



Universidade Federal do Maranhão

Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação

QUANTIFICAÇÃO DOS ESTOQUES DE CARBONO ACIMA DO SOLO DA AMAZÔNIA MARANHENSE

ADMO RAMOS SILVA JÚNIOR

SÃO LUÍS/MA

2024

ADMO RAMOS SILVA JÚNIOR

**QUANTIFICAÇÃO DOS ESTOQUES DE CARBONO
ACIMA DO SOLO DA AMAZÔNIA MARANHENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Biodiversidade e Conservação da Universidade Federal do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Conservação.

Orientador: Prof. Dr. Celso Henrique Leite Silva Júnior

SÃO LUÍS/MA

2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Júnior, Admo Ramos Silva.

QUANTIFICAÇÃO DOS ESTOQUES DE CARBONO ACIMA DO SOLO DA
AMAZÔNIA MARANHENSE / Admo Ramos Silva Júnior. - 2024.

58 p.

Orientador(a): Celso Henrique Leite Silva Júnior.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Biodiversidade Conservação/ccbs, Universidade Federal do
Maranhão, Google Meet, 2024.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Estoque de Carbono. 3.
Mudanças Climáticas. I. Júnior, Celso Henrique Leite
Silva. II. Título.

ADMO RAMOS SILVA JÚNIOR

QUANTIFICAÇÃO DOS ESTOQUES DE CARBONO ACIMA DO SOLO DA AMAZÔNIA MARANHENSE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Universidade Federal do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Conservação.

Aprovada em 05/09/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Celso Henrique Leite Silva Junior (Orientador)

Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr^a Taíssa Caroline Silva Rodrigues

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL

Prof. Dr^a Polyanna da Conceição Bispo

University of Manchester (UK)

Não tem nada a ver com ser possível ou não.

Eu faço porque quero!”

Monkey D. Luffy, One Piece.

Dedico a vocês, minha família, com todo o amor e respeito,
esta realização, pois sem vocês, nenhum dos meus sonhos seria possível.

AGRADECIMENTOS

Muito obrigado,

Agradeço a Deus, que em Sua infinita sabedoria e bondade, me concedeu a força, a coragem e a clareza para enfrentar cada desafio ao longo desta jornada. Sua presença constante em minha vida foi a luz que me guiou nos momentos de incerteza e a paz que me acalmou nos momentos de dificuldade. A Ele dedico cada conquista e cada passo dado, pois sei que sem Sua graça, nada disso seria possível.

Aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio incondicional, paciência e amor em cada etapa dessa jornada. Sem o suporte emocional e os valores que me foram transmitidos ao longo da vida, esta conquista não seria possível. Vocês são minha fonte de inspiração e motivação diária.

Aos meus orientadores e docentes que, com sua dedicação e conhecimento, me guiaram ao longo deste projeto. Suas orientações precisas, críticas construtivas e incentivo constante foram essenciais para a realização deste trabalho. Sou grato por todo o tempo e esforço investidos, que me permitiram crescer como estudante e como profissional.

Aos meus colegas, que compartilharam comigo os desafios e as alegrias deste caminho. A troca de ideias, o companheirismo e o apoio mútuo foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. A amizade e colaboração que construímos ao longo do tempo serão lembradas com carinho e gratidão.

Muito obrigado a todos envolvidos que me guiaram até aqui. Por vocês.

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) nas florestas tropicais são amplamente impulsionadas pelo desmatamento e pela degradação florestal, os quais liberam grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, contribuindo significativamente para o aquecimento global. Na Amazônia, o histórico de desmatamento e degradação é caracterizado por atividades antrópicas que resultam em altas taxas de desmatamento e perda de biodiversidade. A Amazônia Maranhense, especificamente, enfrenta desafios semelhantes, com o desmatamento contribuindo para substanciais emissões de GEE, agravando as mudanças climáticas. O ciclo do carbono, essencial para a regulação do clima, é severamente perturbado pelo desmatamento, que interrompe o sequestro de carbono realizado pelas florestas, transformando-as de sumidouros em fontes de carbono. Nesse contexto, o sensoriamento remoto de biomassa emerge como uma ferramenta crucial para monitorar e estimar a biomassa florestal, permitindo uma avaliação precisa dos estoques de carbono e das emissões associadas à perda de florestas. Essas tecnologias são fundamentais para a implementação de políticas de conservação e restauração, com o objetivo de mitigar as emissões de GEE e preservar os serviços ecossistêmicos vitais das florestas tropicais. O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica em diversos periódicos nacionais e internacionais, destacando a importância do sensoriamento remoto em estudos sobre florestas tropicais. No entanto, constatou-se que, embora haja uma contribuição significativa dos pesquisadores para o uso de dados de sensoriamento remoto em florestas tropicais, os estudos focados na Amazônia Maranhense ainda são escassos.

Palavras-chave: Emissões de GEE, Desmatamento, Ciclo do Carbono, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Greenhouse gas (GHG) emissions in tropical forests are largely driven by deforestation and forest degradation, which release significant amounts of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere, contributing significantly to global warming. In the Amazon, the history of deforestation and degradation is characterized by anthropogenic activities that result in high rates of deforestation and biodiversity loss. The Amazon region of Maranhão, specifically, faces similar challenges, with deforestation contributing to substantial GHG emissions, exacerbating climate change. The carbon cycle, essential for climate regulation, is severely disrupted by deforestation, which halts the carbon sequestration carried out by forests, turning them from carbon sinks into carbon sources. In this context, remote sensing of biomass emerges as a crucial tool for monitoring and estimating forest biomass, allowing for an accurate assessment of carbon stocks and the emissions associated with forest loss. These technologies are fundamental for the implementation of conservation and restoration policies aimed at mitigating GHG emissions and preserving the vital ecosystem services of tropical forests. The present work aims to conduct a literature review in various national and international journals, highlighting the importance of remote sensing in studies on tropical forests. However, it was found that, although researchers have made significant contributions to the use of remote sensing data in tropical forests, studies focused on the Amazon region of Maranhão are still scarce.

