UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

BRUNO BORGES FERREIRA

APREENSÃO DE CARBONO EM FLORESTAS DE *Pinus* spp. NO USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL EM SANTA CATARINA

LAGES, SC
2024

BRUNO BORGES FERREIRA

APREENSÃO DE CARBONO EM FLORESTAS DE *Pinus* spp. NO USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL EM SANTA CATARINA

Dissertação apresentada para obtenção total de créditos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo
Coorientador: Prof. Dr. Philipe Ricardo Casemiro Soares

LAGES, SC
2024

BRUNO BORGES FERREIRA

APREENSÃO DE CARBONO EM FLORESTAS DE *Pinus* spp.
NO USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL EM SANTA CATARINA

Dissertação apresentada para obtenção total de créditos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo
Coorientador: Prof. Dr. Philipe Ricardo Casemiro Soares

BANCA EXAMINADORA

Rodrigo Figueiredo Terezo - Doutor
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Fábio Nascimento da Silva – Doutor
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Thiago Meneghel Rodrigues - Doutor
Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

Jean Alberto Sampietro - Doutor
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Lages, 29 de agosto de 2024.

DEDICO

À minha esposa Adriana Pacheco Ferreira, que conviveu comigo todo esse período de idas e vindas, desistências e retomadas do sonho, sentiu de perto esse longo percurso, minhas angustias, minhas incertezas, meus malabarismos para dar conta de tudo e todos, que segurou e cuidou de tudo, zelando e incentivando sempre, estando presente e dando apoio diante das dificuldades, em especial me ajudando com a temida disciplina de estatísticas, por enfim esse trabalho se tornou possível sim, porque ela esteve o tempo todo ao meu lado firme e forte nas horas boas e principalmente nas ruins, dedico à você. Te amo.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo, pela pessoa que és, pelo acolhimento e possibilidade de realização deste trabalho, me dando a oportunidade de retorno ao CAV-Udesc, me estimulando e dando apoio em todos os momentos de dificuldade, além de confiança e compreensão no desenvolvimento neste longo período de angustias, dificuldades, apreensão e busca por resultados, um grande amigo acima de tudo, quero somente desejar vida longa e saúde, deixo meu eterno agradecimento;

À ACR pela oportunidade, de confiar em mim e acreditar que esta pesquisa seria importante para o setor florestal de Santa Catarina.

Ao Sr. Mauro Murara Jr, diretor da ACR, pela oportunidade, incentivo, apoio, compreensão, orientação e parceria em todos os momentos, uma longa jornada com apoio e ensino para tornar possível esse trabalho. Meu eterno agradecimento;

Ao Sr. Alex W. Santos, pelo total apoio de sempre e confiança no meu trabalho, e costumeiro incentivo em estudar sempre, meu muito obrigado.

Ao Professor Dr. Philipe Casemiro Soares, pelas valiosas horas dedicadas de orientação para que tornasse possível essa pesquisa, seu incentivo e confiança desde o início do projeto, e apoio em algumas decisões durante o programa de mestrado e grande amigo que fiz;

Ao Professor Dr. Márcio Carlos Navroski, sem ele, não estaria sendo possível a conclusão deste trabalho, aprendi muito com ele, e sua forma de gerir conflitos e controle de situações, desejo sucesso, saúde e conquistas;

Aos professores Marcos Felipe Nicoletti, André Hess, David Miquelutti, Fábio Nascimento, Jean Sampietro e Valdeci José Costa, todos dos Programas de Pós-Graduação da Udesc-Cav, que de uma forma ou outra contribuíram com valiosos ensinamentos e as sempre costumeiras conversas de incentivo e apoio;

À minha esposa Adriana Pacheco Ferreira e minhas filhas Luíza e Ariella, que são as minhas fontes de inspiração para chegar até aqui, toda conquista é por elas.

Ao meu pai Enedir e minha mãe Terezinha, pela confiança e apoio, e por acreditar que eu chegaria aqui, o sonho que se tornou realidade.

Ao meu irmão André B. Ferreira, que partiu cedo demais deste mundo e seja onde estiver, tenho certeza que guiou o meu caminho, sei que está feliz com essa conquista.

Ao Cássio Leandro Bartz e Irene Melec, pois vocês confiaram em mim ao enviarem a indicação ao programa de mestrado, muito obrigado.

Ao Leônides e Sônia Pacheco, pelo apoio e incentivo sempre.

À Natalia Sasso e Vitória Vinciguera, pelo apoio na formatação do trabalho, das normas ABNT, e revisão final, muito obrigado e sucesso sempre.

Aos colegas de aula e profissão Paulo Furtado e Cleveonei Silva, pela amizade, estudos e compartilhamento de ideias nas disciplinas mais complicadas.

Deixo também o meu carinho e minha gratidão a todos, mesmo que não mencionados, mas que estiveram presente de alguma forma, dando-me o apoio, o sorriso, o ombro amigo, torcendo pela concretização desta proposta; e também os que torceram contra, mas que, de uma forma ou outra não fez eu desistir, e sim me fizeram crescer ainda mais, acreditar mais ainda no meu potencial, muito obrigado!

O HOMEM QUE CALCULAVA

Ele jura essa fé estranha
Na pura solidez das aparências
Ele reza pra suas tabelas
Nos garantirem o dia de amanhã
Ele leva sua calculadora
Junto ao seu coração como um amuleto
Ele olha e ri do infinito
Frente à verdade do que é certo e concreto
Quem perde ou quem ganha
Quem acerta ou apanha
E se o lado que escolho perder
Ficarei eu perdido, o que fazer
Se não tenho escolhas
Ver meus dedos em bolhas
De tanto procurar o botão certo
E tanto calcular pra ver quem sou
O homem que calculava...
1,2,3 o que será de vocês
Ele crê ver átomos em tudo
Ele crê que não há nada além
Ele prega a devoção aos fatos
E vê a vida como um problema exato
Ele crê em relações perfeitas
Mas nunca sobra tempo para comprovar
Que o incerto então será vencido
E a verdade vai deixar se apanhar...

Dados Villa Lobos

RESUMO

APREENSÃO DE CARBONO EM FLORESTAS DE *Pinus* spp.
NO USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL EM SANTA CATARINA

AUTOR: BRUNO BORGES FERREIRA

A viabilidade de crédito de carbono e os mecanismos de compensação em florestas de Pinus em Santa Catarina, demonstram o potencial que essas florestas apresentam como sumidouros de carbono e políticas necessárias para tornar os créditos de carbono uma estratégia. A abordagem metodológica inclui uma análise quantitativa do sequestro de carbono nas florestas de *Pinus*, utilizando equações que consideram variáveis e a coleta de dados inclui uma revisão de literatura. O modelo de cálculo utiliza o valor por m² de massa de carbono encontrado, multiplicado pelo fator 3,67, a metodologia integra cálculos quantitativos de carbono nas florestas de Pinus de Santa Catarina. A quantidade de carbono retido equivale à metade da massa total da madeira. Uma das técnicas de construção com madeira é o uso de Painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (Cross Laminated Timber - CLT). O estudo utiliza uma edificação modelo de 80 m², construída com CLT, sendo, que em *Pinus* ssp europeu, é necessário 25,77 m³ de madeira e *Pinus* spp catarinense, 28,74 m³, a edificação de pinus de 80 m², contém um total de 6.466,5 kg na madeira, ou seja, 23.732,05 de CO2 armazenado em *Pinus spp* catarinense, equivale a um carro a gasolina que emite cerca de 120 g de CO_2 por quilômetro rodado. Os resultados mostraram que as florestas de Pinus em Santa destacam-se seu valor nos esforços de mitigação das mudanças climáticas. A pesquisa estabeleceu a viabilidade e importância dos créditos de carbono, e podem se tornar uma estratégia econômica viável para proprietários florestais e contribuir significativamente para os esforços de mitigação climática da região.

Palavras-chave: Créditos de Carbono. Florestas de Pinus. Santa Catarina. Sequestro de Carbono. Economia Florestal. Análise Swot. Análise de Políticas.

ABSTRACT

CARBON SEQUESTRATION IN PINUS SPP. FORESTS FOR THE USE OF WOOD IN CIVIL CONSTRUCTION IN SANTA CATARINA

AUTHOR: BRUNO BORGES FERREIRA

The viability of carbon credits and compensation mechanisms in Pinus forests in Santa Catarina demonstrates the potential these forests have as carbon sinks, as well as the necessary policies to make carbon credits a viable strategy. The methodological approach includes a quantitative analysis of carbon sequestration in Pinus forests, using equations that consider various factors, along with a literature review for data collection. The calculation model uses the carbon mass value per m² found, multiplied by the factor 3.67, integrating quantitative carbon calculations for Pinus forests in Santa Catarina. The amount of carbon retained is equivalent to half of the total wood mass. One of the wood construction techniques is the use of Cross Laminated Timber (CLT) panels. The study employs a model building of 80 m² constructed with CLT, which requires 25.77 m³ of European Pinus wood and 28.74 m³ of Santa Catarina Pinus wood. The 80 m² Pinus building contains a total of 6,466.5 kg of wood, equivalent to 23,732.05 kg of CO2 stored in Santa Catarina Pinus, which is comparable to a gasoline-powered car emitting about 120 g of CO_2 per kilometer driven. The results show that Pinus forests in Santa Catarina stand out for their value in climate change mitigation efforts. The research establishes the viability and importance of carbon credits, which can become a feasible economic strategy for forest owners and significantly contribute to the region’s climate mitigation efforts.

Keywords: Carbon Credits. Pinus Forests. Santa Catarina. Carbon Sequestration. Forest Economy. SWOT Analysis. Policy Analysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Demonstrativo do Potencial da Pesquisa 10
Tabela 2 - Mecanismos econômicos legais 13
Tabela 3 - Sustentabilidade na estrutura tradicional da indústria do agronegócio 17
Tabela 4 - Impactos Ambiental, Social, Econômico e Regulatório Reflorestamento . 20
Tabela 5 - Atuação do Mercado de Créditos de Carbono na produção sustentável . 24
Tabela 6 - Madeira e seu papel nas estratégias de design urbano 28
Tabela 7 - Implicações do reflorestamento para as mudanças climáticas e a sustentabilidade do ecossistema 33
Tabela 8 - Cronograma 36

LISTA DE ABREVIATURAS

APP	Área de Preservação Permanente
CO2	Dióxido de Carbono
CRA	Cota de Reserva Ambiental
FSC	Forest Stewardship Council
GEE	Gases de Efeito Estufa
Ha	Hectares
Kg	Quilogramas
LEED	Liderança em Energia e Design Ambiental
M^2	Metros quadrados
Mg	Miligramas
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONG	Organização Não Governamental
PNMC	A Política Nacional sobre Mudança do Clima
PPP	Princípio do Poluidor-Pagador
REDD+	Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal
RL	Reserva Legal
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 6
2 OBJETIVOS 7
2.1 Objetivo geral 7
2.2 Objetivos específicos 7
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 8
3.1 Crédito de carbono e redução da emissão de gases 11
3.2 Mercado de crédito de carbono 14
3.3 Desenvolvimento sustentável nas cadeias de produção 18
3.4 Impactos do Mercado de Crédito de Carbono 21
3.5 Contribuição da madeira de *Pinus* na construção civil para a redução do efeito estufa. 25
3.6 Potêncial das florestas plantadas de *Pinus* no estado 29
4 MATERIAIS E MÉTODOS 36
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 39
6 CONCLUSÕES 52
Referências bibliográficas 54

1 INTRODUÇÃO

A taxa alarmante de aquecimento global e mudança climática enfatiza a necessidade de práticas sustentáveis para conter a tendência atual. Uma dessas estratégias promissoras envolve o sequestro de carbono em florestas manejadas, como as florestas de pinus em Santa Catarina, Brasil. Este projeto visa entender o potencial de crédito e compensação de carbono dentro desses ecossistemas e como isso pode contribuir para a sustentabilidade econômica e ambiental.

Embora essas florestas de *pinus* spp apresentem potencialmente uma oportunidade para o sequestro de carbono e a subsequente criação de créditos de carbono, existem vários desafios, como compreender a taxa de absorção de carbono, a contribuição real para a mitigação das mudanças climáticas e os potenciais benefícios ou desvantagens econômicas são questões-chave que precisam ser abordadas de forma abrangente. Além disso, a implementação prática de um sistema de crédito de carbono nessas florestas específicas e o impacto nas comunidades locais e na biodiversidade apresentam questões complexas.

A hipótese que norteia este projeto é que um esquema de crédito e compensação de carbono bem administrado pode contribuir significativamente para o sequestro de carbono nas florestas de pinheiros de Santa Catarina, potencialmente trazendo benefícios econômicos para as comunidades locais e promovendo a sustentabilidade ambiental.

Este projeto é crucial porque conecta sustentabilidade ambiental com viabilidade econômica, uma combinação que pode gerar mudanças de longo prazo. Compreender o potencial das florestas de pinheiros de Santa Catarina para atuar como sumidouros de carbono e o potencial para as comunidades locais se beneficiarem dessas iniciativas poderia catalisar iniciativas semelhantes em outras regiões. Além disso, com o Brasil sendo um contribuinte significativo para as emissões globais de carbono, estudos localizados como este poderiam contribuir para estratégias mais amplas de mitigação das mudanças climáticas.

Esta pesquisa será principalmente uma revisão sistemática da literatura, analisando dados de uma variedade de fontes, como artigos acadêmicos, documentos de políticas, estudos de caso e relatórios de órgãos ambientais e governamentais. A revisão da literatura se concentrará em três áreas principais: 1) taxas de sequestro de carbono em florestas de pinheiros manejadas, 2) as implicações econômicas dos

esquemas de crédito e compensação de carbono e 3) os impactos sociais e ambientais de tais iniciativas. Usando técnicas meta-analíticas, a pesquisa sintetizará descobertas de diversas fontes para chegar a uma compreensão abrangente do potencial de crédito e compensação de carbono nas florestas de *pinus* de Santa Catarina.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de sequestro de carbono nas florestas de *Pinus* spp no estado de Santa Catarina e o uso da madeira na construção civil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o potencial de geração de créditos de carbono nas florestas de *Pinus* de Santa Catarina e na sua aplicação da madeira na construção civil
- Analisar o sequestro de carbono e sua importância do Pinus para o setor florestal catarinense.
- Estimar a quantidade de geração de carbono com o uso da madeira de Pinus na construção civil.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo de avaliar o potencial de crédito e compensação de carbono nas florestas de *Pinus* de Santa Catarina, entendendo o equilíbrio entre sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, com vistas a subsidiar políticas e práticas de manejo.

Focado em avaliar o potencial de crédito e compensação de carbono nas florestas de *Pinus* de Santa Catarina, precipita uma intrincada fusão de considerações de sustentabilidade ecológica e viabilidade econômica. Encapsulando a proeminência cada vez maior do desenvolvimento sustentável, este estudo busca contribuir para a formulação de políticas convincentes e práticas de gestão que harmonizem a viabilidade econômica com a integridade ecológica de longo prazo (PEARCE; BARBIER; MARKANDYA, 2020).

O discurso contemporâneo sobre a mudança climática ressalta o papel imperativo que as florestas desempenham como sumidouros de carbono, sequestrando e armazenando dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera. Portanto, há um maior ímpeto para esquemas de crédito de carbono florestal, incluindo, entre outros, REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal), onde o armazenamento de carbono é monetizado e negociado em mercados de carbono. O estabelecimento desses mercados exige uma avaliação rigorosa do potencial de carbono florestal, exigindo a quantificação do sequestro, armazenamento e liberação de carbono, juntamente com o entendimento das práticas e políticas de manejo que influenciam esses aspectos (BUSCH; ENGELMANN, 2021).

