1413-40122013000200001&script=sci_arttext. Acesso em: 15 out. 2024.

WADE, C. M.; BAKER, J. S.; JONES, J. P. H.; AUSTIN, K. G.; CAI, Y.; HERNANDEZ, A. B. de; LATTA, G. S.; OHREL, S. B.; RAGNAUTH, S.; CREASON, J.; MCCARL, B. Projecting the Impact of Socioeconomic and Policy Factors on Greenhouse Gas Emissions and Carbon Sequestration in U.S. Forestry and Agriculture. **Journal of Forest Economics**, vol. 37, n. 1, p 127-131, 2022. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1561/112.00000545>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ZHANG, K.; WANG, D.; ZHOU, H. Regional endogenetic strategic interaction of environmental protection investment and emission. **China Ind. Econ.**, v. 2, p. 68–82, 2016.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organizational Research Methods**, v. 18(3), p. 429–472, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>. Acesso em: 10 jun. 2024.

Artigo II⁴

REGULATORY CHALLENGES OF THE CARBON CREDIT MARKET IN BRAZIL⁵

ABSTRACT: The growing relevance of the carbon market in the international arena places Brazil before the challenge of structuring a regulated system capable of reconciling economic competitiveness with environmental protection. In this context, the enactment of Law No. 15,042/2024, which establishes the Brazilian Greenhouse Gas Emissions Trading System (SBCE), constitutes a regulatory milestone, while raising doubts about its sufficiency to consolidate a robust and effective market. This study aimed to assess the law's capacity to enable a regulated carbon market in Brazil, considering its historical and legal trajectory, the distinctions between voluntary and regulated markets, the main technical and institutional challenges, as well as its merits and limitations. Methodologically, the research is exploratory, with a qualitative approach, based on bibliographic and documentary review across scientific databases (Scielo, Scopus, Google Scholar) and legislative records. From an initial corpus of 303 documents, 90 were selected for in-depth analysis and organized into thematic categories (regulatory frameworks, market design, infrastructure, socio-environmental justice, and methodological gaps). The results indicate that, although the law advances by creating a mandatory system with phased implementation and benefit-sharing mechanisms, significant gaps persist. These include the exclusion of agribusiness from emission limits, the absence of clear sectoral reduction targets, weaknesses in monitoring, reporting, and verification (MRV), and the risk of speculative dynamics. In conclusion, Law No. 15,042/2024 constitutes an important step but remains insufficient. Regulatory and institutional refinements are required to ensure an environmentally effective, legally stable, and socially just carbon market. Ongoing research and careful monitoring of its implementation will be essential for aligning the system with Brazil's climate goals.

Keywords: Emissions Trading System; Climate Policies; Market Regulation; Sustainable Development; Environmental Governance.

RESUMO: A crescente relevância do mercado de carbono no cenário internacional coloca o Brasil diante do desafio de estruturar um sistema regulado capaz de alinhar competitividade econômica e proteção ambiental. Nesse contexto, a promulgação da Lei nº 15.042/2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), representa um marco normativo, mas levanta dúvidas quanto à sua suficiência para consolidar um mercado robusto e efetivo. Este estudo teve como objetivo avaliar a capacidade da lei em viabilizar o mercado regulado de carbono no Brasil, considerando sua trajetória histórica e jurídica, as distinções entre os mercados voluntário e regulado, os principais desafios técnicos e institucionais, além de seus méritos e limitações. Metodologicamente, a pesquisa caracteriza-se como exploratória, de abordagem qualitativa, baseada em revisão bibliográfica e documental em bases científicas (Scielo, Scopus, Google Scholar) e registros legislativos. Dos 303 documentos inicialmente identificados, 90 foram selecionados para análise integral, organizados em categorias

⁴Artigo publicado na Revista ARACÊ.

⁵BISINOTO, Gustavo Domingos Sakr; DANZER, Valter Gustavo; DE LARA, Julio Cezar; ZANIN, Rodrigo Bruno; OLIVEIRA JUNIOR, Ernandes Sobreira. DESAFIOS REGULATÓRIOS DO MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO NO BRASIL. ARACÊ, [S. l.], v. 7, n. 10, p. e8595, 2025. DOI: [10.56238/arace/article/view/8595](https://doi.org/10.56238/arace/article/view/8595). Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/8595>. Acesso em: 6 out. 2025.

temáticas (marcos regulatórios, desenho de mercado, infraestrutura, justiça socioambiental e lacunas metodológicas). Os resultados indicam que, embora a lei avance ao criar um sistema obrigatório, com fases de implementação progressiva e mecanismos de repartição de benefícios, persistem lacunas regulatórias e setoriais - como a exclusão do agronegócio, ausência de metas claras por setor, fragilidades em monitoramento, relato e verificação (MRV) e risco de especulação. Conclui-se que a Lei nº 15.042/2024 constitui um avanço importante, mas ainda insuficiente, demandando aperfeiçoamentos regulatórios e institucionais para garantir um mercado ambientalmente efetivo, juridicamente seguro e socialmente justo. Pesquisas contínuas e o monitoramento de sua implementação serão cruciais para adequação às metas climáticas brasileiras.

Palavras-Chave: Sistemas de Comércio de Emissões; Políticas Climáticas; Regulação de Mercado; Desenvolvimento Sustentável; Governança Ambiental.

1 INTRODUCTION

The Earth's atmosphere consists of various gases and particles, with nitrogen and oxygen in greater quantities, as well as other gases that form what is known as the greenhouse effect. Among these gases, carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) stand out as the main ones. CO₂ is the most significant of these gases (IPCC AR6 WG3, 2022) and contributes substantially to climate change, such as the rise in global average temperatures (Hansen *et al.* 2006). This is due to its long residence time in the atmosphere and its gradual yet significant increase year after year.

Humanity is convinced that reducing CO₂ emissions is essential, particularly to curb the rise in global temperatures. Several alternatives have been proposed, including the preservation of carbon stocks in soils, forests, and other types of vegetation (Smith *et al.*, 2016).

Among the alternatives studied for mitigating climate change, the knowledge of carbon dynamics is of great relevance. The process carried out by plants, which capture CO₂ through photosynthesis and store it in their biomass, is widely recognized (Dias-Filho, 2006; Viana *et al.*, 2023), as well as the process carried out by the soil (Lal; Cerri, 2006; Pinheiro-Junior *et al.*, 2024), which stores it in the form of carbon. It is also known that carbon is stored in areas with large amounts of dense forests (Soepadmo, 1993; Pan *et al.*, 2011). In this context, Brazil stands out as a powerhouse in forest carbon stocks, particularly in dense forests, due to its vast forested areas and the diversity of biomes with varying capacities for carbon sequestration and storage, especially in the Amazon (Heinrichi *et al.*, 2021).

In addition to environmental preservation, carbon stockpile can generate credits, especially through the reduction of emissions due to deforestation and forestry manipulation (REDD+). Carbon credits correspond to a type of financial tool used to mitigate greenhouse gas emissions into the atmosphere, thus contributing to reducing the impact of climate change. The fundamental idea is to assign a financial value to verified reductions in carbon emissions, in order to encourage the reduction of greenhouse gas emissions in a more efficient and economical way (Ribeiro, 2007; Souza; Alvarez; Andrade, 2014; Souza *et al.*, 2023).

The regulation of Brazil's carbon credit market faces complex and multifaceted challenges. This emerging market, which plays a crucial role in combating climate change, involves the trading of credits, with each credit representing one ton of CO₂ either avoided or removed from the atmosphere (Fisher, 2010; Mendes, 2013).

The establishment of a robust regulatory framework is considered decisive to ensure the integrity and transparency of the carbon credit market. This regulation must set clear guidelines for the quantification, reporting, and verification of emissions, as well as define strict standards for emission reduction projects (Vilar, 2022). Studies suggest that such regulation is requirement to guarantee that carbon credits genuinely represent effective, measurable, and permanent reductions in greenhouse gas emissions (Cames *et al.*, 2016). However, if it is widely acknowledged that the implementation of a carbon credit market brings both economic and environmental benefits, the question arises: is Law No. 15,042/2024 sufficient to enable a robust carbon market in Brazil, or do its regulatory and sectoral gaps undermine the environmental effectiveness and legal stability of the proposed system?

Projects on carbon credits often occur in areas with a significant presence of traditional communities, whose ways of life may be impacted (Alvarez; Elfying; Andrade, 2016; Schroeder, 2010). Therefore, it is essential that these communities are effectively involved in the decision-making process and that part of the benefits generated by carbon projects are reverted towards the sustainable development of these communities (Alkmin, 2023; Souza *et al.*, 2023).

The overarching purpose of this study is to examine the capacity of Law No. 15,042/2024 to structure a regulated carbon market in Brazil, assessed in light of its normative advances, regulatory and sectoral shortcomings, as well as the multifaceted challenges posed to environmental effectiveness, legal certainty, and socio-environmental inclusion.

In pursuing this goal, the research further intends to scrutinize the historical and legal trajectory of the principal international conferences, agreements, and legislative initiatives that have shaped the carbon market within the Brazilian context; to delineate the distinctions between voluntary and regulated carbon markets by emphasizing their legal, economic, and operational underpinnings; to identify and categorize the principal technical, institutional, and regulatory barriers to the effective implementation of the Brazilian Emissions Trading System (SBCE); and to critically assess the merits and limitations of Law No. 15,042/2024 through reference to the scientific literature and antecedent legislative proposals that informed its enactment. Finally, the study seeks to formulate complementary guidelines and policy recommendations designed to strengthen the effectiveness and resilience of the Brazilian carbon market, informed by comparative international experiences.

2 MATERIAL AND METHOD

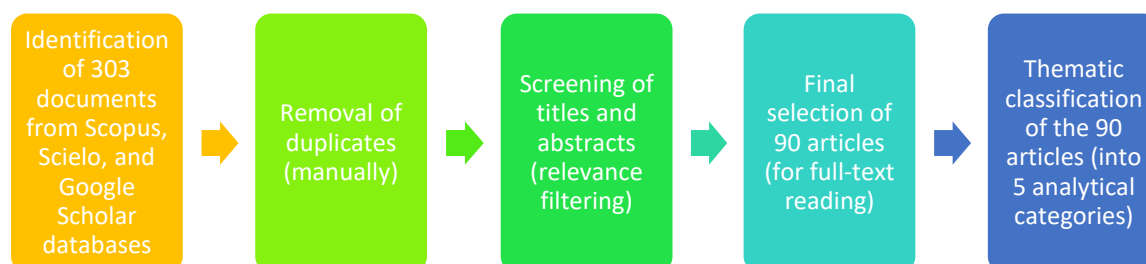
In this work, a narrative literature review was used, which involved a detailed study of publications related to the topic under discussion. The research is characterized as exploratory, with a qualitative approach, and bibliographic procedures. Data collection was carried out through consultation of the Scielo, Scopus, and Google Scholar databases, selecting journals classified as Qualis “A” or “B” or with an H-index greater than two, as well as undergraduate and postgraduate works (dissertations or theses). Documents such as Bills and Opinions were also gathered from federal legislative bodies (Federal Senate and Chamber of Deputies). According to Dourado and Ribeiro (2023), this type of literature review is a solid and reliable source of information, as it compiles knowledge from various selected publications, facilitating the identification of gaps in existing research.

The search strategy used the descriptors: “CARBON CREDIT” OR “CARBON CREDITS” AND BRAZIL OR BRASIL AND REGULAÇÃO OR REGULATION OR “PROJETO DE LEI” OR “PROJECT OF LAW”, in All Fields. The timeframe considered was the last six years (2019–2024), with the inclusion of classic or pioneering works beyond this period based on relevance and citation volume.

Initially, 303 documents were retrieved. After removing duplicates and applying relevance filters based on title and abstract screening, 90 documents were selected for

full-text analysis. Figure 1 illustrates the methodological flow used for selection, based on adapted PRISMA guidelines.

Figure 1 - methodological flow used for selection of documents



Source: elaborated by the authors.

Subsequently, the selected publications were classified into thematic categories, following an inductive coding process derived from content analysis. The categories reflect the dominant axes of discussion present in the carbon credit regulatory debate in Brazil:

Regulatory Frameworks and Legal Instruments (e.g., PLs, decrees, SBCE, SINARE);

Market Design and Economic Mechanisms (e.g., cap-and-trade, voluntary vs. regulated systems);

Infrastructure and Implementation Challenges (e.g., MRV systems, institutional gaps);

Social and Environmental Justice (e.g., REDD+, indigenous participation, benefit sharing);

Technical Proposals and Methodological Gaps (e.g., additionality, leakage, double counting).

These categories are detailed in Table 1, which also lists representative references for each cluster. This analytical classification supported a more structured discussion of results, allowing comparisons between international experiences and the Brazilian context, with emphasis on gaps in current legislation (Law 15.042/2024) and potential areas for improvement.

Table 1 - List of quantities by thematic categories and relevant works

Thematic Category	Nº of Articles	Representative Works
Regulatory Frameworks	24	Lima (2023); Souza et al. (2020); BRASIL (2024).
Market Design and Economic Mechanisms	18	Cames et al. (2016); Reisch (2022).
Infrastructure and Implementation	12	Vilar (2022); Rocha (2019); Rocha; Álvarez; Silveira (2014).

Thematic Category	Nº of Articles	Representative Works
Social/Environmental Justice	20	Alkmin (2023); Alvarez et al. (2016); Brito; Pozzetti, (2021).
Methodological Gaps and Proposals	16	Poyer et al. (2020); Montovanelli (2023).

Source: elaborated by the authors.

Given the established objectives, the study was developed along the following topics: Historical Context of Carbon Market Regulations; Carbon Market: Voluntary vs Regulated; Challenges, Brazilian Potentials in the Regulated Market and Conclusions, presented below. The data was analyzed descriptively and demonstrated in boxes to better demonstrate the results obtained.

3 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 HISTORICAL CONTEXT OF CARBON MARKET REGULATIONS

The inception and evolution of the carbon credit concept is situated in the broader context of global concerns about climate change and the role of greenhouse gas emissions. This idea originated from the growing awareness of the need to establish for efficient and scalable mechanisms to reduce global carbon emissions and mitigate global warming. In the initial phase, the notion of crediting emerged as an innovative tool to incentivize the reduction of emissions in a cost-effective manner (Guimarães, 2023).

The initial discussions started indirectly at the Stockholm Conference (1972), when the interdependence of human beings and the environment was recognized. At the Vienna Convention (1985) there was an international agreement to protect the stratospheric ozone layer. Its aim was to prevent the production and consumption of ozone-depleting substances such as chlorofluorocarbons (CFCs).

The Montreal Protocol (1987) was a complement to the Vienna Convention and established specific targets for the progressive elimination of the use of substances that cause the depletion of the ozone layer. At ECO-92 (1992) there was a significant milestone in promoting global awareness of environmental issues and establishing commitments in the search for more sustainable development.

These events did not directly debate the creation of the carbon credit market, but their ideals contributed to highlighting the problems the modern world was experiencing. Table 2 summarizes the historical evolution of the carbon credit market.

Table 2 - Summary of the historical evolution of the regulation of the Carbon Credit Market

Year	Event	Action
1972	Stockholm Conference	Declaration on the Human Environment “To inspire and guide the peoples of the world to preserve and improve the human environment”. Emergence of the concept of Sustainability.
1985 / 1987	Vienna Convention and Montreal Protocol	Protecting the ozone layer and restricting CFC emissions for the sake of protecting the ozone layer.
1992	ECO-92	Agenda 21 for sustainable development. Creation of the Convention on Diversity and the Framework Convention on Climate Change.
1997	Kyoto Protocol - COP III of the United Nations Framework Convention on Climate Change	Establishment of targets and market mechanisms for the reduction of greenhouse gases. The reduction of greenhouse gases could be financially compensated through CERs - Certified Emission Reductions.
2012	RIO+20	Creation of the SDGs and institutional commitment by States Parties to structure a green economy and eradicate poverty.
2015	Paris Agreement COP 21 of the United Nations Framework Convention on Climate Change	Establishment of iNDCs (Intended Nationally Determined Contribution) to reduce GHG.
2024	Law 15,042 approved	Establishes the Brazilian Greenhouse Gas Emissions Trading System (SBCE)

Source: elaborated by the authors.

An analysis of the main international conferences, such as Kyoto and Paris, reveals the progressive evolution of global understanding and response to climate change, particularly in the context of the carbon credit market. These conferences, milestones in the history of climate negotiations, have outlined paths and established fundamental commitments for the global management of greenhouse gas emissions (Lima, 2023).

In order to look for options to promote sustainable development, the 3rd Conference of the Parties (COP-3) generated documents of intents. These documents were signed by the countries that, at the time, were responsible for 55% of global emissions. The agreement set targets for the developed countries, which were members of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), included in Annex I of the agreement. In addition, Russia signed the agreement in 2004, and Eastern European countries also became signatories (Seiffert, 2009; Delpupo, 2009).

The Kyoto Protocol established emission reduction targets of around 5.2% in relation to 1990 levels for developed countries, which at the time were considered to be

the main contributors to emissions. These targets were projected for the first period of the agreement, between 2008 and 2012 (Souza *et al.*, 2012).

This agreement established both conditions and targets to reduce the continuous increase in greenhouse gas emissions resulting from the growing volume of global production (Lombardi, 2008). A significant contribution of the Kyoto Protocol was the incorporation of three forms of flexibility mechanisms to achieve the stipulated targets. Through these mechanisms, emission reduction efforts from different countries, projects and initiatives can be considered to meet local targets. These mechanisms include:

- a) Emissions Trading System (ETS),
- b) Joint Implementation Mechanism (JI) and
- c) Clean Development Mechanism (CDM).

The CDM is the only mechanism that allows developing countries (like Brazil) to carry out emission reduction and removal projects in order to generate carbon credits, by allowing carbon credits to be traded with Annex I countries that need to reduce their excess emissions. This mechanism is considered an economic instrument that gave rise to the regulated carbon market worldwide. The regulated carbon market consists of an institutional environment where participants are subject to national or global legislation and standards, which establish criteria and rules for designing projects and trading Certified Emission Reductions (CERs) from CDM projects (Souza *et al.*, 2012).

With the replacement of the Kyoto Protocol by the Paris Agreement, there was a new look at the world, letting countries express how much they could contribute to reducing their emissions through NDCs, which must pass through the congresses and parliaments of each country (Hamilton *et al.*, 2021). In its NDC, presented in 2015, Brazil set out its goals for mitigating climate change. Officially, Brazil has committed to reducing its emissions by 37% by 2025 and 50% by 2030, based on its 2005 emissions, through mitigation and adaptation measures (UNFCCC, 2023). At COP29 in November 2024, Brazil set a new target by proposing to reduce net greenhouse gas emissions by 59% to 67% by 2035, relative to 2005 levels. Table 3 shows a summary of the main commitments ratified in the Paris Agreement by the five countries with the highest CO₂ emissions, which accounted for 61% of emissions in 2022.

Through these conferences, there has also been a progressive increase in the global ambition to reduce emissions. While the Kyoto Protocol focused on short-term targets and a more quantitative approach, the Paris Agreement introduced a long-term

vision aimed at limiting the increase in global temperature to values below 2°C above pre-industrial levels (Brito; Pozzetti, 2021).

Table 3 - Summary of the main commitments ratified in the Paris Agreement by the top 5 CO₂ emitting countries

Country	Treaties signed	Global CO ₂ emissions (2022)	
		%	MtCO ₂
1° China	• peak CO₂ emissions by 2030; • reduce energy intensity by 2030; • increase the share of non-fossil sources by 20% by 2030; • expand areas of afforestation and reforestation;	32%	11.900
2° USA	• reduce greenhouse gas emissions by 26% to 28% below 2005 levels by 2025; • increase renewable energy sources; • improve energy efficiency in various economic sectors; • Implement policies and initiatives to promote sustainability and resilience to climate change, including the preservation of forests and natural ecosystems; • contribute to the financing of climate initiatives in developing countries;	13,7%	5.080
3° India	• reduce the greenhouse gas emissions intensity of its GDP by 33% to 35% by 2030, compared to 2005 levels; • increase the installed capacity of non-fossil energy to 40% of the total by 2030; • create an additional carbon sink of 2.5 to 3 billion tons of carbon dioxide equivalent by increasing forest cover and improving the quality of forests by 2030; • invest in clean technologies and promote technology transfer to support their sustainable growth; • implement measures to increase the country's resilience to the impacts of climate change, including the protection of vulnerable communities and the development of resilient infrastructure;	7,4%	2.760
4° Russia	• reduce their greenhouse gas emissions by 25% to 30% below 1990 levels by 2030; • maintain current forests as a carbon sink; • promote energy efficiency in sectors such as transportation, industry and construction, with the aim of reducing total energy consumption and associated emissions; • increase the use of renewable energy sources;	4,3%	1.600
5° Japan	• reduce its greenhouse gas emissions by 26% by 2030, compared to 2013 levels; • significantly improve energy efficiency in sectors such as transportation, industry and buildings to reduce energy consumption and associated emissions; • increase the share of renewable energy sources; • implement adaptation measures to increase the country's resilience to the impacts of climate change;	2,9%	1.060
TOTAL		60,3%	22.400

Source: Elaborated by the author based on data from Climate Watch - PIK (2024) – CO₂ Emissions excluding Land Use Change and Forests.

International conferences have increasingly become critical forums for discussions on integrity and effectiveness. Consequently, issues such as transparency, accounting,

and the prevention of “double counting” of emissions have become central topics, reflecting the ongoing effort to enhance and strengthen market mechanisms in the context of climate change (Oliveira, 2022).

In the early stages, carbon market policies focused mainly on creating cap-and-trade systems, in which limits or caps were set on total allowable emissions, and companies or countries could trade emission permits. These systems sought to incorporate the environmental cost of carbon emissions into economic decisions, encouraging investments in cleaner and more efficient technologies (Chagas; Ferreira; Feitosa, 2022).

With the growing understanding of the impacts of climate change, there has also been a greater emphasis on the need for inclusive and fair approaches. Public policies have begun to recognize and integrate sustainable development considerations, including the protection of biodiversity, the promotion of social equity and the involvement of local and indigenous communities in carbon credit projects (Montovanelli, 2023; Alkmin, 2023).

A comparison of global regulations surrounding carbon credit markets highlights the diversity of approaches adopted by different nations and economic blocks, reflecting the varied economic, environmental and political contexts. This comparison reveals the differences in regulatory frameworks and the similarities in fundamental objectives and challenges faced (Stevanato, 2022).

In the European Union, for example, the Emissions Trading System (EU ETS) represents one of the oldest and most sophisticated carbon markets in the world. It is characterized by a strict cap-and-trade regime, where a ceiling for emissions is set and emission rights are traded. This system has been instrumental in reducing greenhouse gas emissions in the region, demonstrating the effectiveness of a well-structured and coherent regulatory approach (Oliveira, 2021).

In contrast to the European model, the carbon credit regime in the United States is marked by a decentralized approach based on state initiatives, such as the California Cap-and-Trade Program. This program, specific to the state of California, illustrates how sub-national regulations can be effective in managing emissions, offering flexibility and adaptability to local contexts (Maldaner, 2022).

On the Asian continent, particularly in China, the approach has been to gradually implement emissions trading systems. Initially launched as pilot projects in various cities and provinces, these systems are evolving into a national scheme, reflecting China's

growing importance on the climate change scene and its pragmatic, phased approach to implementing environmental policies (Fonseca, 2022).

In regions with established emissions trading systems, such as the European Union, there has been a clear boost in the adoption of low-carbon technologies, demonstrating the potential of these markets to stimulate changes in industrial and energy practices (Delgado, 2022). However, challenges have also been identified, such as the need to set emission ceilings that are both ambitious and achievable. Experience has shown that caps that are too high can fail to promote significant emission reductions, while caps that are too low can impose excessive economic challenges, especially for industries in transition (Nicoletti, 2022).

The integrity of carbon credit markets depends heavily on confidence in the accuracy of emissions data and the effectiveness of reported reductions. Challenges related to double counting and quality have driven efforts to improve monitoring systems and international regulation (Souza, 2020).

An emerging understanding is the importance of climate justice and social inclusion in markets. Initiatives must consider the environmental and economic aspects and the social impact and involvement of local communities. International experience has shown that the most successful projects are those that combine emission reductions with local social and environmental benefits (Oliveira, 2021).

3.2 CARBON MARKET: VOLUNTARY VS REGULATED

The structure and operation of the voluntary carbon credit market has distinct characteristics that differentiate it from regulated markets. The former is characterized by the trading of carbon credits outside of a mandatory regulatory framework, where the buying and selling of credits is driven by the will of interested parties to contribute to the reduction of greenhouse gas emissions, in addition to achieving corporate or personal sustainability goals. In the voluntary market, companies, governments or individuals can buy credits to offset their own emissions, with the aim of becoming neutral or achieving other environmental goals. They are generated by projects that reduce, avoid or capture greenhouse gas emissions. Common examples include reforestation projects, renewable energy, carbon capture and storage, and energy efficiency improvements (Montovanelli, 2023).

Unlike regulated ones, where they are often traded within parameters set by government policies, voluntary ones offer greater freedom in terms of how and where credits can be generated and sold. This provides a breeding ground for innovation and experimentation in reduction projects (Silveira; Oliveira 2021).

Although it is not regulated by a specific legal framework, the market relies heavily on credibility and transparency. Therefore, carbon credits are often validated and verified by independent third parties, according to internationally recognized standards and protocols. This ensures that the emission reductions are real, measurable and permanent (Delgado, 2022).

The regulated market is structured under guidelines and standards established by governmental or intergovernmental authorities, differing substantially from the voluntary market in terms of regulation and supervision. This form of market is often based on international agreements, such as the Kyoto Protocol, or on national legislation that sets emission reduction targets for entire sectors or countries (Souza, 2020).

In this system, they are used as a tool to meet regulatory obligations to reduce emissions. Generally, a cap is set on the total emissions allowed within a jurisdiction or sector. Companies or entities that emit greenhouse gases are then obliged to hold an amount of carbon credits equivalent to their emissions, encouraging them to reduce their emissions or buy additional credits on the market if they exceed their allocated limits (Anis; Carducci; Ruviano, 2022).