Keywords: GHG Emissions, Deforestation, Carbon Cycle, Remote Sensing.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CBERS - China-Brazil Earth Resources Satellite (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres)

CO₂ - Dióxido de Carbono

CSC - Custo Social do Carbono

DETER - Sistema de Detecção do Desmatamento em Tempo Real

GEDI - Global Ecosystem Dynamics Investigation (Investigação Dinâmica do Ecossistema Global)

GEE - Gases de Efeito Estufa

GHG - Greenhouse Gas (Gás de Efeito Estufa)

GIS - Sistema de Informação Geográfica

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IRS - Indian Remote Sensing (Sensoriamento Remoto da Índia)

LiDAR - Light Detection and Ranging (Detecção e Medição por Luz)

LULUCF - Land Use, Land-Use Change, and Forestry (Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas)

MAPBIOMAS - Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil

NASA - National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)

PPCDAm - Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal

PRODES - Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite

QGIS - Quantum Geographic Information System

REDD+ - Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal

SAR - Synthetic Aperture Radar (Radar de Abertura Sintética)

SIG - Sistema de Informação Geográfica

U.C. - Unidade de Conservação

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 - Infográfico da evolução da cobertura e uso da terra.....	18
Figura 2: Monitoramento ao desmatamento na Amazônia maranhense.....	23
Figura 3: Monitoramento ao desmatamento na Amazônia maranhense pelo Mapbioma.....	25

CAPÍTULO II

Figura 1. Localização da Área de Estudo.....	42
Figura 2. Comparação da densidade dos estoques de carbono para diferentes tipos de florestas em diferentes compartimentos na Amazonia Maranhense.....	46
Figura 3. Mapa de estoques de carbono (a) e de CO ₂ (b) para a Amazônia Maranhense.....	48
Figura 4. Distribuição por diferentes compartimento e tipos de florestas dos estoques de CO ₂ na Amazonia maranhense.....	50
Figure 5. Valor Econômico das Florestas por Categoria.....	51

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
APRESENTAÇÃO GERAL	13
1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Histórico do desmatamento e degradação florestal no Bioma Amazônia	16
2.2 Emissões de gases de efeito estufa (GEE) através do desmatamento e degradação florestal.....	19
2.3 Desmatamento e degradação florestal na Amazônia maranhense	20
2.4 Iniciativas de monitoramento do uso da terra e o desmatamento na Amazônia maranhense	22
2.5 Ciclo do carbono em florestas tropicais	25
2.6 Sensoriamento remoto de biomassa	26
3. OBJETIVOS	28
3.1 Objetivo Geral	28
3.2 Objetivos Específicos	28
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
CAPÍTULO II.....	34
Quantificação dos estoques de carbono acima do solo da Amazônia Maranhense	34
INTRODUÇÃO	37
MATERIAL E MÉTODOS.....	42
Área de estudo	42
Conjunto de dados	43
Dado de altura do dossel da vegetação	43
Dados de uso e cobertura da terra.....	43
Processamento dos dados	44
RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
CONCLUSÃO.....	53
AGRADECIMENTOS	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO GERAL

A presente dissertação intitulada “Quantificação dos estoques de carbono acima do solo da Amazônia maranhense” é apresentada em II capítulos: o capítulo I contém uma revisão de literatura com 6 tópicos, sendo eles: Histórico do desmatamento e degradação florestal no Bioma Amazônia; Emissões de gases de efeito estufa (GEE) através do desmatamento e degradação florestal; Desmatamento e degradação florestal na Amazônia maranhense; Iniciativas de monitoramento do uso da terra e o desmatamento na Amazônia maranhense; Ciclo do carbono; Sensoriamento remoto de biomassa. O capítulo II compreende o Artigo 1: Quantificação dos estoques de carbono acima do solo da Amazônia Maranhense.

A dissertação foi elaborada de acordo com as diretrizes do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação (PPGBC), pelas regras da ABNT. Para o capítulo correspondente ao artigo I, considerou-se as normas da Revista Brasileira de Geografia Física.

1. INTRODUÇÃO

A degradação florestal e o desmatamento são dois dos principais fatores que contribuem para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), que levam ao aquecimento global e às mudanças climáticas. A perda da cobertura florestal nas regiões tropicais é responsável por aproximadamente 15% das emissões globais de CO₂, colocando o Brasil entre os principais emissores como resultado da destruição da Amazônia (Silva et al., 2019).

O bioma amazônico brasileiro, como uma das maiores reservas de biodiversidade e carbono do planeta, desempenha um papel crucial na regulação climática. De acordo com Nobre et al. (2016), a destruição das florestas tropicais, especialmente na Amazônia, é responsável por uma grande parcela das emissões de CO₂ do Brasil, tornando-se uma das principais fontes de GEE no país. De acordo com Alencar et al. (2018), o Maranhão é um dos estados com maiores taxas de desmatamento na Amazônia, e essa destruição resulta na liberação significativa de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para o agravamento das mudanças climáticas.

A degradação florestal no bioma amazônico maranhense, que inclui atividades como a exploração seletiva de madeira e as queimadas, também é um fator importante na contribuição para as emissões de GEE. Estudos, como o de Araújo et al. (2020), demonstram que essas atividades não apenas diminuem a capacidade das florestas de servir como sumidouros de carbono, mas também resultam na emissão direta de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), o que agrava os efeitos no meio ambiente e das mudanças climáticas. As florestas degradadas perdem sua resistência natural, aumentando a susceptibilidade à queimada e, como resultado, as emissões aumentam.

Portanto, para controlar as emissões de GEE e reduzir o desmatamento, é necessário implementar políticas de mitigação. Como destacado por Oliveira e Santos (2021), a preservação das florestas é uma estratégia essencial para a manutenção do equilíbrio climático global, necessitando de ações coordenadas em nível nacional e internacional.