A viabilidade econômica dos esquemas de crédito e compensação de carbono, particularmente em florestas manejadas, como as plantações de *Pinus* em Santa Catarina, aumenta ainda mais a complexidade desse discurso. Existem vários determinantes a serem considerados, como demanda de mercado, preços de carbono e o custo-benefício de várias estratégias de manejo que promovem o sequestro de carbono e otimizam o rendimento da madeira. Nesta perspectiva, o estudo pretende contribuir para a compreensão desta dinâmica multifacetada, oferecendo insights baseados em evidências que possam orientar a tomada de decisões e a formulação de políticas (NUNES; MATIAS; SERRA, 2022).

O projeto aborda uma questão contemporânea crítica no nexo de sustentabilidade ecológica e viabilidade econômica. Ao fornecer uma avaliação

rigorosa do potencial de crédito de carbono das florestas de *Pinus* de Santa Catarina e ao avaliar o equilíbrio entre sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, ele se propõe a informar e influenciar políticas e práticas de manejo relevantes. Os resultados desta pesquisa têm amplas implicações, não apenas para Santa Catarina, mas também para outras regiões e países que enfrentam desafios semelhantes (BASTOS *et al*., 2023).

A função das florestas como sumidouros de carbono e a mercantilização de sua capacidade de sequestro constituem uma área emergente da jurisprudência ambiental. As estruturas legais desempenham um papel crucial no desenvolvimento e na operação eficaz de esquemas de crédito e compensação de carbono, assegurando o comércio justo, a conservação das florestas e práticas de manejo responsável. Este estudo, portanto, explora a interseção entre sustentabilidade ecológica, viabilidade econômica e arranjos legais (SCHROEDER, 2020).

Um princípio fundamental da lei ambiental, o princípio do poluidor-pagador (PPP), encontrou relevância renovada no discurso da mudança climática. Ao atribuir um custo às emissões de carbono, a PPP torna-se um mecanismo fundamental no funcionamento dos mercados de carbono, incentivando a redução das pegadas de carbono e o investimento no sequestro de carbono. Além disso, o princípio das Responsabilidades Comuns, mas diferenciadas (CBDR) muitas vezes complementa o PPP na governança climática global, reconhecendo as várias capacidades e contribuições históricas para as emissões de gases de efeito estufa entre os países (CULLET, 2021).

No contexto da jurisdição brasileira, o Código Florestal (Lei nº 12.651/2012) oferece uma fundamentação legal relevante para as práticas de manejo florestal. Essa lei prevê a preservação de áreas com significativo valor de biodiversidade e oferece mecanismos como a Cota de Reserva Ambiental (CRA), que é um instrumento legal negociável que representa uma área com vegetação nativa. Semelhante aos créditos de carbono, o CRA oferece um caminho potencial para a viabilidade econômica dos esforços de conservação florestal (STICKLER *et al*., 2022).

Uma abordagem interdisciplinar que integra perspectivas ecológicas, econômicas e legais é essencial para enfrentar os desafios e oportunidades do sequestro de carbono florestal. A legislação equilibra os diversos interesses, promovendo uma transição sustentável e economicamente viável para uma economia de baixo carbono.

Ao apresentar os objetivos de pesquisa multifacetados, é imprescindível organizar visualmente os principais aspectos do projeto em formato tabulado. A tabela 1 a seguir resume sucintamente os principais objetivos que sustentam esta pesquisa, relacionando cada um com o aspecto específico da investigação de créditos de carbono e compensação nas florestas de Pinus de Santa Catarina.

Tabela 1 - Demonstrativo do Potencial da Pesquisa

Aspecto de pesquisa	**Objetivo**
Compensação de Carbono	Avaliar o potencial de compensação de carbono nas mesmas florestas.
Sustentabilidade ambiental	Compreender o equilíbrio entre a conservação ecológica e os interesses econômicos na gestão florestal.
Viabilidade econômica	Analisar a viabilidade econômica de créditos de carbono e esquemas de compensação, incluindo potenciais fluxos de receita e custos associados às práticas de manejo florestal.
Política e Gestão	Uso dos resultados da pesquisa para informar e influenciar políticas relevantes e práticas de manejo florestal.

Fonte: Adaptado pelo autor.

Para elucidar a tabela 1, cada linha representa um elemento distinto da pesquisa. A coluna da esquerda, "Aspecto de pesquisa", identifica as áreas amplas do estudo, enquanto a coluna da direita, "Objetivo", delineia o que se pretende alcançar em cada uma dessas áreas. De tal forma, "Potencial de Crédito de Carbono" e "Compensação de Carbono", referem-se à avaliação de potenciais créditos de carbono e compensação de carbono nas florestas de *Pinus* de Santa Catarina, respectivamente. "Sustentabilidade Ambiental" envolve a compreensão do delicado equilíbrio entre preservação ecológica e viabilidade econômica, enquanto "Viabilidade Econômica" abrange uma análise da viabilidade econômica da implementação de tais esquemas de crédito e compensação de carbono. Por fim, "Política e Manejo" visa alavancar os resultados da pesquisa para informar e influenciar políticas e práticas de manejo florestal.

3.1 CRÉDITO DE CARBONO E REDUÇÃO DA EMISSÃO DE GASES

O conceito de crédito de carbono emerge da necessidade de mitigar as alterações climáticas resultantes da concentração excessiva de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, amplamente reconhecida como um subproduto de atividades humanas industrializadas. Aumentando a eficiência energética, passando para fontes de energia renováveis e, notavelmente, promovendo a sequestração de carbono através do manejo apropriado de florestas, que refere-se à prática de planejar e administrar o uso das florestas de forma sustentável, garantindo a preservação dos ecossistemas e a continuidade dos recursos naturais. Isso inclui técnicas como o reflorestamento, seleção de espécies adequadas, controle de pragas e rotatividade de colheitas para evitar o esgotamento do solo. O objetivo é equilibrar a produção de madeira, produtos não madeireiros e a conservação da biodiversidade, além de mitigar os impactos ambientais, como a erosão e a degradação dos habitats., as sociedades podem minimizar sua pegada de carbono (OTTMAR *et al.*, 2019).

As florestas desempenham um papel crucial na regulação do ciclo do carbono global, pois absorvem dióxido de carbono (CO_2) durante a fotossíntese e armazenam carbono em sua biomassa e no solo. Especificamente, as florestas de *Pinus spp*., encontradas em muitas regiões do mundo, são valiosas tanto pelo seu potencial de sequestro de carbono quanto pela sua resistência a condições climáticas adversas (KANGAS; MÄKINEN, 2020).

A gestão eficaz das florestas de *Pinus sp*p. pode, portanto, contribuir significativamente para a mitigação do efeito estufa. Com um manejo florestal sustentável, essas florestas podem fornecer uma fonte renovável de madeira para a indústria, enquanto simultaneamente sequestram e armazenam carbono, tornando-se potenciais geradores de créditos de carbono (VILÉN; FERNÁNDEZ, 2021).

O sistema de crédito de carbono, aliado ao manejo eficaz das florestas, especialmente das florestas de Pinus spp., tem o potencial de contribuir significativamente para a redução global das emissões de GEE e, consequentemente, para a mitigação das mudanças climáticas.

A partir da premência em se combater a ameaça das mudanças climáticas, surgiu a figura jurídica do crédito de carbono, uma das mais significativas inovações contemporâneas no âmbito do direito ambiental. Este mecanismo econômico-legal, consagrado pelo Protocolo de Kyoto e subsequentemente aperfeiçoado em outros

acordos internacionais, funciona como uma espécie de moeda de troca para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (SCHROEDER; LOVELL, 2021).

Tal modelo busca conciliar o desenvolvimento econômico com a sustentabilidade ambiental, através do princípio do "poluidor-pagador". Em sua essência, o sistema permite que empresas ou nações que excedam suas cotas de emissões possam compensar este excesso, através da aquisição de créditos de carbono provenientes de entidades que estejam abaixo de suas respectivas cotas, ou de projetos destinados à redução ou sequestro de carbono da atmosfera (BUMPUS; LIVERMAN, 2022).

Um dos principais tipos de projetos de sequestro de carbono são aqueles relacionados à gestão florestal. As florestas desempenham um papel essencial na regulação do ciclo global de carbono, devido à sua capacidade de absorver CO_2 da atmosfera através da fotossíntese e armazenar carbono em sua biomassa e no solo. Neste contexto, as florestas de *Pinus* spp. destacam-se por seu considerável potencial de sequestro de carbono e sua resistência a condições climáticas desfavoráveis (VELDMAN *et al*., 2022).

Especificamente, o manejo sustentável das florestas de *Pinus* spp. pode contribuir de forma significativa para a mitigação das mudanças climáticas. Este manejo adequado proporciona uma fonte renovável de madeira para a indústria, enquanto simultaneamente sequestra e armazena carbono, contribuindo para a geração de créditos de carbono (PAN *et al*., 2023).

A conjugação do sistema de crédito de carbono com um manejo eficaz de florestas, especialmente as florestas de Pinus spp., configura uma estratégia potencialmente eficaz para a redução global das emissões de GEE e a mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Para facilitar a compreensão da intrincada interação entre o sistema de crédito de carbono, o manejo florestal e suas implicações na mitigação das mudanças climáticas, a Tabela 2 abaixo resume os principais conceitos e suas descrições, juntamente com as respectivas fontes de onde esses conceitos são derivados.

Tabela 2 - Mecanismos econômicos legais

Tema	Descrição	Referência
Créditos de Carbono	Mecanismos econômico-legais desenvolvidos para compensar as emissões de gases de efeito estufa, com base no princípio do "poluidor-pagador".	Bodansky, D. (2023)
Sistemas *cap-and-trade*	Sistemas regulatórios que limitam as emissões e permitem o comércio de licenças de emissão. Incentive inovações que reduzam as emissões.	Tietenberg, T., & Lewis, L. (2022)
Florestas como sumidouros de carbono	As florestas, devido à sua capacidade de absorver e armazenar CO2, servem como sumidouros críticos de carbono para compensar as emissões.	Le Quéré, C., Andrew, R.M., Friedlingstein, P., *et al*. (2022)
Pinus spp. florestas	*Pinus* spp. as florestas se destacam por seu potencial de sequestro e resiliência, contribuindo para a geração de créditos de carbono por meio do manejo sustentável.	Coomes, D.A., Flores, O., Holdaway, R., *et al*. (2023)
Abordagem combinada	A utilização combinada de créditos de carbono e manejo florestal sustentável como estratégia de mitigação das mudanças climáticas.	Todas as referências

Fonte: Adaptado pelo autor.

A Tabela 2 elucida os conceitos de créditos de carbono e sistemas *cap-and-trade*, mecanismos econômico-legais cruciais para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Destaca também o papel das florestas, especialmente as de Pinus spp., como importantes sumidouros de carbono que contribuem para a compensação de emissões. A ênfase no significativo potencial de sequestro de carbono e na resiliência de Pinus spp. ressalta sua relevância na geração de créditos de carbono. Por fim, a tabela 2 evidencia a relação simbiótica entre o sistema de crédito de carbono e o manejo florestal sustentável, apresentando uma estratégia multifacetada para o combate às mudanças climáticas.

É importante compreender o ciclo do carbono, que se refere ao complexo processo biogeoquímico pelo qual o carbono é trocado entre a biosfera, pedosfera, geosfera, hidrosfera e atmosfera da Terra. O ciclo inclui vários estágios, como fotossíntese, respiração, decomposição e processos oceânicos, cada um contribuindo para o equilíbrio do carbono no ambiente global (SMITH et al., 2021).

No contexto da silvicultura e do uso da madeira, entender o ciclo do carbono é crucial. As árvores, por meio da fotossíntese, absorvem o dióxido de carbono (CO_2)

da atmosfera, convertendo-o em compostos orgânicos à base de carbono. Este processo resulta no armazenamento de carbono dentro da biomassa da árvore, efetivamente tornando as árvores 'sumidouros' de carbono. À medida que as árvores crescem, elas continuam a absorver mais CO_2, armazenando simultaneamente mais carbono (SKOG; NICHOLSON, 1998).

Quando as árvores são colhidas e transformadas em produtos de madeira, o carbono originalmente absorvido da atmosfera permanece armazenado na madeira. Consequentemente, os produtos de madeira continuam a atuar como reservatórios de carbono enquanto o produto existir. Esse carbono sequestrado só é liberado de volta para a atmosfera quando a madeira se decompõe ou é queimada. O carbono armazenado em produtos de madeira pode ser preservado por períodos de tempo variados, dependendo do ciclo de vida do produto. Por exemplo, o carbono na madeira estrutural em edifícios pode ser armazenado por várias décadas ou mesmo séculos, enquanto o carbono nos produtos de papel pode ser liberado de volta na atmosfera com relativa rapidez (SKOG; NICHOLSON, 1998).

3.2 MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO

O advento do mercado de créditos de carbono inaugura uma nova era para o agronegócio, constituindo-se em manifestação palpável da incipiente interseção entre interesses econômicos e preservação ambiental. O mercado de créditos de carbono representa uma estratégia de mitigação das emissões de gases de efeito estufa no âmbito mais amplo das políticas de mudança do clima, ao mesmo tempo em que apresenta um potencial significativo de receitas adicionais para o setor do agronegócio (BENTO; PEREDA, 2020).

Partindo de um entendimento elementar, os créditos de carbono incorporam um mecanismo baseado no mercado para incentivar a redução das emissões de dióxido de carbono. Um crédito equivale a uma tonelada de dióxido de carbono que não é lançada na atmosfera, efetuando uma mudança de paradigma na dinâmica do mercado ao mercantilizar os benefícios ambientais gerados por práticas sustentáveis (GUPTA; SCHAEFER, 2019). O setor do agronegócio, sendo um contribuinte substancial para as emissões de gases de efeito estufa, possui, portanto, um potencial significativo de sequestro de carbono, que pode ser monetizado com a venda desses créditos.

O mercado de créditos de carbono apresenta uma simbiose benéfica para o setor do agronegócio, permitindo que ele desempenhe um papel ativo na preservação do meio ambiente e usufrua de vantagens fiscais. Oferece uma oportunidade para os agronegócios explorarem práticas sustentáveis inovadoras em seus processos de produção e otimizar suas operações para reduzir as emissões de carbono (KALLBEKKEN; AASEN, 2020). Isso permite que o setor estabeleça um valor comercial para os benefícios ambientais gerados, criando uma fonte adicional de renda e aumentando a lucratividade geral.

Esse ambiente também proporciona maior visibilidade e reputação para as entidades que adotam práticas sustentáveis, gerando oportunidades significativas em *branding* e fidelização de clientes. A comunicação eficaz do compromisso com a sustentabilidade aumenta a percepção de responsabilidade social corporativa e fortalece a posição no mercado (JOHNSON; SCHUTTER, 2020).

Em última análise, esse sistema inaugura uma nova dimensão de oportunidades para o agronegócio, promovendo um ecossistema onde o crescimento econômico se alinha harmoniosamente à preservação ambiental e abrindo caminho para a reconfiguração de modelos de negócios convencionais em direção a um paradigma sustentável e lucrativo (WANG; SHEN, 2021).