A distinctive feature of the regulated market is the existence of a cap-and-trade mechanism. This system allows companies that reduce their emissions below the established limits to sell surplus credits to others that are struggling to meet their targets. This creates an economic incentive to reduce emissions and promotes efficiency in the allocation of resources to where emissions reductions can be achieved at the lowest cost (Inácio Filho, 2022).

Integrity and effectiveness depend heavily on a rigorous emissions Monitoring, Reporting, and Verification (MRV) system. Such systems are key to ensuring that emissions reductions are real, measurable and verifiable, sustaining trust in the market and ensuring that emissions reduction targets are effectively achieved (Vercillo, 2023).

The economic and procedural differences are striking and significantly influence the dynamics and effectiveness of each system. In the economic sphere, the main distinction lies in the way carbon credit prices are set and the nature of the incentives for reducing emissions (Maldaner, 2022).

In the markets, carbon credit prices are generally influenced by factors such as emission targets set by the government, supply and demand within the cap-and-trade system, and penalties for non-compliance with quotas. This system tends to create a more stable and predictable price for carbon, reflecting environmental policies and objectives defined in a regulatory manner. It provides a direct incentive to reduce emissions, as companies look for ways to cut their costs by buying credits (Reisch, 2022).

On the other hand, in the voluntary market, prices are more influenced by market supply and demand, without the imposition of government limits or penalties. In many cases, companies acquire carbon credits voluntarily to meet corporate sustainability, social responsibility or marketing objectives. In this context, the price of credits can be more variable (and generally lower than in the regulated market), reflecting a diverse range of projects and their perceived environmental and social quality (Fonseca, 2022).

In terms of procedures, regulated markets require a robust system to ensure that emissions and reductions are accurately quantified and verified. This process often involves regulatory or certification bodies that ensure compliance with established standards. In addition, participation in a regulated market usually implies stricter legal and compliance requirements for companies (Souza, 2020).

Another challenge is the issue of “carbon leakage”, where companies can transfer production to countries with less stringent regulations, resulting in emissions not being reduced globally. To combat this, some jurisdictions have implemented measures such as free allocation of permits to sectors at risk of carbon leakage, seeking a balance between environmental protection and economic competitiveness (Moreira; Silva, 2022).

3.3 BRAZIL'S CHALLENGES AND POTENTIAL IN THE REGULATED MARKET

In the context of the Brazilian carbon credit market, several current barriers can be identified, reflecting challenges at both structural and operational levels. One of the main barriers is the absence of a specific and comprehensive regulatory framework. This legal gap creates uncertainty about the rules of operation, discouraging potential investors and participants due to the lack of clarity about the rights and duties involved, and can even lead to fraud, as reported by CNN Brasil in the article entitled “PF carries out mega operation against fraud in granting carbon credits to multinationals” (Maia, 2024).

There are currently four rules in force in Brazil that legitimize the trading of carbon credits: the National Policy for Payment for Environmental Services (Law Nº. 14.119/21),

the Cédula de Produto Rural - CPR-Verde (Decree N°. 10.828/21); the National System for Reducing Greenhouse Gas Emissions - SINARE (Decree N°. 11.075/22 amended by Decree N°. 11.550/2023) and the Law 15.042/2024 which establishes the Brazilian Greenhouse Gas Emissions Trading System (SBCE).

However, it is important to note that these legal frameworks do not establish guidelines or regulations for this market. The approval of Law 15,042/2024 alone is not sufficient to ensure the operationalization of the market, as the law itself sets a timeline for the implementation of the SBCE, which will be gradual and divided into five main phases, as shown in table 4. This aims to ensure predictability and legal certainty for regulated companies, in addition to attracting international investments and positioning Brazil as a global leader in the carbon market.

Table 4 - Phases for implementing the Brazilian Greenhouse Gas Emissions Trading System

Phase	Time – Months	Action - Objectives
1	12 to 24	Initial regulation, creation of the governing body, and definition of the sectors to be regulated. At this stage, the operational details of the system and the legal framework for market functioning will be established.
2	12	Operationalization of the monitoring, reporting, and verification (MRV) system for emissions. Companies will be required to report their emissions in a standardized manner, creating a database that will enable market oversight.
3	24	Start of the obligation to submit emissions reports and monitoring plans, providing the necessary data for the first National Allocation Plan (PNA).
4	Approximately 12 to 24	Start of the first allocation cycle of Carbon-Based Emission Allowances (CBEs) and the operationalization of the first auctions. The PNA will be published, defining the rules for quota distribution and the initial volume available to the market. During this phase, the first CBEs will begin to be issued and traded, involving regulated companies.
5	Approximately 12	Full implementation of the market, with the first CBE auction and the launch of the secondary market, allowing transactions between companies.

Source: prepared by the authors based on Law No. 15,042/2024.

Law No. 15,042/2024 establishes the Brazilian Greenhouse Gas Emissions Trading System (SBCE), defining emission caps, setting rules for the commercialization of offset credits, and creating standards for the functioning of the trading system. Its purpose is to reconcile economic competitiveness with environmental protection. By instituting the legal framework for the carbon credit market in Brazil, the law aligns

national regulation with international standards and the commitments assumed under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Paris Agreement. In practice, this means the establishment of a mandatory system that imposes progressive emission reduction targets on regulated sectors and integrates Brazil's national reduction commitments under UN monitoring mechanisms.

Before being enacted as Law 15,042/2024, the text was processed under Bill 182/2024, which consolidated the following bills addressing various issues related to emissions and carbon credit trading:

- Bill 10.073/2018: Establishes an IPI reduction for products suitable for the low-carbon green economy;
- Bill 290/2020: Provides for environmental compensation for electricity generation and the certification of carbon credits for generation projects using alternative sources;
- Bill 3.606/2021: Proposes the establishment of a regulatory framework for MBRE;
- Bill 2.122/2021: Proposes the definition of rules for financial assets related to the mitigation of greenhouse gas emissions;
- Bill 4.028/2021: Proposes the creation of general guidelines for the regulation of the carbon market in Brazil;
- Bill 412/2022: Regulates the Brazilian Emissions Reduction Market (MBRE), provided for by Law 12.187, of December 29, 2009, and amends Laws 11.284, of March 2, 2006; 12,187, of December 29, 2009; and 13,493, of October 17, 2017;
- Bills No. 7.578/2017, 5.710/2019, 528/2021, 4.290/2023, 4.088/2021, 5.157/2023 and 155/2023, which deal with similar matters and were therefore joined as substitutes to Bill 182/2024;

It is important to mention these bills, as each emerged within a specific political and social context, reflecting distinct economic, political, environmental, and social interests. Law No. 15,042/2024 ultimately consolidated nearly all of them, except for the exclusion of obligations requiring the agribusiness sector to comply with emission limits.

Although Brazil has great potential for generating carbon credits, especially due to its vast forest cover and renewable energy opportunities, it still lacks a mature market infrastructure that can effectively manage the supply and demand for credits, as well as ensure the integrity and transparency of transactions (Maldaner, 2022). In both the public

and private sectors, there is a lack of specialized knowledge, its potential and its operational mechanisms. This lack of knowledge and experience can result in mistrust or the adoption of inefficient practices (Poyer; Silveira; Oliveira, 2020).

The law 15,042/2024 lists a series of actions that can generate carbon credits, including restoration, maintenance and conservation of permanent preservation areas (APPs), legal reserves or restricted use areas, and conservation units; integral or sustainable use conservation units with a management plan; land reform settlement projects; indigenous peoples and traditional communities are allowed to participate in the market through associations. A preliminary analysis of the draft laws was carried out in December 2024, where the following positive and negative points can be seen in table 05.

Table 5 - Analysis of the Positive and Negative Points of the Bills Regulating Carbon Credits in Brazil

 Pros	 Cons
• It will provide competitive advantages for the Brazilian economy. • It will encourage changes in production and consumption patterns, promoting greater demand for clean technologies. • Regulating the carbon market could become an effective way of reducing greenhouse gas (GHG) emissions, aligning the sustainability tripod: economically viable, socially fair and ecologically correct. • Implementing carbon pricing will help mitigate climate change by creating economic incentives for companies to adopt sustainable practices, as well as stimulating investment in research and innovation. • It increases the mix of compensation possibilities, creating rules and methodologies for certifications, through CBEs (Brazilian Emission Quotas) and CRVEs (Certificates of Verified Emission Reduction or Removal). • Establishes control of activities that emit more than 10,000 tons of CO₂ per year. Companies with emissions	• Carbon pricing alone will not be enough to mitigate the environmental impacts needed to reduce the effects of climate change. • Many carbon offset projects do not result in significant emission reductions, serving merely as a way for companies to offset their pollution without modifying their production processes. • There are concerns about climate justice, as local communities in developing countries, where many offsets occur, may suffer socio-environmental impacts without receiving direct benefits. • They do not explicitly address methane credits, which were included in Decree 11.003/2022 by Decree 11.075/2022. It would be pertinent to include such a reference in the legislation, especially considering the global commitment made by Brazil at COP 26 to reduce methane gas emissions by 30%. • They do not directly address the issue of reducing deforestation. Even after the signing of the

 Pros	 Cons
of between 10,000 and 25,000 tons per year will have to submit an emissions monitoring plan to the SBCE management body, including the submission of an annual emissions and removals report. For activities with emissions of more than 25,000 tons per year, it will be compulsory to submit an annual report on the periodic reconciliation of obligations, which is not currently done. • The issuance of carbon bonds will be validated and regulated by the Brazilian state, which could be important in providing more technical and legal security for both generators and purchasers of decarbonization bonds. • This is a significant step forward in terms of legal certainty, considering that, currently, with the deregulated and voluntary market, negotiations can lead to various risks and legal consequences for those who acquire carbon credits and use them as proof of reductions and compensations at a global level. • It guarantees traditional and indigenous communities the right to receive and participate in the management of financial resources generated by carbon credit projects carried out in their territories. They will be entitled to 50% of the credits in the case of conventional greenhouse gas removal initiatives, and 70% of the credits in the case of avoided deforestation and forest degradation projects, conservation, and forest management (REDD+).	Glasgow declaration on forests and land use at COP 26, this action does not entail formal obligations. • Although the main focus is on regulating financial transactions in the context of a market structure, it would be beneficial to highlight the importance of meeting the targets set in the Paris Agreement, especially by reducing deforestation. • The creation of an Emissions Trading System (ETS) could result in carbon emissions becoming yet another commodity for the international market, without generating significant impacts for Brazil's economic growth. There is concern that the ETS could be concentrated in the hands of large corporations or volatile on the speculative market. • Agriculture, forestry and alternative land use were excluded in the vote by the Senate (Bill 412/2022) and the House (PL 2.148/2015) under the pretext that Brazilian agriculture is low-impact, with a vast area of the country still preserved and increasingly, environmental barriers are being established globally for agricultural products and commodities, which is already causing the Agribusiness sector to organize itself to reduce emissions. • Emission levels can be increased (made more flexible), taking into account the cost-benefit ratio of regulation and compliance with Brazil's commitments to the United Nations Framework Convention on Climate Change.

Source: elaborated by the authors based on Law No. 15,042/2024.

The complexity and diversity of the Brazilian environmental scenario also pose challenges. The country has a wide range of biomes and great socio-environmental diversity, which makes the implementation of carbon credit projects and the measurement

of their emission reductions particularly challenging (Vercillo, 2023). This complexity requires customized and well-founded approaches that take into account the peculiarities of each region and community (Munhoz, 2023).

From a social point of view, the carbon credit market has the potential to generate tangible benefits for local communities, especially those located in rural areas or in regions of great ecological importance, although the viability of this depends on areas of at least 20,000 hectares, due to the high fixed costs of auditing and certifying projects (Credcarbo, 2024; Carbonext, 2024); through consortium contracts or partnerships, it is possible to unite areas of 4,000 hectares or more in order to reach the break-even point of economic viability.

Well-structured projects can create jobs, foster sustainable local development and improve people's quality of life, in line with the United Nations Sustainable Development Goals. However, it is essential that these projects are developed in a participatory and inclusive manner, ensuring that the benefits are shared with local communities and that their rights and ways of life are respected (Brito; Pozzetti, 2021).

An important strategy is also investment in infrastructure and technical capacity. This involves, for example, developing systems that minimize carbon emissions, as well as training qualified professionals to manage and operate these systems (Rocha, 2019).

The awareness and involvement of all stakeholders must be promoted, including the private sector, the government, local communities and civil society. This can be achieved through educational campaigns, participatory dialogues and collaboration with non-governmental organizations and academic institutions. The inclusion of diverse perspectives and the dissemination of information about the benefits and functioning of the carbon credit market can foster broader and more effective uptake (Vargas; Delazeri; Ferreira, 2022).

Another fundamental aspect is the integration of credit policies with other environmental and economic initiatives. This includes aligning credit policies with national strategies for sustainable development, forest conservation, renewable energy and poverty reduction. An integrated approach can maximize environmental and social benefits while contributing to the low-carbon economy (Brito; Pozzetti, 2021).

This framework must establish clear guidelines on the issuing, marketing and monitoring of carbon credits, guaranteeing transparency, reliability and compliance with international standards. This regulation in phases should also include inspection

mechanisms and penalties for non-compliance with the established standards (Baeta, 2020).

4 CLOSING REMARKS

Law No. 15,042/2024 represents a relevant advancement by establishing the Brazilian Greenhouse Gas Emissions Trading System (SBCE) and aligning the country with international climate mitigation commitments. However, the findings of this study indicate that the law is not yet sufficient to enable a robust carbon market, as it contains regulatory, operational, and sectoral gaps that compromise both environmental effectiveness and legal certainty.

The analysis of the historical and legal trajectory of the carbon market shows that the law is the result of a long process of legislative maturation, influenced by international agreements (such as the Kyoto Protocol and the Paris Agreement) and the consolidation of several previous legislative proposals. While the text incorporates important regulatory elements, it failed to fully include crucial sectors such as agribusiness, based on fragile justifications. This omission weakens the scope of national climate policy.

The comparison between voluntary and regulated carbon markets reinforces the importance of transitioning to a state-managed system with binding targets, emissions control, and environmental integrity. While the voluntary market operated with variable credibility and lacked legal obligations, the regulated market imposes emission caps and trading rules grounded in monitoring, reporting, and verification (MRV) methodologies. Law 15,042/2024 advances in this direction, but its effective implementation will depend on complementary regulations and the creation of robust institutional structures.

Among the main technical and institutional challenges identified are: the absence of a fully operational governing body; the need for a reliable MRV system; the technical unpreparedness of many public and private actors; and the complexity of implementing projects in diverse socio-environmental contexts. Additionally, the economic viability of carbon projects, according to international standards, is still limited to large areas (>20,000 hectares), potentially excluding small rural producers and traditional communities unless consortia are formed.

The critical analysis of the law also reveals strategic limitations. There are no clearly defined emission reduction targets by sector; methane credits and effective deforestation control mechanisms are omitted; and the compensation system may allow companies to merely “buy the right to pollute” without being encouraged to change their

production processes. Furthermore, there is a risk that the market could become a speculative commodity with no real climate benefit.

Despite these issues, Law 15,042/2024 contains important merits: it guarantees benefit-sharing with Indigenous and traditional communities; proposes the issuance of regulated carbon quotas (CBEs and CRVEs); and promotes predictability through a five-phase implementation model. Its existence already constitutes a legal milestone that can be improved and expanded.

Based on successful international experiences, the following recommendations are made for subsequent regulatory phases and possible revisions to the law: (a) include all economic sectors, especially agriculture and land use; (b) impose limitations on the use of offset mechanisms to prevent misuse; (c) improve MRV methodologies to avoid double counting; (d) set ambitious and progressive emission reduction targets; (e) integrate SBCE with other environmental and climate public policies; and (f) ensure participatory governance with transparency, oversight, and social inclusion in all technical working groups and regulatory bodies involved in the law's implementation.

In conclusion, although it is an important step, Law No. 15,042/2024 still requires regulatory and operational refinements to guarantee the establishment of an environmentally effective, legally stable, and socially just carbon market in Brazil. Ongoing research and rigorous monitoring of the law's implementation will be crucial to ensure its success and alignment with the country's climate goals.

REFERENCES

ALKMIN, F. M. Colonialismo climático e financeirização do carbono: Reflexões sobre o REDD+ e a autonomia socioterritorial dos povos indígenas na Amazônia. **AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política**, v. 5, n. 2, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.48075/amb.v5i2.31885>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ALVAREZ, G.; ELFVING, M.; ANDRADE, C. REDD+ governance and indigenous peoples in Latin America: the case of Suru Carbon Project in the Brazilian Amazon Forest. **Latin American Journal of Management for Sustainable Development**, v. 3, n. 2, 2016. p. 133-146. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/LAJMSD.2016.083705>. Acesso em: 09 abr. 2024.

ANIS, C. F.; CARDUCCI, C. E.; RUVIARO, C. F. Mercado de carbono agrícola: realidade ou desafio? **Multitemas**, [S. l.], v. 27, n. 65, 2022. p. 163–188. DOI: 10.20435/multi.v27i65.3396. Disponível em: <https://multitemas.ucdb.br/multitemas/article/view/3396>. Acesso em: 28 nov. 2024.

BAETA, F. Mercado de crédito de carbono entra na mira de empresas. **Institute of Economics**. Brazil. 2020. Disponível em:

<https://policycommons.net/artifacts/1549510/mercado-de-credito-de-carbono-entra-na-mira-de-empresas/2239203/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 10.073/2018**. Estabelece redução de IPI para produtos adequados à economia verde de baixo carbono. Brasília, 2018. Disponível em:

<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2172606>. Acesso em: 10 abr. 2024.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 182/2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009; nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal); nº 6.385, de 7 de dezembro de 1976; nº 11.033, de 21 de dezembro de 2004; nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). Brasília, 2015. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/161961>. Acesso em: 10 abr. 2024.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 290/2020**. Dispõe sobre a compensação ambiental da geração de energia elétrica e a certificação de créditos de carbono para empreendimentos de geração por fontes alternativas. Brasília: Câmara dos Deputados, 2020. Disponível em:

<https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicameras/-/ver/pl-290-2020>. Acesso em: 11 abr. 2024.

BRASIL. **Decreto nº 10.828, de 1º de outubro de 2021**. Regulamenta a emissão de Cédula de Produto Rural, relacionada às atividades de conservação e recuperação de florestas nativas e de seus biomas, de que trata o inciso II do § 2º do art. 1º da Lei nº 8.929, de 22 de agosto de 1994. Brasília, 2021. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/Decreto/D10828.htm. Acesso em: 10 abr. 2024.

BRASIL. **Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022**. Estabelece os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa e altera o Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. Brasília, 2022. Disponível em:

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2022/decreto-11075-19-maio-2022-792682-publicacaooriginal-165314-pe.html>. Acesso em: 11 abr. 2024.

BRASIL. **Lei Nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nºs 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. Brasília, 2021. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/14119.htm. Acesso em: 11 abr. 2024.

BRASIL. **Lei Nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nºs 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), 6.385, de 7 de dezembro de 1976 (Lei da Comissão de Valores Mobiliários), e 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/15042.htm. Acesso em: 12 dez. 2024.

BRASIL. Senado Federal. **Projeto de Lei nº 2.122/2021**. Institui o marco regulatório para ativos financeiros associados a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/148745>. Acesso em: 12 abr. 2024.

BRASIL. Senado Federal. **Projeto de Lei nº 3.606/2021**. Institui o marco regulatório para o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE). Brasília, 2021. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/150293>. Acesso em: 12 abr. 2024.

BRASIL. Senado Federal. **Projeto de Lei nº 412/2022**. Regulamenta o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE), previsto pela Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, e altera as Leis nºs 11.284, de 2 de março de 2006; 12.187 de 29 de dezembro de 2009; e 13.493 de 17 de outubro de 2017: 2022. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/151967>. Acesso em: 11 abr. 2024.

BRITO, A. C. L.; POZZETTI, S. Mercado de créditos de carbono na amazônia e comunidades indígenas e tradicionais. **Percursos**, v. 3, n. 40, 2021. p. 85-91. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21902/RevPercursos.2316-7521.v3i41.5536>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CAMES, M.; HARTHAN, R. O.; FÜSSLER, J.; LAZARUS, M.; LEE, C. M.; ERICKSON, P.; SPALDING-FECHER, R. How additional is the clean development mechanism. Analysis of the application of current tools and proposed alternatives. **Öko-Institut**, Berlin, 2016. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2017-04/clean_dev_mechanism_en.pdf. Acesso em: 18 ago. 2024.

CARBONEXT. Produza carbono na sua terra. 2022. Site **Carbonext**. Disponível em: <https://www.carbonext.com.br/be-a-producer>. Acesso em: 21 nov. 2024.

CHAGAS, R. M.; FERREIRA, N. B. V.; FEITOSA, J. R. T. Crédito de carbono e sua aplicabilidade: estudo de caso em uma empresa hidroelétrica no interior de Rondônia. **Revista Farol**, v. 16, n. 16, 2022. p. 48-66. Disponível em: <https://revista.farol.edu.br/index.php/farol/article/view/382>. Acesso em: 20 ago. 2024.

CREDCARBO. Pequenas propriedades podem gerar crédito de carbono? **CredCarbo**. 2023. Disponível em: <https://credcarbo.com/carbono/pequenas-propriedades-podem-gerar-credito-de-carbono/>. Acesso em: 21 nov. 2024.

DELGADO, F. A captura de carbono no Brasil: getting ready. **Revista Conjuntura Econômica**. v. 76, n. 08, 2022. p. 42-44. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/rce/article/view/88909/83542>. Acesso em: 21 jan. 2025.

DELPUPPO, C. Protocolo de Quioto. In.: FUJIIHARA, M. A.; LOPES, F. G. **Sustentabilidade e Mudanças Climáticas** - um guia para o amanhã. São Paulo: Senac, 2009. p. 27-44.

DIAS-FILHO, M. B. A fotossíntese e o aquecimento global. In.: DIAS-FILHO, M. B. Belém **Embrapa Amazônia Oriental**, 2006. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/387686/1/OrientalDoc234.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2025.

DOURADO, S.; RIBEIRO, E. **Metodologia qualitativa e quantitativa**. 2023. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/download-file/6097>. Acesso em: 15 fev. 2023.

FISHER, J. Voluntary carbon markets. An international business guide to what they are and how they work. **Journal of Integrative Environmental Sciences**, v. 7, n. 1, p. 95–96, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19438150903314354>. Acesso em: 06 abr. 2024.

FONSECA, A. Y. S. D. **Crédito de carbono na esfera dos resíduos sólidos urbanos no Brasil**. 2022. 43 p. Monografia (Bacharelado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/48768>. Acesso em: 25 ago. 2024.

GUIMARÃES, V. S. **Mercado de Crédito de Carbono: evolução no Brasil**. 2023. 49 p. Bachelor's thesis, Universidade Federal do Amazonas. Disponível em: <http://rii.ufam.edu.br/handle/prefix/7324>. Acesso em: 12 set. 2024.

HAMILTON, I.; KENNARD, H.; MCGUSHIN, A.; HÖGLUND-ISAKSSON, L.; KIESEWETTER, G.; LOTT, M.; MILNER, J.; PUROHIT, P.; RAFAJ, P.; SHARMA, R.; SPRINGMANN, M.; WOODCOCK, J.; WATTS, N. The public health implications of the Paris Agreement: a modelling study. **The Lancet Planetary Health**, [S.l.], v. 5, n. 2, p. e74–e83, fev. 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30249-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30249-7). Acesso em: 09 out. 2024.

HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R.; LO, K.; LEA, D. W.; MEDINA-ELIZADE, M. Global temperature change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 39, p. 14288–14293, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.060629110>. Acesso em: 29 set. 2024.

HEINRICH, V. H. A.; DALAGNOL, R.; CASSOL, H. L. G.; ROSAN, T. M.; ALMEIDA, C. T.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; CAMPANHARO, W. A.; HOUSE, J. I.; SITCH, S.; HALES, T. C.; ADAMI, M.; ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C. Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. **Nature Communications**, v. 12, article n. 1785, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>. Acesso em: 12 nov. 2024.

INÁCIO FILHO, J. C. Créditos de carbono da agricultura brasileira. **Revista de Estudos Interdisciplinares do Vale do Araguaia - REIVA**, v. 5, n. 02, p. 4, 25 maio 2022. Disponível em: <https://reiva.unifaj.edu.br/reiva/article/view/242>. Acesso em: 20 out. 2024.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC Sixth Assessment Report. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Retrieved from: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 26 nov. 2023.

LAL, R.; CERRI, C. (Eds.). Carbon Sequestration in Soils of Latin America. 1st ed. Boca Raton: **CRC Press**, 2006. 544 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781482298031>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LIMA, A. P. **Os obstáculos jurídicos para a implementação de um mercado de créditos de carbono no Brasil**. 2023. Bachelor's thesis, Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/5365/6/MONOGRAFIA_Obst%C3%A1culosJur%C3%ADdicosImplementa%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 10 fev. 2024.

LOMBARDI, A. **Créditos de Carbono e sustentabilidade: os caminhos do novo capitalismo**. São Paulo: Lazuli; Companhia Editora Nacional, 2008.

MAIA, E. PF faz megaoperação contra fraude em concessão de crédito de carbono a multinacionais. **CNN Brasil**, 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/pf-faz-megaoperacao-contrafraude-em-concessao-de-credito-de-carbono-a-multinacionais/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

MALDANER, A. C. H. **A relação jurídica de comercialização de créditos de carbono: uma análise acerca do mercado voluntário de carbono no Brasil**. 2022. 113 p. Bachelor's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/237894>. Acesso em: 10 dez. 2024.

MENDES, A. M. G. **Disclosure e contabilização dos créditos de carbono: um estudo de caso na Empresa Nestlé**. 2013. 62 p. Bachelor's thesis, Universidade Federal de Campina Grande. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/16320>. Acesso em: 08 nov. 2024.

MONTOVANELLI, A. L. D. Q. **A tecnologia Blockchain como mecanismo de credibilidade e transparência do mercado voluntário de crédito de carbono**. 2023. 84 p. Bachelor's thesis, Faculdade de Direito de Vitória. Disponível em: <http://191.252.194.60:8080/handle/fdv/1557>. Acesso em: 04 mar. 2024.