Diante deste contexto, este estudo se propõe a realizar uma revisão bibliográfica sobre a degradação e desmatamento florestal na Amazônia maranhense, com o objetivo de identificar os principais fatores que impulsionam a perda de cobertura vegetal nesta região e os impactos subsequentes sobre as emissões de gases de efeito estufa. A revisão

busca também compreender como essas alterações no uso do solo influenciam a estrutura e a funcionalidade dos ecossistemas florestais, e avaliar as políticas públicas e estratégias de manejo que têm sido implementadas para mitigar esses efeitos. Além disso, será analisado como as práticas de desmatamento e degradação afetam a resiliência das florestas maranhenses frente às mudanças climáticas globais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico do desmatamento e degradação florestal no Bioma Amazônia

Os custos reduzidos de transporte marítimo aumentaram a pressão para transformar a Amazônia em um corredor logístico. Contudo, o impacto de novos projetos, como a Ferrogrão e a pavimentação de rodovias, tem intensificado o desmatamento na região do bioma amazônico (de Souza, Tisler & Castro, 2023). Além disso, o desmatamento e a degradação florestal na Amazônia têm uma história marcada por diferentes fases de ocupação e exploração econômica que começaram a se intensificar a partir da segunda metade do século XX. Inicialmente, o processo de desmatamento estava associado à abertura de estradas, como a construção da rodovia Transamazônica na década de 1970, que facilitou o acesso a áreas remotas da floresta (Kuck et al., 2023). Essa infraestrutura promoveu a colonização e a expansão da agricultura e pecuária na região, impulsionando a destruição de vastas áreas de floresta.

A expansão agropecuária se tornou o principal motor do desmatamento na Amazônia, particularmente após a década de 1980, quando incentivos governamentais e o aumento da demanda por produtos agrícolas, como soja e carne bovina, estimularam o desmatamento em larga escala. A conversão de florestas para pastagens e monoculturas levou a uma perda significativa de biodiversidade e à liberação de grandes quantidades de carbono armazenado na vegetação e no solo (Dutra et al., 2024).

A degradação florestal, por outro lado, é um processo mais insidioso e menos visível que o desmatamento, mas com impactos igualmente devastadores. A extração seletiva de madeira, os incêndios florestais e a fragmentação da floresta contribuem para a degradação, reduzindo a capacidade da Amazônia de atuar como um sumidouro de carbono e afetando negativamente a biodiversidade local (Grodofzig et al., 2023). Esses processos de degradação são frequentemente subestimados, mas têm consequências significativas para o equilíbrio ecológico da região.

Durante as décadas de 1990 e 2000, o Brasil implementou diversas políticas para conter o desmatamento, incluindo a criação de áreas protegidas e o fortalecimento da fiscalização ambiental. Essas medidas resultaram em uma redução temporária nas taxas de desmatamento, particularmente entre 2005 e 2012. No entanto, a partir de 2013, observou-se um novo aumento nas taxas de desmatamento, impulsionado por mudanças políticas e econômicas que enfraqueceram a governança ambiental na região (Oliveira et al., 2023).

Os impactos do desmatamento e da degradação florestal na Amazônia vão além das fronteiras regionais, afetando o clima global. A Amazônia desempenha um papel crucial no ciclo hidrológico e na regulação do clima, influenciando padrões de precipitação não apenas na América do Sul, mas em todo o planeta.

A Amazônia, o maior bioma do Brasil, está apresentando uma queda de desmatamento, percentagem de 5,4% a 9,8%, de acordo com um levantamento publicado em julho de 2024 pelo Mapbiomas. "Outros vetores como extração madeireira, abertura de estradas e estresse hídrico por mudança climática também são importantes para entender o processo de degradação da floresta amazônica", aponta Carlos Souza Jr., (Mapbiomas, 2024).

As mudanças climáticas, por sua vez, exacerbam a vulnerabilidade da Amazônia, criando um ciclo vicioso em que o aumento das temperaturas e a alteração dos padrões de precipitação intensificam os incêndios florestais e a degradação, acelerando o desmatamento. Estudos indicam que a resiliência da floresta amazônica está em declínio, o que aumenta o risco de colapso ecológico em vastas áreas da floresta (Bochow, 2024).

A restauração de áreas degradadas e a implementação de políticas eficazes de conservação são essenciais para reverter os danos causados pelo desmatamento e pela degradação na Amazônia. A promoção de práticas agrícolas sustentáveis, a recuperação de florestas secundárias e a ampliação das áreas protegidas são algumas das estratégias que podem ajudar a preservar a integridade ecológica da região (Bogoni et al., 2024).

A participação das comunidades locais e dos povos indígenas é fundamental para o sucesso das iniciativas de conservação na Amazônia. Essas populações possuem um conhecimento profundo da floresta e podem desempenhar um papel crucial na proteção e manejo sustentável dos recursos naturais. O reconhecimento dos direitos territoriais e o

2.2 Emissões de gases de efeito estufa (GEE) através do desmatamento e degradação florestal

As emissões provenientes do desmatamento e da degradação florestal em florestas tropicais representam uma das principais fontes de gases de efeito estufa, contribuindo significativamente para as mudanças climáticas globais. As florestas tropicais, que armazenam grandes quantidades de carbono, desempenham um papel crucial na regulação do clima, mas sua destruição libera vastas quantidades de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (Ganamé et al., 2024).

O desmatamento em larga escala, especialmente na Amazônia, tem sido impulsionado por atividades antrópicas e incêndios florestais. Essas atividades não apenas removem a cobertura florestal, mas também perturbam o solo, liberando carbono que estava armazenado tanto na biomassa das árvores quanto no solo. Estudos indicam que o desmatamento tropical é responsável por cerca de 10% das emissões globais de CO₂ (Rajapakshe et al., 2024).

A degradação florestal, por sua vez, refere-se a mudanças nas florestas que reduzem sua capacidade de armazenar carbono e sua função ecológica, sem necessariamente resultar na perda total da cobertura florestal. Essa degradação pode ocorrer devido à extração seletiva de madeira, incêndios florestais e outras atividades humanas. Embora menos visível que o desmatamento, a degradação pode ter impactos substanciais nas emissões de carbono (Mullissa et al., 2024).

Programas como o REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal) têm sido implementados para mitigar essas emissões, incentivando a conservação florestal e promovendo práticas de manejo sustentável. O REDD+ busca fornecer incentivos financeiros para países tropicais reduzirem suas taxas de desmatamento e degradação, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Guizar-Coutiño et al., 2024).

No entanto, a eficácia do REDD+ e de outras iniciativas semelhantes depende de vários fatores, incluindo o monitoramento adequado das florestas e a implementação de políticas eficazes de conservação. A precisão na medição das emissões evitadas é crucial para garantir que os créditos de carbono sejam baseados em reduções reais de emissões (Butler et al., 2024).

Além disso, a degradação florestal é frequentemente subestimada nos cálculos de emissões de carbono, o que pode levar a uma avaliação inadequada dos impactos ambientais dessas atividades. O desenvolvimento de novas tecnologias de sensoriamento remoto tem possibilitado a detecção mais precisa das áreas degradadas, melhorando a estimativa das emissões associadas (Tejada et al., 2024).