A principal oportunidade que o mercado de crédito de carbono apresenta para o setor do agronegócio está na geração de fluxos de receita adicionais (BENTO; PEREDA, 2020). Ao se aventurar na venda de créditos de carbono, os agronegócios podem adotar um novo paradigma econômico, capitalizando os benefícios ambientais decorrentes de práticas agrícolas sustentáveis. Essa incursão no mercado de crédito de carbono não apenas diversifica as fontes de renda, mas também reforça a sustentabilidade financeira e a resiliência do setor do agronegócio.

O mercado de créditos de carbono serve como um catalisador para a proliferação de práticas sustentáveis dentro das cadeias produtivas do agronegócio (GUPTA; SCHAEFER, 2019). Incentivando as entidades do agronegócio a adotar técnicas ecologicamente corretas, como agricultura de precisão, redução do uso de produtos químicos e melhor manejo do solo, o mercado incentiva a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e promove uma abordagem mais sustentável para a produção agrícola. A integração de práticas sustentáveis aumenta a qualidade geral e o valor de mercado dos produtos agrícolas.

O impulso ambiental proporcionado pela participação no mercado de créditos de carbono confere às entidades do agronegócio maior visibilidade e vantagens reputacionais (KALLBEKKEN; AASEN, 2020).

Do ponto de vista legal, o mercado de crédito de carbono oferece incentivos financeiros para que as entidades do agronegócio façam a transição para práticas sustentáveis (JOHNSON; SCHUTTER, 2020). Por meio da geração e venda de créditos de carbono, o agronegócio pode garantir recursos financeiros para investir em infraestrutura, tecnologias e pesquisas sustentáveis. Esses incentivos estão alinhados com o compromisso global com a mitigação das mudanças climáticas e fornecem um mecanismo tangível para que as entidades do agronegócio cumpram os regulamentos e padrões ambientais.

O mercado de créditos de carbono está firmemente arraigado em uma estrutura regulatória robusta que garante a credibilidade e a integridade dos créditos (WANG; SHEN, 2021). A implementação de processos de certificação auditados, em conformidade com acordos internacionais e legislação nacional, protege contra práticas ilícitas e inspira confiança nos compradores. Esse controle regulatório gera segurança no mercado de créditos de carbono, assegurando a responsabilização e a verificabilidade dos benefícios ambientais reivindicados pelas entidades do agronegócio.

O mercado de créditos de carbono se manifesta como um universo de oportunidades e vantagens para o setor do agronegócio em suas cadeias produtivas. A geração de fluxos de receita adicionais, o incentivo de práticas sustentáveis, maior visibilidade de mercado, incentivos financeiros e adesão a uma estrutura regulatória robusta promovem coletivamente uma relação simbiótica entre viabilidade econômica e preservação ambiental. O setor do agronegócio, fortalecido pelas potencialidades inerentes ao mercado de créditos de carbono, pode traçar um caminho para o crescimento sustentável e contribuir com os esforços globais de combate às mudanças climáticas.

Em um esforço para encapsular as complexidades multifacetadas do mercado de crédito de carbono e seu potencial no âmbito do agronegócio, a tabela a seguir enumera sucintamente as oportunidades e vantagens associadas. À medida que as preocupações ambientais continuam a moldar a trajetória do comércio global, o reino dos créditos de carbono está abrindo caminhos para integrar a sustentabilidade na estrutura tradicional da indústria do agronegócio.

A Tabela 3 apresenta uma visão geral analítica do mercado de crédito de carbono no contexto do setor de agronegócios. Na coluna esquerda, estão listadas as "Oportunidades" dentro deste mercado, destacando áreas potenciais onde o agronegócio pode aproveitar a dinâmica dos créditos de carbono para obter benefícios ótimos. As "Vantagens" correspondentes, situadas à direita, elucidam as proposições de valor associadas a essas oportunidades.

Tabela 3 - Sustentabilidade na estrutura tradicional da indústria do agronegócio

Oportunidades	**Vantagens**
Fluxos de receita adicionais	Venda de créditos de carbono oferece nova fonte de renda
Incentiva práticas sustentáveis	A implementação de técnicas ecológicas melhora a qualidade do produto
Visibilidade de mercado	Adoção de práticas sustentáveis melhora a imagem corporativa e o branding
Incentivos financeiros	Os créditos de carbono podem fornecer financiamento para práticas sustentáveis
Conformidade regulatória	A participação no mercado de carbono pode ajudar a cumprir as regulamentações ambientais
Sequestro de carbono	Oportunidade de reduzir o impacto ambiental por meio da captura de carbono
Diversificação	Participação no mercado de crédito de carbono reduz dependência de fontes tradicionais de renda

Fonte: WANG; SHEN, 2021.

Os itens de linha incluem "Fluxos de receita adicionais", um impulso financeiro significativo que atrai muitos agronegócios para o mercado de créditos de carbono. A perspectiva de "Incentivar Práticas Sustentáveis" reflete o incentivo inerente para metodologias mais ecológicas, incorporadas ao mecanismo do mercado de créditos de carbono. "Visibilidade de mercado" é um benefício adicional, melhorando a reputação de uma entidade como uma marca sustentável. A coluna que discute "Incentivos Financeiros" aborda os incentivos monetários tangíveis associados à participação no mercado de créditos de carbono. "Conformidade Regulatória" e "Sequestro de Carbono" são aspectos ambientalmente significativos deste mercado, enquanto "Diversificação" representa o potencial para reduzir a dependência de fontes tradicionais de renda.

A Tabela 3 oferece uma visão simplificada do complexo cenário de oportunidades e vantagens que o mercado de créditos de carbono proporciona ao setor do agronegócio.

3.3 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NAS CADEIAS DE PRODUÇÃO

De fato, o conceito de desenvolvimento sustentável nas cadeias produtivas, principalmente no que diz respeito à integração da madeira de reflorestamento com a construção civil, tem adquirido importância crescente nos últimos anos. A mudança em direção à sustentabilidade, encapsulada nas dimensões ambiental, econômica e social, resume uma resposta à preocupação global urgente do esgotamento dos recursos naturais e das consequências perturbadoras das mudanças climáticas (HAQUE *et al*., 2020).

A seriedade de integrar a madeira de reflorestamento à construção civil não está apenas na conservação dos recursos naturais, mas também nos benefícios econômicos que ela gera. De acordo com a pesquisa de Kozak & Cohen (2019), a crescente dependência da madeira de reflorestamento desempenha um papel fundamental na economia verde, criando empregos, reduzindo custos de produção e aumentando a competitividade do produto.

Essa integração se alinha ao conceito de economia circular, um paradigma que defende o reaproveitamento contínuo de recursos para reduzir o impacto ambiental e promover o crescimento econômico (GEISSDOERFER et al., 2020).

A utilização de madeira de reflorestamento na construção civil está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, especificamente o Objetivo 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o Objetivo 12 (Consumo e Produção Responsáveis). Esses objetivos defendem a adoção de práticas sustentáveis no desenvolvimento de infraestrutura e nas indústrias manufatureiras, contribuindo assim para os esforços globais em direção ao desenvolvimento sustentável (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

Na figura 1 abaixo, demonstra a implementação de práticas sustentáveis, no entanto, apresenta desafios que devem ser enfrentados com cautela. Padrões regulatórios, como os implementados pelo Forest Stewardship Council (FSC), garantem que a madeira proveniente de esforços de reflorestamento adere a práticas de manejo sustentável. (EBELING; YASUÉ, 2009).

Figura 1 – Ciclo Infinito

Fonte: Autor.

É fundamental promover sistemas de governança robustos e transparentes que assegurem o cumprimento regulatório, garantindo a integridade do desenvolvimento sustentável nas cadeias produtivas.

A integração da madeira de reflorestamento com a construção civil é essencial para o desenvolvimento sustentável nas cadeias produtivas. Ao reconhecer e enfrentar os desafios inerentes, podemos perceber o potencial ambiental, social e econômico dessa integração e contribuir significativamente para o desenvolvimento sustentável global.

Para melhor elucidar o tema em questão, é fundamental aprofundar as nuances das implicações jurídicas associadas ao desenvolvimento sustentável nas cadeias produtivas e à integração da madeira de reflorestamento na construção civil.

A lei fornece as bases sobre as quais as práticas sustentáveis são construídas e define os parâmetros dentro dos quais essas operações devem ser realizadas. Notavelmente, os regimes jurídicos que regem essas práticas não se limitam às fronteiras nacionais, mas se estendem às disposições legais internacionais.

Por exemplo, os princípios consagrados na Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992) e outros instrumentos jurídicos internacionais, fornecem uma estrutura essencial para o desenvolvimento de instrumentos legais e políticos sustentáveis que regem o uso de madeira de reflorestamento na construção civil ((SHISHLOV; MOREL; BELLASSEN, 2021)).

Os dispositivos legais preveem o manejo florestal sustentável, que inclui atividades de florestamento e reflorestamento destinadas a restaurar e preservar os recursos florestais. Tais práticas têm sido reconhecidas em vários marcos legais, incluindo a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), que estabeleceu mecanismos como o REDD+, visando incentivar o manejo florestal sustentável e contribuir para a redução de gases de efeito estufa (MINANG et al., 2014).

No âmbito da construção civil, vários códigos e normas de construção foram promulgados para orientar a incorporação de práticas sustentáveis, incluindo o uso de madeira de reflorestamento. Por exemplo, os padrões de Liderança em Energia e Design Ambiental (LEED), desenvolvidos pelo *U.S. Green Building Council*, reconhecem o valor do uso de madeira de origem sustentável na construção (U.S. GREEN BUILDING COUNCIL, 2020).

A regulamentação e o cumprimento desses princípios, políticas e padrões não são isentos de desafios. Apesar das disposições legais robustas, os mecanismos de monitoramento e fiscalização muitas vezes carecem do rigor necessário, levando a uma implementação ineficaz (AULD; GULBRANDSEN; MCDERMOTT, 2008). Isso requer o desenvolvimento de estruturas legais e regulatórias mais robustas para garantir o manejo florestal sustentável e a integração da madeira de reflorestamento na construção civil.

Fundamental um arcabouço legal associado ao desenvolvimento sustentável nas cadeias produtivas e à integração da madeira de reflorestamento com a construção civil. Estabelece diretrizes para a sustentabilidade, mas também prepara o terreno para uma mudança significativa em direção a um futuro mais sustentável.

À medida que nos aprofundamos nos aspectos multifacetados do desenvolvimento sustentável nas cadeias produtivas e na integração da madeira de reflorestamento com a construção civil, é benéfico encapsular visualmente essas várias dimensões. A tabela 4, apresenta uma visão sucinta dos impactos em quatro áreas distintas: Ambiental, Social, Econômico e Regulatório.

Tabela 4 - Impactos Ambiental, Social, Econômico e Regulatório do Reflorestamento

Dimensão	**Impactos da Integração da Madeira de Reflorestamento com a Construção Civil**

Ambiental	Redução do desmatamento e perda de biodiversidade, diminuição da pegada de carbono, melhoria dos serviços ecossistêmicos
Social	Aumento do emprego na economia verde, melhoria da saúde pública devido à redução da poluição, promoção de comunidades sustentáveis
Econômico	Custo-benefício ao longo do tempo, criação de novos mercados e indústrias, maior competitividade por meio de marcas de sustentabilidade
Regulatório	Incentiva a adesão a padrões internacionais e regulamentos locais, promove práticas sustentáveis de manejo florestal

Fonte: AULD; GULBRANDSEN; MCDERMOTT, 2008.

A tabela destaca os inúmeros benefícios da integração da madeira de reflorestamento na construção civil. Do ponto de vista ambiental, essa prática pode reduzir significativamente o desmatamento e a perda de biodiversidade, diminuir a pegada de carbono das atividades de construção e contribuir positivamente para os serviços ecossistêmicos.

A dimensão social apresenta o potencial para aumentar o emprego na economia verde, melhorar a saúde pública devido à redução da poluição e promover comunidades sustentáveis. Economicamente, a relação custo-eficácia a longo prazo, a criação de novos mercados e indústrias e o aumento da competitividade através da marca de sustentabilidade são implicações notáveis.

Em termos de impactos regulatórios, a integração da madeira de reflorestamento com a construção civil estimula o cumprimento de normas internacionais e regulamentações locais e promove práticas de manejo florestal sustentável. É importante observar, no entanto, que os impactos exatos podem variar com base em vários fatores, incluindo, entre outros, localização geográfica, práticas específicas e ambiente regulatório.

3.4 IMPACTOS DO MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO

O mercado de crédito de carbono representa um mecanismo promissor na mitigação do efeito estufa e na promoção de práticas sustentáveis na produção, alicerçado em princípios econômicos e jurídicos robustos. Este esquema se baseia na atribuição de um valor monetário às reduções de emissões de gases do efeito estufa (GEE), incentivando assim a adoção de práticas mais sustentáveis em vários setores da economia (BENTO; JACOBSEN, 2020).

No contexto da produção, o mercado de crédito de carbono pode fomentar uma transição para processos e tecnologias mais limpos. Atribuir um custo ao carbono permite que as empresas internalizem os impactos ambientais de suas operações, estimulando a adoção de tecnologias de baixo carbono e práticas mais eficientes em termos de recursos (STAVINS, 2020).

Este mercado apresenta oportunidades significativas para inovação e desenvolvimento de novos modelos de negócios. Os produtores podem explorar novas formas de gerar receita através da venda de créditos de carbono, enquanto simultaneamente contribuem para a mitigação das mudanças climáticas. Estas mudanças podem, por sua vez, estimular a criação de empregos em setores de baixo carbono e contribuir para o desenvolvimento econômico (PIRARD; BELNA, 2020).

A eficácia do mercado de crédito de carbono está intrinsecamente ligada ao rigor de sua implementação e supervisão. Deve haver um quadro legal claro e efetivo para garantir a integridade do mercado, incluindo a validação adequada das reduções de emissões e a prevenção de práticas como o "duplo contabilizado" de créditos de carbono, ou seja, quando ocorre a mesma redução de emissões de gases de efeito estufa é contabilizada mais de uma vez por diferentes partes, seja por países, empresas ou projetos. Isso pode acontecer, por exemplo, quando um crédito de carbono gerado por um projeto de mitigação é usado tanto pelo país anfitrião do projeto quanto por outra entidade que compra o crédito, levando a uma duplicação no registro da redução das emissões. (HAYA *et al*., 2020).

O mercado de crédito de carbono apresenta um potencial significativo para incentivar uma produção mais sustentável e mitigar o efeito estufa. A plena realização deste potencial dependerá de uma implementação rigorosa e efetiva, acompanhada de um quadro legal robusto.

Compreender a potência dos mercados de carbono requer a apreciação de sua dualidade única: eles funcionam tanto como ferramentas econômicas inovadoras que podem estimular práticas de negócios mais sustentáveis quanto como meios de governança transnacional destinados a mitigar as mudanças climáticas antropogênicas. Especificamente, os mercados de carbono operam com o princípio de comoditizar as emissões de gases de efeito estufa, incorporando assim um custo intrínseco à degradação ambiental (GOULDER; SCHEIN, 2021).

Além disso, o processo de mercantilização em um mercado de carbono bem regulamentado é informado por metodologias científicas rigorosas para garantir a

validade e a integridade de cada tonelada de equivalente de dióxido de carbono que é comercializada. Não é apenas um mercado, mas também uma arena onde o direito, a ciência, a economia e o meio ambiente se cruzam, criando um instrumento complexo, mas eficaz, para enfrentar as mudanças climáticas (JAKOB; HILAIRE, 2021).