MOREIRA, A. M. A.; SILVA, M. A. Mercado de créditos de carbono: uma análise crítica legislativa. **Percurso**, v. 1, n. 42, p. 18–20, 2022. Disponível em: <https://revista.unicuritiba.edu.br/index.php/percurso/article/view/6094>. Acesso em: 12 jan. 2025.

MUNHOZ, L. Regulação do mercado de carbono brasileiro. **AgroANALYSIS**, v. 43, n. 9, 2023. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/agroanalysis/article/view/90105>. Acesso em: 29 jan. 2025.

NICOLETI, L. M. **Como as empresas que atuam no Brasil pretendem reduzir suas emissões de carbono?** 2022. 84 p. Bachelor's thesis, Universidade Federal de São Paulo. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/62722>. Acesso em: 18 mar. 2025.

OLIVEIRA, I. M. **Crédito de carbono: uma alternativa para o contexto agrícola familiar**. 2022. 32 p. Bachelor's thesis, Instituto Federal Farroupilha. Disponível em: <https://arandu.iffarroupilha.edu.br/jspui/handle/itemid/400?mode=full>. Acesso em: 15 mai. 2024.

OLIVEIRA, J. F. D. **O mercado de crédito de carbono como vantagem competitiva entra as empresas**. Bachelor's thesis Universidade Federal de Ouro Preto. 2021. 29 p. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/3493>. Acesso em: 12 dez. 2024.

OLIVEIRA, Y. P. L. Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma revisão. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 4, n. 1, 2021. Disponível em: <https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/167>. Acesso em: 20 jan. 2025.

PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; FANG, J.; HOUGHTON, R.; KAUPPI, P. E.; KURZ, W. A.; PHILLIPS, O. L.; SHVIDENKO, A.; LEWIS, S. L.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; PACALA, S. W.; MCGUIRE, A. D.; PIAO, S.; RAUTIAINEN, A.; SITCH, S.; HAYES, D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, n. 6045, p. 988-993, 2011. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1201609>. Acesso em: 30 jan. 2025.

PINHEIRO JUNIOR, C. R.; FERREIRA, T. O.; OLIVEIRA FILHO, J. S.; QUEIROZ, H. M.; CANISARES, L. P.; GRESCHUK, L. T.; PELLEGRINO CERRI, C. E.; PEREIRA, M. G.; PEREIRA, G. A. G.; CHERUBIN, M. R. Shallow soils in dryland ecosystems: drivers of C accumulation and land management implications. **Geoderma Regional**, v. 38, n. 849, Sept. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00849>. Acesso em: 09 abr. 2025.

POYER, F. R.; SILVEIRA, C. S. D.; OLIVEIRA, L. D. Crédito de Carbono: panorama das publicações no Brasil para os últimos dez anos (2009 a 2019). **Anais do VIII Simpósio da Ciência do Agronegócio**, 2020. 10 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/218625>. Acesso em: 31 jan. 2025.

REISCH, R. D. N. O potencial brasileiro para gerar créditos de carbono através da conservação florestal, reflorestamento e produção agrícola sustentável. Humboldt - **Revista de Geografia Física e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 1, n. 3, 2022. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/humboldt/article/view/61662>. Acesso em: 26 abr. 2025.

RIBEIRO, M. D. S. Os Créditos de carbono e seus efeitos contábeis. I Congresso Anpcont, Gramado, **Anais**. São Paulo, 2007.

ROCHA, J. M. M. **Otimização de sistemas térmicos alinhado ao mecanismo de desenvolvimento limpo para o mercado de crédito de carbono**. Bachelor's thesis Universidade Federal de Pernambuco. 2019. 50 p. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46730>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ROCHA, L.; ALVAREZ, G.; SILVEIRA, C. Mercado Regulado de Carbono no Brasil: um ensaio sobre Divergências Contábil e Tributária dos créditos de carbono. **Organizações & Sociedade**, v. 20, n. 67, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/revistaoes/article/view/9128>. Acesso em: 14 ago. 2024.

SCHROEDER, H. Agency in international climate negotiations: the case of indigenous peoples and avoided deforestation. **International Environmental Agreements**:

Politics, Law and Economics, v. 10, n. 4, p. 317-332, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10784-010-9138-2>. Acesso em: 19 mai. 2025.

SEIFFERT, M. E. B. **Mercado de carbono e Protocolo de Quioto: oportunidades de negócio na busca da sustentabilidade**. São Paulo: Atlas, 2009.

SILVEIRA, C. S.; DE OLIVEIRA, L. Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. **Novos Cadernos NAEA**, [S.l.], v. 24, n. 3, dez. 2021. ISSN 2179-7536. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/9354>. Acesso em: 28 mai. 2025.

SMITH, P.; DAVIS, S. J.; CREUTZIG, F.; FUSS, S.; MINX, J.; GABRIELLE, B.; YONGSUNG, C. Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 1, p. 42-50, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate2870>. Acesso em: 01 jul. 2025.

SOEPADMO, E. Tropical rain forests as carbon sinks. **Chemosphere**, v. 27, n. 6, p. 1025-1039, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(93\)90066-E](https://doi.org/10.1016/0045-6535(93)90066-E). Acesso em: 12 abr. 2025.

SOUZA, A. L. D.; ALVAREZ, G.; ANDRADE, J. C. S. Regulated carbon market and carbon credits in Brazil: accounting and taxation issues. **Organizações & Sociedade**, v. 20, n. 67, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/revistaoes/article/view/9128>. Acesso em: 27 jul. 2025.

SOUZA, A. L.; PAIVA, D. S.; ANDRADE, J. C. S.; SILVA JUNIOR, A. C.; GOULART, R. C. O mercado internacional de créditos de carbono: estudo comparativo entre as vertentes regulada e voluntária no Brasil no período de 2004 a 2011. **Sistemas & Gestão**, 2012. 19 p. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/26027>. Acesso em: 22 ago. 2024.

SOUZA, C. A. C. D. **Negociação internacional de crédito de carbono entre o Brasil e o mercado de carbono europeu**. 2020. 41 p. Monografia (Bacharelado)—Universidade Presbiteriana Mackenzie. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/30566>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SOUZA, C. R. D.; BALDONI, A. B.; TONINI, H.; MAIA, V. A.; SANTOS, R. M. D.; LUVISON, M.; SANTOS, J. P. Ecological patterns and conservation opportunities with carbon credits in Brazil groves: a study-case in the Southeast Amazon. **CERNE**, v. 29, e-103164, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01047760202329013164>. Acesso em: 23 nov. 2024.

STEVANATO, L. H. A. **Inventário de descarbonização para conquista de crédito de carbono**. 2022. 55 p. Monografia (Bacharelado)—Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/427833ad-8e64-4f06-aa5b-1d65b89385a3/content>. Acesso em: 15 mar. 2025.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Homepage from UNFCCC**. 2023. Disponível em: <https://unfccc.int/decisions>. Acesso em: 30 nov. 2024.

VARGAS, D. B.; DELAZERI, L. M. M.; FERRERA, V. H. P. **O avanço do mercado voluntário de carbono no Brasil: desafios estruturais, técnicos e científicos**. São Paulo: Escola de Economia de São Paulo/FGV, 2022. Disponível em: https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/mercado_de_carbono_2.pdf. Acesso em: 25 out. 2024.

VERCILLO, U. E. Mercado de carbono e sustentabilidade, por Natasha Trennepohl. ReDiS – **Revista de Direito Socioambiental (UEG)**, 2023. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/redis/article/view/13755/9766>. Acesso em: 12 jan. 2024.

VIANA, C. R. S.; PEREIRA, T. F.; BISINOTO, G. D. S.; FREIRE, B. M.; RODRIGUES, L. da C.; MUNIZ, C. C.; JUNIOR, E. S. O. Praças urbanas como potenciais ferramentas na neutralização de carbono. **Peer Review**, v. 5, n. 18, p. 394-409, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.53660/886.prw2511>. Acesso em: 20 nov. 2024.

VILAR, B. L. **Créditos de carbono: segurança jurídica para o setor sucroalcooleiro no Brasil**. 2022. 83 p. Monografia (Bacharelado) - Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/28561>. Acesso em: 27 nov. 2024.

Artigo III⁶

CARTOGRAFANDO O SILÊNCIO DO SOLO: A DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO NO SOLO DE 1987 A 2023 EM MATO GROSSO⁷

MAPPING THE SILENCE OF THE SOIL: THE DYNAMICS OF SOIL ORGANIC CARBON FROM 1987 TO 2023 IN MATO GROSSO

RESUMO: Manter o carbono no solo é fundamental para a fertilidade, retenção hídrica e equilíbrio climático. Contudo, o desmatamento sem um programa de manejo adequado acelera a perda de carbono orgânico do solo (COS), intensificando a erosão e liberando CO₂, o que compromete os serviços ecossistêmicos. Este estudo investiga a dinâmica espaciotemporal do COS no estado de Mato Grosso, Brasil, com foco nas implicações do desmatamento e expansão agropecuária sobre a estabilidade deste elemento. O objetivo do estudo é analisar tendências de 1987 a 2023, utilizando dados integrados da plataforma MapBiomass Solo v2.0, *Google Earth Engine* e QGIS, aliando geotecnologias ao cruzamento de históricos de uso da terra. A metodologia envolveu a análise de séries temporais e elaboração de mapas temáticos, validados por métricas estatísticas como RMSE e R². Os resultados indicam aumento global modesto (0,88%) dos estoques de COS no período, mas ressaltam um preocupante aumento de áreas com baixo teor de carbono; regiões de desmatamento intenso, como no Pantanal e Cerrado, apresentaram grande vulnerabilidade à perda de carbono, enquanto terras indígenas e unidades de conservação se destacaram como *hotspots* de estoque. As discussões salientam que, embora práticas conservacionistas possam mitigar perdas, a restauração dos estoques naturais exige ações contínuas, políticas específicas e incentivos como créditos de carbono. Conclui-se que o monitoramento sistemático e a proteção de áreas prioritárias são indispensáveis para a resiliência edáfica regional. O fortalecimento de bancos de dados e um inventário nacional de COS são recomendados para subsidiar políticas públicas e adaptação climática.

PALAVRAS-CHAVE: Mudanças Climáticas; Desmatamento; Geotecnologias.

ABSTRACT: Maintaining soil carbon is fundamental for fertility, water retention, and climate equilibrium. However, deforestation without an adequate management program accelerates the loss of soil organic carbon (SOC), intensifying erosion and releasing CO₂, thereby compromising ecosystem services. This study investigates the spatiotemporal dynamics of SOC in the state of Mato Grosso, Brazil, focusing on the implications of deforestation and agricultural expansion for the stability of this element. The aim of the study is to analyze trends between 1987 and 2023, using integrated data from the MapBiomass Solo v2.0 platform, *Google Earth Engine*, and QGIS, combining geotechnologies with analyses of historical land use. The methodology involved time series analysis and the production of thematic maps, validated through statistical metrics such as RMSE and R². Results indicate a modest overall increase (0.88%) in SOC stocks during the period, but highlight a concerning expansion of areas with low carbon content; regions of intense deforestation, such as the Pantanal and Cerrado, exhibited pronounced vulnerability to carbon loss, whereas Indigenous lands and conservation units emerged as carbon stock hotspots. The discussion emphasizes that, although

⁶ Aceito para publicação em 20 de Setembro de 2025 na revista Scientia Plena ISSN: 1808-2793 Qualis A4.

conservation practices can mitigate losses, restoring natural stocks requires continuous action, specific policies, and incentives such as carbon credits. It is concluded that systematic monitoring and the protection of priority areas are indispensable for regional edaphic resilience. Strengthening databases and establishing a national SOC inventory are recommended to support public policies and climate adaptation strategies.

KEYWORDS: Climate Change; Deforestation; Geotechnologies.

1 INTRODUÇÃO

O carbono orgânico do solo (COS) representa a maior reserva de carbono terrestre, superando o carbono armazenado na vegetação e na atmosfera combinadas (Lal, 2004). Estima-se que os solos contenham cerca de 1.500 gigatoneladas de carbono nos primeiros 100 cm de profundidade, sendo fundamentais na regulação do clima global e no ciclo biogeoquímico do carbono (Batjes, 2016).

O estado de Mato Grosso, localizado na região Centro-Oeste do Brasil, possui uma posição central na agenda ambiental e agropecuária nacional, abrangendo três importantes biomas: Amazônia, Cerrado e Pantanal. Considerando, sua vasta extensão territorial, Mato Grosso exerce influência direta sobre fluxos de carbono associados à mudança do uso da terra, desmatamento, expansão agrícola e regeneração florestal (Silva Junior *et al.*, 2020).

Recentemente, avanços nas tecnologias de sensoriamento remoto e acesso a bases de dados públicos, têm possibilitado uma nova abordagem para estimar o estoque de carbono no solo de maneira integrada e espacialmente explícita. A plataforma MapBiomas Solo (versão 2.0) disponibiliza informações sobre textura, profundidade, densidade aparente e carbono orgânico do solo para todo o território nacional, com base em modelos de *machine learning* aplicados a dados de amostras de solo georreferenciadas (MapBiomas, 2023). A análise dessas informações por meio do *Google Earth Engine* (Gorelick *et al.*, 2017), combinada com a produção de mapas temáticos no QGIS, permite visualizar padrões espaciais de estoque de carbono e identificar áreas prioritárias para conservação e restauração. O avanço metodológico permitiu um monitoramento mais preciso, possibilitando um melhor controle da dinâmica de carbono do solo em escala regional e global (UNEP WCMC; IIASA, 2023).

A compreensão da distribuição espacial do carbono orgânico no solo é essencial para subsidiar políticas públicas voltadas à agricultura de baixo carbono, pagamentos por serviços ambientais e impactos nas estratégias de adaptação climática, uma vez que o manejo adequado do solo e consequentemente do carbono promove práticas agrícolas

que reduzem emissões de CO₂ e aumentam a capacidade de suporte dos sistemas produtivos. Além disso, a identificação de áreas com alto potencial de estoque contribui para ações de planejamento territorial, conservação de recursos naturais e valorização dos serviços ecossistêmicos associados ao solo (Tôsto *et al.*, 2023).

Mato Grosso desempenha um papel fundamental na dinâmica de uso e cobertura da terra no Brasil, destacando-se como um dos estados com maior taxa histórica de conversão florestal para atividades agropecuárias. Sua localização estratégica, cobrindo áreas dos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, confere ao estado uma diversidade de paisagens naturais e um grande potencial produtivo. Contudo, essa diversidade também o torna um dos principais focos de pressão antrópica, especialmente, pelo avanço da agricultura mecanizada e da pecuária extensiva sobre áreas nativas (Macedo *et al.*, 2012). O desmatamento em Mato Grosso representa o principal fator de alteração dos estoques de COS, e no Brasil, dados mostram que 75% das emissões nacionais de gás carbônico (CO₂) para a atmosfera são provenientes do desmatamento (Tôsto *et al.*, 2023).

A conversão de florestas e savanas para pastagens e lavouras tem implicações diretas nos estoques de carbono, tanto na vegetação quanto no solo. Estudos apontam que mudanças no uso da terra em Mato Grosso foram responsáveis por grande parte das emissões de carbono do Brasil entre 2000 e 2018, com destaque para a perda de COS em áreas desmatadas ou degradadas (Silva Junior *et al.*, 2021). Além disso, a substituição de vegetação nativa por monoculturas como soja e milho tem provocado alterações nos ciclos hidrológicos, no microclima regional e na biodiversidade, comprometendo a resiliência ecológica do território (Fearnside, 2017).

O cruzamento de uso e cobertura da terra, desmatamento e séries históricas de estoques de COS revelou a dinâmica do carbono em Mato Grosso através da análise estatística do impacto das atividades agropecuárias (pastagens e lavouras). Pesquisadores analisaram dados históricos em diferentes sistemas de uso da terra (pastagens, pastagens integradas com árvores, lavouras de soja, milho e algodão em sistemas de irrigação, lavoura-pecuária-floresta e agricultura irrigada) e detectaram uma tendência de aumento no estoque de COS nos diferentes usos do solo, exceto nas áreas irrigadas com pastagem (Oliveira *et al.*, 2022).

Por outro lado, Mato Grosso também abriga iniciativas relevantes de restauração, agricultura de baixo carbono e intensificação sustentável, que vêm ganhando espaço nos últimos anos. O potencial para regeneração natural e para sistemas produtivos

integrados, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), representa uma oportunidade concreta de reverter parte das perdas de carbono e promover uma transição ecológica no uso do solo (Strassburg *et al.*, 2020). Diante da magnitude das áreas já convertidas e da pressão contínua por novas áreas produtivas, identificar regiões com alto potencial de estoque de carbono no solo torna-se fundamental para orientar políticas públicas e ações estratégicas que conciliem produção agropecuária com conservação ambiental.

O COS é reconhecido como um indicador-chave da sustentabilidade dos ecossistemas, pois influencia diretamente a fertilidade do solo, a retenção de água, a biodiversidade edáfica e a resiliência frente a perturbações climáticas e antrópicas (Lal, 2004). Solos com altos estoques de carbono são mais estruturados, promovem maior infiltração de água e tem menor erosão, além de servirem como tampões contra variações extremas de temperatura e umidade. A manutenção ou aumento do COS está diretamente associada à capacidade de suporte dos serviços ecossistêmicos, como fertilidade, capacidade de retenção de hídrica, e estabilidade estrutural do solo, tornando-se essencial para práticas agrícolas sustentáveis, programas de restauração ecológica e ações de mitigação das mudanças climáticas (FAO, 2017).

Além de sua função ecológica, o estoque de carbono no solo tem se consolidado como métrica de avaliação em políticas públicas e programas internacionais de clima e uso da terra, como a Iniciativa 4p1000 (“Quatro por mil”) a qual representa um movimento internacional lançado durante a Conferência do Clima de Paris (COP21), em 2015, com o objetivo de combater as mudanças climáticas por meio do aumento do carbono orgânico nos solos (4P1000, 2015). A resiliência ecológica – entendida como a capacidade dos ecossistemas de resistir e se recuperar de distúrbios – está fortemente vinculada à manutenção de estoques de carbono no solo, especialmente, em regiões tropicais sujeitas a pressões intensas de uso da terra (Minasny *et al.*, 2017).

Apesar dos avanços na modelagem de atributos do solo, ainda persistem lacunas no conhecimento sobre a distribuição espacial do COS em escalas subnacionais, como a estadual. Muitas estimativas globais e nacionais de estoque de carbono baseiam-se em médias generalizadas ou em bancos de dados com baixa densidade amostral, o que reduz a precisão em regiões heterogêneas como Mato Grosso, onde coexistem solos de diferentes classes, profundidades e usos da terra (Batjes, 2016; Poggio *et al.*, 2021). A ausência de mapeamentos detalhados e atualizados dificulta a identificação de *hotspots* de carbono no solo, bem como a avaliação dos impactos das mudanças no uso da terra

e a implementação de políticas locais de mitigação climática fundamentadas em evidências.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar o potencial de estoque de carbono orgânico no solo para o estado de Mato Grosso, utilizando dados da plataforma MapBiomas Solo, com processamento no *Google Earth Engine* e visualização em QGIS. A pesquisa busca identificar os principais padrões espaciais de distribuição do COS, com foco em sua relação com os diferentes usos e coberturas da terra, e apontar áreas estratégicas para conservação e manejo sustentável dos solos, visto que para projetos de crédito de carbono (como a plataforma Verra) utiliza-se metodologias no âmbito do REDD – Redução de Emissão por Desmatamento e Degradação florestal e um dos fatores que fundamentam a precificação final do crédito de carbono, principalmente, em mercados não regulados.

A organização Verra inclui vários padrões de certificação de créditos de carbono, tendo como mais relevantes o VCS – *Verified Carbon Standard*, e o CCB – *Climate, Community and Biodiversity*. Após atender aos princípios de qualidade explicitados no padrão VCS, como demonstrar que a redução/remoção é real, adicional, mensurável, permanente, única e verificada, são emitidos as VCU's – *Verified Carbon Units* que são os créditos propriamente ditos e passíveis de comercialização. De acordo com as regras vigentes do padrão VCS da Verra, a linha de base precisa ser revisada após o sexto ano de implementação do projeto. De modo geral, projetos REDD com área inferior a 10 mil hectares tendem a se tornar economicamente inviáveis, ao passo que regiões de acesso mais fácil e cercadas por maiores índices de desmatamento passam a mostrar maior viabilidade (Sanquetta, 2023).

2 METODOLOGIA

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A escolha do estado do Mato Grosso, no centro-oeste do Brasil, assume grande importância para o estudo da dinâmica do COS, dado que abrange a conexão entre três importantes biomas (Amazônia, Cerrado e Pantanal), os quais possuem particularidades climáticas, geomorfológicas e hidrológicas, que influenciam o ciclo do carbono. Na Amazônia, em decorrência do clima equatorial úmido, da textura argilosa dos solos e da vegetação densa, os estoques de carbono orgânico do solo são elevados,

principalmente, em áreas preservadas. O Cerrado apresenta clima sazonal e diferentes tipos de textura do solo e de grande taxa de conversão para uso agrícola e pastagem, o que leva a estoques intermediários e risco de perda do COS. Já o Pantanal apresenta solos franco-arenosos e menor estoque de carbono, com maior sensibilidade à conversão para atividades agrícolas (Ramos *et al.*, 2023; Fontana *et al.*, 2024; Couto *et al.*, 2023).

Com a variação espacial do desmatamento e da atividade agrícola, um gradiente no estoque de COS se estabelece, indicando que as áreas com remanescentes de vegetação nativa e áreas protegidas são locais importantes para a conservação e a restauração dos estoques de COS. As características físicas do solo e o uso da terra têm influência direta no estoque de COS, e a granulometria se correlaciona com os teores de carbono dependendo do bioma. No Pantanal, por exemplo, solos com textura franco-arenosa, apresenta correlação negativa entre a argila e o carbono orgânico. Já no Cerrado, Mata Atlântica e Pampa, essa correlação pode ultrapassar 0,50 em profundidades superiores a 100 cm (Couto *et al.*, 2023; Fontana *et al.*, 2024).

2.2. BASE DE DADOS

A aquisição de dados do estoque de COS de Mato Grosso foi realizada através da utilização da base de dados MapBiomass Solo v.2.0, a qual disponibiliza séries temporais de alta resolução para os anos de 1987 até 2023. Tais arquivos abrangem o uso e cobertura da terra, textura, densidade aparente e profundidade, sendo requisitos para a obtenção do COS, devido à sua complexidade e à visão multiescalar de Mato Grosso (Nwaogu *et al.*, 2024; Fontana *et al.*, 2024).

A base MapBiomass Solo v.2.0 cobre os principais biomas (Amazônia, Cerrado e Pantanal) e variações dos estoques de COS do Estado em relação aos usos da terra, permitindo a análise espacial e temporal, com foco na dinâmica e tendência do COS em Mato Grosso. Os arquivos foram padronizados no tempo para possibilitar o cruzamento com as séries de dados de desmatamento e a identificação de relações causais entre as atividades agropecuárias, o avanço das pastagens e os estoques de COS (Nwaogu *et al.*, 2024). O cruzamento dos dados históricos de desmatamento com os dados atuais permite uma análise retroativa dos impactos de políticas públicas e eventos climáticos (seca ou enchente) na dinâmica do carbono, fornecendo maior detalhamento, de acordo com o bioma, microbacia ou classe de solos. A validação dos dados utilizados é baseada

em referências e estudos sobre solos brasileiros e análises estatísticas sobre a distribuição espacial do COS. A dimensão dos dados utilizados minimiza as incertezas da amostragem, com mais de 1.700 amostras de solos brasileiros (Fontana *et al.*, 2024).

2.3. PROCESSAMENTO NO GOOGLE EARTH ENGINE E VISUALIZAÇÃO NO QGIS

Os *scripts* implementados no *Google Earth Engine* (GEE) possibilitaram o pré-processamento dos dados, além da automatização do cálculo do estoque de COS em escala local através da equação de estimativa, que engloba a profundidade, a densidade aparente e o teor de carbono orgânico (UNEP WCMC; IIASA, 2023).

Neste estudo, foram utilizados os dados da Coleção 2 do MapBiomias Solo para estimar o estoque de Carbono Orgânico do Solo (COS) na camada superficial de 0 a 30 cm. Os mapas fornecem a distribuição do carbono expressa em toneladas por hectare (t/ha), com resolução espacial de 250 metros, possibilitando análises em diferentes escalas geográficas. A modelagem espacial do estoque de carbono foi realizada por meio de algoritmos de aprendizado de máquina (Random Forest), utilizando como variáveis preditoras dados de uso e cobertura da terra (MapBiomias – Coleção 8), características climáticas (precipitação, temperatura), relevo (altitude, declividade), textura do solo (frações de areia, silte e argila), entre outros fatores ambientais e edáficos. As estimativas foram obtidas com base nos dados do projeto internacional SoilGrids250m, calibrados com informações nacionais provenientes de bancos de solos da Embrapa, IBGE e do Projeto RadamBrasil. Os resultados foram expressos em toneladas por hectare (t/ha) para os 30 cm iniciais do perfil do solo. As classes de concentração de carbono orgânico do solo adotadas pelo MapBiomias são as seguintes: 0 a 10 t/ha; 10 a 20 t/ha; 20 a 30 t/ha; 30 a 40 t/ha; 40 a 50 t/ha; 50 a 60 t/ha; 60 a 70 t/ha; 70 a 80 t/ha; mais de 80 t/ha.

O processamento foi realizado na plataforma *Google Earth Engine*, e os mapas finais foram analisados no QGIS para visualização e geração de produtos cartográficos. A validação do modelo foi feita com dados de campo e métricas estatísticas como o Erro Quadrático Médio (RMSE) e o coeficiente de determinação (R^2), assegurando robustez aos resultados⁸.

⁸ Esta análise do COS pode ser observada em:

<https://data.mapbiomas.org/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.58053/MapBiomias/3KXXVV>. Acesso em: 25 mar. 2025.