A restauração de áreas degradadas, por meio de técnicas como a regeneração natural assistida, também tem se mostrado uma estratégia eficaz para aumentar a captura de carbono. Essa abordagem permite a recuperação da biodiversidade e a restauração dos serviços ecossistêmicos, contribuindo para a redução das emissões líquidas de carbono (Rajive et al., 2024).

Outro desafio é a necessidade de conciliar a conservação florestal com o desenvolvimento econômico nas regiões tropicais. A criação de alternativas sustentáveis para as comunidades locais, como a agrofloresta e o ecoturismo, pode reduzir a pressão sobre as florestas e, ao mesmo tempo, proporcionar meios de subsistência (Callinan, 2024).

Portanto, as emissões do desmatamento e da degradação em florestas tropicais são uma questão complexa que exige abordagens integradas e políticas eficazes de conservação. A implementação de programas como o REDD+, combinada com tecnologias avançadas de monitoramento e restauração florestal, pode contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas e a conservação desses ecossistemas vitais (Maysarah, 2024).

2.3 Desmatamento e degradação florestal na Amazônia maranhense

O desmatamento na Amazônia Maranhense é impulsionado principalmente pela expansão da agricultura, especialmente do cultivo de soja, e pela pecuária extensiva. A conversão de florestas em áreas agrícolas resulta na liberação imediata de CO₂, que estava anteriormente armazenado na biomassa das árvores e no solo. Estudos indicam que o desmatamento na Amazônia Legal, incluindo o Maranhão, é responsável por uma parcela significativa das emissões de GEE do Brasil, contribuindo de maneira substancial para as mudanças climáticas globais (Fearnside, 2020).

Além do desmatamento, a degradação florestal é outro fator crítico que contribui para as emissões de GEE na Amazônia Maranhense. A extração seletiva de madeira,

juntamente com os incêndios florestais frequentes na região, degrada a estrutura da floresta, reduzindo sua capacidade de sequestrar carbono e, ao mesmo tempo, aumentando as emissões de CO₂ e outros GEE. Esse processo de degradação é muitas vezes subestimado, mas seus impactos cumulativos podem ser tão prejudiciais quanto o desmatamento completo (Malhi et al., 2019).

A Amazônia Maranhense também enfrenta desafios específicos relacionados às mudanças climáticas, que exacerbam os efeitos do desmatamento e da degradação. A mudança nos padrões de precipitação e o aumento das temperaturas médias tornam a região mais suscetível a incêndios florestais, que por sua vez aumentam as emissões de GEE. Essa retroalimentação entre clima e desmatamento coloca a Amazônia Maranhense em uma posição particularmente vulnerável (Brando et al., 2020).

O papel das políticas públicas na mitigação das emissões de GEE na Amazônia Maranhense é crucial. No entanto, a efetividade dessas políticas tem sido limitada pela falta de fiscalização adequada e pela pressão contínua do agronegócio. Iniciativas como o Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) precisam ser adaptadas e reforçadas para atender às especificidades da Amazônia Maranhense, garantindo a proteção das florestas remanescentes (Nepstad et al., 2014).

Além das políticas de controle, a restauração florestal emerge como uma estratégia importante para reduzir as emissões de GEE na Amazônia Maranhense. A recuperação de áreas degradadas por meio de técnicas como a regeneração natural assistida e o plantio de espécies nativas pode aumentar o sequestro de carbono e ajudar a restaurar os serviços ecossistêmicos essenciais que essas florestas fornecem (Strassburg et al., 2020).

A integração das comunidades locais nos esforços de conservação e restauração é essencial para o sucesso dessas iniciativas. As comunidades tradicionais e os povos indígenas da Amazônia Maranhense possuem um conhecimento profundo do manejo sustentável da terra, e sua participação pode garantir que as práticas de conservação sejam culturalmente adequadas e eficazes. A valorização do conhecimento tradicional e o fortalecimento dos direitos territoriais são fundamentais para a sustentabilidade a longo prazo (Coomes et al., 2019).

A Amazônia Maranhense, como parte da Amazônia Legal, desempenha um papel importante no equilíbrio climático regional e global. Portanto, a conservação dessa

região é não apenas uma questão ambiental, mas também uma necessidade global para a mitigação das mudanças climáticas. O compromisso contínuo com a proteção e restauração das florestas nessa região é crucial para reduzir as emissões de GEE e garantir um futuro sustentável para as próximas gerações (Silva et al., 2021).

Em conclusão, as emissões de GEE na Amazônia Maranhense são um desafio complexo que exige uma abordagem integrada, combinando políticas públicas eficazes, restauração florestal, e a participação ativa das comunidades locais. Somente por meio de esforços coordenados e sustentados será possível mitigar os impactos do desmatamento e da degradação nessa região crítica da Amazônia Legal (Ferreira et al., 2018).

2.4 Iniciativas de monitoramento do uso da terra e o desmatamento na Amazônia maranhense

O Brasil tem se destacado no monitoramento e combate ao desmatamento na Amazônia e no Maranhão através de iniciativas como o PRODES (Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite) e o DETER (Sistema de Detecção do Desmatamento em Tempo Real). Ambos são coordenados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e desempenham papéis complementares na preservação da floresta.

O PRODES, criado em 1988, utiliza imagens de satélite para monitorar o desmatamento por corte raso na Amazônia Legal. Este projeto gera taxas anuais de desmatamento, que são fundamentais para a formulação de políticas públicas e para a avaliação da eficácia dessas políticas. As imagens de satélite utilizadas pelo PRODES incluem as do LANDSAT, CBERS e IRS, que permitem uma resolução espacial adequada para identificar áreas desmatadas de no mínimo 6,25 hectares¹ (INPE, 2024).

No estado do Maranhão, que abrange tanto o bioma Amazônia quanto o Cerrado, a aplicação do PRODES e DETER é crucial. A combinação de monitoramento detalhado e alertas rápidos permite que as autoridades tomem medidas imediatas contra o desmatamento ilegal, protegendo assim uma das regiões mais biodiversas do Brasil. Contudo, a efetividade dessas iniciativas depende não apenas da coleta de dados, mas também da aplicação rigorosa das políticas ambientais (Conceição Bispo et al., 2024).