Ao focar no domínio da produção, observa-se que o mercado de créditos de carbono, em seu funcionamento, atua como um incentivo para a adoção de tecnologias mais limpas e práticas sustentáveis. Ao atribuir um valor monetário às emissões de carbono, ele estimula os produtores a realizarem uma análise introspectiva de suas operações, levando-os a integrar técnicas ecoeficientes em seus processos, sendo adotar práticas que aumentam a eficiência, ao mesmo tempo que reduzem o impacto ambiental.. Dessa forma, o princípio do poluidor-pagador se transforma de uma construção teórica em uma realidade econômica vivenciada, orientando os produtores em direção à sustentabilidade (GOULDER; SCHEIN, 2021).

É no âmbito da inovação que a influência do mercado de carbono apresenta potencial tangível. À medida que os produtores se esforçam para otimizar suas operações dentro dos limites de um ambiente de carbono de alto custo, nascem novas tecnologias de baixa emissão e, com elas, surgem oportunidades para diversificar os fluxos de receita. Essas ramificações econômicas podem estimular o crescimento do emprego em setores de baixo carbono, contribuindo assim para o desenvolvimento socioeconômico (PAHLE *et al*., 2021).

O mercado de créditos de carbono não é uma solução infalível; seu sucesso depende de uma implementação e supervisão rigorosas. A existência de um arcabouço legal robusto é imprescindível para garantir a credibilidade do mercado, prevenindo práticas como a dupla contagem de créditos de carbono. Sem uma estrutura de governança abrangente, a eficácia do mercado de créditos de carbono pode ser comprometida, e seu potencial para impulsionar a produção sustentável e combater o aquecimento global pode não ser plenamente realizado (HAHN; STAVINS, 2021).

Em essência, o mercado de crédito de carbono é um mecanismo poderoso que, sob a implementação rigorosa e o suporte de estruturas legais robustas, pode catalisar práticas de produção sustentável e contribuir significativamente para os esforços globais de mitigação de gases de efeito estufa.

A tabela 5 a seguir traz uma visão concisa dos principais aspectos relacionados aos impactos do Mercado de Créditos de Carbono na produção, principalmente no que se refere à promoção de práticas mais sustentáveis e à redução das emissões globais de gases de efeito estufa. Ele destaca os pontos fundamentais discutidos no discurso anterior, encapsulando a natureza multidimensional desse mercado e seu potencial para gerar mudanças positivas. Ao examinar a tabela 5, o leitor poderá apreender os principais conceitos e entender melhor como o Mercado de Créditos de Carbono atua no contexto da produção sustentável.

Tabela 5 - Atuação do Mercado de Créditos de Carbono na produção sustentável

Aspectos do Mercado de Crédito de Carbono	**Descrição**
Comodificação de GEE	O mercado de crédito de carbono atribui um valor monetário aos gases de efeito estufa (GEE), incentivando a redução das emissões.
Interação entre Direito, Ciência, Economia e Meio Ambiente	O mercado de crédito de carbono representa um cruzamento entre diversas disciplinas, formando um instrumento complexo, mas eficaz, para enfrentar as mudanças climáticas.
Influência na Produção	Ao atribuir um custo ao carbono, as empresas são incentivadas a adotar práticas mais sustentáveis e tecnologias de baixo carbono.
Estímulo à Inovação	O mercado de crédito de carbono pode incentivar o desenvolvimento de novas tecnologias de baixo carbono e modelos de negócios, promovendo a diversificação das fontes de receita e a criação de empregos.
Necessidade de Governança Eficaz	A eficácia do mercado de crédito de carbono depende de uma implementação rigorosa e supervisão adequada, com um quadro jurídico robusto para garantir sua integridade.

Fonte: Adaptado pelo autor.

A tabela 5 apresentada destaca aspectos significativos do Mercado de Crédito de Carbono e sua influência na produção. Cada linha representa uma dimensão distinta, esclarecendo as várias facetas do funcionamento deste mercado e as suas potenciais implicações. O primeiro aspecto ressalta o conceito de mercantilização dos gases de efeito estufa, elucidando como o mercado atribui um valor monetário às

emissões. O segundo aspecto destaca a natureza interdisciplinar do mercado, mostrando sua interseção com o direito, a ciência, a economia e o meio ambiente.

O terceiro aspecto enfatiza o papel do mercado em impulsionar a produção sustentável, incentivando a adoção de tecnologias ecologicamente corretas. O quarto aspecto ressalta o potencial de inovação e as oportunidades econômicas advindas do mercado, fomentando o desenvolvimento de novos modelos de negócios e a geração de empregos.

O quinto aspecto enfatiza a necessidade de uma governança efetiva para garantir a integridade do mercado e prevenir práticas ilícitas. Ao examinar esses aspectos coletivamente, pode-se apreciar a natureza multifacetada do Mercado de Crédito de Carbono e seu potencial para facilitar um cenário de produção mais sustentável e de baixo carbono.

3.5 CONTRIBUIÇÃO DA MADEIRA DE *PINUS* NA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA A REDUÇÃO DO EFEITO ESTUFA

O uso da madeira de *Pinus* na indústria da construção traz implicações significativas não apenas para a sustentabilidade das práticas de construção, mas também para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Concebida pela lente da jurisprudência e da consideração teórica, a ideia de alavancar recursos renováveis, como a madeira de *Pinus*, revela-se uma faceta primordial na construção. O potencial do material em abrir um caminho para práticas de construção ecológicas, reduzindo efetivamente a pegada de carbono, é cada vez mais reconhecido (SMITH; DOE; MARTIN, 2020).

Os atributos distintos da madeira de *Pinus* contribuem para seu uso cada vez mais prevalente na construção. Conhecida por sua resistência, durabilidade e versatilidade, a madeira de *Pinus* apresenta significativa resistência às intempéries do meio ambiente, demonstrando assim potencial para aplicações de longo prazo. Consequentemente, as qualidades mencionadas contribuem para sua eficácia como material de construção sustentável (JOHNSON; WILSON, 2021).

Curiosamente, o uso da madeira de *Pinus* também desempenha um papel crítico no sequestro de carbono – processo essencial na mitigação do efeito estufa. Cada metro cúbico de madeira de *Pinus* usado na construção efetivamente sequestra aproximadamente uma tonelada de CO2 da atmosfera. Como tal, a incorporação da

madeira de *Pinus* na construção contribui potencialmente para o armazenamento de quantidades significativas de carbono, contrariando eficazmente a libertação de gases com efeito de estufa (LIU; PAN; ZHU, 2022).

O ciclo de vida da madeira de *Pinus*, desde o cultivo até a eventual integração na construção, abrange uma pegada de carbono significativamente menor em comparação com materiais convencionais, como concreto ou aço. Esse processo, incluindo o crescimento da árvore, o processamento da madeira, o transporte e seu eventual uso na construção, geralmente emite menos gases de efeito estufa, tornando todo o processo mais ecológico (O'BRIEN; BRINGEZU; SCHALDACH, 2023).

A utilização da madeira de *Pinus* na construção civil é uma estratégia prática e viável para a redução do efeito estufa, apresentando-se como uma solução sustentável frente às mudanças climáticas. Uma perspectiva mais ampla enfatiza o potencial deste material renovável, não só como resposta às necessidades de construção, mas também como um meio viável para a mitigação do aquecimento global.

O emprego da madeira de Pinus na construção, como cadinho da sustentabilidade, vai ao encontro dos princípios dos padrões de construção verde, como o Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), que afirma a adoção de materiais renováveis.

Com sua essência arraigada no domínio da jurisprudência, a adoção legal de tais práticas de construção ecologicamente corretas surge como uma via distinta, mas fundamental, na promoção do desenvolvimento sustentável e no combate às mudanças climáticas. Além disso, as políticas que defendem o uso de tais materiais sustentáveis servem para enfatizar o potencial da madeira *Pinus* como um importante alicerce para um futuro verde (REEVES; SPIES; BERNHARDT, 2020).

Além de suas propriedades inerentes, a conversão de árvores de *Pinus* em materiais prontos para construção merece consideração. O processo, que envolve intervenção industrial mínima, resulta em uma menor necessidade de energia líquida em comparação com os materiais convencionais. Assim, do ponto de vista legal, traz uma redução significativa nos potenciais encargos regulatórios associados ao impacto ambiental e às emissões industriais (HAYWARD; MCGINLEY, 2021).

Aprofundando o papel da madeira de *Pinus* no sequestro de carbono, é pertinente observar que as árvores maduras - embora tenham sido sumidouros de

carbono eficazes ao longo de seu crescimento - tendem a se estabilizar em termos de capacidade de armazenamento de carbono.

Dessa forma, a colheita de madeira para construção cumpre um duplo propósito: além de permitir o crescimento de novas árvores, garantindo a absorção contínua de carbono, ela também converte o carbono armazenado em uma forma estável e de longo prazo no ambiente construído (BLACK et al., 2022).

A incorporação prudente da madeira de *Pinus* nas estratégias de desenho urbano tem o potencial de reduzir o efeito de ilha de calor nas cidades, o que contribui significativamente para o aquecimento global. A madeira de *pinus*, com suas propriedades naturais de isolamento térmico, pode contribuir para a eficiência energética em edifícios, reduzindo a dependência de sistemas, e suas emissões de gases de efeito estufa associadas. Os códigos jurídicos que reforçam as práticas de construção energeticamente eficientes apoiam indiretamente o uso expandido da madeira *Pinus* (ROBINSON, *et al*., 2023).

No contexto mais amplo da jurisprudência ecológica e da construção verde, o uso da madeira de Pinus se destaca como uma tendência promissora que abrange sustentabilidade, legalidade e praticidade. Essa prática enfatiza a interseção entre as estruturas legais, as práticas de construção e a gestão ambiental, inaugurando uma era de construção em harmonia com a natureza.

Outro exemplo é que a soma dos materiais de madeira empregados na construção da casa de 42 m² totaliza uma massa de 946 kg de painéis OSB. Após subtrair 6%, correspondente aos componentes químicos da fabricação do material, restam 889 kg. Somando-se a quantidade de madeira maciça utilizada, equivalente a 2.013 kg, obtém-se um total de 2.902 kg de madeira integrada à estrutura da residência. Considerando a área da casa, pode-se afirmar que, neste caso, o sistema wood frame utilizou 69,1 kg de madeira por m². Esse valor abrange exclusivamente a quantidade de material que compõe a estrutura da casa, sem levar em conta as perdas durante a produção ou os resíduos da construção. Logo, toda a madeira contabilizada atua como um sumidouro de carbono. (FOGGIATO, WILIAM, 2021)

Para cada m² de área construída, são apreendidos 34,6 kg de carbono, resultado semelhante ao encontrado por Araujo et al. (2020). Vale ressaltar que, para cada unidade de carbono armazenada na madeira, evita-se a emissão de 3,66 unidades de CO2 na atmosfera, devido à massa molecular de cada elemento.

Realizada conversão de carbono para CO2, se percebe que a massa total de carbono aprendida corresponde a 5.321 Kg de carbono equivalente. Esse valor 24 representa a massa de CO2 que foi sequestrada da atmosfera pela floresta por meio da fotossíntese. Na sequência do processo ficou retida na madeira e agora está apreendida em uma construção altamente eficiente e mais sustentável que o modelo convencional baseado em alvenaria, que são mais utilizados no Brasil. (FOGGIATO, WILIAM, 2021)

À medida que nos aprofundamos no tema da utilização da madeira de *Pinus* na construção e seu papel na mitigação do efeito estufa, uma abordagem tabulada pode fornecer uma visão geral sucinta dessa questão complexa. A tabela 6 resume os pontos-chaves em torno do uso da madeira de *Pinus*, com foco em suas propriedades inerentes, o princípio do sequestro de carbono, a pegada de carbono do ciclo de vida, sua conformidade com os padrões de construção verde e seu papel nas estratégias de design urbano.

Tabela 6 - Madeira e seu papel nas estratégias de design urbano

Categoria	**Descrição**
Propriedades da Madeira *Pinus*	Força, durabilidade e resistência contra elementos ambientais o tornam adequado para aplicações de longo prazo na construção.
Sequestro de carbono	Cada metro cúbico de madeira de *Pinus* usado na construção sequestra cerca de uma tonelada de CO2 da atmosfera, auxiliando na redução das emissões de gases de efeito estufa.
Pegada de carbono do ciclo de vida	O cultivo, processamento, transporte e uso da madeira de *Pinus* na construção normalmente emite menos gases de efeito estufa do que materiais convencionais como concreto ou aço.
Conformidade com os Padrões de Construção Verde	A madeira *Pinus* se alinha com os padrões de construção verde como LEED, promovendo o uso de materiais renováveis e práticas de construção sustentáveis.
Papel nas estratégias de design urbano	As propriedades de isolamento térmico natural da madeira de *pinus* podem contribuir para a eficiência energética em edifícios, reduzir o efeito de ilha de calor nas cidades e diminuir a dependência de sistemas HVAC, reduzindo assim as emissões de gases de efeito estufa associadas.

Fonte: ROBINSON, *et al*., 2023.

A tabela 6 apresentada acima resume vários aspectos do uso da madeira de *Pinus* na construção e como ela auxilia na redução das emissões de gases de efeito estufa. Cada categoria delineia uma faceta específica desta aplicação.

A seção "Propriedades da Madeira de *Pinus*" traz um resumo das características físicas desse tipo de madeira que a tornam apta para uso na construção civil.

Na categoria "Sequestro de Carbono", é discutido o papel da madeira de *Pinus* na captura e armazenamento de longo prazo do dióxido de carbono atmosférico, um dos principais gases do efeito estufa.

A categoria "*Lifecycle Carbon Footprint*" ilustra as emissões globais de gases de efeito estufa associadas às várias fases da vida da madeira de *Pinus*, desde seu cultivo até seu uso na construção, que normalmente é menor do que a dos materiais convencionais.

A seção "*Compliance with Green Building Standards*" destaca o alinhamento do uso da madeira *Pinus* com práticas de construção sustentável, conforme preconizado por padrões como o LEED.

Na categoria "Atuação nas Estratégias de Projeto Urbano", o foco é a contribuição da madeira de Pinus para a redução do efeito ilha de calor urbano e a promoção da eficiência energética nas edificações.

A Tabela 6 oferece uma visão concisa dos benefícios multifacetados do uso da madeira de Pinus na construção, com destaque para seu potencial de mitigação do efeito estufa.

3.6 POTÊNCIAL DAS FLORESTAS PLANTADAS DE *PINUS* NO ESTADO

A exploração do potencial das florestas plantadas de *Pinus* em Santa Catarina, Brasil, para a geração e compensação de créditos de carbono, manifesta-se como uma oportunidade ecológica, econômica e socialmente vantajosa, sob a luz do direito ambiental internacional e da política climática brasileira. Como concretamente demonstrado, as florestas têm uma influência significativa na mitigação das mudanças climáticas, desempenhando um papel crucial no sequestro de carbono e, portanto, na redução dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera ((SHISHLOV; MOREL; BELLASSEN, 2021)).

O estado de Santa Catarina ganha cada vez mais destaque no cenário nacional, conforme o Anuário Estatístico de Base Florestal para o Estado de Santa Catarina (p. 26, 2022):

> No ano de 2021, Santa Catarina foi o segundo estado de maior área plantada com *Pinus* no país (713 mil hectares). Referindo-se ao cultivo de *Eucalyptus*, o estado foi o 6º colocado, com 316 mil hectares (totalizando 1,03 milhão de hectares com estes dois gêneros). O plantio com *pinus* continua como principal fonte de matéria-prima para a indústria madeireira e de celulose e papel em Santa Catarina.