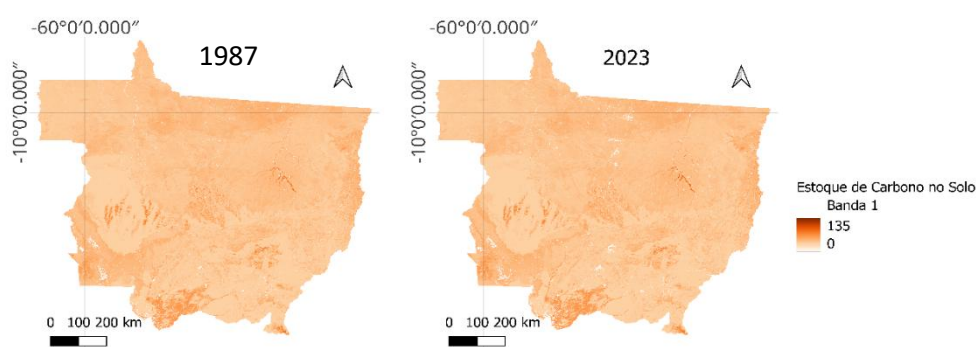
Embora o modelo de estimativa de Carbono Orgânico do Solo (COS) do MapBiomass Solo – Coleção 2 utilize técnicas robustas de aprendizado de máquina e dados nacionais calibrados, apresenta limitações significativas, especialmente, em áreas próximas a corpos hídricos. A resolução espacial de 250 metros dificulta a representação da alta heterogeneidade ambiental de margens de rios, áreas alagáveis e zonas de transição, onde o acúmulo de carbono é altamente influenciado por variações locais de umidade e vegetação. Além disso, corpos d'água e áreas úmidas, frequentemente, são sub-representados ou classificados como “sem dados”, o que pode levar à subestimação dos estoques reais de carbono, uma vez que solos hidromórficos tendem a armazenar grandes quantidades de matéria orgânica devido às condições anóxicas. O modelo também não incorpora a dinâmica sazonal do lençol freático, fator fundamental em zonas ribeirinhas e várzeas, e depende em parte de bases globais como o *SoilGrids*, que possuem baixa densidade de amostragem em ambientes tropicais úmidos, reduzindo a acurácia das estimativas nesses contextos.

3 RESULTADOS

3.1 ANÁLISE DAS ÁREAS DE CARBONO ESTOCADO NO SOLO DE MT

Entre 1987 a 2023, o estoque total de carbono orgânico no solo em Mato Grosso apresentou uma variação positiva de 0,88%, passando de aproximadamente 176.935.617 toneladas em 1987 para 178.494.104 toneladas em 2023 (Figura 1).

Figura 1 - Estoque de carbono no solo (t/ha) nos anos 1987 e 2023 no estado de Mato Grosso.

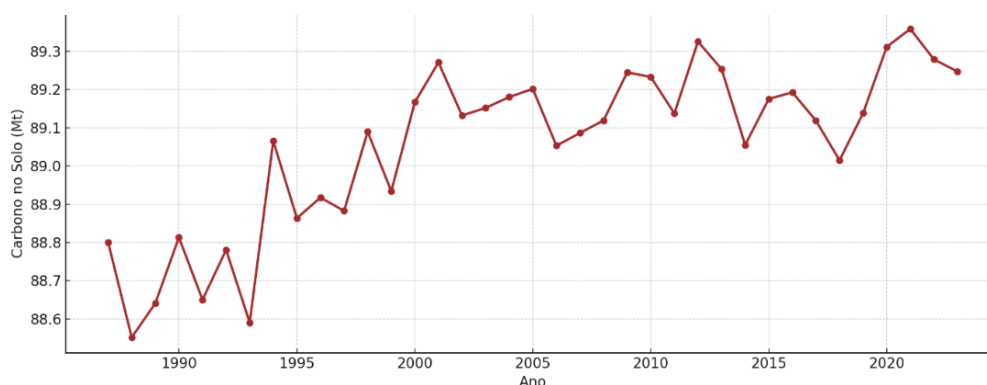


Fonte: MapBiomass coleção 2.0.

Apesar da relativa estabilidade, quando se olha para o estado como um todo, observou-se uma leve tendência de crescimento ao longo das décadas, culminando em um pico em 2021, com um total de 178.716.782 toneladas. O menor valor da série

corresponde ao próprio ano inicial da série, 1987, evidenciando que, embora o crescimento tenha sido modesto, houve um acréscimo contínuo em parte do período analisado. A taxa média anual de acréscimo foi de cerca de 41.013 toneladas por ano (Figura 2).

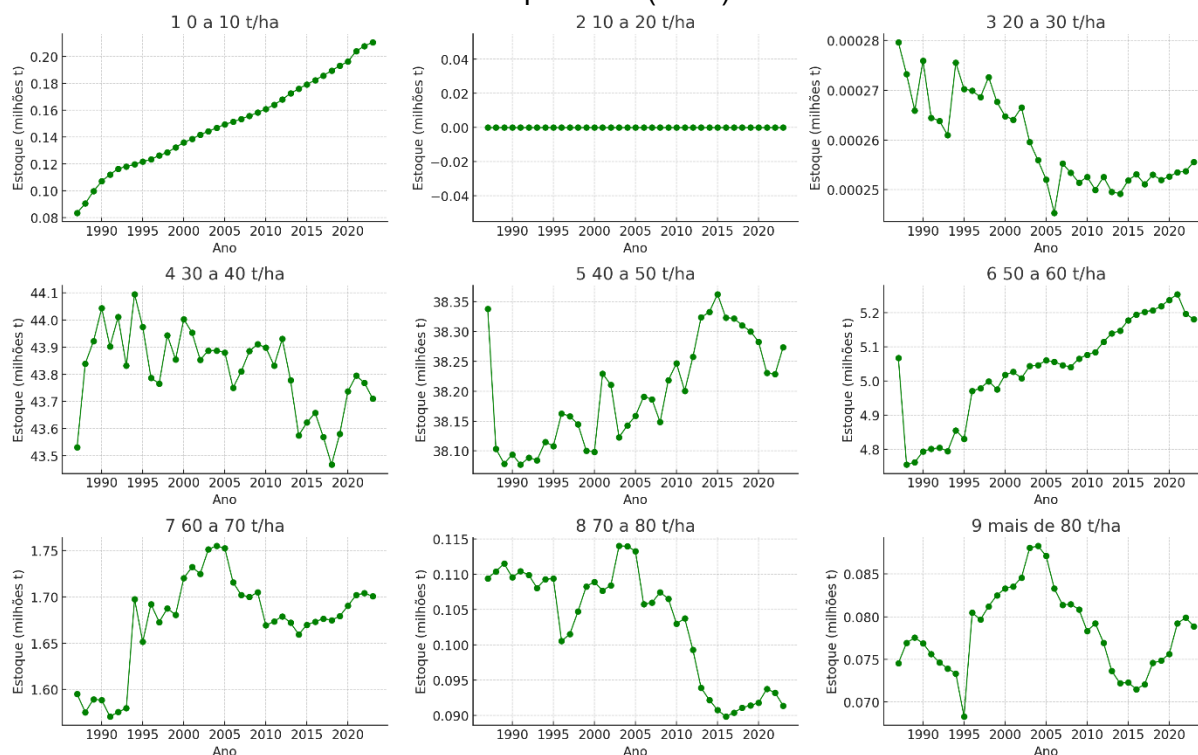
Figura 2 - Tendência do estoque de carbono no solo em Mato Grosso entre 1987 e 2023.



Fonte: MapBiomass coleção 2.0.

De acordo com a Figura 3, a distribuição proporcional média do estoque de carbono no solo em Mato Grosso entre 1987 e 2023 revela forte concentração em duas faixas principais: a classe “30 a 40 t/ha”, com média de 49,2% do estoque total, e a classe “40 a 50 t/ha”, que representa 42,9%. Juntas, essas faixas concentram mais de 92% do COS no Estado. A classe “0 a 10 t/ha”, por sua vez, apresenta uma média menor que 1%. Já as classes mais elevadas, como “50 a 60 t/ha” e “60 a 70 t/ha”, representam respectivamente 5,7% e 1,9% do total, enquanto as faixas superiores (“70 a 80 t/ha” e “> 80 t/ha”) são residuais, juntas somando menos de 0,3% do estoque. A faixa “20 a 30 t/ha” praticamente não aparece na composição, indicando baixa ocorrência ou possível subestimativa nas bases utilizadas.

Figura 3 - Tendência de área do estoque de carbono no solo em Mato Grosso de 1987 a 2023 de acordo com as classes de concentração de carbono orgânico do solo adotadas pelo MapBiomass (1 a 9).



Fonte: MapBiomass Coleção 2.0.

A análise temporal dos estoques de Carbono Orgânico do Solo (COS) por classes revela limitações metodológicas relevantes nos dados do MapBiomass Solo, especialmente, nas faixas de 0 a 10 t/ha e 10 a 20 t/ha. Observa-se um crescimento linear e contínuo na classe de 0 a 10 t/ha, sem oscilações ou estabilizações ao longo de mais de três décadas, o que sugere uma possível superclassificação de áreas como de baixo carbono em decorrência de processos de degradação não suficientemente detalhados pelo modelo. Ainda mais crítico, a classe de 10 a 20 t/ha apresenta valores nulos durante todo o período analisado, o que não é ecologicamente plausível e indica uma provável falha na atribuição ou representação desta faixa na modelagem ou na discretização dos dados.

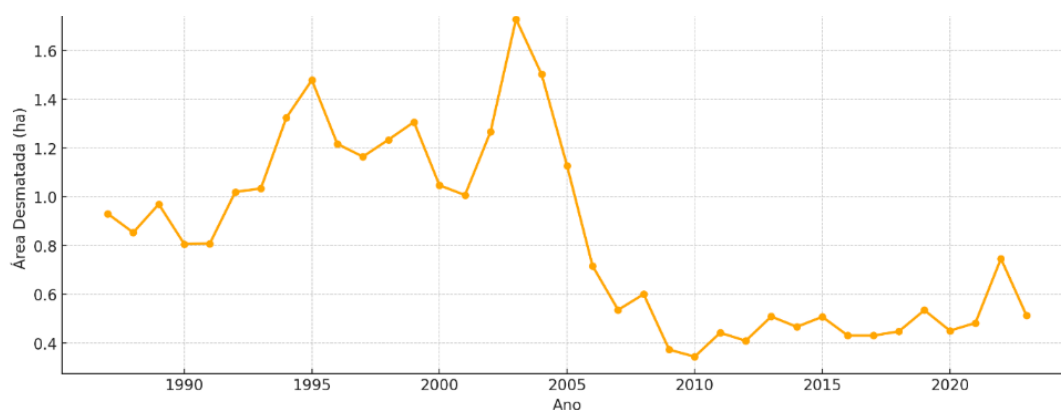
Esses padrões não refletem a variabilidade esperada em sistemas naturais e apontam para possíveis erros de categorização, ausência de calibração específica para faixas intermediárias e limitações na resolução espacial (250 m), que podem mascarar a heterogeneidade real do solo, sobretudo, em áreas de transição ou marginais. Tais inconsistências reforçam a necessidade de cautela na interpretação dos resultados, sobretudo, em estudos que dependem da acurácia das classes de menor estoque de

carbono, recomendando-se a complementação com dados de campo e análises locais de alta resolução.

3.2 ANÁLISE DA DINÂMICA DO DESMATAMENTO NO SOLO DE MT

De 1987 a 2023, Mato Grosso registrou um acumulado de aproximadamente 11,7 milhões de hectares desmatados, com variações anuais expressivas. O pico ocorreu em 2004, quando foram suprimidos cerca de 1,37 milhão de hectares de vegetação nativa, representando mais de 11% do desmatamento total do período. Houve uma queda acentuada até 2010 tendendo a se estabilizar nos anos seguintes. No entanto, a partir de 2019, a área desmatada voltou a crescer, alcançando 485 mil hectares em 2022, um aumento de mais de 119% em relação a 2012 (Figura 4).

Figura 4 - Desmatamento anual em Mato Grosso de 1987 a 2023.



Fonte: MapBiomass Coleção 2.0.

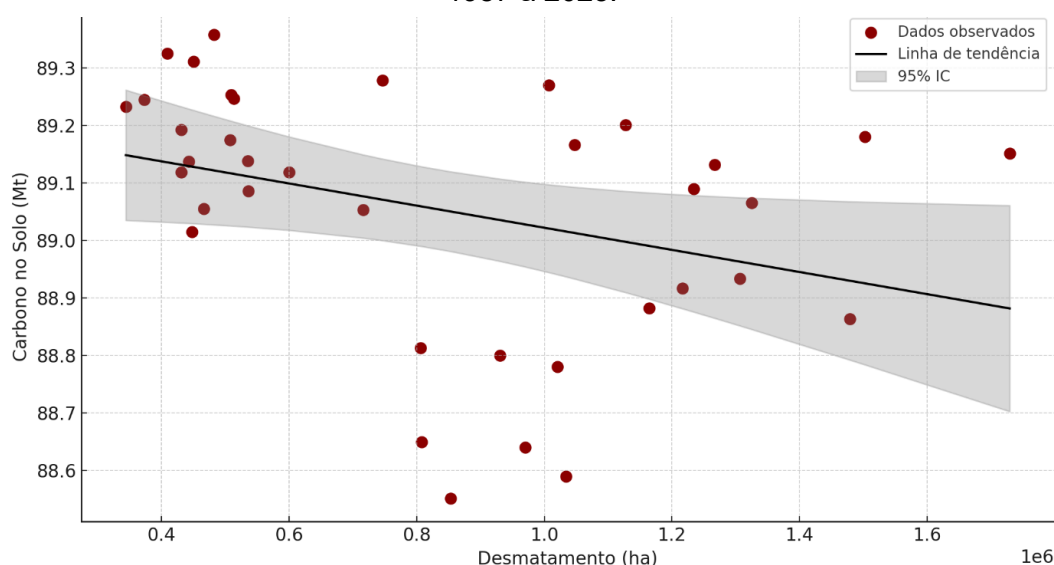
3.3 RELAÇÃO ENTRE CARBONO ESTOCADO E DESMATAMENTO EM MT

A análise da relação entre o desmatamento anual e o estoque total de COS em Mato Grosso, no período de 1987 a 2023, revelou uma correlação negativa moderada e estatisticamente significativa (Spearman $R = -0,41$; $p = 0,012$; Figura 5). A regressão linear demonstrou uma tendência de declínio do estoque de carbono conforme aumentam os valores anuais de desmatamento, com um intervalo de confiança de 95% que reforça a consistência da relação observada.

A análise da relação entre o desmatamento anual e o estoque de carbono no solo em Mato Grosso (1987–2023), desagregada por classes de densidade (t/ha), revelou

padrões estatisticamente significativos em sete das nove classes analisadas, com magnitudes de associação distintas (Figura 6). A classe “70 a 80 t/ha” apresentou a maior correlação com o desmatamento, com $R^2 = 0,47$ ($p < 0,001$), indicando que o menor desmatamento ocorreu em anos em que houve uma redução na concentração do carbono na área. Nota-se que já houve maior desmatamento quando a área dessa classe era maior e isto pode ter causado a redução desta área. Em seguida, destacam-se as classes “40 a 50 t/ha” ($R^2 = 0,42$; $p < 0,001$) e “20 a 30 t/ha” ($R^2 = 0,40$; $p < 0,001$), reforçando que mesmo os estoques intermediários e elevados de carbono no solo são sensíveis à pressão antrópica exercida pela conversão da vegetação nativa.

Figura 5 - Relação entre o desmatamento e o estoque de carbono no solo em Mato Grosso de 1987 a 2023.



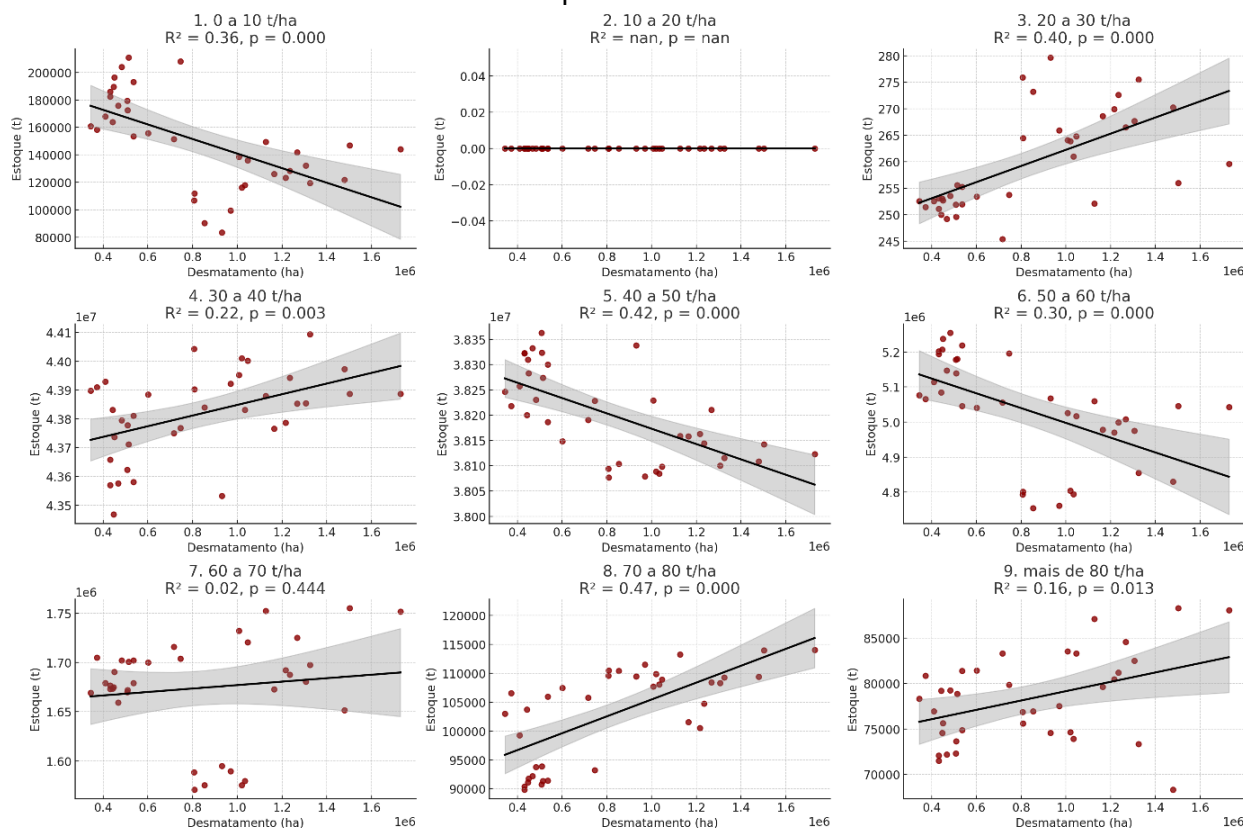
Fonte: MapBiomass Coleção 2.0.

A classe “0 a 10 t/ha”, representando solos degradados ou com baixa fertilidade, apresentou $R^2 = 0,36$ ($p < 0,001$), demonstrando que o aumento do desmatamento contribui diretamente para o crescimento dessa área de faixa de estoque. A classe “50 a 60 t/ha” também revelou associação significativa ($R^2 = 0,30$; $p < 0,001$), assim como a faixa “30 a 40 t/ha” ($R^2 = 0,22$; $p = 0,003$), evidenciando a vulnerabilidade até mesmo de solos relativamente estáveis frente ao avanço do desmatamento.

A classe “> 80 t/ha” mostrou uma correlação mais modesta, porém ainda significativa ($R^2 = 0,16$; $p = 0,013$). Por outro lado, a classe “60 a 70 t/ha” não apresentou correlação estatisticamente significativa ($R^2 = 0,02$; $p = 0,44$). Já a classe “10 a 20 t/ha” não pôde ser avaliada devido à ausência de dados válidos para regressão. Esses resultados revelam que o desmatamento em Mato Grosso tem repercussões diretas

sobre diferentes áreas de faixas de COS, desde as mais empobrecidas até as mais ricas, exigindo atenção especial a políticas de uso da terra que levem em conta a resiliência e a vulnerabilidade dos estoques edáficos.

Figura 6 - Relação entre o desmatamento e o estoque de carbono no solo entre 1987 e 2023 por classe



Fonte: MapBiomass Coleção 2.0.

O quadro 1 apresenta a identificação de *hotspots* de áreas de risco e áreas de estoque de carbono, considerando os dados obtidos.

Quadro 1 - Identificação de *Hotspots* de áreas de risco e áreas de estoque de carbono.

Tipo	Gráficos da Figura 06	Identificação
Áreas de Risco (baixo estoque e alto desmatamento) Essas áreas são mais vulneráveis à perda de carbono e à degradação ambiental.	Gráfico 1 (0 a 10 t/ha)	Forte correlação negativa ($R^2 = 0.45$, $p < 0.0001$) Aumento do desmatamento reduz a área de estoque de carbono. Área crítica de risco → Baixo estoque + uso intensivo.
	Gráfico 5 (40 a 50 t/ha)	Correlação negativa ($R^2 = 0.41$, $p < 0.0001$) Redução acentuada de área de estoque com maior desmatamento. Área de risco moderado.
	Gráfico 6 (50 a 60 t/ha)	Correlação negativa ($R^2 = 0.47$, $p < 0.0001$) Alta perda de carbono com avanço do desmatamento. Área de risco elevado, embora com estoque médio-alto.
<i>Hotspots</i> de Estoque (alto)	Gráfico 3 (20 a 30 t/ha)	Correlação positiva ($R^2 = 0.50$, $p < 0.0001$)

Tipo	Gráficos da Figura 06	Identificação
estoque e baixa pressão) Estas áreas são prioritárias para conservação e têm papel importante no sequestro de carbono.		Aparentemente, áreas com mais desmatamento em áreas onde existem maiores estoques — pode indicar áreas em transição ou regeneração. Necessita validação em campo, pode indicar <i>hotspot</i> potencial de estoque.
	Gráfico 4 (30 a 40 t/ha)	Correlação positiva fraca ($R^2 = 0.18$, $p = 0.009$) Pode indicar estabilidade de estoque em áreas com pressão moderada.
	Gráfico 8 (70 a 80 t/ha)	Correlação positiva moderada ($R^2 = 0.49$, $p < 0.0001$) Estoques elevados mesmo em áreas com grande quantidade de desmatamento. <i>Hotspot</i> relevante para conservação, mas exige monitoramento constante.
Outros casos	Gráfico 2 (10 a 20 t/ha):	Problema nos dados (valores constantes), sem análise possível.
	Gráfico 7 (60 a 70 t/ha):	Correlação fraca e não significativa.
	Gráfico 9 (>80 t/ha):	Correlação negativa fraca ($R^2 = -0.14$, $p = 0.023$), mas o impacto é pequeno. Pode representar reservatórios importantes, porém sob baixa ameaça.

Fonte: elaborado pelos autores.

4 DISCUSSÕES

4.1 CONVERSÃO DO USO DAS TERRAS E A DIMINUIÇÃO DO CARBONO

Conforme Figura 3, A classe “0 a 10 t/ha” indica a expansão de áreas degradadas ou empobrecidas em carbono. Com a análise das séries temporais, revela-se que a expansão das terras aráveis de Mato Grosso representa um aumento de 78,52% no período, no qual se intensificou sobre áreas com vegetação nativa, resultando perdas significativas de COS. Estudos indicam que a conversão da floresta amazônica e do cerrado em lavouras e pastagens causaram perdas de 24% a 52% do estoque original, sobretudo, pela remoção da biomassa e rápida mineralização da matéria orgânica do solo (Nwaogu *et al.*, 2021; Leite *et al.*, 2025; Minasny *et al.*, 2027).

De acordo com a Figura 6, A classe “0 a 10 t/ha”, demonstrou que o aumento do desmatamento contribui diretamente para o crescimento dessa área de faixa de estoque — possivelmente, por empobrecimento da matéria orgânica e exposição do solo, bem como as classes “50 a 60 t/ha” e a faixa “30 a 40 t/ha” ($R^2 = 0,22$; $p = 0,003$), evidenciando a vulnerabilidade, até mesmo, de solos relativamente estáveis frente ao avanço do desmatamento. A classe “ > 80 t/ha” sugere que mesmo os estoques mais altos podem ser impactados pela fragmentação da paisagem. Já o resultado da classe “60 a 70 t/ha”

pode ser atribuído à baixa variabilidade ou à sua distribuição mais restrita a áreas específicas.

A maior parte do estoque de carbono está contido em profundidades entre 0 e 10 cm, e o estoque diminui com a profundidade. A retirada da cobertura vegetal e o revolvimento do solo, dentre outras causas, ocasionam a perda desse estoque e tornam o solo mais vulnerável à erosão, sendo necessário, portanto, que as camadas superficiais do solo sejam conservadas e protegidas (Couto *et al.*, 2023; Fontana *et al.*, 2024). Em estudos acerca dos impactos da conversão da vegetação nativa para o uso agrícola convencional no Cerrado, foi encontrado que o estoque de carbono no solo diminui entre 24% a 52% em áreas de agricultura (Santos *et al.*, 2029), enquanto a prática de manejo conservacionista na integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) mostra-se favorável, em sistemas bem manejados, para minimizar ou, até mesmo, reverter a depleção do carbono no solo (Zolin *et al.*, 2021).

Zomer *et al.*, (2017) abordam que a melhoria de práticas agrícolas - como adubação orgânica, plantio direto, agrofloresta, pastagem rotativa e cobertura permanente - pode reverter a perda histórica de carbono causada pelo cultivo intensivo e concluíram que a restauração do carbono orgânico nos solos agrícolas é uma estratégia viável e imediata de mitigação climática, alinhada a compromissos do Acordo de Paris, desde que políticas públicas e incentivos favoreçam a adoção em larga escala.

A intensificação agropecuária, quando alinhada a boas práticas de manejo, mostrou-se capaz de conter a depleção do carbono no solo - e em alguns casos até revertê-la pontualmente - mesmo com mudanças no uso da terra. Contudo, o equilíbrio entre expansão agrícola, conservação de vegetação nativa e estabilidade dos serviços ecossistêmicos depende de monitoramento contínuo, maior fiscalização e políticas públicas que viabilizem a geração de receitas por serviços ambientais, como os créditos de carbono (Macedo *et al.*, 2025).