A detecção desses monitoramentos, para o DETER, até o presente momento foi detectado 422.491,52 hectares de áreas degradadas ou exploradas ilegalmente e para o

PRODES, até o presente momento foi detectado 334.729,91 hectares de áreas desmatadas, conforme a figura 2.

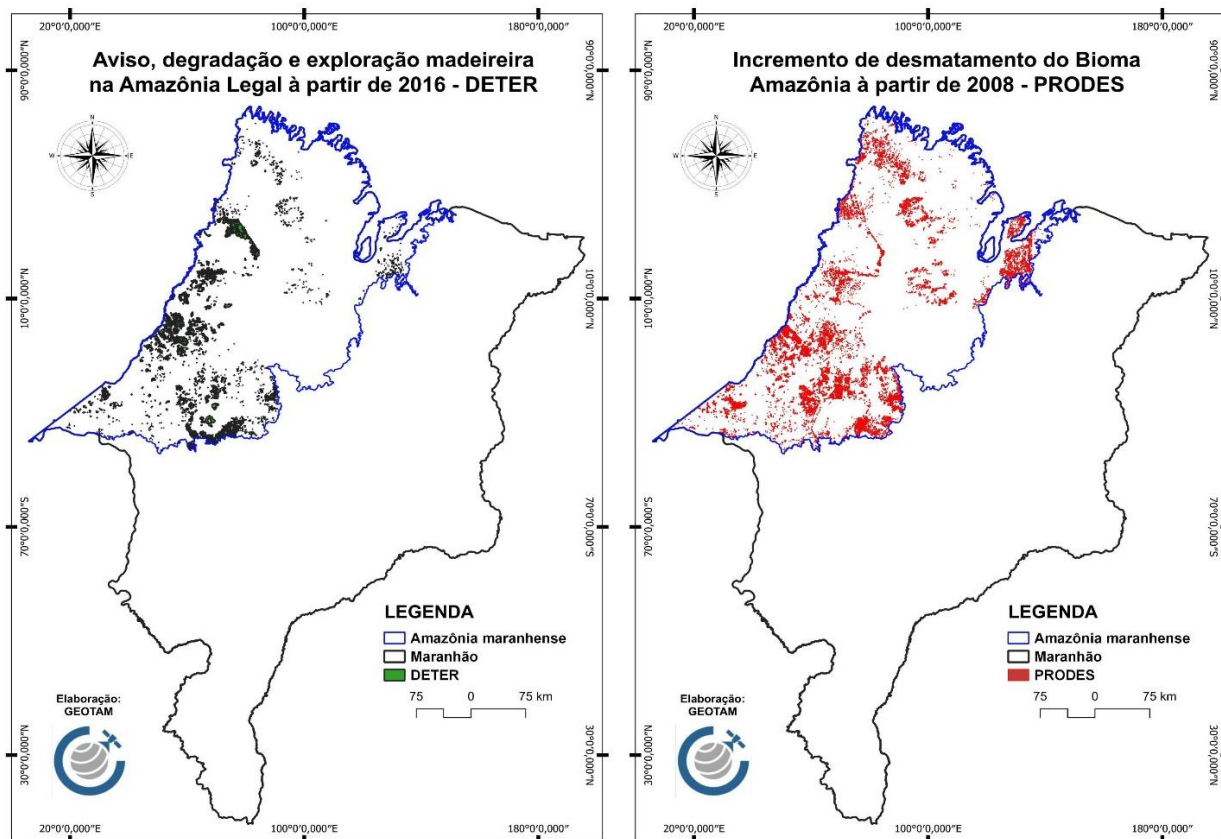


Figura 2: Monitoramento ao desmatamento na Amazônia maranhense

Fonte: GEOTAM, 2024

O MapBiomas é outra iniciativa colaborativa brasileira que se destaca no monitoramento e análise das transformações no uso e cobertura da terra em todo o território nacional, com ênfase em biomas como a Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa. O projeto utiliza tecnologias avançadas, como imagens de satélite e inteligência artificial, para mapear e documentar as mudanças ambientais que ocorrem ao longo dos anos.

A iniciativa MapBiomas desempenha um papel crucial na análise e monitoramento do uso do solo no Brasil, especialmente na Amazônia e no Maranhão. Em 2023, o projeto revelou que, embora tenha havido uma redução de 11,6% no desmatamento geral no Brasil, a Amazônia ainda enfrenta desafios significativos. A equipe de MapBiomas destacou que o desmatamento na Amazônia continua em ritmo alarmante, com uma perda diária média de 1.245 hectares de vegetação nativa, o que equivale a aproximadamente oito árvores por segundo (CartaCapital, 2024).

No Maranhão, o cenário é igualmente preocupante. Pela primeira vez, o estado do Maranhão liderou o ranking de desmatamento entre os estados brasileiros, superando inclusive alguns estados da Amazônia. Em 2023, o Maranhão foi responsável por uma área significativa de desmatamento, impulsionado principalmente pela expansão agropecuária (Agência Brasil, 2024).

Além disso, o relatório MapBiomas 2023 destacou que o Cerrado, um bioma que inclui o Maranhão, superou a Amazônia como o bioma mais desmatado do Brasil, com a região de Matopiba (que abrange partes do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) assumindo a liderança no desmatamento nacional. Esse fato acende um alerta sobre a necessidade de políticas públicas mais eficazes para a preservação dessas áreas (Cerrado Info, 2024).

De acordo com o MapBiomas até o presente momento foi detectado 69.533,17 hectares de áreas desmatadas, no bioma amazônico maranhense, conforme a figura 3.