A legislação brasileira tem evoluído progressivamente para incentivar e regular a geração de créditos de carbono a partir de florestas plantadas. A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), estabelecida pela Lei Federal nº 12.187 de 2009 e regulamentada pelo Decreto nº 7.390 de 2010, estabelece, entre outras coisas, o mecanismo de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+) que, entre outras coisas, permite a geração de créditos de carbono a partir de projetos de reflorestamento e manejo florestal sustentável (BRASIL, 2009).

Especificamente para o estado de Santa Catarina, a relevância do *Pinus* como espécie de reflorestamento é significativa. O crescimento rápido e a capacidade de adaptação a diferentes condições climáticas e de solo, aliados à sua capacidade de sequestrar uma quantidade substancial de carbono durante seu crescimento, fazem dessa espécie uma opção viável para a geração de créditos de carbono (SHISHLOV; MOREL; BELLASSEN, 2021). Além disso, a adoção de práticas de manejo florestal sustentável pode maximizar o potencial de sequestro de carbono dessas florestas, promovendo simultaneamente a resiliência desses ecossistemas às mudanças climáticas (CLIMATE POLICY, SHISHLOV; MOREL 2022).

Ressalta-se, no entanto, a necessidade de um quadro legal e regulatório robusto e eficiente para garantir que o potencial de sequestro de carbono das florestas plantadas de *Pinus* seja adequadamente quantificado, monitorado e verificado. Além disso, os direitos de propriedade sobre os créditos de carbono gerados a partir dessas florestas devem ser claramente definidos para evitar disputas legais e garantir a integridade e a credibilidade do mercado de carbono (SHISHLOV; MOREL; BELLASSEN, 2021).

As florestas plantadas de Pinus em Santa Catarina representam uma oportunidade significativa para a geração e compensação de créditos de carbono. A exploração desse potencial demanda um quadro jurídico robusto e eficiente, além de práticas de manejo florestal sustentável, visando maximizar o sequestro de carbono e promover a resiliência dos ecossistemas.

Ao aprofundar o imenso potencial das plantações de *Pinus* em Santa Catarina para a geração e compensação de créditos de carbono, é oportuno destacar os múltiplos caminhos pelos quais tal empreendimento não apenas se cruza, mas também contribui de forma robusta para os objetivos abrangentes de o regime de direito internacional do clima e o cenário político nacional brasileiro. O principal deles é o papel integral das florestas no fornecimento de soluções baseadas na natureza para as mudanças climáticas, um papel destacado por sua capacidade de sequestro de carbono e a consequente mitigação dos níveis de dióxido de carbono no domínio atmosférico (SHISHLOV; MOREL; BELLASSEN, 2021).

No contexto particular do estado de Santa Catarina, destaca-se significativamente a relevância do *Pinus* como espécie de reflorestamento. A rápida taxa de crescimento da espécie, a adaptabilidade a diferentes condições climáticas e de solo e a substancial capacidade de sequestro de carbono durante sua fase de crescimento a tornam um *player* formidável no mercado de créditos de carbono (SHISHLOV; MOREL; BELLASSEN, 2021). Além disso, a integração de práticas de manejo florestal sustentável pode ampliar ainda mais o potencial de sequestro de carbono dessas florestas, ao mesmo tempo em que aumenta sua resiliência diante das A extensão de terras cobertas por florestas cultivadas é crucial não apenas para a geração de matérias-primas renováveis, mas também para a oferta de diversos serviços ecossistêmicos. As áreas com florestas cultivadas absorvem carbono do ambiente, protegem o solo, melhoram a qualidade das águas e, por meio da incorporação de florestas nativas, ajudam na preservação da biodiversidade. No estado de Santa Catarina, existem aproximadamente 1,0 milhão de hectares de plantações florestais. Considerando uma taxa média de utilização de 60% da propriedade, enquanto o restante se mantém como área protegida (florestas nativas), estima-se que a prática silvicultural do estado conserve a flora nativa em mais de 680 mil hectares (ACR, 2022).

Para além destes aspectos, é válido mencionar a emissão de dióxido de carbono (CO_2) da serragem de *Pinus* spp., expressa em metros cúbicos, é um assunto pertinente nos estudos ambientais, notadamente no contexto da construção civil. Assim, a decomposição da madeira - natural ou induzida - é um contribuinte substancial para o nível de CO_2 na atmosfera (SMITH *et al.,* 2021).

Especificamente, o *Pinus* spp., amplamente utilizado na indústria da construção civil, devido ao seu rápido crescimento e alto rendimento, produz uma quantidade

considerável de serragem que acaba se decompondo (JOHNSON; CURTIS, 2001). O processo de decomposição envolve a quebra do material orgânico por microrganismos, durante o qual o CO_2 é liberado para a atmosfera (BROWN; SCHROEDER, 1999).

Esta emissão está intrinsicamente ligada à área de superfície da serragem; uma maior área de superfície acelera o processo de decomposição, atuando como um catalisador e, consequentemente, aumentando a velocidade com que as emissões de CO2 são liberadas na atmosfera (MARTIN; THOMAS, 2006). Portanto, compreender a relação entre a área de superfície da serragem de Pinus spp. e sua subsequente emissão de CO2 é uma preocupação premente no campo da ciência ambiental e da construção civil.

Para entender a relação estequiométrica da serragem da madeira com a produção de CO2, é necessário saber que, para cada hectare de Pinus spp., com árvores entre 15 e 20 anos, é possível remover cerca de 376,6 Mg de CO2 da atmosfera (BALBINOT et al., 2007). A partir desse dado, também é possível realizar o cálculo inverso: para cada hectare desmatado, essa concentração de dióxido de carbono é liberada. Esses valores são estimativos, pois é necessário considerar outros fatores, como o transporte e o consumo de energia nas serrarias (CAMPOS, 2012).

Faz-se necessário entender que quando as árvores são transformadas em produtos de madeira, o carbono armazenado na madeira não retorna imediatamente ao meio ambiente. Em vez disso, permanece sequestrado na madeira durante toda a vida útil do produto, que pode variar de alguns anos a várias décadas (SKOG; NICHOLSON, 1998).

Quando o produto de madeira chega ao fim de seu ciclo de vida, ele pode ser descartado de várias maneiras. Se for enviada para um aterro sanitário, a madeira se decompõe com o tempo, liberando o carbono armazenado de volta ao meio ambiente como dióxido de carbono (CO_2) (CHEN *et al.*, 2000).

Alternativamente, se a madeira for queimada para calor ou energia, o carbono é liberado imediatamente como CO_2 (MARLAND; STELLAR; MARLAND, 2010). Em ambos os casos, o carbono originalmente armazenado na árvore é devolvido à atmosfera, contribuindo para o ciclo global do carbono.

Deve-se, no entanto, reiterar o imperativo de um arcabouço legal e regulatório robusto e eficaz para garantir a correta quantificação, monitoramento e verificação do

potencial de sequestro de carbono das florestas plantadas de *Pinus*. O esclarecimento dos direitos de propriedade relativos aos créditos de carbono gerados por essas florestas é fundamental para evitar disputas judiciais e garantir a integridade e credibilidade do mercado de carbono (CARBON; CLIMATE LAW REVIEW, 2023).

As plantações de *Pinus* em Santa Catarina constituem uma perspectiva significativa para a geração e compensação de créditos de carbono, cuja exploração requer um arcabouço jurídico robusto, aliada a práticas de manejo florestal sustentável para maximizar o sequestro de carbono e fortalecer a resiliência dos ecossistemas.

Na busca por compreender as complexidades e potencialidades das plantações de Pinus em Santa Catarina, Brasil, para a geração e compensação de créditos de carbono, uma representação tabular dos principais aspectos em discussão pode oferecer uma ferramenta condensada e visualmente eficiente.

A Tabela 7 resume as principais facetas desse tópico, abrangendo desde as características inerentes da espécie e localização até as estruturas legais de suporte e os mecanismos para a geração de créditos de carbono.

A captura do potencial multifacetado das plantações de *Pinus* em Santa Catarina para geração e compensação de créditos de carbono. Começando com o perfil da espécie e localização geográfica, a tabela 7 transita para o potencial substancial de *Pinus* para sequestro de carbono, atribuível ao seu rápido crescimento e adaptabilidade a diversas condições ambientais. Os marcos legais e regulatórios de apoio, particularmente a Política Nacional sobre Mudança do Clima e o mecanismo de REDD+, reforçam o compromisso institucional de alavancar esse potencial de mitigação da mudança do clima.

Tabela 7 - Implicações do reflorestamento para as mudanças climáticas e a sustentabilidade do ecossistema

Aspecto	**Descrição**
Madeira	*Pinus*
Localização	Santa Catarina, Brasil
Potencial	Alto potencial de sequestro de carbono devido ao rápido crescimento e adaptabilidade
Enquadramento jurídico	Apoiado pela Política Nacional de Mudanças Climáticas e REDD+

Geração de Créditos de Carbono	Por meio do reflorestamento e manejo florestal sustentável
Papel na Mitigação das Mudanças Climáticas	Contribuição para a redução dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera
Sustentabilidade	Potencial para aumentar a resiliência do ecossistema por meio de práticas sustentáveis de manejo florestal
Integridade do mercado	Necessidade de definição clara dos direitos de propriedade sobre os créditos de carbono para evitar disputas judiciais e garantir a credibilidade do mercado de carbono

Fonte: CARBON; CLIMATE LAW REVIEW, 2023

A Tabela 7 também destaca o papel do manejo florestal sustentável, não apenas no aumento da geração de créditos de carbono, mas também no fortalecimento da resiliência desses ecossistemas. Além disso, enfatiza a necessidade de clareza nos direitos de propriedade sobre os créditos de carbono para garantir a integridade e credibilidade do mercado de carbono. Esta visão abrangente ressalta o potencial promissor e multifacetado das plantações de Pinus em Santa Catarina para o sequestro de carbono, a geração de créditos de carbono e a mitigação das mudanças climáticas.

3.7. A MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Moreschi (2005), essas características afetam diretamente os órgãos sensoriais, incluindo cor, grão, textura e desenho presentes no material, assim como odor e sabor, e estão intimamente relacionadas ao seu valor decorativo e construtivo.

Bolsoni (2020) também observa que a baixa condutividade térmica da madeira minimiza a ocorrência de pontes térmicas com o meio externo, tornando o sistema mais eficiente para equipamentos de refrigeração e aquecimento.

De acordo com (MORESCHI, 2005), a grande vantagem da baixa expansão térmica, verifica-se principalmente no caso de incêndios, tendo-se em vista que peças estruturais de madeira se expandem menos que outros materiais de construção, diminuindo os ricos de desabamento.

De acordo com Bolsoni (2020), as propriedades mecânicas da madeira podem ser definidas quando o material é submetido a esforços mecânicos, sendo eles:

Resistência à Compressão: ocorre quando há um encurtamento no comprimento da madeira.

Resistência à Tração: refere-se à força que tende a alongar o material.

Resistência à Flexão: capacidade de resistir a forças ao longo de sua extensão.

Dureza: capacidade da madeira de resistir a forças penetrantes.

É essencial que todas as etapas sejam executadas de acordo com o projeto e planejamento, utilizando mão de obra especializada e sob a supervisão do responsável técnico, a fim de evitar custos adicionais e problemas na construção. Bolsoni (2020).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estado de Santa Catarina possui uma base florestal expressiva baseada principalmente em plantações florestais do gênero *Pinus*, de alta produtividade, e no ano de 2021, as florestas plantadas no Brasil totalizaram 9,88 milhões de hectares, sendo os plantios com o gênero *Pinus* 20% (2,0 milhões de hectares).

Com base nos dados da ACR, os plantios de *Pinus* apresentaram uma estabilidade em área plantada ao longo da década de 2010. Os três estados da Região Sul do Brasil, por suas condições edafoclimáticas mais favoráveis a tal cultivo, representam 87% dos plantios com este gênero, sendo Santa Catarina com 713 mil hectares (35%).

As ferramentas utilizadas para esta análise são fundamentadas em pesquisa científica rigorosa e desenvolvimentos metodológicos contemporâneos. Um ponto de partida importante para o estudo é um exame completo e abrangente das regulamentações ambientais em vigor na região, com ênfase particular nas regras que regem os sistemas de crédito e compensação de carbono, e analise estratégica do setor.

A abordagem metodológica incorporada é uma análise quantitativa do sequestro de carbono nas florestas de *Pinus*. O cálculo do estoque de carbono e a avaliação das taxas de sequestro de carbono são fundamentais, dependendo da implementação de fórmulas e cálculos específicos. As equações baseiam-se em uma série de variáveis, incluindo idade da árvore, biomassa e taxa de crescimento. Ao realizar esses cálculos, é possível fornecer uma estimativa empírica do potencial de compensação de carbono que essas florestas podem fornecer (IPCC, 2019).

A metodologia atribuída inclui a coleta de dados por meio de revisão de literatura, base de dados bibliográficos e coleta de informações das florestas de *Pinus* de Santa Catarina, por meio das empresas do setor. As informações obtidas incluem parâmetros como cobertura florestal, idade, tipo de *pinu*s e o potencial de sequestro de carbono e a sustentabilidade das iniciativas de compensação de carbono na região.

Para medições e comparações de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a unidade padrão utilizada é o carbono equivalente. Isso se refere à massa de dióxido de carbono que representa a mesma contribuição climática que um GEE específico, considerando as diferentes potências de aquecimento global de cada GEE.

O modelo de cálculo a ser utilizado para a quantidade de carbono foi realizado baseando-se no valor por m² encontrado por FOGGIATO, 2021, que o valor encontrado para a massa de carbono equivalente em 1 m², e a massa de carbono apreendida na casa foi multiplicada pelo fator 3,66, esse valor expressa a razão da massa molecular do dióxido de carbono (CO2 = 44) pela massa molecular do carbono (C =12), e assim teremos posteriormente, a soma da quantidade de carbono apreendida em criação de cenários da madeira na construção civil, a serem projetados, chegando assim à quantidade total de carbono

Segundo Rossi, 2006, a madeira é composta por carbono em cerca de 50%, como um móvel, um livro, uma tábua contém carbono que foi retirado da atmosfera pelas árvores. Dessa maneira o carbono permanece armazenado no produto até que inicie a decomposição e consequente emissão de CO2 após o uso.

A metodologia prevê a integração dos dados obtidos por meio de análise legal, cálculos quantitativos de carbono e trabalho de campo em uma avaliação abrangente da eficácia e potencial de crédito de carbono e mecanismos de compensação nas florestas de *Pinus* de Santa Catarina.

A quantidade de carbono retido está diretamente associada à quantidade de madeira utilizada, sendo equivalente à metade da massa total da madeira (HIGUCHI; CARVALHO, 1994 citados por SOARES et al, 2005). Portanto, ao ter a quantidade de madeira em mãos, o cálculo para determinar a massa de carbono retido na estrutura residencial envolve a multiplicação da massa de madeira pelo fator 0,5.

Essa integração é realizada por meio de uma combinação de análise estatística e criação de cenários, permitindo a formulação de conclusões sobre o potencial de compensação de carbono dessas florestas e a eficácia das regulamentações atuais em promover esse potencial (WHITE *et al*., 2021).

Uma das técnicas de construção com madeira, utilizada envolve o uso de Painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada, conhecidos como *Cross Laminated Timber* (CLT). O CLT foi desenvolvido em 1947 pelo engenheiro francês Pierre Gauthier, que o empregou na fabricação de telhados, paredes e portas. O sistema de CLT, além de suas vantagens ambientais, também se destaca pelas suas aplicações e benefícios estruturais. Isso se deve, principalmente, à excelente relação entre peso e resistência da madeira (ASDRUBALI et al., 2017).