O avanço agrícola em Mato Grosso foi muito acentuado no período de 1985 a 2023, principalmente para a região de Cerrado e Amazônia, em que extensas áreas de vegetação nativa foram substituídas por terras agricultáveis. O avanço de 78% de terras de uso agropecuário em Mato Grosso ocorreu sobre áreas de alto estoque de carbono. Esses *hotspots* sofreram uma depleção expressiva do COS e fragmentação no período de análise (Nwaogu *et al.*, 2024; MapBiomas Initiative, 2024).

As regiões de forte expansão agrícola no Cerrado e no Pantanal representam focos críticos na depleção de COS e podem ter grande potencial de restauração e uso

mais sustentável da terra. É importante mencionar que os estoques de carbono no solo também apresentam grandes diferenças e capacidade de resiliência entre diferentes tipos de solo e biomas (Strassburg *et al.*, 2020; Campos; Oliveira, 2025).

4.2 POTENCIAL E LIMITES DAS PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS

Práticas conservacionistas, como o plantio direto, a adubação verde, a rotação de culturas e os sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no bioma cerrado, têm contribuído para o acúmulo de matéria orgânica no solo e contribuindo para melhoria da pegada de carbono do solo (Oliveira *et al.*, 2024). Dados para o sudeste de Mato Grosso apontam para ganhos concretos: incremento de 11% na produtividade da soja, aumento da lotação de rebanhos entre 2012 e 2021 (aproximadamente de 19%) e um acréscimo líquido no estoque de carbono do solo de aproximadamente 0,8% (Macedo *et al.*, 2025).

Apesar dos avanços, essas práticas dos sistemas integrados ainda enfrentam entraves estruturais para pequenos e médios produtores, pois o alto custo de implementação, capacidade técnica limitada e falta de governança limitam a sua adoção (Nwaogu *et al.*, 2024). Mesmo quando bem implementadas, as práticas conservacionistas nem sempre são capazes de restaurar completamente os estoques de carbono encontrados em áreas de vegetação nativa (Amoakwah *et al.*, 2022; Veldkamp *et al.*, 2020).

A manutenção de fragmentos florestais, portanto, permanece essencial para a estabilidade de longo prazo do COS, sobretudo na Amazônia, onde sua integridade está diretamente relacionada à resiliência ecológica (Ramos *et al.*, 2023; De Sy *et al.*, 2019). Ainda assim, o potencial técnico de sequestro de carbono em solos mato-grossenses é elevado, podendo variar de 0,05 a 1,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, conforme a textura do solo e o sistema de manejo adotado. As perdas acumuladas por conversão de florestas e campos, por outro lado, chegam a 30 a 40 Mg ha⁻¹ de carbono, o que reforça a urgência de ampliar a escala e a efetividade das ações conservacionistas (Severino *et al.*, 2021).

4.3 HOTSPOTS, VULNERABILIDADE E AÇÕES RECOMENDADAS

As áreas protegidas, como terras indígenas e unidades de conservação, representam a maior reserva do estoque de carbono, devido à ausência de manejos de uso da terra e utilização sustentável dos recursos, representando barreiras à perda de carbono (Strassburg *et al.*, 2020). Conforme Figura 03, as classes “40 a 50 t/ha” e “50 a

60 t/ha” sugerem a permanência de solos produtivos com capacidade de retenção de carbono em determinadas regiões.

Considerando a identificação de *hotspots* e áreas de risco é possível com base nestes dados sugerir as seguintes ações, conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Ações para implementação de políticas públicas

Tipo de Área	Classes de Biomassa (t/ha)	Ação Recomendada
Áreas de Risco	0–10; 40–60;	Mitigação do desmatamento; restauração; créditos de carbono;
<i>Hotspots</i>	20–30; 70–80;	Conservação; políticas de proteção e créditos de carbono;
Neutras	60–70; >80;	Monitoramento e planejamento adaptativo

Fonte: elaborado pelos autores.

A leitura da Tabela 1 demonstra que cada território carrega uma demanda específica de cuidado, urgência e atenção. As áreas de risco, muitas vezes invisibilizadas nas decisões políticas, exigem ações imediatas de restauração e controle do desmatamento, sob pena de agravamento da perda de carbono e de outras funções ecológicas do solo. Já os *hotspots*, embora ainda preservados, não podem ser tratados como garantias infinitas, sua proteção ativa precisa ser fortalecida. As áreas neutras, por sua vez, pedem vigilância e planejamento, pois a estabilidade aparente não significa ausência de ameaça. Ao traduzir dados em ação, essa classificação territorial oferece um caminho possível para que políticas públicas saiam do papel e cheguem em ações palpáveis, respeitando as diferenças ecológicas e sociais que cada pedaço de terra carrega consigo.

4.4 PAPÉIS DAS POPULAÇÕES TRADICIONAIS E CONSERVAÇÃO ATIVA

Assim como demonstrado em outros estudos no Brasil e em outras regiões do mundo, os *hotspots* de carbono permaneceram nas áreas de reservas extrativistas, territórios indígenas e áreas de preservação permanente ao longo de todo o período avaliado, principalmente devido à conservação dos estoques de carbono promovida pelo manejo sustentável por parte das comunidades tradicionais (Ramos *et al.*, 2023; De Sy *et al.*, 2019).

A redução do desmatamento na Amazônia brasileira apresentada por (Nepstad *et al.*, 2020) durante o período de 2005 a 2013 foi resultado de políticas combinadas: restrições legais, barreiras de mercado e expansão de áreas protegidas (incluindo Terras Indígenas), e destaca que o sucesso só será consolidado se incentivos positivos, crédito

de baixo carbono e pagamentos por serviços ambientais (como REDD+) avançarem para apoiar produtores, comunidades locais e indígenas.

Os resultados de (Walker *et al.*, 2020) na Amazônia apontam que 94% do carbono total retido entre 2001 e 2018 na Amazônia foi protegido dentro de terras indígenas e unidades de conservação e que as emissões de carbono por degradação e distúrbios estão aumentando, principalmente em áreas próximas a fronteiras agrícolas e rodovias, onde se estimou que as perdas de carbono por degradação florestal superaram as emissões por desmatamento total nos últimos anos.

Considerando que uma das principais limitações para a estimativa de carbono orgânico do solo em áreas extensas é a escassez de dados laboratoriais, e levando em consideração que a supressão da vegetação natural causa grandes perdas de carbono orgânico do solo, torna-se necessário apontar que territórios como terras indígenas e sistemas tradicionais de uso e ocupação, são zonas estratégicas para conservação do carbono orgânico do solo. Ademais, esses territórios são importantes na conservação da biodiversidade, serviços ecossistêmicos, incluindo o controle do clima regional e global. Esses espaços, no entanto, ainda sofrem fortes pressões de expansão agropecuária, e são importantes políticas públicas de incentivo econômico e de crédito de carbono, para que a conservação dos solos em diferentes biomas e regiões possam gerar retornos financeiros (Almada *et al.*, 2024; Olorunfemi *et al.*, 2022).

4.5 MODELAGEM, DESAFIOS E CAMINHOS PARA O MONITORAMENTO

A mudança no uso e cobertura da terra afeta os estoques de COS de forma heterogênea, variando conforme os tipos de solo, clima e estratégias de manejo adotadas (Batjes, 2016; Fan *et al.*, 2019). A integração entre amostragem tradicional, dados de sensoriamento remoto e plataformas como MapBiomas Solo tem aprimorado o monitoramento desses estoques, possibilitando a identificação de padrões espaciais e áreas críticas de depleção. No entanto, esses modelos ainda exigem validação em campo e aprimoramento em múltiplas escalas, o que limita a precisão de estimativas regionais. Solos argilosos sob florestas naturais apresentam maior estabilidade estrutural e capacidade de retenção de carbono, ao contrário dos solos do Pantanal, que são fisicamente frágeis e mais suscetíveis à erosão e à mineralização da matéria orgânica (Poggio *et al.*, 2021; Fontana *et al.*, 2019).

Além da textura, o uso inadequado do solo, como pastagem degradada ou lavouras mal manejadas, intensifica a perda de COS, sobretudo em solos arenosos. Estudos demonstram correlação positiva entre o teor de argila e o carbono até 40 cm de profundidade, com coeficientes superiores a 0,50 no Cerrado, reforçando a importância de considerar atributos edáficos no monitoramento (Batjes, 2016; Caballero; Ruhoff; Biggs, 2022).

Ainda que haja avanços no mapeamento de *hotspots* de carbono e regiões de risco, as plataformas atuais - como MapBiomass Solo, *Google Earth Engine* e SoilGrids - ainda carecem de algoritmos mais robustos e validação sistemática. É urgente fortalecer bancos de dados nacionais com parâmetros edáficos detalhados e resolver a alta variabilidade amostral (Neves *et al.* 2022; Chaddad *et al.*, 2022).

A dinâmica do COS também sofre influência de eventos climáticos extremos, como secas e inundações, que geram oscilações nos estoques e alteram os padrões de distribuição em biomas tropicais. Detectar essas variações exige séries temporais mais longas e dados climáticos de alta resolução. Políticas de adaptação devem considerar esses riscos e promover o manejo climático-inteligente nas diferentes regiões do estado (Neves *et al.* 2022).

A ocupação agropecuária crescente, sobretudo no Pantanal e na transição Cerrado-Amazônia, intensifica o risco de depleção do COS. Isso exige ações pontuais de restauração, promoção de créditos de carbono e adequação das práticas ao tipo de solo. A correlação entre teor de argila e estabilidade do COS reforça que solos mais arenosos requerem práticas específicas, como adubação verde, cobertura permanente e rotação de culturas (Fontana *et al.*, 2024; Hernandez *et al.*, 2022).

Diante disso, é urgente a criação de uma rede nacional integrada de monitoramento do carbono do solo, aliada a um inventário especializado de uso e cobertura da terra. Tais dados são essenciais para o desenvolvimento de modelos preditivos adaptados à realidade socioambiental brasileira, capazes de reduzir incertezas e orientar políticas públicas eficazes (Dos Santos *et al.*, 2025).

Os resultados deste trabalho revelam que em áreas críticas é essencial combinar políticas de uso da terra com práticas de manejo conservacionistas e de restauração para garantir a estabilidade do carbono orgânico do solo e prevenir os efeitos negativos do desmatamento no estoque de carbono orgânico do solo em Mato Grosso. Apesar do avanço metodológico na estimativa de carbono do solo, persistem lacunas estruturais na integração entre ciência, política e território. É pertinente criar protocolos nacionais de

validação em campo com foco em zonas de transição e desenvolver modelos preditivo ajustados à realidade socioeconômica e pedológica local e envolver atores locais na coprodução de conhecimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste estudo foi avaliar a dinâmica e potencial do estoque de carbono orgânico do solo em Mato Grosso, entre os anos de 1987 e 2023, em face das inter-relações entre o desmatamento. Por meio deste estudo, buscou-se estabelecer estas inter-relações na estocagem de carbono nos biomas que integram o Estado.

Os resultados indicam que a distribuição do desmatamento no estado de Mato Grosso entre 1987 e 2023 ocorreu de forma desigual entre as classes de estoque de carbono no solo. Em determinadas classes (como 20 a 30 t/ha e 40 a 50 t/ha), observou-se uma relação positiva significativa entre o desmatamento e os estoques, indicando que áreas com maior concentração de carbono foram desmatadas em maior quantidade. Já em outras classes (como 1 a 10 t/ha e 50 a 60 t/ha), nota-se uma correlação negativa, sugerindo que o desmatamento se deu em áreas com menor acúmulo de carbono no solo. Essa análise não implica que o desmatamento aumentou ou reduziu o estoque de carbono diretamente, mas evidencia onde o carbono está concentrado e como essas áreas foram afetadas pelo avanço do desmatamento. Ressalta-se que, caso o desmatamento atinja áreas de alta densidade de carbono, há maior potencial de emissões de GEE, reforçando a importância de proteção dessas zonas, em especial, os solos arenosos do Pantanal se mostraram mais vulneráveis à erosão e à perda de matéria orgânica.

Os resultados corroboram o que tem sido apontado na literatura nacional e internacional, na qual o desmatamento e a utilização de técnicas de cultivo convencionais em solos tropicais contribuem com a redução do estoque de carbono no solo. De forma original, os dados apresentados demonstraram os gradientes/concentrações dos estoques de carbono no solo, sinalizando áreas estratégicas para sua conservação. O monitoramento em longo prazo do impacto de eventos climáticos extremos, como secas e inundações, assim como a análise da efetividade de novas políticas públicas e incentivos de mercado de crédito de carbono no manejo sustentável dos solos tropicais, com uso de sistemas integrados de produção, entre outros aspectos, devem ser abordados em futuros estudos. É altamente recomendável a intensificação da validação

de dados em campo, especialmente nas zonas de transição entre biomas, onde há maior variabilidade edáfica, como forma de conferir maior robustez às projeções.

As políticas de manejo sustentável de ecossistemas naturais, restauração de ecossistemas, uso sustentável dos recursos naturais, valorização de territórios indígenas e sistemas agroflorestais são recomendadas como estratégias que permitem maior resiliência da produção regional e mitigação dos impactos adversos provocados pelas mudanças no uso da terra e mudanças climáticas. Áreas com alto potencial de estoque ou que possuem alto potencial de recuperação devem ser priorizadas para conservação e manejo sustentável para fins de composição de projetos de geração de créditos de carbono.

A realização deste trabalho e o aprofundamento das estratégias de análise de dados multitemporais de estoque de carbono do solo demonstraram a importância das técnicas de geotecnologia ambiental e de métodos interdisciplinares na compreensão dos processos ecológicos associados à dinâmica do carbono no solo. As análises e informações sobre o carbono no solo disponibilizadas neste estudo podem servir de referência para a formulação de políticas públicas com base em evidências e para o aprimoramento da legislação e licenciamento ambientais no uso da terra.

REFERÊNCIAS

- ALMADA, H. K.; MACEDO, M. N.; LENZA, E.; MARACAHIPES, L.; SILVÉRIO, D. V. Indigenous lands and conservation units slow down non-GHG climate change in the Cerrado-Amazon ecotone. **Perspect Ecol Conserv**, 22(2), 177–85, 2024. Disponível em: <https://10.1016/j.pecon.2024.03.002> . Acesso em 15 abr. 2025.
- AMOAKWAH, E.; SHAWN, L. T.; DIDENKO, N. A.; RAHMAN, M. A.; ISLAM, K. R. Impact of deforestation and temporal land-use change on soil organic carbon storage, quality, and lability. **PLoS ONE**, 17(8), e0263205, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263205>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- BATJES, N. H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. **Geoderma**, 269, p. 61–68, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.034>. Acesso em: 03 mai. 2025.
- CABALLERO, C.B.; RUHOFF, A.; BIGGS, T. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. **Sci Total Environ**, 808, 1–14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152134>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- CHADDAD, F.; MELLO, F. A. O.; TAYEBI, M.; SAFANELLI, J. L.; CAMPOS, L. R.; AMORIM, M. T. A.; SOUSA, G. P. B.; FERREIRA, T. O.; RUIZ, F.; PERLATTI, F.; GRESCHUK, L. T.; ROSIN, N. A.; ROSAS, J. T. F.; DEMATTÊ, J. A. M. Impact of mining-induced deforestation on soil surface temperature and carbon stocks: A case

study using remote sensing in the Amazon rainforest. **J S Am Earth Sci**, v. 119, p. 1–5, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103983>. Acesso em: 03 mai. 2025.

CAMPOS, Camila da Silva; OLIVEIRA, Rozilda Vieira. Estoque de carbono no solo sob diferentes tipos de uso no bioma caatinga. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 26, n. 104, p. 86–105, 2025. DOI: [10.14393/RCG2610474601](https://doi.org/10.14393/RCG2610474601). Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/74601>. Acesso em: 8 out. 2024.

COUTO, E. G.; CORRÊA, G. R.; OLIVEIRA, V. A.; NASCIMENTO, A. F.; VIDAL-TORRADO, P.; BEIRIGO, R. M.; SCHAEFER, C. E. G. R. Soils of Pantanal: The Largest Continental Wetland. *In*: Schaefer CEGR, Cerri CEP, Andreote FD, Lima JM, editors. Soils of Brazil. Cham: Springer; p. 491–517, 2023. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003143920>. Acesso em: 03 mai. 2025.

DE SY, V.; HEROLD, M.; ACHARD, F.; AVITABILE, V.; BACCINI, A.; CARTER, S.; CLEVERS, J. G. P. W.; LINDQUIST, E.; PEREIRA, M.; VERCHOT, L. Tropical deforestation drivers and associated carbon emission factors derived from remote sensing data. **Environ Res Lett**, 14, 094022, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3dc6>. Acesso em: 10 jun. 2025.

DOS SANTOS, W. P.; VAZ, C. M. P.; MARTIN-NETO, L.; ANSELMINI, A.; TOMASELLA, J.; COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; LIER, Q. J. van; GALBIERI, R.; PERINA, F. J. Predição da densidade do solo em solos brasileiros para cálculo de estoques de carbono: um estudo comparativo de modelos de regressão linear múltipla e Random Forest usando variáveis contínuas e categóricas. **Discover Soil**, v. 2, article 7, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00035-6>. Acesso em: 08 mar. 2025.

FAN, L.; WIGNERON, J.-P.; CIAIS, P.; CHAVE, J.; BRANDT, M.; FENSHOLT, R.; SAATCHI, S. S.; BASTOS, A.; AL-YAARI, A.; HUFKENS, K.; QIN, Y.; XIAO, X.; CHEN, C.; MYNENI, R. B.; FERNANDEZ-MORAN, R.; MIALON, A.; RODRIGUEZ-FERNANDEZ, N. J.; KERR, Y.; TIAN, F.; PEÑUELAS, J. Satellite observed pantropical carbon dynamics. **Nat. Plants**, 5, 944–951, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0478-9>. Acesso em: 19 abr. 2025.

FEARNSIDE, P.M. Deforestation of the Brazilian Amazon. **Oxford Res Encyc Environ Sci**. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.102>. Acesso em: 08 abr. 2025.

FONTANA, A.; VIVIAN, A.M.; ARCO, M.A.L.; MENEZES, A.R.; SANTOS, B.V.; CLEMENTE, E. P. Níveis de referência do carbono orgânico no solo sob vegetação natural dos biomas brasileiros. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 59, 2024. Embrapa. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1169042/1/Niveis-referencia-carbono-organico-2024.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Soil Organic Carbon: the hidden potential. Rome: FAO; 2017. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/6b9dba50-4d5f-45dc-8ab1-92b3f9f9f43b>. Acesso em: 13 jul 2025.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sens Environ.** 202, p. 18–27, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>. Acesso em: 10 jul. 2025.

HERNANDES, T.A.D.; DE OLIVEIRA BORDONAL, R.; DUFT, D.G.; LEAL, M. R. L. V. Implications of regional agricultural land use dynamics and deforestation associated with sugarcane expansion for soil carbon stocks in Brazil. **Reg Environ Change**, 22, 49, 2022. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1007/s10113-022-01907-1>. Acesso em: 22 abr. 2025.

LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, 123(1–2), p. 1–22, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>. Acesso em: 08 jun. 2025.

LEITE, F. F. G. D.; FONTANA, A.; NÓBREGA, G. N.; SANTOS, F. M.; ALVES, B. J. R.; SILVEIRA, J. G.; CORDEIRO, R. C.; CERRI, C. E. P.; SANTOS, R. A. F.; RODRIGUES, R. A. R. Land use change effect on organic matter dynamics and soil carbon sequestration in the Brazilian Cerrado: A study case in Mato Grosso do Sul state (Midwest-Brazil). **Catena**, 249:108670, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816224008671>. Acesso em: 19 mar. 2025.

MACEDO, M.N.; DEFRIES, R.S.; MORTON, D.C.; STICKLER, C.M.; GALFORD, G.L.; SHIMABUKURO, E.Y. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. **Proc Natl Acad Sci U S A**. 109(4), p. 1341–1346, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1111374109>. Acesso em: 15 jun. 2025.

MACEDO, L. O. B.; COSTA, M.A.; OLIVEIRA, I. L.; STURZA, J. A. I. Intensificação das práticas agropecuárias e impactos no sequestro de carbono no solo na região sudeste de Mato Grosso. **Rev Tocant Geogr**, 14(33), p. 59–60, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.70860/rtg.v14i33.19460>. Acesso em: 02 jun. 2025.

MAPBIOMAS. Coleção MapBiomias Solo v2.0 – Carbono Orgânico do Solo. 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/solo>. Acesso em: 13 jul. 2025.

MAPBIOMAS INITIATIVE. MapBiomias General Handbook (Version 1). Climate Observatory, 2024. Disponível em: <https://amazonia.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/10/2024/09/ATBD-Collection-9-v2.docx.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2025.

MINASNY, B.; MALONE, B. P.; McBRATNEY, A. B.; ANGERS, D. A.; ARROUAYS, D.; CHAMBERS, A.; CHAPLOT, V.; CHEN, Z.-S.; CHENG, K.; DAS, B. S.; FIELD, D. J.; GIMONA, A.; HEDLEY, C. B.; HONG, S. Y.; MANDAL, B.; MARCHANT, B. P.; MARTIN, M.; McCONKEY, B. G.; MULDER, V. L.; O'ROURKE, S.; RICHER-DE-FORGES, A. C.; ODEH, I.; PADARIAN, J.; PAUSTIAN, K.; PAN, G.; POGGIO, L.; SAVIN, I.; STOLBOVOY, V.; STOCKMANN, U.; SULAEMAN, Y.; TSUI, C.-C.; VÅGEN, T.-G.; VAN WESEMAEL, B.; WINOWIECKI, L. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, 292, p. 59–86, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>. Acesso em: 03 jul. 2025.

NEPSTAD, D.; McGRATH, D.; STICKLER, C.; ALENCAR, A.; AZEVEDO, A.; SWETTE, B.; BEZERRA, T.; DiGIANO, M.; SHIMADA, J.; MOTTA, R. S.; ARMIJO, E.; CASTELLO, L.; BRANDO, P.; HANSEN, M. C.; McGRATH-HORN, M.; CARVALHO, O.; HESS, L. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science*, 344(6188), 1118–1123, 2014. Disponível em: <https://10.1126/science.1248525>. Acesso em: 01 jul. 2025.

NEVES DE MELO, M. V.; OLIVEIRA, M. E. G.; ALMEIDA, G. L. P.; GOMES, N. F.; MORALES, K. R. M.; SANTANA, T. C.; SILVA, P. C.; MORAES, A. S.; PANDORFI, H.; SILVA, M. V. Spatiotemporal characterization of land cover and degradation in the agreste region of Pernambuco, Brazil, using cloud geoprocessing on Google Earth Engine. *Remote Sens Appl Soc Environ*, 26, 100756, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100756>. Acesso em: 28 mai. 2025.

NWAOGU, C.; DIAGI, B. E.; EKWEOGU, C. V.; AJEYOMI, A. S.; EJLOGU, C. C.; EMEREIBEOLE, E. I.; ENECHE, P. S. U.; OKEKE, O. J.; EDOKPA, D. O.; CHIKE, E.; OZABOR, F.; ADEKUNLE, O.; WEKPE, V. O.; DOLLAH, O. C.; OGAGA, E.; NWANKWOALA, H. O.; WALLACE, E.; ONUGU, C.; FAJEMBOLA, T.; CHERUBIN, M. R. Soil organic carbon stocks as driven by land use in Mato Grosso State: the Brazilian Cerrado agricultural frontier. *Discov Sustain*, 5(382), p. 1–21, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00592-w>. Acesso em: 19 jun. 2025.

OLIVEIRA, J. M.; GOLLANY, H. T.; POLUMSKY, R. W.; MADARI, B. E.; LEITE, L. F. C.; MACHADO, P. L. O. A.; CARVALHO, M. T. M. Predicting soil organic carbon dynamics of integrated crop-livestock system in Brazil using the CQESTR model. *Front Environ Sci*. 10, 826786, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.826786>. Acesso em: 14 jul. 2025.

OLIVEIRA, D. M. S.; SANTOS, R. S.; CHIZZOTTI, F. H. M.; BRETAS, I. L.; FRANCO, A. L. C.; LIMA, R. P.; FREITAS, D. A. F.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. *Geoderma Regional*, v. 37, p. 1–11, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796>. Acesso em: 01 jul. 2025.

OLORUNFEMI, I. E.; OLUFAYO, A. A.; FASINMIRIN, J. T.; KOMOLAFE, A. A. Dynamics of land use land cover and its impact on carbon stocks in Sub-Saharan Africa: an overview. *Environ Dev Sustain*, 24, 40–76, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01484-z>. Acesso em 18 jul. 2025.

POGGIO, L.; SOUSA, L. M.; BATJES, N. H.; HEUVELINK, G. B. M.; KEMPEN, B.; RIBEIRO, E.; ROSSITER, D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*. 7, p. 217–240, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>. Acesso em: 10 abr. 2025.

RAMOS, A. W. P.; AZEVEDO, Ú. R.; XAVIER, F. V.; NEVES, S. M. A. S.; GALVANIN, E. A. S. Deforestation Patterns in the Amazon, Cerrado and Pantanal Biomes in the Upper Paraguay River Basin, Mato Grosso - Brazil. *Rev Geogr Acadêmica*, 17(2), p. 136–158, 2023. Disponível em: <https://revista.ufrr.br/rqa/article/view/7907>. Acesso em: 08 jul. 2025.

SANQUETTA, C. R. **Créditos de carbono avançado**. 1. ed. Curitiba (PR); 2023.

SANTOS, C. A.; REZENDE, C. P.; PINHEIRO, É. F. M.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil carbon stocks after land use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil.

Geoderma. 337, p. 394–401, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.045>. Acesso em: 03 jul. 2025.

SEVERIANO, R.M.; PIERANGELI, M.A.P.; SANTOS, N.S.; XAVIER, V. Soil organic carbon in no-tillage systems of different ages in Southwest Mato Grosso, Brazil. **Rev Bras Eng Agríc Ambient.**, v. 25(4), p. 250–255, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n4p250-255>. Acesso em: 03 mai. 2025.