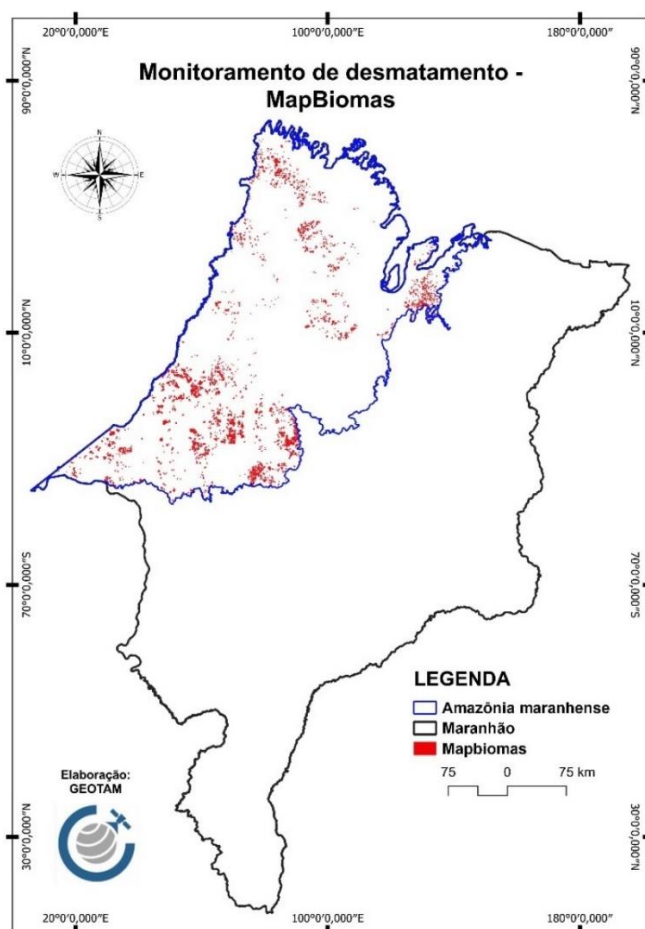


Figura 3: Monitoramento do desmatamento na Amazônia maranhense pelo Mapbiomas

Fonte: GEOTAM, 2024

2.5 Ciclo do carbono em florestas tropicais

O ciclo do carbono nas florestas tropicais é um processo crucial para a regulação do clima global. Essas florestas, que cobrem cerca de 12% da superfície terrestre, desempenham um papel fundamental na captura e armazenamento de carbono, ajudando a mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Vergasta, 2023). A capacidade dessas florestas de atuar como sumidouros de carbono está intimamente ligada à sua biodiversidade e à saúde dos seus ecossistemas.

Nas florestas tropicais, o carbono é sequestrado principalmente através da fotossíntese realizada pelas árvores. Durante esse processo, o dióxido de carbono (CO_2) é absorvido da atmosfera e convertido em biomassa vegetal, que inclui troncos, galhos, folhas e raízes. Esse carbono pode permanecer armazenado nas árvores por décadas ou até séculos (Borges, 2024). Além disso, o solo das florestas tropicais também desempenha um papel importante no armazenamento de carbono, particularmente na serapilheira e na matéria orgânica do solo.

No entanto, as florestas tropicais estão sob crescente pressão devido ao desmatamento e às mudanças climáticas. O desmatamento, em particular, libera grandes quantidades de carbono armazenado na biomassa das árvores para a atmosfera, contribuindo significativamente para o aumento das concentrações de CO_2 e, conseqüentemente, para o aquecimento global (Costa, 2024). Além disso, a fragmentação das florestas pode reduzir a capacidade desses ecossistemas de funcionar como sumidouros de carbono.

Estudos têm mostrado que o ciclo do carbono em florestas tropicais é altamente sensível a variações climáticas, como mudanças na precipitação e na temperatura. Durante períodos de seca, por exemplo, a fotossíntese pode ser reduzida, diminuindo a capacidade da floresta de sequestrar carbono (Placido, 2024). Além disso, o aumento das temperaturas pode acelerar a decomposição da matéria orgânica no solo, liberando mais CO_2 na atmosfera.

A dinâmica do carbono nas florestas tropicais também está relacionada ao ciclo da água. A evapotranspiração, que é a soma da evaporação da água do solo e a transpiração das plantas, é um processo crucial que influencia tanto o ciclo do carbono quanto o ciclo hidrológico (Bezerra & Cunha, 2023). A interdependência desses ciclos

destaca a complexidade das interações ecológicas nas florestas tropicais e a importância de abordagens integradas para o seu estudo.

Além disso, o papel das florestas tropicais no ciclo global do carbono vai além do sequestro de CO₂. Esses ecossistemas também emitem dióxido de carbono através da respiração das plantas e da decomposição da matéria orgânica. Em algumas regiões, como as florestas sazonalmente secas, a emissão de CO₂ pode até superar a quantidade sequestrada, dependendo das condições ambientais (Silva & Galvêncio, 2024).

As práticas de manejo florestal sustentável são essenciais para manter o papel das florestas tropicais como sumidouros de carbono. Isso inclui a conservação das florestas intactas e a restauração de áreas desmatadas. Estudos indicam que a recuperação da vegetação nativa pode ajudar a restaurar a capacidade dessas áreas de sequestrar carbono, embora esse processo possa levar décadas (Chavele, 2024).

As florestas tropicais desempenham um papel vital no ciclo global do carbono e, conseqüentemente, na regulação do clima. No entanto, essas florestas estão sob ameaça devido ao desmatamento e às mudanças climáticas, o que pode comprometer sua capacidade de atuar como sumidouros de carbono. A conservação e o manejo sustentável desses ecossistemas são fundamentais para garantir que eles continuem a desempenhar esse papel crucial no futuro (Oliveira & Zanoni, 2023).

2.6 Sensoriamento remoto de biomassa

O sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta crucial para a estimativa da biomassa em florestas tropicais, especialmente devido à complexidade e à extensão desses ecossistemas. O uso de tecnologias como LiDAR, radar e imagens de satélite tem permitido avanços significativos na quantificação da biomassa acima do solo, proporcionando dados mais precisos e detalhados sobre a distribuição de carbono nessas áreas (Brown et al., 2024).

Uma das principais vantagens do sensoriamento remoto é a capacidade de mapear grandes áreas de floresta com alta precisão. Isso é particularmente importante em regiões tropicais, onde o acesso ao solo pode ser limitado devido à densidade da vegetação e às condições climáticas. Estudos demonstram que a combinação de diferentes tipos de dados de sensoriamento remoto, como imagens ópticas e de radar, pode melhorar

significativamente as estimativas de biomassa, permitindo uma análise mais detalhada das florestas tropicais (Effendi et al., 2024).

A tecnologia LiDAR, em particular, tem se destacado na estimativa da biomassa em florestas tropicais. LiDAR utiliza pulsos de laser para medir a altura da vegetação e a estrutura da floresta, o que permite uma estimativa mais precisa da biomassa. Essa tecnologia tem sido amplamente utilizada em estudos na Amazônia e em outras florestas tropicais para mapear a distribuição da biomassa e monitorar as mudanças na cobertura florestal ao longo do tempo (Winstanley et al., 2024).