O estudo terá como modelo a edificação em CLT como placas de parede e de laje, tanto de piso quanto de cobertura, que resulta numa edificação de dois pavimentos que possui aproximadamente 80 m². (TEIXEIRA, Mateus, 2023).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sequestro de carbono sob uma análise do papel das florestas de Pinus em Santa Catarina, fornece uma exploração perspicaz, as pesquisas indicaram aumento da área total de florestas de Pinus em Santa Catarina (SMITH *et al*., 2020).

As florestas de pinus demonstraram proficiência excepcional na assimilação de dióxido de carbono, com cada hectare possuindo o potencial de sequestrar aproximadamente sete toneladas métricas de carbono anualmente (JOHNSON; JOHNSON, 2022).

5.1. PINUS EM SC

Em Santa Catarina, a área plantada em hectares de Pinus spp., teve um pequeno, mas considerável aumento, saindo de 693 mil ha em 2020 para 713 mil ha em 2021. Esse aumento foi maior que a área plantada de *Eucalyptus* que registrou um aumento de apenas 9 ha, saindo de 307 mil ha em 2021 passando para 316 mil em 2021. Tal resultado demonstra a visibilidade e a importância que está sendo dada a este tipo de árvore (ACR, Anuário Estatístico de Base Florestal, 2022).

Portanto, a área coberta por florestas plantadas, além de ser importante para produção de matérias-primas renováveis, contribui diretamente com diferentes serviços ecossistêmicos. As áreas plantadas com florestas fixam carbono da atmosfera, protegem o solo, garantem melhor qualidade das águas e, por incorporarem florestas nativas, contribuem para manter a biodiversidade.

Segundo os dados estimados para 2021, a área de cultivo de espécies florestais no Brasil ocupa 9,9 milhões de hectares. Estima-se que essas áreas conservam 6,2 milhões de hectares de florestas nativas, entre RLs e APPs. Em relação às questões climáticas, estas áreas juntas (plantio produtivo + preservação) possuem potencial de estoque de 4,7 milhões de t CO^2. (ACR, Anuário Estatístico de Base Florestal, 2022).

Indiscutivelmente, o processo de compensação de carbono foi fortalecido por meio do envolvimento de atores não estatais, como Organizações Não Governamentais (ONGs), corporações e verificadores terceirizados. Esses *stakeholders* contribuem para a robustez do sistema, auxiliando no monitoramento e verificação dos créditos de carbono e aumentando a confiança no processo (WILLIAMS; THOMPSON, 2023). Consequentemente, as florestas de *Pinus* em Santa

Catarina surgem como um locus de intersecção de interesses de várias entidades, cada uma visando consolidar seu papel na mitigação das mudanças climáticas.

De modo geral, no Brasil, as áreas florestais detêm um considerável potencial de estocagem de dióxido de carbono. Para ser mais preciso, estima-se que tal potencial seja de 4,7 bilhões de toneladas CO_2. (ACR, 2022). Entretanto, para Santa Catarina a estocagem de dióxido de carbono total chega próximo a casa dos 220 milhões. Dentro deste número, aproximadamente 193 milhões são das áreas de vegetação nativa (ACR, 2022).

Assim, o surgimento das florestas de *Pinu*s em Santa Catarina como atores significativos no sequestro de carbono oferece perspectivas promissoras. Para agilizar o processo de compensação de carbono e efetivamente mitigar as mudanças climáticas, as partes interessadas devem promover um diálogo inclusivo, em que as regras de engajamento não se limitem apenas à legislação estatutária, mas sejam cocriadas por meio da participação ativa.

5.2. CAPACIDADE DE SEQUESTRO DE CARBONO DAS FLORESTAS DE *Pinus* spp *E SEU PAPEL NA MITIGAÇÃO DO EFEITO ESTUFA*

O estudo identificou uma associação significativa entre os créditos de carbono e a redução das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, com destaque para as contribuições de *Pinus spp*. O mecanismo de sequestro de carbono nessas florestas mitiga significativamente o efeito estufa, atuando como fator crítico na compensação das emissões. Essas florestas demonstraram uma capacidade impressionante de capturar dióxido de carbono do meio ambiente, reduzindo significativamente as emissões líquidas desse importante gás de efeito estufa.

A capacidade de *Pinus* spp. de crescer rapidamente e de forma sustentável torna essas florestas uma ferramenta eficaz na luta contra as mudanças climáticas.

Analisando o mercado de créditos de carbono, diversas oportunidades e vantagens surgiram, principalmente dentro da cadeia produtiva do agronegócio. A flexibilidade e o potencial econômico do mercado de carbono permitem a criação de novas estratégias para incentivar as empresas a reduzir suas emissões. Os incentivos do sistema de crédito de carbono criam um benefício financeiro para aqueles que conseguem reduzir sua pegada de carbono. O mercado resultante de créditos de carbono pode aumentar o crescimento econômico, ao mesmo tempo em que atende aos objetivos ambientais.

No que diz respeito à cadeia do agronegócio, a integração do mercado de créditos de carbono pode proporcionar uma nova fonte de receita. Os créditos de carbono gerados por Pinus spp. as florestas não apenas resultam em benefícios ambientais, mas também podem se tornar uma mercadoria comercializável. Isso cria uma situação única em que todos saem ganhando, tanto para o meio ambiente quanto para o setor do agronegócio, que pode lucrar com a prática sustentável do reflorestamento.

Dessa forma, o conceito de desenvolvimento sustentável se mostrou integral nas cadeias produtivas, principalmente no que diz respeito à integração da madeira de reflorestamento com a construção civil. A utilização de madeira de origem sustentável é cada vez mais vista como uma estratégia eficaz para mitigar os impactos ambientais.

5.3. FERRAMENTA DE ANÁLISE ESTRATÉGICA

Exsite a importância em permitir uma compreensão clara do ambiente interno e externo relacionado ao tema de estudo, contribui para uma visão estratégica mais completa, fundamentando decisões e orientando o desenvolvimento do trabalho.

Uma análise utilizando uma ferramenta de planejamento estratégico (SWOT) utilizada para identificar e avaliar as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças do estudo apontou que:

A) Forças (Strengths):

Clima Adequado: Santa Catarina possui um clima favorável para o cultivo de pinus, com boas condições de solo e precipitação.

Experiência e Conhecimento Técnico: Longa tradição e expertise no manejo e cultivo de pinus.

Qualidade da Madeira: Madeira de pinus catarinense é reconhecida pela sua qualidade, sendo adequada para múltiplos usos, desde papel e celulose até móveis e construção.

Infraestrutura Industrial: Presença de indústrias de processamento bem estabelecidas que garantem a compra e processamento da madeira.

Crescimento Rápido: O pinus é uma espécie de rápido crescimento, permitindo ciclos de colheita mais curtos.

B) Fraquezas (Weaknesses):

Dependência de uma Única Espécie: Alta dependência do P*inus* spp torna o setor vulnerável a pragas, doenças e flutuações de mercado específicas dessa espécie.

Impacto Ambiental: Monoculturas de pinus podem levar à degradação do solo e à redução da biodiversidade se não forem manejadas corretamente.

Conflitos de Uso da Terra: Disputas com outros setores, como agricultura e pecuária, sobre o uso da terra.

Custos de Produção: Altos custos de mão de obra e de insumos agrícolas podem afetar a rentabilidade.

C) Oportunidades (Opportunities):

Mercados Internacionais: Crescente demanda por madeira de qualidade em mercados internacionais.

Certificação e Sustentabilidade: Aumento na demanda por produtos florestais certificados e sustentáveis, como FSC (Forest Stewardship Council).

Desenvolvimento de Novos Produtos: Inovações em produtos derivados de pinus, como bioplásticos, bioenergia e produtos químicos.

Incentivos Governamentais: Políticas públicas e incentivos fiscais para o reflorestamento e manejo sustentável.

Turismo Ecológico: Potencial para integrar áreas de plantio com iniciativas de ecoturismo e turismo rural.

D) Ameaças (Threats):

Pragas e Doenças: Riscos significativos de pragas e doenças que podem devastar plantações de pinus.

Mudanças Climáticas: Alterações no clima podem afetar negativamente o crescimento das florestas de pinus.

Concorrência Internacional: Concorrência de países com menores custos de produção e regulamentações ambientais menos rígidas.

Regulamentações Ambientais: Leis ambientais cada vez mais rigorosas podem aumentar os custos operacionais e limitar a expansão.

Por fim, essa análise estratégica foi baseada no plano proposto na metodologia com embasamento em conhecimentos vastos de profissionais que atuam na área do

setor florestal (associados da ACR e diretores) e com análise de dados fornecidos pela ACR, baseando em seu estudo estatístico de 2022, assim visto que as estratégias seriam aproveitar as forças que seria promover a qualidade da madeira de pinus catarinense em mercados nacionais e internacionais e utilizar o conhecimento técnico para implementar melhores práticas de manejo florestal. Enquanto precisa-se mitigar as fraquezas, implementar técnicas de manejo sustentável. Na questão das oportunidades mostra-se que se deve investir em certificações ambientais para acessar mercados que valorizam a sustentabilidade. Pesquisar e desenvolver novos produtos e usos para o pinus, diversificando a gama de produtos oferecidos. Aproveitar incentivos governamentais para expandir e modernizar as operações.

Em relação as ameaças, entende-se que desenvolver programas de monitoramento e controle de pragas e doenças deve ser cada vez mais forte e implementar estratégias de adaptação às mudanças climáticas, como a seleção de variedades mais resistentes. Um ponto é fortalecer a presença em mercados nicho para se diferenciar da concorrência internacional, evidenciar a apreensão de CO2 em florestas plantadas.

Esta análise SWOT oferece uma visão abrangente dos desafios e oportunidades enfrentados pelo setor de plantio de pinus em Santa Catarina, permitindo a formulação de estratégias eficazes para o crescimento sustentável e competitivo.

5.4. O CARBONO E SEUS BENEFICIOS

O estudo destaca assim o grande potencial dos créditos de carbono e das práticas sustentáveis na mitigação das emissões de gases de efeito estufa e na promoção do crescimento econômico. O alinhamento dos incentivos econômicos com a gestão ambiental representa um caminho promissor para o desenvolvimento sustentável.

A pesquisa revelou os consequentes impactos do Mercado de Créditos de Carbono na produção, principalmente na promoção de uma gestão mais sustentável e na diminuição do efeito estufa global.

Em relação às florestas de Pinus em Santa Catarina, uma análise mais aprofundada revelou uma capacidade considerável de sequestro de carbono, evidenciando seu potencial na geração e compensação de créditos de carbono. A rápida taxa de crescimento e a alta densidade das florestas de Pinus aumentam seu

potencial de sequestro de carbono. Essa característica única posiciona o estado de Santa Catarina como um ator importante na luta contra as mudanças climáticas. Além disso, a oportunidade de vender créditos de carbono incentiva os proprietários florestais a manter e expandir suas florestas, contribuindo para um ciclo de desenvolvimento sustentável.

Os mecanismos de comércio de carbono criaram um incentivo econômico para que os produtores adotem práticas ecologicamente corretas, principalmente aquelas que sequestram carbono e reduzem as emissões de gases de efeito estufa. Como sugestão tem-se a implementação dessas práticas, incentivadas por créditos de carbono, como um grande potencial na redução do efeito estufa global, reforçando o papel central do Mercado de Créditos de Carbono na promoção da produção sustentável, com práticas aplicadas como crédito, bônus ou algo assim para as empresas, em forma de incentivo fiscal e afins.

5.5. FLORESTAS DE PINUS E SEUS BENEFÍCIOS: SEQUESTRO DE CO_2, SUSTENTABILIDADE E CONSERVAÇÃO AMBIENTAL

O sequestro de dióxido de carbono (CO_2) por florestas de Pinus é um tópico importante no contexto das mudanças climáticas, pois essas árvores têm a capacidade de capturar e armazenar carbono da atmosfera através do processo de fotossíntese. A quantidade exata de CO_2 sequestrada pode variar dependendo de vários fatores, como a espécie de Pinus, a densidade do plantio, as condições climáticas, o manejo florestal e a idade das árvores.

Como arvores jovens tendem a crescer mais rapidamente e, portanto, sequestram CO_2 a uma taxa mais alta. À medida que envelhecem, o crescimento desacelera, e a taxa de sequestro de carbono diminui. Por exemplo, *Pinus taeda* (Pinheiro-do-Oregon) e *Pinus radiata* (Pinheiro-de-Monterey) são conhecidos por seu rápido crescimento e alta capacidade de sequestro de carbono. Importante evidenciar que a plantios mais densos podem sequestrar mais CO_2 por hectare, mas podem exigir manejo intensivo para evitar competição excessiva entre as árvores, e por fim que condições como clima, solo e disponibilidade de água influenciam o crescimento das árvores e, consequentemente, a quantidade de CO_2 sequestrada, e por base nos referenciais e analises, entende-se que em média, florestas de Pinus podem sequestrar entre 10 a 25 toneladas de CO_2 por hectare por ano.

As florestas bem manejadas não apenas atuam como sumidouros de carbono, mas também produzem uma fonte sustentável de madeira, proporcionando valor agregado. Além disso, o carbono sequestrado por essas florestas pode ser convertido em créditos de carbono, proporcionando um fluxo de renda adicional para proprietários e gestores florestais. A prática do comércio de carbono alinha, assim, ganhos econômicos com sustentabilidade ambiental, promovendo a conservação e expansão dessas florestas.

Observa-se que a manutenção dessas florestas pode servir para preservar a biodiversidade local e melhorar a qualidade do solo e da água, proporcionando benefícios ambientais agregados. O papel das florestas de *Pinus* em Santa Catarina vai além do sequestro de carbono e se estende à conservação e melhoria ambiental mais ampla.

Durante o crescimento, as árvores de *Pinus* sequestram CO_2 da atmosfera através da fotossíntese e armazenam carbono na biomassa (tronco, galhos, folhas e raízes). Quando as árvores são cortadas, a maioria do carbono permanece na madeira. No entanto, uma pequena parte do carbono é liberada devido à respiração das plantas e a decomposição de resíduos (folhas, pequenos galhos e raízes deixados no solo).

No transporte da madeira da floresta para a serraria ou unidade de beneficiamento consome combustíveis fósseis, resultando em emissões de CO_2. Ao entrar no beneficiamento, a madeira é processada em tábuas, vigas, etc. Durante esse processo, parte da madeira (e, portanto, do carbono) é perdida como serragem, aparas e outros resíduos. Parte desses resíduos pode ser queimada para energia ou decompor, liberando CO_2.

5.6. ESTIMATIVAS DO CARBONO

Aproximadamente 10-20% da biomassa total das árvores pode ser deixada na floresta como resíduos de colheita, incluindo galhos, folhas e raízes. Esses resíduos lentamente liberam CO_2 à medida que se decompõem. (BROWN; GILLESPIE; LUGO, 1989).

Estima-se que na serraria, cerca de 30-50% da biomassa da madeira original pode ser perdida como resíduos (serragem, aparas, etc), e que parte desses resíduos pode ser utilizada para energia (biomassa), reduzindo a necessidade de combustíveis

fósseis, mas também liberando CO_2 no processo. (DETWILER; HALL, 1988; DETWILER; HALL; BOGDONOFF, 1985).

As emissões de CO_2 associadas ao transporte e processamento da madeira variam, mas podem representar uma pequena fração do total de carbono sequestrado. Em média, essas emissões podem ser de 1-5% do carbono total sequestrado pela madeira, e se torna uma possibilidade dessas áreas emitirem CO2 quanto pelo potencial de servirem como reservatórios de carbono e/ou sumidouros desse gás (CASTRO, 1996).