SILVA JUNIOR, C. H. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; SHIMABUKURO, Y. E.; VANCUTSEM, C.; ACHARD, F.; BEUCHLE, R.; NUMATA, I.; SILVA, C. A.; MAEDA, E. E.; LONGO, M.; SAATCHI, S. S. Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. **Sci Adv**, 6(40), eaaz8360, 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz8360>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SILVA JUNIOR, C.H.L.; PESSÔA, A.C.R.; CARVALHO, N.S.; REIS, J.B.C.; ANDERSON, L.O.; ARAGÃO L.E.O.C. The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. **Nat Ecol Evol**, 5(2), p. 144–145, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1038/s41559-020-01368-x>. Acesso em: 02 jun. 2025.

STRASSBURG, B. B. N.; IRIBARREM, A.; BEYER, H. L.; CORDEIRO, C. L.; CROUZEILLES, R.; JAKOVAC, C. C.; JUNQUEIRA, A. B.; LACERDA, E.; LATAWIEC, A. E.; BALMFORD, A.; BROOKS, T. M.; BUTCHART, S. H. M.; CHAZDON, R. L.; ERB, K.-H.; BRANCALION, P.; BUCHANAN, G.; COOPER, D.; DÍAZ, S.; DONALD, P. F.; KAPO, V.; LECLÈRE, D.; MILES, L.; OBERSTEINER, M.; PLUTZAR, C.; SCARAMUZZA, C. A. M.; SCARANO, F. R.; VISCONTI, P. Global priority areas for ecosystem restoration. **Nature**. 586(7830), p. 590–594, 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9>. Acesso em: 05 ago. 2025.

TÔSTO, S. G.; KANO, C.; MENDES, A. M.; NOGUEIRA JÚNIOR, L. R.; PEREIRA, L. C.; GOMES, M. A. F. O carbono no contexto dos serviços ecossistêmicos e serviços ambientais da Amazônia. *In*: Tôsto SG, Pereira LC, Gomes MAF, Rodrigues JA, eds. Serviços ecossistêmicos e serviços ambientais de solo, água e carbono – Amazônia. Brasília (DF): Embrapa, p. 128–143, 2023. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1157738/1/6167.pdf>.

Acesso em: 13 jul 2025.

UNEP WCMC; IIASA. Remote sensing for monitoring impacts of land use change on biodiversity and carbon stocks: the role in the spatial planning process. Cambridge: United Nations Environment Programme / SPACES coalition; 2023. Disponível em:

https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/18924/1/202301_SPACES-Remote-Sensing-1.pdf.

Acesso em: 13 jul 2025.

VELDKAMP, E.; SCHMIDT, M.; POWERS, J.S.; CORRE, M.D. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. **Nat Rev Earth Environ**, 1, 590–605, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0091-5>. Acesso em: 10 mai. 2025.

WALKER, W. S.; GORELIK, S. R.; BACCINI, A.; ARAGON-OSEJO, J. L.; JOSSE, C.; MEYER, C.; MACEDO, M. N.; AUGUSTO, C.; RIOS, S.; KATAN, T.; SOUZA, A. A.; CUELLAR, S.; LLANOS, A.; ZAGER, I.; DÍAZ MIRABAL, G.; SOLVIK, K. K.; FARINA, M. K.; MOUTINHO, P.; SCHWARTZMAN, S. The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. **Proc Natl Acad Sci U S A**. 117(6), 3015–3025, 2020. Disponível em <https://doi.org/10.1073/pnas.1913321117>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ZOLIN, C. A.; MATOS, E. S.; MAGALHÃES, C. A. S.; PAULINO, J.; LAL, R.; SPERA, S. T.; BEHLING, M. Short-term effect of a crop-livestock-forestry system on soil, water and nutrient loss in the Cerrado-Amazon ecotone. **Acta Amaz**, 51(2), p. 102–112, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4392202000391>. Acesso em: 17 mai. 2025.

ZOMER, R.J.; BOSSIO, D.A.; SOMMER, R.; VERCHOT, L.V. Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils. **Sci Rep**, 7, 15554, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8>. Acesso em: 01 abr. 2025.

4P1000: Iniciativa internacional “4 por 1000”. Os solos para a segurança alimentar e o clima. Paris, 2015. Disponível em: <https://4p1000.org>. Acesso em: 13 jul 2025.

Artigo IV⁹

ENCRUZILHADA CLIMÁTICA DE UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA: CRÉDITOS DE CARBONO VS. AÇÕES INTERNAS - VIABILIDADE BASEADA NA LEI 15.042/2024 E NAS DIRETRIZES DO *GHG Protocol*

RESUMO: A crescente crise climática global tem impulsionado o desenvolvimento de mecanismos de quantificação, redução e compensação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Metodologias consolidadas, como o *GHG Protocol*, e marcos regulatórios recentes, a exemplo da Lei nº 15.042/2024, estabelecem exigências para a redução ou neutralização dessas emissões. Nesse contexto, universidades públicas, em razão de sua missão formativa e de seu papel social, enfrentam o dilema entre compensar suas emissões por meio de créditos de carbono ou investir em ações internas de mitigação. Este estudo analisou a viabilidade econômica dessas duas estratégias em uma universidade pública estadual, considerando as metas de neutralização previstas na Lei nº 15.042/2024 e as diretrizes do *GHG Protocol*. Adotou-se uma abordagem quantitativa, baseada na metodologia do *GHG Protocol*, utilizando dados de consumo de eletricidade, combustíveis fósseis, GLP e gases refrigerantes (Escopos 1 e 2) referentes ao período de 2018 a 2022. O total estimado foi de 12.191,97 tCO₂e. Em seguida, comparou-se o custo de neutralização via créditos de carbono (R\$ 45–R\$ 100/tCO₂e) com o de medidas internas, como implantação de sistemas fotovoltaicos, programas de eficiência energética e substituição parcial de combustíveis fósseis. Os resultados indicaram que a compra de créditos de carbono é a opção de menor custo imediato, enquanto as ações internas, embora demandem maior investimento inicial, proporcionam reduções contínuas nas emissões e benefícios institucionais de longo prazo. A análise de sensibilidade e os resultados obtidos sugerem uma estratégia híbrida. Foi elaborada uma matriz SWOT para apoiar a implementação de ações estratégicas, bem como desenvolvido um aplicativo *cross-platform* para engajar a comunidade acadêmica na temática. Conclui-se que, embora a compra de créditos de carbono permita o cumprimento das metas legais de neutralização com menor custo imediato, essa alternativa não reduz a dependência energética nem promove autonomia institucional. Por outro lado, as ações internas de mitigação, apesar de exigirem maior investimento inicial, asseguram reduções contínuas das emissões, fortalecem a sustentabilidade institucional e geram ganhos operacionais. Assim, recomenda-se a adoção de uma abordagem híbrida que concilie sustentabilidade ambiental, responsabilidade fiscal e fortalecimento institucional.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade Universitária; Inventário de Emissões; Viabilidade Econômica.

ABSTRACT: The growing global climate crisis has driven the development of mechanisms for quantifying, reducing, and offsetting greenhouse gas (GHG) emissions.

⁹ Artigo a ser submetido após a defesa.

Established methodologies, such as the GHG Protocol, and recent regulatory frameworks, such as Law No. 15,042/2024, set requirements for the reduction or neutralization of these emissions. In this context, public universities, due to their formative mission and social role, face the dilemma of whether to offset their emissions through carbon credits or to invest in internal mitigation actions. This study analyzed the economic feasibility of these two strategies in a state public university, considering the neutrality targets established by Law No. 15,042/2024 and the guidelines of the GHG Protocol. A quantitative approach was adopted, based on the GHG Protocol methodology, using data on electricity consumption, fossil fuels, liquefied petroleum gas (LPG), and refrigerant gases (Scopes 1 and 2) for the period from 2018 to 2022. The estimated total was 12,191.97 tCO₂e. Subsequently, the cost of neutralization through carbon credits (R\$45 - R\$100/tCO₂e) was compared with that of internal measures such as the implementation of photovoltaic systems, energy efficiency programs, and partial replacement of fossil fuels. The results indicated that the purchase of carbon credits represents the least costly immediate option, while internal actions - although requiring greater initial investment - provide continuous emission reductions and long-term institutional benefits. Sensitivity analysis and the obtained results suggest a hybrid strategy. A SWOT matrix was developed to support the implementation of strategic actions, as well as a cross-platform application to engage the academic community in the topic. It is concluded that although the purchase of carbon credits allows compliance with the legal neutrality targets at a lower immediate cost, this alternative neither reduces energy dependence nor promotes institutional autonomy. On the other hand, internal mitigation measures, despite requiring higher initial investments, ensure continuous emission reductions, strengthen institutional sustainability, and generate operational gains. Therefore, the adoption of a hybrid approach that reconciles environmental sustainability, fiscal responsibility, and institutional strengthening is recommended.

KEYWORDS: University Sustainability; Emissions Inventory; Economic Viability.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, especialmente após a Rio-92 e durante a 3rd *Conference of the Parties* (COP 3 - Quioto) a intensificação das mudanças climáticas impulsionou uma crescente mobilização global voltada à mensuração, mitigação e compensação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2023). Nesse cenário, o desenvolvimento de ferramentas normativas e metodológicas tem sido fundamental para que organizações públicas e privadas possam quantificar sua pegada de carbono e planejar estratégias de neutralização.

O *Greenhouse Gas Protocol* (GHG Protocol), desenvolvido em parceria entre o *World Resources Institute* (WRI) e o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), consolidou-se como uma das principais metodologias globais

para esse fim, sendo amplamente aplicado em diversos setores da economia (Mytton, 2020).

O *GHG Protocol* é um conjunto de padrões internacionais criados para medir, quantificar e relatar emissões de gases de efeito estufa (GEE) de organizações, governos e projetos. Surgiu da necessidade de padronizar a contabilidade de emissões corporativas, especialmente após o estabelecimento da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), e diante da crescente demanda por transparência e comparabilidade nos relatórios ambientais (WRI; WBCSD, 2001; Havana, 2025).

No Brasil, a adoção do *GHG Protocol* tem sido incentivada, sobretudo por meio do Programa Brasileiro *GHG Protocol*, que oferece plataformas e fatores de emissão adaptados ao contexto nacional. Silva (2023) destaca a importância de inventários bem estruturados no setor industrial, exemplificando com um estudo de caso sobre a secagem de argilominerais e reforçando a aplicabilidade da metodologia tanto em ambientes industriais quanto acadêmicos. Essa aplicabilidade é ainda mais relevante diante da diversidade operacional e geográfica das universidades públicas brasileiras.

O papel das universidades como espaços de inovação e referência na adoção de práticas ambientais torna-se particularmente relevante quando se consideram os compromissos do Brasil no Acordo de Paris, que preveem a redução de 59% a 67% das emissões até 2035, tomando como base os níveis de 2005. Essa meta corresponde a uma diminuição de 1,51 a 1,71 GtCO₂e, conforme os dados mais recentes do inventário nacional, sendo compatível, em termos absolutos, com níveis de emissão entre 1,05 e 0,85 GtCO₂e (*GWP AR5*) ou entre 0,85 e 0,68 GtCO₂e (*GTP AR5*) (Brasil, 2024).

A aplicação do *GHG Protocol* em instituições de ensino superior (IES) tem ganhado destaque como instrumento estratégico de promoção da sustentabilidade. Universidades, por sua relevância científica, social e ambiental, ocupam posição privilegiada na geração de conhecimento e na implementação de práticas sustentáveis em seus câmpus. Estudos como o de Cano *et al.* (2023), que aplicaram a norma ISO 14.064-1 e o *GHG Protocol* em uma universidade colombiana, demonstram que essa iniciativa permite identificar as principais fontes de emissão, contribuindo para o planejamento de políticas institucionais de mitigação com maior objetividade e eficiência.

A Lei nº 15.042/2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), representa um marco regulatório ao permitir que diferentes setores alinhem suas operações às metas de descarbonização. Os limites de

emissão são definidos com base nas metas da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e serão detalhados no Plano Nacional de Alocação, que determinará a distribuição das Cotas Brasileiras de Emissão (CBEs) entre os setores regulados. Empresas que emitirem abaixo de suas cotas poderão comercializar o excedente, enquanto aquelas que ultrapassarem seus limites deverão adquirir CBEs ou Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVEs) para compensar o excedente (Brasil, 2024). A Lei impõe que organizações cujas emissões ultrapassem determinados limites adotem medidas de redução ou compensação, desafiando universidades públicas a decidir entre a aquisição de créditos de carbono e a implementação de estratégias internas que reduzam suas emissões de forma direta.

Contudo, mensurar emissões representa apenas uma das etapas no enfrentamento das mudanças climáticas - a etapa diagnóstica. Após identificar suas fontes de GEE, as organizações precisam decidir entre implementar medidas internas de mitigação ou compensar suas emissões por meio da compra de créditos de carbono (Bisinoto *et al.*, 2025). Essa decisão envolve variáveis técnicas, econômicas e éticas, demandando análises de custo-efetividade cada vez mais consistentes. Segundo Diniz *et al.* (2021), tecnologias emergentes como *blockchain* podem contribuir significativamente para a transparência e rastreabilidade das emissões e compensações, especialmente no Escopo 2, aumentando a confiabilidade dos inventários e das transações de carbono.

Além dos aspectos operacionais, observa-se uma crescente integração entre sustentabilidade ambiental e gestão institucional. Schaltegger *et al.* (2022) ressaltam a importância da contabilidade ambiental estratégica como ferramenta de suporte à tomada de decisão, defendendo abordagens multiníveis que integrem dados ambientais aos processos administrativos e financeiros. Essa perspectiva implica que a sustentabilidade deve ser tratada como eixo transversal das estratégias de desenvolvimento das universidades, e não apenas como uma pauta ambiental isolada.

As instituições de ensino superior apresentam como principais fontes de emissão de CO₂ aquelas relacionadas ao consumo de energia elétrica, à mobilidade (deslocamento de estudantes e servidores) e à geração de resíduos sólidos. Filimonau *et al.* (2021) observaram que o consumo de energia elétrica é uma das maiores fontes de emissões nas IES, em razão do uso intensivo de iluminação, climatização e equipamentos laboratoriais. Carvalho *et al.* (2017) destacaram, em estudo na Universidade de Brasília (UnB), a relevância das emissões associadas ao transporte de

estudantes e servidores, concluindo que a mobilidade urbana cotidiana contribui de forma expressiva para as emissões institucionais. Já Ridhosari e Rahman (2020) aplicaram o modelo *WARM* para estimar emissões de CO₂ relacionadas à geração e transporte de resíduos na Universidade de Pertamina, identificando valores igualmente significativos.

Reconhecendo o papel formativo das instituições de ensino, iniciativas de redução da pegada de carbono também favorecem a criação de uma cultura ambiental entre servidores, estudantes e demais membros da comunidade acadêmica. Ferramentas como o *CO2UNV*, desenvolvidas para estimar a pegada de carbono em ambientes universitários, têm se mostrado eficazes ao integrar dados e facilitar a visualização de impactos (Valls-Val; Bovea, 2022).

Dessa forma, o presente estudo busca responder à seguinte questão: adquirir créditos de carbono para neutralizar as emissões é mais viável economicamente do que implementar estratégias internas de redução? Sob a ótica da Lei nº 15.042/2024, analisam-se tanto as implicações financeiras de cada estratégia quanto os impactos dessas escolhas sobre a sustentabilidade institucional.

O objetivo geral consiste em avaliar a viabilidade econômica da aquisição de créditos de carbono em comparação à implementação de medidas internas de redução de emissões em uma universidade pública estadual. Os objetivos específicos são: (i) verificar se a metodologia GHG Protocol é eficiente e aplicável ao modelo da Universidade; (ii) calcular a pegada de carbono da universidade, abrangendo todas as fontes significativas de emissões (energia, combustíveis, GLP e emissões fugitivas) no período de 2018 a 2022; (iii) estimar os custos associados à aquisição de créditos de carbono no mercado atual; (iv) analisar os custos e benefícios de medidas internas específicas de mitigação; e (v) comparar a viabilidade econômica das duas abordagens, considerando diferentes cenários e horizontes temporais.

A escolha do tema se justifica sob múltiplas perspectivas. No âmbito acadêmico, o estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a aplicação prática de metodologias internacionais - como o *GHG Protocol* - no contexto brasileiro, fomentando a integração entre gestão ambiental e análise econômica no ambiente universitário. A discussão sobre estratégias de neutralização de emissões, embora não seja recente, mantém-se atual e relevante frente às transformações climáticas globais. Trabalhos como os de Cruz (2020) e Bautista-Puig e Sanz-Casado (2021) discutem práticas sustentáveis em universidades, enquanto Diniz *et al.* (2021) e Lamenza, Da Silva Pereira

e Braga Junior (2017) analisam o funcionamento e os custos associados aos mercados de carbono. Assim, este artigo busca integrar dimensões econômicas, ambientais e legais na análise proposta, com foco no contexto institucional brasileiro.

No campo político e administrativo, o estudo se mostra relevante por responder a demandas crescentes de responsabilidade socioambiental nas instituições públicas. A Política Nacional sobre Mudança do Clima, aliada aos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil, requer que o setor público adote estratégias eficazes de mitigação e adaptação. Nesse sentido, universidades públicas, como agentes formadores e gestoras de amplas estruturas físicas e operacionais, desempenham papel essencial.

No âmbito social, a pesquisa insere-se em um contexto em que a sociedade civil exige maior transparência, responsabilidade ambiental e ética institucional. A adoção de medidas concretas de mitigação ou compensação das emissões de GEE atende a essas expectativas e contribui para fortalecer a imagem da universidade perante a comunidade.

Por fim, a análise da viabilidade econômica das alternativas de neutralização oferece suporte prático à tomada de decisão, possibilitando o planejamento estratégico com base em indicadores objetivos. Trata-se, portanto, de um estudo que alia relevância teórica e aplicabilidade direta na gestão universitária, reforçando o alinhamento entre os princípios da sustentabilidade e a eficiência na administração pública.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MODELAGEM ECONÔMICA: CONCEITOS E APLICAÇÕES

A modelagem econômica é indispensável para examinar e compreender sistemas econômicos. É amplamente empregada para descrever, analisar e prever o comportamento de elementos econômicos em diferentes contextos, por meio de estruturas matemáticas e estatísticas. Tais representações permitem ao analista identificar como diversos fatores afetam a economia de uma entidade, localidade ou nação, reconhecer conexões entre variáveis e simular resultados de políticas ou cenários alternativos (Vieira; Oliveira; Sugahara, 2023).

Os princípios da modelagem econômica baseiam-se na construção de modelos matemáticos capazes de retratar a realidade de forma parcimoniosa, porém precisa. Variáveis essenciais - produção, consumo, custos e alocação de recursos - exigem definição criteriosa, assim como suposições que conciliem simplificação e complexidade

do problema. Este método viabiliza o desenvolvimento de estratégias e políticas apoiadas em análises quantitativas robustas (Sampaio; De-Losso, 2020).

No âmbito da sustentabilidade, a modelagem econômica é necessária para avaliar efeitos econômicos e ambientais de práticas sustentáveis. Diante da urgência por soluções de baixo impacto, compreender como a integração de práticas ambientalmente responsáveis afeta resultados econômicos de uma organização ou empresa torna-se importante. Modelos econômicos permitem mensurar custos e benefícios de projetos como a instalação de sistemas de energia renovável ou o aprimoramento da gestão de resíduos, avaliando viabilidade financeira e potencial de redução de custos operacionais (Meneses; Portella; Benvenuti, 2021).

O uso da modelagem econômica em gerenciamento sustentável inclui ferramentas de otimização para maximizar o uso de recursos naturais e reduzir impactos ambientais, preservando a sustentabilidade financeira. Em instituições educacionais, por exemplo, modelos apoiam a avaliação do *return on investment* (ROI) de iniciativas como energia solar e programas de redução de consumo (campanhas educativas, adoção de materiais recicláveis), orientando o equilíbrio entre custos iniciais e benefícios de longo prazo (Arasteh; Farjami, 2021).

Modelos são instrumentais para antecipar impactos de instrumentos econômicos - como imposto sobre carbono e subsídios à energia renovável - em diferentes níveis da economia. Ao projetar os resultados de mudanças regulatórias ou incentivos, a modelagem auxilia no aperfeiçoamento de intervenções governamentais para maximizar ganhos ambientais e econômicos (Meraj, 2021).

Por fim, a modelagem permite mensurar custos associados à adoção - ou à não adoção - de práticas sustentáveis. A postergação de soluções pode implicar despesas crescentes com energia, degradação de recursos e danos reputacionais. A quantificação desses custos explicita desvantagens de adiar a integração de práticas mais eficazes (Vieira; Oliveira; Sugahara, 2023).

2.2 A LEI 15.042/2024 E SUA APLICABILIDADE AO CONTEXTO DAS INSTITUIÇÕES PÚBLICAS

A Lei nº 15.042/2024, ao instituir o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), estabelece regras para operadores cujas emissões ultrapassem determinados limites, criando base jurídica para a redução de GEE no país. O marco introduz obrigações de monitoramento e reporte para instituições que excedam

10 mil tCO₂e anuais e a conciliação periódica de obrigações para aquelas acima de 25 mil tCO₂e anuais (Brasil, 2024). A Lei não distingue entre entes públicos e privados e exclui explicitamente o agronegócio das obrigações.

O SBCE adota o modelo *cap-and-trade*, estipulando tetos de emissões e permitindo a comercialização de créditos de carbono entre os participantes. O Plano Nacional de Alocação, previsto na Lei, define limites máximos por período e aloca *Cotas Brasileiras de Emissão* (CBEs), gerando incentivos econômicos à eficiência energética e à inovação (Brasil, 2024). Sua formulação se inspira em experiências internacionais - do Protocolo de Quioto a acordos debatidos na COP28 - e evidencia o potencial dos mercados de carbono na redução de emissões (Bisinoto *et al.*, 2025).

Embora o modelo de mercado de carbono introduzido pelo SBCE represente um avanço, sua aplicação a universidades públicas demanda atenção a particularidades: restrições orçamentárias e a necessidade de conformidade sem comprometer ensino, pesquisa e extensão (Sadalla, 2019). Nesse contexto, a modelagem econômica torna-se essencial para avaliar cenários e impactos financeiros de estratégias de mitigação. Investimentos em energia solar, embora onerosos inicialmente, reduzem emissões e diminuem a dependência do mercado de carbono (Martins *et al.*, 2016). Por outro lado, os preços no mercado regulado apresentaram em 2024 média de US\$ 61,30, variando entre US\$ 10,06 e US\$ 99,98 por tCO₂e (World Bank, 2024), indicando volatilidade capaz de gerar riscos financeiros a quem dependa exclusivamente da compensação (Brito, 2024).

Casos internacionais oferecem parâmetros comparativos: em universidades chinesas, transições energéticas reduziram emissões em até 64,7%, demonstrando a viabilidade econômica de fontes renováveis (Wang *et al.*, 2023). A expansão de energia limpa e o uso da mobilidade elétrica - apoiada por subsídios governamentais - mostrou efeitos positivos na adoção tecnológica e na eficiência energética, ainda que com disparidades provinciais (Zhang; Hanaoka, 2021).

Abordagens educacionais que conectem competências e práticas pedagógicas aos ODS também fortalecem o atendimento às exigências da Lei nº 15.042/2024. Currículos orientados por competências de sustentabilidade potencializam o impacto institucional e oferecem um marco holístico para atualização de cursos e programas acadêmicos (Lozano *et al.*, 2017).

2.3 SUSTENTABILIDADE NO ENSINO SUPERIOR PÚBLICO

Universidades públicas podem atuar como catalisadoras de mudanças, influenciando paradigmas acadêmicos e práticas operacionais voltadas ao meio ambiente (Marques; Santos; Aragão, 2020). Iniciativas de gestão de resíduos, adoção de energias renováveis e desenho de câmpus sustentáveis figuram entre os caminhos possíveis. O engajamento amplo da comunidade acadêmica é condição necessária para fortalecer esses esforços (Membrillo-Hernández; Lara-Prieto; Caratozzolo, 2021).

Há desafios recorrentes: restrições financeiras limitam a modernização de infraestrutura; resistências institucionais e baixa conscientização dificultam a integração de medidas ambientais e sociais às prioridades estratégicas (Bautista-Puig; Sanz-Casado, 2021). Para superá-los, universidades têm estabelecido parcerias com setor privado, governos e organizações internacionais, além de explorar fundos ambientais e linhas “verdes”. Essas alianças, contudo, requerem planejamento estratégico consistente e visão de longo prazo (Arasteh; Farjami, 2021).

Obstáculos culturais e organizacionais também são frequentes. A ausência de estruturas de governança dedicadas à sustentabilidade leva à execução fragmentada de iniciativas. Uma governança participativa - da Reitoria ao corpo discente - com metas mensuráveis e integração da sustentabilidade à missão institucional é fundamental (Membrillo-Hernández; Lara-Prieto; Caratozzolo, 2021).

A gestão de resíduos sólidos é um ponto crítico em câmpus com grande população acadêmica. Falhas em coleta seletiva, reciclagem e compostagem acarretam impactos ambientais e desperdício de recursos. Sistemas abrangentes de gestão, aliados a formação continuada e incentivos, podem reduzir consumo e minimizar a geração de resíduos (Arasteh; Farjami, 2021; Bautista-Puig; Sanz-Casado, 2021).

Além disso, recomenda-se incorporar sustentabilidade aos processos administrativos: diretrizes éticas de compras, uso de materiais de baixo impacto e práticas de consumo responsável. Monitoramento e avaliação estratégicos asseguram o alcance de metas. Comitês de sustentabilidade e instrumentos participativos, como *ombudsman*, reforçam a governança, a transparência e o engajamento comunitário (Membrillo-Hernández; Lara-Prieto; Caratozzolo, 2021).