Além do LiDAR, o uso de satélites de radar como o Sentinel-1 tem se mostrado promissor na estimativa da biomassa em florestas tropicais. Esses satélites são capazes de penetrar nas camadas superiores da floresta, capturando informações sobre a estrutura interna das árvores e do solo, o que é essencial para uma estimativa precisa da biomassa (Chawla, 2024).

No entanto, apesar dos avanços tecnológicos, a estimativa da biomassa em florestas tropicais ainda enfrenta desafios significativos. A heterogeneidade dessas florestas, com variações na densidade e na altura das árvores, torna difícil a aplicação de modelos uniformes para todas as regiões. Além disso, fatores como a presença de lianas e outras plantas trepadeiras podem interferir nas medições, resultando em estimativas superestimadas ou subestimadas (Mackintosh et al., 2024).

A integração de dados de sensoriamento remoto com inventários florestais de campo tem sido uma abordagem eficaz para superar esses desafios. Ao combinar medições de campo com dados de sensoriamento remoto, os pesquisadores podem calibrar e validar seus modelos, melhorando a precisão das estimativas de biomassa (Shenkin et al., 2024). Essa abordagem híbrida é particularmente útil em áreas onde os dados de campo são limitados ou inexistentes.

Outro avanço importante é o uso de aprendizado de máquina e inteligência artificial para processar grandes volumes de dados de sensoriamento remoto. Essas tecnologias permitem a análise de dados complexos e a criação de modelos preditivos mais precisos, que podem ser aplicados em diferentes regiões e tipos de floresta (Zwick et al., 2024).

É importante destacar o papel do sensoriamento remoto no monitoramento de mudanças na biomassa florestal ao longo do tempo. Isso é essencial para entender o impacto de atividades humanas, como o desmatamento e a degradação florestal, na capacidade das florestas tropicais de armazenar carbono. Estudos recentes mostram que o sensoriamento remoto pode detectar mudanças na biomassa com alta precisão, permitindo uma resposta mais rápida e eficaz às ameaças ambientais (Bourgoin et al., 2024).

Desta forma, conforme apresentado na revisão bibliográfica, abaixo estão descritos os seguintes objetivos, que buscam abordar as lacunas identificadas na literatura e avançar no entendimento do tema. Esses objetivos foram definidos com base nas evidências e discussões teóricas previamente exploradas, visando contribuir para o desenvolvimento de soluções práticas e teóricas que respondam às questões levantadas no estudo.

3. OBJETIVOS

Artigo: Quantificação dos estoques de carbono acima do solo da Amazônia Maranhense

3.1 Objetivo Geral

Fornecer a quantificação e a valoração dos estoques de carbono florestal da Amazônia maranhense.

3.2 Objetivos Específicos

- Comparar a densidade dos estoques de carbono para diferentes tipos de florestas em diferentes compartimentos na Amazonia Maranhense;
- Elaborar um mapa de estoques de carbono e de CO₂ para a Amazônia Maranhense;
- Distribuir por diferentes compartimento e tipos de florestas dos estoques de CO₂ na Amazonia maranhense;
- Valorar economicamente as Florestas por Categoria.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, A.; MOUTINHO, P.; SOARES-FILHO, B. Deforestation scenarios for the Brazilian Amazon: impacts and mitigation opportunities. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 7, 074045, 2018.

ARAÚJO, T. M.; CARDOSO, D. Forest degradation and greenhouse gas emissions in the eastern Amazon. *Journal of Environmental Management*, v. 256, 109946, 2020.

BEZERRA, U. A.; CUNHA, J. E. B. L. Aplicativo para estimativa de séries temporais de evapotranspiração na Amazônia. XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023. Disponível em: <http://mtc-m21d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/11.21.16.01/doc/XXV-SBRH1031-2-1-20230731-172657.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2024.

BORGES, E. A. T. S. Efluxo de CO₂ do tronco em árvores de uma floresta de terra firme na Amazônia Central. 2024. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/40424>. Acesso em: 17 ago. 2024.

BOURGOIN, C.; CECCHERINI, G.; GIRARDELLO, M.; VANCUTSEM, C. Human degradation of tropical moist forests is greater than previously estimated. *Nature*, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07629-0>. Acesso em: 17 ago. 2024.

BROWN, C.; SJÖGERSTEN, S.; LEDGER, M. J.; PARISH, F.; BOYD, D. Remote sensing for restoration change monitoring in tropical peat swamp forests in Malaysia. *Remote Sensing*, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/15/2690>. Acesso em: 17 ago. 2024.

CAMACHO-ROZO, C. P.; URBINA-CARDONA, N. Major knowledge shortfalls for Colombian Amazonian anurans: implications for conservation. *Austral Ecology*, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/aec.13564>. Acesso em: 17 ago. 2024.

CERRADO INFO. Cerrado supera Amazônia e se torna o bioma mais desmatado do país, mostra MapBiomias. 2024. Disponível em: <https://climainfo.org.br/2024/05/29/cerrado-supera-amazonia-e-se-torna-o-bioma-mais-desmatado-do-pais-mostra-mapbiomias/>. Acesso em: 17 ago. 2024.

CHAVELE, I. P. Estimativa do estoque de carbono acima do solo, dos principais tipos de vegetação seca no Parque Nacional do Banhine. 2024. Disponível em: <http://monografias.uem.mz/handle/123456789/3493>. Acesso em: 17 ago. 2024.

CHAWLA, A. Integrating single and multi-band radar data for aboveground biomass assessment in Indonesia's complex tropical landscape. Master's Thesis, 2024. Disponível em: <http://essay.utwente.nl/100509/>. Acesso em: 17 ago. 2024.

COSTA, M. B. T. D. Além das árvores: mapeando a biomassa total acima do solo no Cerrado brasileiro usando dados de lidar aerotransportado de alta densidade. 2024. Disponível em: <http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/48414>. Acesso em: 17 ago. 2024.

Coomes, O. T., et al. Amazonian forest conservation: climate change, fire, and the future of Amazonian ecosystems. *Global Environmental Change*, v. 59, 101977, 2019.