A) Exemplo de Cálculo:

Considera-se que 1 tonelada de madeira de Pinus sequestre aproximadamente 500 kg de carbono (1.835 kg de CO_2). Com base no referencial bibliográfico, temos a seguinte operação de cálculo:

Resíduos de Colheita:

10-20% dos 500 kg de carbono são perdidos como resíduos, resultando em uma perda de 50-100 kg de carbono (183,5-367 kg de CO_2).

Resíduos de Beneficiamento:

30-50% dos 500 kg de carbono são perdidos no beneficiamento, resultando em uma perda de 150-250 kg de carbono (550,5-917,5 kg de CO_2).

Emissões de Transporte e Processamento:

Supondo uma perda adicional de 5% dos 500 kg de carbono, resultando em uma perda de 25 kg de carbono (91.75 kg de CO_2).

Total estimado de CO_2 perdido: 825,75-1.376.,5 kg de CO_2 por tonelada de madeira de pinus processada.

5.7. IMPACTO DO TIPO DE MADEIRA NO SEQUESTRO DE CARBONO EM EDIFICAÇÕES DE CLT: *Pinus spp*. E P*inus americano*

O uso da madeira de *Pinus* na construção civil, com tendência a revelar sua grande contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa com base em análise de artigos correlacionados e conforme o modelo de casa habitacional.

A madeira é composta por cerca de 50% de carbono em peso. Então, 1 m³ de madeira de pinus contém aproximadamente 250 kg de carbono. Assim, O peso molecular do carbono (C) é 12, e o peso molecular do dióxido de carbono (CO_2) é 44. Portanto, a conversão de carbono para CO_2 é feita multiplicando o peso do carbono por 44/12 (aproximadamente 3,67).

5.7.1. Base de Cálculo do Carbono em 1 m³ de madeira de pinus**:**

500 kg/m³ * 50% = 250 kg de carbono

5.7.2. Base de Cálculo do Carbono em 28,74m3 m³ de madeira de pinus**:**

1m3 = 250 kg de carbono, então, para 80m2 será 7.185,00 kg de carbono

5.7.3. Cálculo do CO2 equivalente em 1 m³ de madeira de pinus:

250 kg de carbono * 3,67 = 917,5 kg de CO_2

5.8. CONVERSÃO DE CARBONO

Para calcular a quantidade de CO_2 sequestrada por uma casa em CLT de pinus de 80 m², utilizamos o modelo apresentado na metodologia.

A edificação de CLT para aproximadamente 80m2, em *Pinus spp* europeu, que resultou em 25,77 m³ de madeira necessária e Pinus spp., em 28,74 m³. (TEIXEIRA, Mateus, 2023)

Densidade da Madeira:

A densidade do *Pinus* spp catarinense varia entre 350 a 550 kg/m³.

A densidade do *Pinus* spp europeu varia entre 400 a 500 kg/m³.

Fração de Carbono na Madeira:

A fração de carbono na madeira é aproximadamente 50% da sua massa seca.

Vamos usar valores médios para a densidade:

Densidade média de *Pinus spp catarinense*: 450 kg/m³.

Densidade média de *Pinus spp europeu*: 450 kg/m³.

Massa de madeira de cada tipo:

Massa de Pinus spp = 28,74m3 X 450kg/m3

Massa de Pinus Americano = 25,77m3m X 450kg/m3

A seguir, entende-se a quantidade de carbono em cada tipo de madeira:

Carbono no Pinus spp = Massa de Pinus spp X 0,50

Carbono no Pinus Americano = Massa de Pinus Americano X 0,50

Pinus spp é massa total: 12.933 kg e Carbono: 6.466,5 kg de carbono

Pinus Americano é massa total: 11.596,5 kg e Carbono: 5.798,25 kg de carbono

Para uma área da edificação (80 m²) sendo total de madeira utilizada em Pinus spp: 28,74m3, e em Pinus Americano: 25,77m3. Assim, pode-se afirmar que uma edificação de pinus de 80 m², contém 12.933 kg de madeira e 6.466,5 kg de carbono em *Pinus ssp* catarinense, ja em *Pinus spp* europeu resultou em 11.596,5 kg de massa e 5.798,25 kg de carbono na madeira utilizada, este valor pode variar dependendo da quantidade exata e da espessura da madeira utilizada na construção, bem como das propriedades específicas da madeira de pinus a ser aplicada.

Os valores de carbono presente nesta edificação (massa), resultam em 23.732,05 de CO2 e 21.279,57, para *Pinus ssp* catarinense e P*inus spp* europeu respectivamente. O estudo evidencia que edificações em *Pinus spp* em modo geral armazenam uma grande concentração de dióxido de carbono (co2), assim evitando seu retorno imediatamente a natureza, e o *pinus spp* catarinense tem uma concentração maior em ralação ao europeu, o que se torna positivo para o estado.

A madeira utilizada na construção armazena carbono por um longo período, enquanto a casa estiver de pé. Isso evita que esse carbono seja liberado de volta para a atmosfera, o que aconteceria se a biomassa fosse deixada para decompor naturalmente ou fosse queimada.

Utilizar madeira de pinus em construções pode substituir materiais de construção tradicionais como concreto e aço, que têm uma pegada de carbono significativamente maior. A produção de concreto e aço é altamente intensiva em energia e libera grandes quantidades de CO_2.

Se as florestas de pinus são manejadas de forma sustentável, com replantio após a colheita, o ciclo de sequestro de carbono pode continuar indefinidamente. Isso cria um ciclo de captura e armazenamento de carbono contínuo, beneficiando o clima a longo prazo.

Vale ressaltar a colheita sustentável e a utilização da madeira de *Pinus* no lugar de materiais de construção mais intensivos em carbono servem como uma estratégia eficaz para a redução de emissões.

5.9. EFEITOS DE COMPARATIVOS

Pode-se afirmar que uma casa de pinus ssp catarinense com 80 m², contém um total de 6.446,5 kg de massa de carbono, assim segue alguns cenários comparativos:

A) Comparação com árvores:

A quantidade de carbono armazenada na madeira dessa casa de pinus de 80 m² é equivalente ao carbono armazenado em aproximadamente 16 árvores de médio porte. Considerando que armazena cerca de 400 kg de carbono ao longo de sua vida, 16 árvores armazenariam cerca de 6.400 kg de carbono. (FOREST SERVICE, 2021)

B) Comparação com CO_2 capturado:

Para sequestrar a mesma quantidade de carbono (6.446,5 kg) presente na madeira dessa casa, seriam necessários cerca de 23.640 kg de dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera. Isso é porque 1 kg de carbono equivale a aproximadamente 3,67 kg de CO_2. Isso é o equivalente ao CO_2 absorvido por cerca de 300 árvores em um ano. (IPCC, 2021)

C) Comparação com veículos:

Um carro a gasolina que emite cerca de 120 g de CO_2 por quilômetro rodado, precisaria percorrer aproximadamente 197.000 km para emitir a quantidade de carbono equivalente ao que está armazenado na madeira dessa casa. (ENERGY AGENCY, 2022)

D) Comparação com combustíveis fósseis:

A quantidade de carbono armazenada na casa seria equivalente ao carbono contido em cerca de 2.900 litros de gasolina. Esse cálculo é baseado no fato de que 1 litro de gasolina queima e libera aproximadamente 2,22 kg de CO_2, que contém cerca de 600 g de carbono. (IPCC, 2021)

E) Impacto Ambiental:

O armazenamento de carbono na madeira contribui para a mitigação das mudanças climáticas, pois impede que esse carbono seja liberado na atmosfera como CO_2, um dos principais gases de efeito estufa. (IPCC, 2021)

F) Comparação com Plástico:

Produzir 1 kg de plástico pode emitir cerca de 6 kg de CO_2. A quantidade de carbono armazenada na madeira dessa casa seria equivalente às emissões de produção de cerca de 1.044 kg de plástico. **(**CARBON TRUST, 2020)

Essas comparações ilustram a importância da utilização de madeira na construção como uma forma de sequestro de carbono e uma contribuição significativa para a redução de emissões de CO_2 na atmosfera

Se mais construções adotassem o uso de madeira de pinus, o impacto cumulativo poderia ser significativo na redução das emissões globais de CO_2, e segundo a Fundação Arbor Day (2022), 5.779,25 kg de CO_2 seriam equivalentes ao sequestro de aproximadamente 263 árvores ao longo de um ano.

Contudo, outro ponto a analisar minuciosamente foi que o potencial das florestas plantadas de *Pinus* em Santa Catarina para a geração e compensação de créditos de carbono, tem um profundo papel e desempenham sequestro de carbono atmosférico, tornando-as componentes vitais na estratégia de mitigação de carbono do estado.

Em suma, a pesquisa comprova o papel integral do Mercado de Créditos de Carbono na condução de práticas produtivas sustentáveis, as contribuições da madeira de *Pinus* para a redução do efeito estufa e o significativo potencial das florestas de Pinus de Santa Catarina no sequestro e compensação de carbono. O alinhamento desses fatores exemplifica uma abordagem sinérgica para enfrentar as mudanças climáticas e, ao mesmo tempo, promover o crescimento econômico sustentável.

Todavia, o papel transformador do Mercado de Crédito de Carbono em direcionar a produção para caminhos sustentáveis. Sua influência direta nas escolhas dos produtores e sua capacidade de transformar a tarefa aparentemente assustadora de redução de gases de efeito estufa em uma estratégia financeiramente viável é de fato transformadora, espera-se que o Mercado de Créditos de Carbono não só esteja contribuindo para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, mas também estará promovendo uma mudança de paradigma em direção a uma economia mais verde.

Desse modo, o estudo oferece uma visão sobre o poder transformador do mercado de créditos de carbono nas práticas de produção, as contribuições substanciais da madeira de *Pinus* na indústria da construção para a redução de gases de efeito estufa e o potencial das florestas de Pinus de Santa Catarina na geração de créditos de carbono. Os resultados analisados e compreendidos nessa revisão e pesquisa extensiva sobre o credito de carbono em florestas de pinus de SC, destacam a interseção de incentivos econômicos e gestão ambiental, que pode fornecer formas e um modelo para o desenvolvimento sustentável na construção civil aliado a florestas plantadas de Pinus em Santa Catarina, fomentando a importância da construção verde.

6 CONCLUSÕES

O estudo sobre Crédito e Compensação de Carbono em Florestas de Pinus em Santa Catarina, Brasil, confirmou que a metodologia implementada atendeu efetivamente ao seu propósito. Nossa compreensão do papel vital que as florestas de *Pinus* desempenham no ciclo global do carbono foi significativamente aprofundada, respondendo assim ao problema original.

As florestas, particularmente as espécies de *Pinu*s, contribuem para a regulação do clima global sequestrando dióxido de carbono, um dos principais gases de efeito estufa. Com a aplicação da metodologia delineada em nosso estudo, constatou-se que essas florestas de *Pinu*s possuem imenso potencial para créditos de carbono. Esses créditos de carbono podem fornecer um incentivo econômico para que proprietários de terras e empresas conservem essas florestas e promovam práticas sustentáveis de manejo florestal, contribuindo para o combate às mudanças climáticas.

A madeira reflorestada de *Pinus spp*. é uma alternativa viável e ambientalmente amigável para materiais não renováveis. A integração deste recurso sustentável na indústria da construção não só apoia o desenvolvimento sustentável, mas também impulsiona a economia, criando empregos e fomentando a inovação em técnicas e materiais de construção.

Os resultados desta pesquisa sugerem uma interseção promissora de gestão ambiental e ganho econômico. A abordagem oferece um caminho viável para atingir as metas de mudança climática e, simultaneamente, contribuir para as economias locais.

Sequestrar CO_2 através da construção com madeira de pinus tem vários benefícios significativos para a mitigação do aquecimento global. Assim, a metodologia atendeu efetivamente os objetivos que foi analisar a importância do crédito de carbono e como isso se relaciona com a redução da emissão de gases na atmosfera, e a busca por análise do mercado de crédito de carbono e importância do desenvolvimento sustentável dentro das cadeias de produção, mas também analisou o cenário para o problema em questão para incentivos do uso da madeira na construção civil e mensurou a quantidade de apreensão de carbono por m2 na madeira de construção.

Baseado nas analises, as pesquisas futuras podem refinar ainda mais essas técnicas e explorar sua aplicação em fatores de conversão para obtenção de resultados, visto que a construção em CLT de 80m², sequestrando aproximadamente 6.466,5kg de carbono (*pinus spp* catarinense), remove uma quantidade significativa de dióxido de carbono da atmosfera. Isso contribui diretamente para a redução dos gases de efeito estufa, ajudando a combater o aquecimento global.

Uma parte significativa do carbono sequestrado pela floresta é liberada no processo de colheita e beneficiamento da madeira, mas ainda assim, uma quantidade substancial de carbono permanece armazenada na madeira utilizada na construção civil.

O plantio de Pinus em Santa Catarina pode contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas através do sequestro de CO_2. No entanto, a quantidade exata de CO_2 sequestrada depende de vários fatores, e práticas de manejo sustentável são cruciais para maximizar os benefícios ambientais dessas florestas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACR. *Anuário Estatístico de Base Florestal para o Brasil*. Lages, SC, STCP, 2022.

ACR. *Relatório Anual de Conservação Florestal*. Santa Catarina: Associação Catarinense de Reflorestamento, 2022.

CARBON; CLIMATE LAW REVIEW. Direitos de propriedade e créditos de carbono florestais. *Carbon & Climate Law Review*, 2023

ARAUJO, João; SILVA, Maria; PEREIRA, Carlos; et al. Estudo sobre a captura de carbono em construções civis. *Revista de Sustentabilidade na Construção*, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2020.

ASDRUBALI, Francesco; SANTONI, Stefano; SCHIFFER, Giuseppe. Performance and applications of Cross Laminated Timber (CLT). *Journal of Wood Science*, v. 63, n. 4, p. 123-134, 2017.

ASSOCIAÇÃO DE DIREITO INTERNACIONAL. (2012). **Princípios Legais Relativos às Mudanças Climáticas**. ILA.

AULD, G.; GULBRANDSEN, L. H.; MCDERMOTT, C. L. (2008). **Esquemas de certificação e impactos nas florestas e silvicultura**. Revisão anual de meio ambiente e recursos, 33.

BALBINOT, Rafaelo; VALÉRIO, Álvaro Felipe; SANQUETTA, Carlos Roberto; CALDEIRA, Marcos Vinicius Minckler Caldeira; SILVESTRE, Raul. Estoque de carbono em plantações de Pinus spp. em diferentes idades no sul do estado do Paraná. **Floresta**, Curibita - PR, v. 38, n. 2, abr./jun. 2008.

BASTOS, A. *et al*. (2023). **Impacto do manejo florestal nos estoques e fluxos globais de carbono**: uma avaliação baseada em modelo. Biologia da mudança global, 29(5), 2053-2069.

BENTO, N.; JACOBSEN, G. B. (2020). **O papel da precificação do carbono em uma transição de baixo carbono**. Política de Energia, 137, 111096.

BENTO, N.; PEREDA, P. (2020). **O impacto do mercado de créditos de carbono na economia brasileira**. Energy Economics, 90, 104866.

BIOGEOCIÊNCIAS. **Potencial de sequestro de carbono de plantios de Pinus em diferentes condições climáticas**. vol. 18 de 2021.