2.4 FERRAMENTAS E MÉTODOS DE MODELAGEM PARA SUSTENTABILIDADE

A análise de custo-benefício é uma ferramenta-chave para priorizar práticas sustentáveis sob restrições orçamentárias. Ao comparar custos iniciais e benefícios de longo prazo - como redução de despesas operacionais e ganhos ambientais -, as instituições aumentam a eficiência financeira enquanto desenvolvem infraestrutura sustentável (De Sousa *et al.*, 2024).

Indicadores de sustentabilidade, associados à análise de custo-benefício, permitem monitorar a eficácia de iniciativas. Entre os principais indicadores estão taxas de reciclagem, conservação de energia, eficiência hídrica e emissões de GEE. A integração dessas métricas à operação aprimora esforços de sustentabilidade e identifica áreas de melhoria (Mohiuddin, 2022).

A divulgação dos resultados derivados das métricas amplia o engajamento de alunos, servidores e colaboradores. Ferramentas de rastreamento - sistemas de gestão ambiental e energética - agilizam a coleta de dados e a elaboração de inventários, reforçando o foco institucional e a visibilidade dos esforços (Duarte, 2023).

Experiências nacionais ilustram resultados: a Universidade de São Paulo (USP) implementou iniciativas sustentáveis como utilização de energia solar, gestão de resíduos e tecnologias de baixo consumo (LED, sensores de presença), com economia de energia e ambientes mais sustentáveis (Sadalla, 2019). Na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), destacam-se captação de água de chuva, mobilidade de baixo carbono e pesquisa em energias renováveis, combinando conservação ambiental e economia de custos (Duarte, 2023).

No âmbito da avaliação institucional, Schlemer Alcantara e Sampaio (2024) analisaram indicadores ecossocioeconômicos — U-Multirank, UMR, *Green Office Movement* - UniSAF e EIS-RC-PMU - e concluíram que a avaliação da pós-graduação deve ser contextualizada às realidades locais e regionais, com indicadores multidimensionais que reconheçam o papel da universidade no desenvolvimento sustentável.

A incorporação de práticas sustentáveis impulsiona a inovação tecnológica. As IES podem mobilizar seu *know-how* para conceber soluções economicamente viáveis - desde sistemas de energia renovável e tecnologias de gestão de resíduos até materiais de menor impacto para construção e infraestrutura, - tornando o câmpus um laboratório vivo de sustentabilidade (Duarte, 2023). Esses esforços também promovem justiça e equidade, alinhando a missão universitária aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (Hernández-Díaz, 2021).

2.5 OS CRÉDITOS DE CARBONO COMO UMA POSSIBILIDADE DE COMPENSAÇÃO

A formalização dos mercados de carbono remonta ao Protocolo de Quioto, no qual países desenvolvidos assumiram reduzir, em média, 5,2% de suas emissões em relação a 1990. Esse arranjo sustentou mecanismos como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e sistemas *cap-and-trade*, que utilizam instrumentos econômicos para enfrentar problemas ambientais (Godoy; Saes, 2015; Lamenza; Da Silva Pereira; Braga Junior, 2017). O *Emission Trading Scheme* (ETS) do Reino Unido, implementado em 2002, demonstrou a eficiência do *cap-and-trade* ao fixar limites claros e estimular a competitividade tecnológica (Godoy; Saes, 2015). No Brasil, a Lei nº 15.042/2024 adapta tais práticas ao cenário nacional, por meio do SBCE.

Os benefícios econômicos do *cap-and-trade* são expressivos: estimativas indicam que instrumentos de precificação de carbono podem gerar receitas equivalentes a 0,9% do Produto Interno Bruto (PIB) global, reforçando sua relevância para a descarbonização (Fouré *et al.*, 2023). Entretanto, a viabilidade prática sofre com a volatilidade de preços. No projeto de preservação ambiental da Serra de Baturité, por exemplo, a comercialização via MDL resultou em Valor Presente Líquido (VPL) negativo, evidenciando que oscilações de preço podem desencorajar instituições públicas que necessitam de estabilidade financeira (Silveira; Oliveira, 2021).

Além da dimensão econômica, o mercado de carbono pode induzir práticas sustentáveis (Suchikova *et al.*, 2024). Na Universitat Jaume I (Espanha), o uso dessa ferramenta permitiu mapear emissões e viabilizar reflorestamento que compensou 1,11% das emissões dos Escopos 1 e 2, ilustrando como a integração entre tecnologias e iniciativas locais contribui para metas de descarbonização e fundamenta decisões orçamentárias sobre compra de créditos ou investimento em mitigação interna (Valls-Val; Bovea, 2022).

3 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem quantitativa, com o objetivo de comparar duas estratégias de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em uma universidade pública estadual: a aquisição de créditos de carbono e a implementação de medidas internas de redução.

A pesquisa foi estruturada em quatro etapas principais:

- (I) levantamento de dados institucionais;
- (II) cálculo da pegada de carbono conforme o *GHG Protocol*;
- (III) análise econômica das alternativas; e
- (IV) aplicação de análise de sensibilidade sobre os custos estimados.

A coleta de dados constituiu a etapa inicial da pesquisa, com foco nos principais insumos responsáveis por emissões relevantes no contexto institucional. Foram reunidas informações referentes ao período de 2018 a 2022, abrangendo:

- consumo de energia elétrica;
- uso de combustíveis para transporte institucional;
- consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP), referente à estrutura completa da UNEMAT;
- consumo dos gases refrigerantes R-410A e R22, coletados especificamente nos câmpus de Cáceres, Sinop, Tangará da Serra e na Reitoria - unidades que contam com técnicos de refrigeração responsáveis pela manutenção dos equipamentos.

Além desses elementos, avaliou-se a possibilidade de incluir informações sobre consumo de água, esgoto, viagens aéreas institucionais e emissões casa-trabalho - componentes que, caso disponíveis, poderiam integrar o Escopo 3 do inventário. Contudo, verificou-se que a instituição não dispõe de relatórios ou controle sistematizado dessas informações.

Os dados utilizados foram obtidos por meio de relatórios administrativos, planilhas e registros internos das diversas unidades da universidade, fornecidos oficialmente pela Diretoria Administrativa de Patrimônio e Serviços. A única exceção corresponde aos dados de consumo de energia elétrica, obtidos diretamente junto à Concessionária Energisa, uma vez que a universidade não possuía registros completos desses valores.

A etapa seguinte consistiu no cálculo da pegada de carbono institucional, realizado com base na metodologia do *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)*, reconhecida internacionalmente e adaptada ao contexto brasileiro por meio do Programa Brasileiro *GHG Protocol*, conforme planilha oficial em sua versão 2025.0.1 disponibilizada pela Fundação Getúlio Vargas (FGV).

A aplicação dessa metodologia foi estruturada segundo os três escopos preconizados:

- Escopo 1: emissões diretas provenientes de fontes sob controle da universidade, como a queima de combustíveis em veículos institucionais, o uso de GLP e as emissões fugitivas;
- Escopo 2: emissões indiretas relacionadas à aquisição de energia elétrica de concessionárias;
- Escopo 3: emissões indiretas adicionais, como deslocamentos aéreos, consumo de água e tratamento de resíduos, consideradas apenas quando há disponibilidade de dados.

O cálculo das emissões foi realizado com base na fórmula fundamental proposta pelo *GHG Protocol*:

Equação 1 – Cálculo do total de emissões

$$E = \sum(A_i \times F_i) \quad \text{Eq.1}$$

Nessa equação, E representa as emissões totais de gases de efeito estufa (GEE), expressas em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e); A_i corresponde ao valor da atividade ou do consumo do item i (como litros de combustível, kWh de eletricidade ou kg de GLP); e F_i é o fator de emissão respectivo, obtido a partir das tabelas atualizadas do *GHG Protocol Brasil* ou de fontes reconhecidas, como o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Os dados de consumo foram convertidos em emissões totais por escopo, proporcionando uma visão abrangente do impacto institucional ao longo do período analisado.

Com base na pegada de carbono obtida, procedeu-se à análise econômica comparativa entre as duas abordagens de neutralização. No caso da aquisição de créditos de carbono, realizou-se uma pesquisa de mercado considerando os valores praticados no mercado voluntário, que variaram de R\$ 45,00 (US\$ 9,00) a R\$ 100,00 (US\$ 20,00) por tonelada de CO_2 equivalente, conforme o tipo de crédito e a certificadora envolvida. Créditos oriundos de energia renovável apresentaram menor valor, enquanto aqueles vinculados à restauração florestal possuíam preço mais elevado, considerando o período de 2018 a 2022 (MSCI *Carbon Markets*, 2025). Optou-se por desconsiderar os preços do mercado regulado, uma vez que sua aquisição ocorre em moeda estrangeira e enfrenta entraves operacionais para execução com recursos públicos. Soma-se a isso a escassez de créditos lastreados disponíveis para comercialização, em razão da falta de regulamentações claras em âmbito internacional.

Para as estratégias internas de mitigação, foram orçados projetos voltados à instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica, adoção de programas de eficiência energética e implementação de ações de reflorestamento. Cada medida foi avaliada quanto ao custo total e ao potencial de redução das emissões, possibilitando a comparação por meio da fórmula de custo-efetividade (CE), expressa da seguinte forma:

Equação 2 – Cálculo do Custo de Efetividade

$$CE = \frac{C}{R} \quad \text{Eq.2}$$

Na equação apresentada, C representa o custo total da medida (em reais) e R corresponde à redução estimada em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e). Esse indicador foi essencial para estabelecer uma métrica comparativa entre as duas abordagens analisadas, especialmente em termos de retorno ambiental por real investido.

Em seguida, realizou-se uma análise de sensibilidade com o objetivo de verificar a robustez dos resultados diante de diferentes cenários de custo. Essa etapa consistiu na simulação de variações tanto no preço dos créditos de carbono quanto nos custos de implantação das tecnologias internas de mitigação.

Foram testados valores variando de R\$ 45,00 a R\$ 100,00 por tonelada de CO₂e para os créditos de carbono, e de R\$ 1.000.000,00 a R\$ 2.000.000,00 para os investimentos em infraestrutura de mitigação. Considerou-se uma capacidade média de redução de 50 tCO₂e por ano decorrente do investimento direto e ponderou-se que, ao realizar tal investimento, a universidade seria contemplada pela Chamada Pública para Projetos de Eficiência Energética (PEE), a qual prevê o aporte aproximado de R\$ 20.000.000,00 em contrapartida para a instalação de usinas fotovoltaicas capazes de gerar cerca de 4 MWh/ano, compensando adicionalmente cerca de 450 tCO₂e.

Os valores de investimento utilizados nas simulações foram obtidos entre os meses de fevereiro e abril de 2025, com base em cotações de empresas do setor de energia solar que prestam serviços a grandes clientes.

A análise dos resultados deste estudo é fundamentada na metodologia do GHG *Protocol*, que organiza as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em três escopos principais. Para este trabalho, serão analisados os Escopo 1 e Escopo 2, uma vez que

representam as fontes diretas e indiretas mais relevantes associadas às atividades da instituição.

O Escopo 1 compreende as emissões diretas provenientes de fontes que estão sob controle operacional da universidade, como, por exemplo, o uso de combustíveis fósseis em veículos institucionais e a combustão de gás liquefeito de petróleo (GLP) nas cozinhas. Já o Escopo 2 engloba as emissões indiretas associadas ao consumo de energia elétrica adquirida de concessionárias, cuja geração é realizada fora dos limites institucionais, mas que resulta em emissões atribuídas à instituição devido ao seu consumo.

Para os valores do Escopo 1, foram aplicados os seguintes fatores de emissão médios, considerando que foram inseridos em planilhas de cada ano, uma vez que houveram pequenas modificações nos fatores de emissão ao longo dos anos:

- Fator de emissão de combustível Diesel: 0,0024 tCO₂e/litro
- Fator de emissão de combustível Etanol: 0,000014 tCO₂e/litro
- Fator de emissão de combustível Gasolina: 0,0018 tCO₂e/litro
- Fator de emissão do GLP: 0,00294 tCO₂e/kg
- Fator de emissão do Gás R410-A: 1,924 tCO₂e/kg
- Fator de emissão do Gás R22 (equivalente ao gás R438-A): 2,059 tCO₂e/kg

Para a análise econômica, foram consideradas duas abordagens possíveis para que uma instituição de ensino superior reduza seu impacto climático: a compensação por meio da compra de créditos de carbono e o investimento direto em ações internas de mitigação. Ambas as estratégias apresentam características distintas em termos de custo, efetividade e impacto institucional, exigindo uma comparação criteriosa baseada na análise de custo-efetividade.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CÁLCULO DA PEGADA DE CARBONO

A partir dos dados de consumo de combustível, gás liquefeito de petróleo (GLP) e gases refrigerantes referentes ao período de 2018 a 2022, foram registrados os seguintes totais:

- Combustíveis para transporte (litros): 1.140.614,82, sendo 714.426,03 litros de óleo diesel, 315.729,20 litros de etanol comum e 110.459,58 litros de gasolina comum;
- GLP utilizado nas cozinhas institucionais (kg): 601 botijões, correspondendo a 7.813kg.;
- Gás refrigerante R410A: 113 garrafas com conteúdo entre 11,3 e 13,6kg, totalizando 1.440,20kg;
- Gás refrigerante R22: 199 garrafas de 13,6kg, totalizando 2.706,40kg.

Aplicando a equação 1, se tem-se os seguintes resultados nos Quadros 1, 2 e 3:

Quadro 1 – Análise do fator de emissão de combustível ao longo do período em estudo

Ano	Tipo	Consumo de Combustível (A_i em litros)	Fator de Emissão (F_i) t CO ₂ e/litro	Cálculo ($E = A_i \times F_i$)	Emissões de GEE (E) t CO ₂ e
2018	D	183.641,05	0,0024	$E = 183.641,05 \times 0,0024$	440,73
	E	38.075,73	0,000014	$E = 38.075,73 \times 0,000014$	0,53
	G	96.457,84	0,0018	$E = 96.457,84 \times 0,0018$	173,62
2019	D	186.253,37	0,0024	$E = 186.253,37 \times 0,0024$	447,00
	E	141.681,40	0,000014	$E = 141.681,40 \times 0,000014$	1,98
	G	9.390,64	0,0018	$E = 9.390,64 \times 0,0018$	16,90
2020	D	71.582,45	0,0024	$E = 71.582,45 \times 0,0024$	171,79
	E	25.779,62	0,000014	$E = 25.779,62 \times 0,000014$	0,36
	G	1.370,49	0,0018	$E = 1.370,49 \times 0,0018$	2,46
2021	D	95.278,80	0,0024	$E = 95.278,80 \times 0,0024$	228,67
	E	12.293,49	0,000014	$E = 12.293,49 \times 0,000014$	0,17
	G	1.809,46	0,0018	$E = 1.809,46 \times 0,0018$	3,25
2022	D	177.670,37	0,0024	$E = 177.670,37 \times 0,0024$	426,40
	E	97.898,96	0,000014	$E = 97.898,96 \times 0,000014$	1,37
	G	1.431,15	0,0020	$E = 1.431,15 \times 0,0018$	2,57
Total		1.140.614,82	—	---	1.917,80

Fonte: Elaboração própria (2025).

Quadro 2 – Análise do fator de emissão do GLP ao longo do período em estudo

Ano	Consumo de GLP (A_i em kg)	Fator de Emissão (F_i) t CO ₂ e/kg	Cálculo ($E = A_i \times F_i$)	Emissões de GEE (E) t CO ₂ e
2018	115	0,0029	$E = 115 \times 0,0029$	0,33
2019	147	0,0029	$E = 147 \times 0,0029$	0,43
2020	124	0,0029	$E = 124 \times 0,0029$	0,36

Ano	Consumo de GLP (A _i em kg)	Fator de Emissão (F _i) t CO ₂ e/kg	Cálculo (E = A _i × F _i)	Emissões de GEE (E) t CO ₂ e
2021	96	0,0029	E = 96 × 0,0029	0,28
2022	119	0,0029	E = 119 × 0,0029	0,35
Total	601	—	E = Σ(A _i × F _i) = 601 × 0,0029	1,75

Fonte: Elaboração própria (2025).

Quadro 3 - Análise do fator de emissão de Gás Refrigerante ao longo do período em estudo

Ano	Gás	Consumo de Gás (A _i em kg)	Fator de Emissão (F _i) t CO ₂ e/kg	Cálculo (E = A _i × F _i)	Emissões de GEE (E) t CO ₂ e
2018	R-438A	1.931,20	2,059	E = 1.931,20 × 2,059	3.976,34
	R-410A	110,90	1,924	E = 110,90 × 1,924	213,37
2019	R-438A	136,00	2,059	E = 136,00 × 2,059	280,02
	R-410A	133,50	1,924	E = 133,50 × 1,924	256,85
2020	R-438A	149,60	2,059	E = 149,60 × 2,059	308,02
	R-410A	412,20	1,924	E = 412,20 × 1,924	793,07
2021	R-438A	136,00	2,059	E = 136,00 × 2,059	280,02
	R-410A	190,40	1,924	E = 190,40 × 1,924	366,33
2022	R-438A	353,60	2,059	E = 353,60 × 2,059	728,06
	R-410A	593,20	1,924	E = 593,20 × 1,924	1.141,31
Total	---	4.146,60	—	---	8.343,39

Fonte: Elaboração própria (2025).

Entende-se que as emissões totais do Escopo 1 somam 10.262,94 toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) no período analisado. A maior parte dessas emissões (81,3%) está relacionada ao consumo de gases refrigerantes utilizados em equipamentos como aparelhos de ar-condicionado, refrigeradores e geladeiras. Em seguida, observam-se as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis em veículos utilizados nas atividades institucionais, representando 18,68% do total.

Embora em menor proporção, ressalta-se a importância de a instituição adotar medidas internas voltadas à mobilidade sustentável, como a substituição gradual da frota por veículos elétricos ou híbridos, além da otimização de rotas e deslocamentos. Cabe destacar que a Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão do Estado de Mato Grosso determinou, a partir de 2019, o abastecimento obrigatório com etanol em veículos flex de toda a frota oficial, sejam locados ou próprios. Essa medida atende tanto à demanda ambiental quanto à econômica, visto que o etanol, além de ser menos poluente, geralmente apresenta melhor relação custo-benefício do que a gasolina no contexto mato-grossense.

Por outro lado, o consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP), embora represente uma fração mínima do total (<0,02%), também constitui uma fonte de emissão, especialmente em unidades com alta demanda de serviços de alimentação.

Avançando para o Escopo 2, este abrange as emissões indiretas de GEE resultantes da compra e do consumo de energia elétrica gerada fora dos limites institucionais, mas atribuídas à universidade em razão de seu uso. Essas emissões são relevantes, pois refletem a dependência da instituição em relação à matriz energética nacional e à sua composição de fontes renováveis e não renováveis.

No período de 2018 a 2022, o consumo total de energia elétrica da universidade foi de 26.188,21 MWh. Para o cálculo das emissões, utilizou-se fatores de emissão específicos do contexto brasileiro. Nesse período, o fator médio de emissão de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) da energia elétrica consumida no Sistema Interligado Nacional (SIN) apresentou variações significativas, influenciadas principalmente pelas condições hidrológicas e pela participação das usinas termelétricas na matriz elétrica. Aplicando a mesma fórmula do *GHG Protocol*, obtém-se:

Quadro 4 - Análise do fator de emissão da energia elétrica ao longo do período em estudo

Ano	Consumo de Energia (A _i em MWh)	Fator de Emissão (F _i) t CO ₂ e/MWh	Cálculo (E = A _i × F _i)	Emissões de GEE (E) t CO ₂ e
2018	7.044,83	0,0740	E = 7.044,83 × 0,0740	521,31
2019	6.567,48	0,0750	E = 0 × 0,0750	492,56
2020	3.830,17	0,0617	E = 3.830,17 × 0,0617	236,32
2021	3.654,93	0,1264	E = 3.654,93 × 0,1264	461,98
2022	5.090,80	0,0426	E = 5.090,80 × 0,0426	216,86
Total	26.188,21	—	---	1.929,03

Fonte: Elaboração própria (2025).

As emissões totais de GEE associadas ao consumo de energia elétrica (Escopo 2) somaram aproximadamente 1.436,47 toneladas de CO₂ equivalente no período de cinco anos. Embora esse valor seja inferior ao do Escopo 1, representa uma parcela relevante das emissões totais da instituição e evidencia o potencial de redução por meio da adoção de estratégias de eficiência energética e do investimento em fontes renováveis, como a geração solar fotovoltaica. Além disso, medidas como substituição de lâmpadas por modelos *led*, sistemas automatizados de controle de consumo e sensibilização da comunidade acadêmica para o uso consciente da energia podem

contribuir significativamente para a diminuição desse indicador ao longo do tempo, conforme demonstrado nos estudos de Sadalla (2019).

4.2 ANÁLISE ECONÔMICA

A aquisição de créditos de carbono representa uma solução prática e imediata para a neutralização das emissões. O mercado voluntário de carbono apresenta uma faixa de preços variável, influenciada por fatores como o tipo de crédito (redução ou remoção), a localização do projeto e a certificação envolvida. De acordo com os dados de mercado referentes ao período da pesquisa, os valores oscilaram de R\$ 45,00 a R\$ 100,00 por tonelada de CO₂e no mercado voluntário, enquanto no mercado regulado ultrapassaram R\$ 400,00 por tonelada. Considerando uma média conservadora de R\$ 60,00/tCO₂e e o total de emissões apuradas neste estudo (12.191,97 tCO₂e, somando os Escopos 1 e 2), o custo estimado para a compensação integral seria de aproximadamente R\$ 731.518,20. Essa alternativa apresenta a vantagem de ter baixo custo inicial por tonelada compensada, sendo, portanto, financeiramente mais acessível no curto prazo.

Por outro lado, as estratégias internas de mitigação - como a instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica, a implementação de programas de eficiência energética e o plantio de árvores nos câmpus -, embora demandem investimentos iniciais mais elevados, proporcionam benefícios mais amplos e duradouros. Por exemplo, a implantação de um sistema fotovoltaico institucional com capacidade para reduzir cerca de 500 tCO₂e por ano pode exigir um investimento aproximado de R\$ 1.500.000,00. Aplicando-se a fórmula de custo-efetividade, obtém-se um resultado de R\$ 3.000,00 por tCO₂e, ou seja, um custo unitário superior ao apresentado pela compra de créditos de carbono. Entretanto, é importante considerar que essa redução ocorre de forma recorrente, ano após ano, e que o sistema possui vida útil superior a 20 anos, o que dilui o investimento ao longo do tempo, além de gerar economia direta na conta de energia elétrica da instituição.

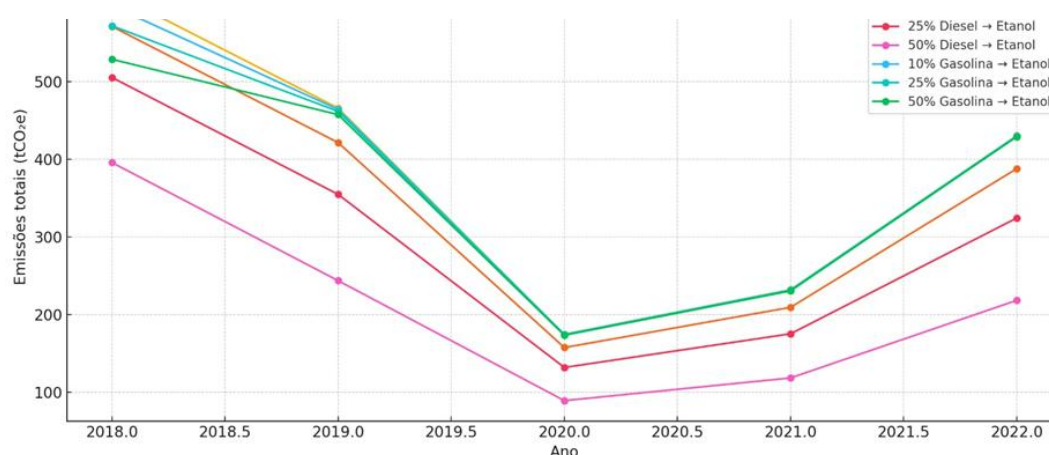
Outra possibilidade analisada refere-se à substituição de 50% do diesel e da gasolina consumidos pela universidade por etanol, o que resultaria em impactos econômicos e ambientais relevantes. Nessa análise, valores negativos indicam economia adicional à redução das emissões. A Figura 1 apresenta a projeção de alguns cenários considerando essa substituição.

Cenário 1: Substituição de 50% do diesel por etanol

Economia financeira total: R\$ 607.262,13

Redução total de emissões: 1.010,4 tCO₂eCusto-efetividade: – R\$ 601,01 por tonelada evitada de CO₂**Cenário 2:** Substituição de 50% da gasolina por etanol

Economia financeira total: R\$ 110.459,58

Redução total de emissões: 68,8 tCO₂eCusto-efetividade: – R\$ 1.605,52 por tonelada evitada de CO₂**Figura 1** - Cenários de Substituição de Combustíveis e Impacto nas Emissões

Fonte: elaborado pelo autor

A análise de custo-efetividade demonstra que a compra de créditos de carbono é a alternativa economicamente mais viável no curto prazo, especialmente em contextos de restrição orçamentária ou diante da necessidade de cumprir metas de compensação imediatas. No entanto, as estratégias internas de mitigação, embora exijam um investimento inicial mais elevado, revelam-se mais vantajosas a longo prazo, pois combinam retorno financeiro, redução estrutural das emissões e ganhos simbólicos e institucionais, como o fortalecimento da imagem da universidade perante a sociedade e a consolidação de uma cultura de sustentabilidade entre seus membros.

Assim, a resposta à pergunta proposta não é estritamente binária, uma vez que a viabilidade econômica depende do horizonte temporal considerado. Quando o objetivo é alcançar a neutralização imediata, a aquisição de créditos de carbono apresenta melhor relação custo-benefício. Contudo, se a meta é estabelecer uma política institucional sustentável, com efeitos contínuos e estruturantes, as estratégias internas de mitigação mostram-se mais adequadas. Dessa forma, recomenda-se a adoção de uma abordagem híbrida, que combine a compensação por meio do mercado de carbono com

investimentos graduais em soluções internas, promovendo uma trajetória de sustentabilidade equilibrada, consistente e economicamente racional.

4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Em primeiro lugar, considerou-se a oscilação dos preços dos créditos de carbono no mercado voluntário e regulado. Como esses valores não são fixos, simularam-se diferentes cenários de custo por tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂e), variando entre R\$ 45,00 e R\$ 100,00. O objetivo foi calcular o custo total necessário para compensar as 12.191,97 tCO₂e emitidas pela instituição (soma dos escopos 1 e 2). Os resultados estão dispostos no quadro 5:

Quadro 5 - Variação no Preço dos Créditos de Carbono e Custo Total de Compensação

Preço crédito de carbono (R\$/tCO₂e)	Custo total para compensar (R\$)
45,00	R\$ 548.638,65
60,00	R\$ 731.518,20
75,00	R\$ 914.397,75
90,00	R\$ 1.097.277,30
100,00	R\$ 1.219.197,00

Fonte: elaborado pelo autor.

Os dados revelam que, mesmo que haja um aumento expressivo no preço por tonelada creditada, o custo total da compensação via mercado voluntário continua relativamente acessível. Por exemplo, mesmo no cenário mais caro (R\$ 100/tCO₂e), o custo total de neutralização permanece inferior a R\$ 1,22 milhões, o que demonstra a atratividade econômica da compensação externa no curto prazo. Ainda assim, o cenário mais caro tende a não se concretizar, visto os dados de preços praticados, atualmente, na plataforma MSCI *Carbon Markets* (2025).

Em contrapartida, foi simulada a variação nos custos de implementação de tecnologias internas de mitigação. Considerando um projeto que proporcione a redução anual de 500 tCO₂e, foram analisados investimentos que vão de R\$ 1.000.000,00 a R\$ 2.000.000,00, a fim de calcular o custo-efetividade (CE) por tonelada reduzida. O quadro 6 apresenta os resultados:

Quadro 6 - Variação no Custo de Tecnologias Internas e Análise de Custo-Efetividade

Custo de implantação (R\$)	Redução estimada (tCO₂e/ano)	CCE (R\$/tCO₂e)
1.000.000,00	500	2.000,00
1.250.000,00	500	2.500,00
1.500.000,00	500	3.000,00
1.750.000,00	500	3.500,00
2.000.000,00	500	4.000,00

Fonte: elaborado pelo autor.

Verifica-se que, mesmo em seu cenário mais econômico, o custo por tonelada de CO₂ evitada por meio de medidas internas (R\$ 2.000,00/tCO₂e) permanece superior ao custo médio dos créditos de carbono disponíveis no mercado, que varia de R\$ 45,00 a R\$ 100,00. Contudo, é importante ponderar que as tecnologias de mitigação interna proporcionam reduções permanentes e recorrentes ao longo dos anos, enquanto os créditos de carbono precisam ser adquiridos continuamente, o que pode comprometer a sustentabilidade financeira no longo prazo. Além disso, as ações internas geram benefícios colaterais relevantes, como a economia operacional - exemplificada pela redução na conta de energia elétrica -, o fortalecimento da imagem institucional perante a sociedade e o alinhamento com as diretrizes de *Environmental, Social and Governance* (ESG).

A análise de sensibilidade confirma que a compra de créditos de carbono é economicamente mais viável no curto prazo, mesmo diante de possíveis aumentos no valor de mercado. Por outro lado, as medidas internas de mitigação, embora apresentem custos iniciais mais elevados, configuram-se como alternativas sustentáveis e estratégicas em médio e longo prazos, especialmente quando associadas a um planejamento técnico consistente e à utilização de incentivos públicos ou linhas de financiamento verde.

Esses resultados reforçam a recomendação de uma abordagem híbrida, que combine compensações imediatas via mercado de carbono com investimentos graduais em soluções internas. Considerando que a média das emissões dos cinco anos analisados corresponde a aproximadamente 2.350 tCO₂e por ano, a Figura 2 apresenta

uma representação ilustrativa do que esse valor equivale e quais medidas seriam necessárias para compensar tais emissões médias.

Figura 2 - Equivalências e Compensações para 2.350 tCO₂e/ano-1



Fonte: Elaboração própria (2025) utilizando dados da pesquisa. Representação gráfica gerada por inteligência artificial.

4.4 PRODUTOS GERADOS

Como forma de contribuir para o Planejamento Estratégico da Instituição, com base nos dados desta pesquisa, apresenta-se uma matriz SWOT (Figura 3) que poderá ser debatida e inserida no próximo planejamento estratégico da IES.

Figura 3 - Proposição de uma matriz SWOT para inserção no próximo planejamento estratégico da IES



Fonte: Elaboração própria (2025).

Considerando a matriz SWOT elaborada, foi desenvolvido um aplicativo *cross-platform* denominado “Carbon-U – Calculadora de Emissões de Carbono” (<https://calc-carbono.vercel.app/>) que será disponibilizado gratuitamente à instituição de ensino superior. O objetivo é permitir que a comunidade acadêmica tenha acesso a uma ferramenta prática para calcular suas próprias emissões, compreendendo de forma mais clara como o modo de vida, o consumo e as atividades desenvolvidas impactam na geração de CO₂e, além de identificar ações que possam contribuir para a redução desses impactos. Espera-se que, com essa iniciativa, haja maior engajamento da comunidade e adoção de práticas cotidianas que favoreçam a implementação efetiva de medidas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A quantificação da pegada de carbono em uma universidade pública estadual, aliada à modelagem econômica, constitui uma ferramenta eficaz para subsidiar a tomada de decisões estratégicas voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas, no âmbito da instituição. A metodologia do *GHG Protocol* é aplicável e permitiu, com eficiência, identificar as principais fontes de emissão - especialmente o consumo de combustíveis fósseis e as emissões fugitivas (Escopo 1), bem como a energia elétrica adquirida (Escopo 2) - e calcular o total de emissões entre os anos de 2018 e 2022, que somaram aproximadamente 12.191,97 toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e).

Ainda que esse valor possa estar subestimado pela ausência de dados sobre consumo de água, esgoto, viagens aéreas institucionais e deslocamentos casa-trabalho da comunidade acadêmica, caracterizando uma limitação desta pesquisa, é fundamental que a universidade adote, futuramente, a coleta sistemática dessas informações. Para isso, recomenda-se que os dados de água e esgoto sejam registrados por cada câmpus, por meio dos setores de patrimônio; que as informações sobre viagens aéreas institucionais sejam centralizadas nos setores de compras ou transporte; e que as emissões relacionadas ao deslocamento casa-trabalho sejam obtidas semestralmente via sistema acadêmico, por meio de uma tela de preenchimento obrigatório após o login.

A análise econômica permitiu comparar duas abordagens de mitigação: a aquisição de créditos de carbono e a implementação de medidas internas, como a instalação de sistemas fotovoltaicos, a adoção de programas de eficiência energética e a substituição da frota de veículos, priorizando modelos flex abastecidos com etanol. A

troca do diesel por etanol mostrou-se altamente vantajosa, reduzindo mais de 1.000 toneladas de CO₂ ao longo de cinco anos e gerando economia superior a R\$ 600 mil para a instituição. A substituição da gasolina por etanol também proporciona economia e redução de emissões, embora com impacto ambiental menor, devido ao volume inferior de gasolina utilizado. Em ambos os casos, o custo por tonelada de CO₂ evitado é negativo, o que significa que a instituição obtém ganho financeiro simultaneamente à redução de sua pegada de carbono.

Os resultados indicaram que, no curto prazo, a compra de créditos de carbono representa a alternativa financeiramente mais viável, com custo médio por tonelada reduzida variando de R\$ 45,00 a R\$ 100,00. No entanto, em uma perspectiva de longo prazo, as estratégias internas, apesar dos maiores custos iniciais, demonstraram-se mais sustentáveis, recorrentes e alinhadas aos objetivos institucionais de responsabilidade socioambiental.

A análise de sensibilidade reforçou essa constatação, evidenciando que, embora o custo por tonelada evitada em estratégias internas seja significativamente superior ao dos créditos de carbono, tais ações produzem benefícios permanentes, como autonomia energética, economia operacional e fortalecimento da imagem institucional. Assim, recomenda-se a adoção de uma abordagem híbrida, que combine compensações via mercado de carbono com investimentos graduais em soluções internas, promovendo uma transição sustentável e financeiramente equilibrada.

Para pesquisas futuras, sugere-se ampliar a análise de modo a incluir o Escopo 3, contemplando dados sobre viagens aéreas institucionais, consumo de água, esgoto, gestão de resíduos sólidos e deslocamentos casa-universidade-casa de estudantes e servidores. Essa ampliação permitirá a elaboração de inventários mais completos e precisos. Além disso, estudos comparativos entre diferentes instituições públicas de ensino superior poderão aprofundar o debate sobre as melhores práticas de gestão climática, contribuindo para a formulação de políticas públicas e estratégias nacionais de descarbonização no setor educacional.

Por fim, recomenda-se à gestão institucional da universidade a elaboração de um plano de transição energética, a incorporação do diagnóstico da matriz SWOT no próximo ciclo de planejamento estratégico, e a ampliação do uso do aplicativo desenvolvido, acompanhada de campanhas de conscientização sobre emissões, de modo a promover a neutralização das emissões institucionais e o alinhamento das

práticas da instituição ao que estabelece o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

REFERÊNCIAS

ARASTEH, M. A.; FARJAMI, Y. New hydro-economic system dynamics and agent-based modeling for sustainable urban groundwater management: A case study of Dehno, Yazd Province, Iran. **Sustainable Cities and Society**, v. 72, p. 103078, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721003620>. Acesso em: 01 abr. 2025.

BAUTISTA-PUIG, N.; SANZ-CASADO, E. Sustainability practices in Spanish higher education institutions: An overview of status and implementation. **Journal of cleaner production**, v. 295, p. 126320, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126320>. Acesso em: 05 abr. 2025.

BISINOTO, G. D. S.; VIANA, C. R. S.; PEREIRA, T. F.; NASCIMENTO, N. T. A.; ZANIN, R. B.; OLIVEIRA JUNIOR, E. S. Global panorama of carbon credit research: from the seed of Kyoto to the winds of COP28. **REVISTA OBSERVATORIO DE LA ECONOMIA LATINOAMERICANA**, 23(1), 2024, p. 01-32. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv23n1-031>. Acesso em: 16 abr. 2025.

BRASIL. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); D.O.U de 12/12/2024, pág. nº 4. 2024. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-15.042-de-11-de-dezembro-de-2024-601124199>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BRASIL. **Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil ao Acordo de Paris**. Ministério do Meio Ambiente, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris/brazils-ndc.pdf/>. Acesso em: 15 mai. 2025.

BRITO, F. A. **Potencial econômico de créditos de carbono**: O uso de APPs para rentabilização das propriedades rurais no Rio Grande do Sul. 2024. 42 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/11424/2/FREDERICO_APOLLO_BRITO_DI_S.pdf. Acesso em: 03 abr. 2025.

CANO, N.; BERRIO, L.; CARVAJAL, E.; ARANGO, S. Assessing the carbon footprint of a Colombian University Campus using the UNE-ISO 14064–1 and WRI/WBCSD GHG Protocol Corporate Standard. **Environmental Science and Pollution Research**, 2023, 30.2: 3980-3996. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/S11356-022-22119-4>. Acesso em: 16 jun. 2025.

CARVALHO, A. L.; NÓBREGA, B. G.; BARROS, N. V.; ARRUDA, F.S. de. Diagnóstico das emissões de CO₂ a partir dos deslocamentos dos estudantes da Universidade de Brasília. **Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia – REPAE**, Brasília, DF, v. 1, n. 2, p. 122–129, ago. 2017. Disponível em: <https://gctnt.unb.br/publicacoes->

[em-revistas/repae?download=19%3Adiagnostico-das-emissoes-de-co2-a-partir-dos-deslocamentos-dos-estudantes-da-universidade-de-brasil](#). Acesso em: 12 abr. 2025.

CRUZ, U. D. B. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa e estratégias de mitigação em instituições de ensino superior: o caso da Universidade Federal de Sergipe**. 2020. 265 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Bahia. Disponível em:

<https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/35620/1/Ulysses%20de%20Brito%20Cruz.pdf>.

Acesso em: 18 mar. 2025.

DE SOUSA, M. M.; MARTINS, S.; OZÓRIO MELO, S. A.; DE ALMEIDA, F. A. S.

Neutralidade do carbono, procedimentos ambientais de redução de gases e o

aquecimento global: um estudo de caso das empresas ambev e bunge. **Revista Ibero-Americana de Humanidades**. Ciências e Educação, 10(07), p. 1746–1757, 2024.

Disponível em: <https://doi.org/10.51891/revise.v10i7.14911>. Acesso em: 10 fev. 2025.

DINIZ, E. H.; YAMAGUCHI, J. A.; SANTOS, T.R. dos; CARVALHO, A. P. de; ALÉGO, A. S.; CARVALHO, M. Greening inventories: Blockchain to improve the GHG Protocol Program in scope 2. **Journal of Cleaner Production**, 291, 125900, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621001207>. Acesso em:

04 abr. 2025.

DUARTE, M.; CAEIRO, S. S.; FARINHA, C. S.; MOREIRA, A.; SANTOS-REIS, M.; RIGUEIRO, C.; SIMÃO, J. Integration of sustainability in the curricula of public higher education institutions in Portugal: do strategic plans and self-report align?

International Journal of Sustainability in Higher Education, v. 24, n. 9, p. 299-317,

2023. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ijshe-01-2023-0001/full/html>. Acesso em: 12 mar. 2025.

FILIMONAU, V.; ARCHER, D.; BELLAMY, L.; SMITH, N.; WINTRIP, R. The carbon footprint of a UK University during the COVID-19 lockdown. **Science of The Total Environment**, 756, 143964, 2021. Disponível em

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143964>. Acesso em: 12 set. 2025.

FOURÉ, J.; DELLINK, R.; LANZI, E.; PAVANELLO, F. Public finance resilience in the transition towards carbon neutrality: Modelling policy instruments in a global net-zero emissions (nº. 214). **OECD Publishing**, 2023. Disponível em:

<https://dx.doi.org/10.1787/7f3275e0-en>. Acesso em: 21 jan. 2025.

GHG PROTOCOL. **About Us. GHG Protocol**, s.d. Disponível em:

<https://ghgprotocol.org/about-us>. Acesso em: 12 mai. 2025.

GODOY, S. G. M.; SAES, M. S. M. Cap-and-trade e projetos de redução de emissões: Comparativo entre mercados de carbono, evolução e desenvolvimento. **Ambiente & Sociedade**, 18(1), p. 141–160, 2015. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/asoc/a/qjksxKdKbqDX9bs7DjShvhs/?format=pdf&lang=pt> .

Acesso em: 15 mar. 2025.

HAVANA, S. Case studies in greenhouse gas protocol implementation: lessons from industry leaders. **Oil & Gas Research**, [S.l.], v. 11, n. 2, p. 389-397, 2025. Disponível

em: <https://www.omicsonline.org/open-access/case-studies-in-greenhouse-gas-protocol-implementation-lessons-from-industry-leaders.pdf>. Acesso em: 12 maio 2025.

HERNÁNDEZ-DÍAZ, P. M.; POLANCO, J.A.; ESCOBAR-SIERRA, M.; FILHO, W. L. Holistic integration of sustainability at universities: Evidences from Colombia. **Journal of Cleaner Production**, v. 305, p. 127145, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621013640>. Acesso em 03 mar. 2025.

IPCC, 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, p. 35-115. Disponível em: <https://10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>. Acesso em: 10 dez. 2024.

LAMENZA, A.; DA SILVA PEREIRA, R.; BRAGA JUNIOR, S. Comercialização e Gestão de Projetos de Créditos de Carbono no Brasil. **Revista de Administração da Unimep**, 15(1), p. 100-127, 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/2737/273750689005.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.

LOZANO, R.; MERRILL, M. Y.; SAMMALISTO, K.; CEULEMANS, K.; LOZANO, F. J. (2017). Connecting competences and pedagogical approaches for sustainable development in higher education: A literature review and framework proposal. **Sustainability**, 9(10), 1889. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/10/1889/pdf>. Acesso em: 12 mar. 2025.

MARQUES, J. F. S.; SANTOS, Â. V.; ARAGÃO, J. M. C. Planejamento e sustentabilidade em instituições de ensino superior à luz dos objetivos do desenvolvimento sustentável. **REUNIR Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade**, v. 10, n. 1, p. 14-29, 2020. Disponível em: <http://www.reunir.revistas.ufcg.edu.br/index.php/uacc/article/view/1052>. Acesso em: 18 fev. 2025.

MARTINS, L. O. S., SILVA, L. T., CARNEIRO, R. A. F.; VELAME, J. L. Análise da viabilidade econômica e financeira da implantação de usina de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no município de Santo Antônio de Jesus – BA. **Almanaque Multidisciplinar de Pesquisa**, 1(2), p. 152-176, 2016. Disponível em: <https://granrio.emnuvens.com.br/amp/article/download/3930/2269>. Acesso em: 06 abr. 2025.

MEMBRILLO-HERNÁNDEZ, J.; LARA-PRIETO, V.; CARATOZZOLO, P. **Sustainability**: A public policy, a concept, or a competence? Efforts on the implementation of sustainability as a transversal competence throughout higher education programs. **sustainability**, v. 13, n. 24, p. 13989, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/24/13989>. Acesso em: 05 abr. 2025.

MENESES, T. C.; PORTELLA, B. S.; BENVENUTI, M. F. L. Análise quantitativa do comportamento: possíveis interfaces entre Psicologia e Economia no estudo de tomada de decisões. **Revista Brasileira de Terapia Comportamental e Cognitiva**, v. 23, p. 1-19, 2021. Disponível em: <https://rbtcc.com.br/RBTCC/article/view/1518>. Acesso em: 18 de fev. 2025.

MERAJ, G.; KANGA, S.; KRANJČIĆ, N.; DURIN, B.; SINGH, S. K. Role of natural capital economics for sustainable management of earth resources. **Earth**, v. 2, n. 3, p. 622-634, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4834/2/3/36>. Acesso em: 28 jan. 2025.

MOHIUDDIN, M.; HOSSEINI, E.; FARADONBEH, S. B.; SABOKRO, M. Achieving human resource management sustainability in universities. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 2, p. 928, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/2/928>. Acesso em: 05 abr. 2025.

MSCI Carbon Markets, **Investment Trends and Outcomes in the Global Carbon-Credit Market**. Disponível em: <https://www.msci.com/www/research-report/investment-trends-and-outcomes/05113551284>. Acesso em: 15 fev. 2025.

MYTTON, D. Assessing the suitability of the Greenhouse Gas Protocol for calculation of emissions from public cloud computing workloads. **Journal of cloud computing**, 9(1), 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13677-020-00185-8>. Acesso em: 08 abr. 2025.

RIDHOSARI, B.; RAHMAN, A. Carbon footprint assessment at Universitas Pertamina from the scope of electricity, transportation, and waste generation: toward a green campus and promotion of environmental sustainability. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 246, p. 119172, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619340429>. Acesso em: 12 mai 2025.

SADALLA, B. A. **Destinação de resíduos eletroeletrônicos em instituições de ensino superior do Estado de São Paulo: práticas adotadas na USP, UNICAMP e UFSCar**. 2019. 152 f. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=500859>. Acesso em: 04 abr. 2025.

SAMPAIO, J. O.; DE-LOSSO, R. **Estimando o Custo de Capital**. Fipe, Temas de Economia Aplicada, 2020. Disponível em: <https://downloads.fipe.org.br/publicacoes/bif/bif477-31-37.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2025.

SCHALTEGGER, S.; CHRIST, K. L.; WENZING, J.; BURRITT, R. L. Corporate sustainability management accounting and multi-level links for sustainability—A systematic review. **International journal of management reviews**, 24(4), p. 480-500, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijmr.12288>. Acesso em: 19 jan. 2025.

SCHLEMER ALCANTARA, L. C.; SAMPAIO, C. A. C. Avaliação de Impacto Eossocioeconômico da Pós-Graduação Brasileira. **Historia Ambiental Latinoamericana Y Caribeña (HALAC)** Revista De La Solcha, 14(3), p. 420–460, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.32991/2237-2717.2024v14i3.p420-460>. Acesso em: 23 set. 2025.

SILVA, J.A. **Inventário de gases de efeito estufa conforme o programa brasileiro GHG Protocol e ISO 14064:2007**. Estudo de caso: secagem de argilominerais. UNESCO, 2023. Disponível em: <http://200.18.15.28/handle/1/9786>. Acesso em: 28 fev. 2025.

SILVEIRA, C. S. da; OLIVEIRA, L. de. Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. **Novos Cadernos NAEA**, 24(3), p. 11-31, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/download/9354/8099>. Acesso em: 23 set. 2025.

SUCHIKOVA, Y.; NESTORENKO, T.; CHERNIAKOVA, Z.; KAPLUNOVSKA, A.; KOINASH, M. The Impact of Displaced Universities on Society: Social and Economic Transformations. **Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології**, 6 (140), p. 385-395, 2024. Disponível em: <https://dspace.bdu.org.ua/handle/123456789/4571>. Acesso em: 05 mar. 2025.

VALLS-VAL, K.; BOVEA, M. D. Carbon footprint assessment tool for universities: CO2UNV. **Sustainable Production and Consumption**, 29, p. 791-804, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235255092100333X>. Acesso em: 12 abr. 2025.

VIEIRA, B. E., OLIVEIRA, J. G. A., & SUGAHARA, R. N. A life-cycle intergenerational model considering social security. **Brazilian Keynesian Review**, 9(1), 128-157, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33834/bkr.v9i1.286>. Acesso em: 15 jun. 2025.

WANG, C.; PARVEZ, A. M.; MOU, J.; QUAN, C.; WANG, J.; ZHENG, Y.; LUO, X.; WU, T. The status and improvement opportunities towards carbon neutrality of a university campus in China: A case study on energy transition and innovation perspectives. **Journal of Cleaner Production**, 414, 137521, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137521>. Acesso em: 28 jan. 2025.

WORLD BANK. **State and Trends of Carbon Pricing 2022**. Washington, DC: World Bank Group, 2022. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI); WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard**. Washington, DC: WRI, 2001. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2025.

ZHANG, R.; HANAOKA, T. Deployment of electric vehicles in China to meet the carbon neutral target by 2060: Provincial disparities in energy systems, CO2 emissions, and cost effectiveness. **Resources, Conservation and Recycling**, 170, 105622, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105622>. Acesso em: 30 jan. 2025.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A consolidação do mercado de créditos de carbono como instrumento legítimo de mitigação das mudanças climáticas requer mais do que mecanismos de compensação baseados unicamente na lógica de mercado. Apesar dos avanços científicos e regulatórios obtidos nas últimas décadas, ainda persistem desafios estruturais que comprometem a eficácia, a equidade e a integridade ambiental desses instrumentos.

O crescente interesse acadêmico sobre o tema, evidenciado pelo aumento de publicações e pela sua crescente internacionalização, demonstra que os créditos de carbono ocupam um papel central na agenda climática contemporânea. Contudo, a literatura também alerta para riscos relevantes, como a fragilidade dos sistemas de rastreabilidade, a fragmentação normativa e o uso indevido dos mecanismos de compensação como justificativa para adiar transformações estruturais ou como mero salvo-conduto ambiental. A governança climática global ainda carece de padrões robustos e mecanismos que garantam a rastreabilidade, a adicionalidade e a permanência das reduções de emissões.

No contexto brasileiro, embora a promulgação da Lei nº 15.042/2024 represente um marco institucional relevante, seu alcance ainda é limitado. A ausência de metas objetivas, a exclusão de setores estratégicos, a dependência de regulamentações futuras e a fragilidade dos mecanismos de verificação podem comprometer a credibilidade do sistema nacional nas etapas seguintes de implementação. Tais lacunas reforçam a necessidade de uma regulamentação mais abrangente, tecnicamente embasada e socialmente justa, que considere as especificidades regionais e setoriais, tendo o meio ambiente como beneficiário e finalidade última das ações.

A análise da dinâmica do carbono orgânico do solo evidenciou que o estado de Mato Grosso detém um patrimônio ambiental valioso, cuja conservação e manejo sustentável são fundamentais para o sequestro de carbono. Essa contribuição, entretanto, só será efetiva mediante a implementação de sistemas de monitoramento confiáveis, políticas de uso da terra sustentáveis e valorização econômica dos serviços ecossistêmicos.

Além do eixo normativo, os resultados demonstraram que a tomada de decisão em torno da neutralização de emissões - como observado no estudo de caso de uma universidade pública estadual - deve considerar não apenas a relação custo-benefício, mas também os impactos institucionais e estratégicos de longo prazo. Estratégias

internas de mitigação, quando planejadas de forma técnica e integrada, mostram-se economicamente viáveis, além de promoverem autonomia energética, inovação e consolidação de uma cultura ambiental organizacional.

Nesse sentido, o objetivo desta tese foi atendido, contribuindo diretamente para o alcance da Meta 13.2 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), ao fomentar a integração de medidas de mitigação das mudanças climáticas em políticas, estratégias e planejamentos institucionais e nacionais. Ao analisar os créditos de carbono sob múltiplas perspectivas - científica, regulatória, ambiental e econômica - este trabalho fornece subsídios técnicos e práticos para o fortalecimento da formulação e aprimoramento de políticas públicas voltadas à transição climática no Brasil.

Conclui-se, portanto, que os créditos de carbono devem ser compreendidos como parte de um sistema mais amplo, que articula ciência, política, economia e justiça ambiental. Sozinhos, não resolverão a crise climática. Sua eficácia dependerá da capacidade de países e instituições de alinhar seus sistemas de governança à urgência climática, com integridade técnica, inclusão social e compromisso real com a transição para uma economia de baixo carbono.

O sucesso ou fracasso das políticas e ações derivadas do crédito de carbono dependerá essencialmente da forma como forem compreendidos e aplicados: se forem utilizados como meio econômico para alcançar fins ambientais, há grande possibilidade de êxito; se, ao contrário, forem empregados como meio ambiental para atingir fins econômicos, a probabilidade de fracasso será igualmente grande. Espera-se, portanto, que as lentes da governança climática sigam o primeiro caminho.