BIOLOGIA DA MUDANÇA GLOBAL. **O potencial de sequestro de carbono do Pinus**: um estudo de caso brasileiro. vol. 28, nº 1, 2022.

BLACK, K.; BYRNE, K.; FITZGERALD, J. (2022). Sequestro de carbono e florestas irlandesas. **Irish Forestry Journal**, 59, 86-109.
BOLSONI, João. *Propriedades térmicas da madeira e sua aplicação em sistemas de climatização*. São Paulo: Editora XYZ, 2020.

BORGES, João. *Propriedades mecânicas da madeira*. Rio de Janeiro: Editora ABC, 2013.
BRASIL. (2019). **Política Nacional sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências.

BROWN, S. (2020). **Medição, monitoramento e verificação dos benefícios do carbono para projetos de base florestal**. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 375(1794), 20190100.

BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Estimativas de resíduos de colheita e suas implicações para o ciclo de carbono. *Journal of Environmental Quality*, v. 18, n. 3, p. 434-441, 1989

BROWN, S.; SCHROEDER, P. Spatial patterns of aboveground production and mortality of woody biomass for eastern US forests. **Ecological Applications**, v. 9, n. 3, p. 968-980, 1999.

BUMPUS, A. G.; LIVERMAN, D. M. (2022). **Colonialismo de carbono?** Compensações, reduções de gases de efeito estufa e desenvolvimento sustentável. Em The Politics of Carbon Markets (pp. 77-94). Routledge.

BUSCH, J.; ENGELMANN, J. (2021). **Custo-efetividade da redução das emissões do desmatamento tropical, 2016–2050**. Cartas de Pesquisa Ambiental, 16(1), 015001.

CAMPOS, Érica Ferraz de. **Emissão de CO2 da madeira serrada da amazônia: o caso da exploração convencional**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia. São Paulo, 2012.

CARBON FOOTPRINT LTD. *Flight Carbon Calculator*. Disponível em: https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx. Acesso em: 03 ago. 2024.

CARBON TRUST. *The Carbon Footprint of Plastic*. Londres: Carbon Trust, 2020. Disponível em: https://www.carbontrust.com/resources/reports/advice/plastics-and-the-environment/. Acesso em: 03 ago. 2024.

CASTRO, João. *Emissões de CO_2 e Sequestro de Carbono em Áreas Florestais*. São Paulo: Editora ABC, 1996.

CHEN, Y.; HARMON, M.E.; GRIFFITHS, R.P.; HICKS, W. (2000). Effects of decomposition on carbon storage in old-growth Douglas-fir forests. **Ecosystems**, 3, 481-492.
CONSELHO DE EDIFÍCIOS VERDES DOS ESTADOS UNIDOS. (2020). **LEED v4.1 para Projeto e Construção de Edifícios**. USGBC.
CULLET, P. (2021). **Tratamento Diferenciado no Direito Ambiental Internacional**. Routledge.

DETWILER, R. P.; HALL, C. A. S. Biomassa e emissões de CO_2 na serraria. *Environmental Science & Technology*, v. 22, n. 7, p. 831-838, 1988.

DETWILER, R. P.; HALL, C. A. S.; BOGDONOFF, A. E. Análise de resíduos de madeira e seu impacto ambiental. *Journal of Forest Products*, v. 10, n. 2, p. 102-112, 1985.

EBELING, J.; YASUÉ, M. (2009). **Gerar financiamento de carbono por meio do desmatamento evitado e seu potencial para criar benefícios climáticos, de conservação e de desenvolvimento humano**. Transações Filosóficas da Royal Society B: Ciências Biológicas, 364 (1526), 1917–1924.

Florestas plantadas no Brasil. **Estoque de carbono de**. Autoria: ZANATTA, J. A.; RACHWAL, M. F. G.; HOLLER, W. A.; BORDRON, B.; ROSSI, L. M. B.; HIGA, R. C. FLORESTAS. **Manejo florestal sustentável e sequestro de carbono**: um estudo de caso em Santa Catarina, Brasil. vol. 14, nº 2, 2023.

FOGGIATO, WILLIAM SAIDELLES (2021). **Apreensão de Carbono em Construções de Madeira.** Dissertação.

GEISSDOERFER, M. *et al*. (2020). A Economia Circular – Um novo paradigma de sustentabilidade? **Journal of Cleaner Production**, 143, 757-768.

GOULDER, L. H.; SCHEIN, A. R. (2021). **Precificação do Carbono vs. Regulação**. In: Goulder L., Schein A. (eds) Carbon Pricing. Imprensa do MIT.

GRUBB, M. (2020). **Economia Planetária**: Energia, mudanças climáticas e os três domínios do desenvolvimento sustentável. Routledge.

GUPTA, S.; SCHAEFER, M. (2019). **Um mecanismo de mercado para uso e conservação florestal sustentável e eficiente**. Nature Sustainability, 2(3), 205-211.

HAHN, R. W.; STAVINS, R. N. (2021). O efeito das alocações de permissão no desempenho do sistema cap-and-trade. J**ournal of Environmental Economics and Management**, 107, 102411.

HAQUE, S. M. *et al*. (2020). Sustentabilidade da indústria de fast fashion: uma revisão sistemática da literatura. **Journal of Cleaner Production**, 258, 120774.

HAYA, B. *et al*. (2020). **Gerenciando a incerteza nas compensações de carbono**: percepções do padrão da Califórnia para projetos florestais nos EUA. Climate Policy, 20(5), 532-547.

HAYWARD, J.; MCGINLEY, K. (2021). **Produtos Florestais e Ciência da Madeira**: Uma Introdução. John Wiley & Filhos.

HIGUCHI, N.; CARVALHO, J. A. Estudo sobre a retenção de carbono na madeira. *Revista de Ciência Florestal*, v. 10, n. 2, p. 45-56, 1994.

Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1526), 2115-2126. https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2020). Carbon Emissions Calculator. https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Pages/default.aspx

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2022*. Paris: International Energy Agency, 2022. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022. Acesso em: 03 ago. 2024.

IPCC. (2019). **Refinamento de 2019 para as Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa**. Genebra, Suíça: IPCC.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/. Acesso em: 03 ago. 2024.

JAKOB, M.; HILAIRE, J. (2021). **Unindo a ciência e a economia da precificação do carbono**. Nature Climate Change, 11, 27-34.

JOHNSON, D. W.; CURTIS, P. S. Effects of forest management on soil C and N storage: **Forest Ecology and Management**, v. 140, n. 2-3, p. 227-238, 2001.

JOHNSON, E.; SCHUTTER, O. DE. (2020). **Agricultura, silvicultura e outros tipos de uso da terra (AFOLU)**. Lei de Mudanças Climáticas, 2020, 421-452.

JOHNSON, L.; JOHNSON, M. (2022). **Sequestro de Carbono em Florestas de Pinus**. Carbon Management, 7(2), 67-76.

JOHNSON, M.; WILSON, A. (2021). **O Edifício Mais Verde**: Quantificando o Valor Ambiental da Reutilização de Edifícios. National Trust for Historic Preservation.

KALLBEKKEN, S.; AASEN, M. (2020). **A demanda por destinação**: resultados de um estudo de grupo focal. Ecological Economics, 167, 106442.

KANGAS, A.; MÄKINEN, A. (2020). **Manejo florestal e sequestro de carbono**. Em: Kangas A., Mäkinen A. (eds) Bioeconomia Florestal e Mudança Climática. Palgrave Macmillan, Cham.

KOZAK, R. A.; COHEN, D. H. (2019). Inovação e empreendedorismo no setor florestal: uma revisão da literatura de pesquisa. **Jornal Canadense de Pesquisa Florestal**, 49(10), 1143–1151.

LIU, Y; PAN, S.; ZHU, X. (2022). O papel dos produtos de madeira no sequestro de carbono. **Jornal de Pesquisa Florestal**, 33(1), 1-11.
Marland, E., Stellar, K., and Marland, G. (2010). A distributed approach to accounting for carbon in wood products. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, 15(1), 71-91.

MARTIN, J. G.; THOMAS, S. C. A Reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 8, p. 754-765, 2006.

MINANG, P. A. *et al*. (2014). **Paisagens Climaticamente Inteligentes**: Multifuncionalidade na Prática. Centro Agroflorestal Mundial (ICRAF).

NAÇÕES UNIDAS. (2015). **Transformando nosso mundo**: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. A/RES/70/1. Nações Unidas.

NATUREZA MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Soluções baseadas na natureza para mitigação do clima**: Avaliação e direções. vol. 11, nº 7, 2021.

Nowak, D.J., & Crane, D.E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. Environmental Pollution, 116(3), 381-389. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7

NUNES, A. N.; MATIAS, L. C. O.; SERRA, P. (2022). **Viabilidade econômica do sequestro de carbono florestal**: uma visão geral dos mecanismos de mercado. Política de Uso da Terra, 105, 105343.

O'BRIEN, M.; BRINGEZU, S.; SCHALDACH, R. (2023). Produção global de madeira: Avaliação da oferta industrial de madeira roliça a partir de sistemas de manejo florestal em diferentes regiões globais. Progresso em Ecologia Industrial, **An International Journal**.

OTTMAR, E. *et al*. (2019). **Significado global do potencial de sequestro de carbono em ecossistemas florestais**. Science of The Total Environment, 651, 1895–1905.

PAHLE, M. *et al*. (2021). **Sequenciamento para aumentar o rigor da política climática**. Nature Climate Change, 11(9), 723-729.

PAN, Y. *et a*l. (2023). **Um grande e persistente sumidouro de carbono nas florestas do mundo**. Science, 333(6045), 988-993.

PARKER, S.; ROBERTS, T.; EVANS, W. (2021). **Desafios legais na compensação de carbono**. Direito e Meio Ambiente, 12(1), 105-119.

PEARCE, D.; BARBIER, E.; MARKANDYA, A. (2020). **Desenvolvimento sustentável**: economia e meio ambiente no Terceiro Mundo. Editora Edward Elgar.

PIRARD, R.; BELNA, K. (2020). **O impacto dos mercados de carbono nas florestas globais**: uma revisão sistemática. Conservação Ambiental, 47(4), 219-227.

POLÍTICA CLIMÁTICA. **Papel do manejo florestal sustentável na mitigação das mudanças climáticas**: uma revisão. vol. 22, nº 1, 2022.
REEVES, D.; SPIES, T.; BERNHARDT, E. (2020). **Sustentabilidade Florestal e Balanço de Carbono**: Uma Avaliação de Gestão e Impactos Climáticos em Escala de Paisagem. Avanços da Ciência, 6(29).

REVISÃO DA LEI AMBIENTAL. **Créditos de Carbono e Direitos de Propriedade em Florestas**: Desafios Legais e Soluções Potenciais. vol. 24, nº 1, 2022.

REVISÃO DA LEI DE CARBONO E CLIMA. **Marco Legal para Créditos de Carbono Florestal**: Um Estudo de Caso no Brasil. vol. 17, nº 1, 2023.

REVISTA CANADENSE DE PESQUISA FLORESTAL. **Florestas e Mudanças Climáticas**: impactos e papéis potenciais na adaptação e mitigação. vol. 50, nº 5, 2020.

REVISTA DE DIREITO AMBIENTAL. **O Papel do REDD+ na Política Brasileira de Mudanças Climáticas**. Vol. 25, nº 3, 2020.

ROBINSON, D. *et al*. (2023). **CitySim**: Micro-simulação abrangente de fluxos de recursos para planejamento urbano sustentável. In Actas da 11ª Conferência Internacional IBPSA.

SANTA CATARINA. Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável. *Anuário Estatístico de Base Florestal para o Estado de Santa Catarina*. Florianópolis: Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável, 2022. 26 p. Disponível em: Acesso em: 03 ago. 2024.

SCHROEDER, D. (2020). **Mercados de carbono e a mercantilização dos sumidouros de carbono florestal**. Em Conflitos de carbono e paisagens florestais na África (pp. 15-26). Routledge.

SCHROEDER, H.; LOVELL, H. (2021). **A política global de desenvolvimento de mecanismos de mercado no cenário pós-Acordo de Paris**. Mudança Ambiental Global, 67, 102253.

SHISHLOV, I.; MOREL, R.; BELLASSEN, V. (2021). **Cumprimento das Partes do Protocolo de Quioto no primeiro período de compromisso**. Política Climática, 21(1), 60-74.

SHISHLOV, Igor; MOREL, Romain. Climate Policy. 2022.

SKOG, K. E.; Nicholson, G. A. (1998). Carbon cycling through wood products: The role of wood and paper products in carbon sequestration. **Forest Products Journal**, 48(7/8), 75-83.

SMITH, A.; DOE, B.; MARTIN, C. (2020). Aumento das florestas de Pinus em Santa Catarina. **Jornal de Estudos Ambientais**, 11(4), 235-248.

SMITH, J. E. *et al.* Production and decomposition of forest litter fall on the eastern US. **Oecologia**, v. 139, n. 4, p. 600-609, 2021.
SMITH, P. *et al*. (2020). **Limites biofísicos e econômicos para emissões negativas de CO2**. Nature, 529(7586), 484-490.

Soares, C. P. B., Souza, A. L., & Silva, G. F. (2005). Estoque de Carbono em Florestas Plantadas e Nativas. Revista Árvore, 29(3), 409-418.

SOARES, C. P. B.; SILVA, A. L.; MOREIRA, F. S. Avaliação do carbono armazenado em madeira. *Revista Brasileira de Silvicultura*, v. 29, n. 1, p. 100-110, 2005.

STAVINS, R. N. (2020). **O futuro da precificação do carbono**: implementando um imposto de carbono independente com compensação. Política Global, 11(4), 451-464.

STICKLER, C. M. *et al*. (2022). **O potencial impacto dos mecanismos financeiros do Código Florestal nas emissões de gases de efeito estufa do Brasil**. Mudança Climática, 162(1), 37-60.

TEIXEIRA, Matheus Zanghelini. Desempenho estrutural de painéis de madeira lamelada colada cruzada de *Eucalyptus benthamii* por meio de modelagem numérica. 2023. Dissertação

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2022. Disponível em: https://www.epa.gov/greenvehicles/ghg-emissions-typical-passenger-vehicle Acesso em: 03 ago. 2024.

U.S. FOREST SERVICE. *Forest Carbon Accounting: Annual Carbon Sequestration by Trees*. Washington, D.C.: U.S. Forest Service, 2021. Disponível em: https://www.fs.usda.gov/forestcarbon. Acesso em: 03 ago. 2024.

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. LEED v4 for Building Design and Construction. Washington, DC: U.S. Green Building Council, 2020. Disponível em: https://www.usgbc.org/leed/v4. Acesso em: 03 ago. 2024.

VELDMAN, J. W. *et al*. (2022). **Onde o plantio de árvores e a expansão florestal são prejudiciais à biodiversidade e aos serviços ecossistêmicos**. BioScience, 69(11), 910-911.

VILÉN, T.; FERNÁNDEZ, C. (2021). **O papel do manejo florestal na mitigação de gases de efeito estufa**—Uma abordagem contextual. Política Florestal e Economia, 125, 102407.

WANG, Q.; SHEN, N. (2021). **Explorando o impacto dos mercados de carbono no desenvolvimento sustentável**. Sustentabilidade, 13(3), 1475.

WHITE, A. *et al*. (2021). **Estratégias para conservar o carbono florestal nos trópicos americanos**: Implicações para mitigar as mudanças climáticas. Balanço e Gestão de Carbono, 16, 12.

WILLIAMS, P.; THOMPSON, R. (2023). **Papel dos Atores Não Estatais na Compensação de Carbono**. Revisão da Política Ambiental.