DUTRA, D.; SANTOS JUNIOR, M.; FERREIRA, I. Optimizing fire preparedness: a forward-looking analysis for 2030 in Boca do Acre region, Brazilian Amazon. EGU General Assembly 2024. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024EGUGA..26.5700D/abstract>. Acesso em: 17 ago. 2024.

EFFENDI, N. A. F. N.; MOHD ZAKI, N. A.; ABD LATIF, Z. Combination of hyperspectral and LiDAR for aboveground biomass estimation using machine learning. *Transactions in GIS*, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/tgis.13214>. Acesso em: 17 ago. 2024.

FEARNSIDE, P. M. Amazônia e o desafio das mudanças climáticas: as emissões de gases de efeito estufa do desmatamento. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 26, p. 17-32, 2020.

FERREIRA, L. V., et al. Amazônia Maranhense: desafios e soluções para a conservação. *Revista Brasileira de Biociências*, v. 16, n. 2, p. 77-83, 2018.

GRODOFZIG, R.; RENOU, M.; MAURITSEN, T. Observation-inferred resilience loss of the Amazon rain forest possibly due to internal climate variability. *EGUsphere*, 2023. Disponível em: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2023/egusphere-2023-2734/>. Acesso em: 17 ago. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES). Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 17 ago. 2024.

KUCK, T. N.; SHIGUEMORI, E. H.; DE CARVALHO DANTAS, B. N. Machine learning techniques for selective logging detection in X-band SAR images—a comparative evaluation. INPE, 2023. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2023/04.25.11.08/doc/156017.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2024.

LIMA, M. G. B. Herbal medicine promotion for a restorative bioeconomy in tropical forests: a reality check on the Brazilian Amazon. Policy Commons, 2023. Disponível em: <https://policycommons.net/artifacts/4850319/herbal-medicine-promotion-for-a-restorative-bioeconomy-in-tropical-forests/5687172/>. Acesso em: 17 ago. 2024.

MACKINTOSH, E. J.; WAITE, C. E.; PUTZ, F. E.; BRENNAN, S. Lianas associated with continued forest biomass losses following large-scale disturbances. Biotropica, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/btp.13348>. Acesso em: 17 ago. 2024.

MALHI, Y., et al. Forest degradation in the Amazon: an overlooked driver of wildfires, carbon emissions, and biodiversity loss. Science Advances, v. 5, n. 10, eaaw2369, 2019.

NEPSTAD, D., et al. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. Science, v. 344, n. 6188, p. 1118-1123, 2014.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; BORMA, L. S. The Amazon deforestation and climate change. Nature Climate Change, v. 6, n. 4, p. 432-439, 2016.

OLIVEIRA, A. L.; SANTOS, R. M. Estratégias de mitigação do desmatamento para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Boletim de Pesquisa em Clima e Meio Ambiente, v. 9, n. 2, p. 98-112, 2021.

OLIVEIRA, G.; MATAVELI, G.; STARK, S. C. Increasing wildfires threaten progress on halting deforestation in Brazilian Amazonia. Nature Ecology & Evolution, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41559-023-02233-3>. Acesso em: 17 ago. 2024.

OLIVEIRA, L. R.; ZANONI, I. Z. Serapilheira em floresta Atlântica no Brasil: uma abordagem da produção científica (1987-2019). 2023. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/2652>. Acesso em: 17 ago. 2024.

PLACIDO, A. Padrões espectrais de reflectância foliar e sua relação com o status hídrico em uma floresta de terra firme na Amazônia Central. 2024. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/40203>. Acesso em: 17 ago. 2024.

SILVA, C. V. J., et al. Forest resilience, fire, and climate change: Amazonian forest degradation dynamics. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 4, 30, 2021.

SILVA, J. N. B.; GALVÍNCIO, J. D. Estimativas de sequestro de carbono por diferentes métodos em ecossistemas florestais: uma abordagem sobre a floresta tropical sazonalmente seca (Caatinga). 2024. Disponível em: <https://www.revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/1610>. Acesso em: 17 ago. 2024.

SILVA, J. P., et al. Impacto do desmatamento na emissão de gases de efeito estufa na Amazônia. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 14, n. 3, p. 45-60, 2019.

SOARES-FILHO, B., et al. Criação de Unidades de Conservação como estratégia para redução das emissões de GEE na Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 29, n. 84, p. 203-206, 2015.

Souza, M.F., Tisler, T.R., & Castro, G.S.A. (2023). Port regionalization for agricultural commodities: mapping exporting port hinterlands. *Journal of Transport Geography*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103506>

STRASSBURG, B. B. N., et al. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, v. 586, n. 7831, p. 724-729, 2020.

VERGASTA, L. A. Efeitos das mudanças do clima e desmatamento no regime hidroclimático da bacia do Rio Madeira. 2023. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/40192>. Acesso em: 17 ago. 2024.

WINSTANLEY, P.; DALAGNOL, R.; MENDIRATTA, S.; BRAGA, D. Post-logging canopy gap dynamics and forest regeneration assessed using airborne LiDAR time series in the Brazilian Amazon with attribution to gap types. *Remote Sensing*, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/13/2319>. Acesso em: 17 ago. 2024.

ZWICK, M.; CARDOSO, J. A.; GUTIERREZ-ZAPATA, D. M. Pixels to pasture: using machine learning and multispectral remote sensing to predict biomass and nutrient quality in tropical grasslands. *Remote Sensing*, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938524001460>. Acesso em: 17 ago. 2024.

CAPÍTULO II

Quantificação dos estoques de carbono acima do solo da Amazônia Maranhense

Artigo publicado em 07/17/2024 ao periódico:



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de
Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



*A formatação quanto ao número de linhas, margens e espaçamento não está de acordo com as normas da revista para que fosse mantida a padronização da dissertação.

Quantification of above-ground carbon stocks in the Maranhão Amazon

Admo Ramos Silva Júnior¹, Iara Regina Ferreira do Carmo¹, Phelipe Silva de Araújo¹,
Raimundo Matos Pereira Neto², Gunter de Azevedo Reschke², Celso Henrique Leite
Silva Junior^{3,1}

Corresponding author: ¹Graduate Program in Biodiversity and Conservation (PPGBC) – Federal University of Maranhão (UFMA), Bacanga University Campus. Avenida dos Portugueses, s/n. ZIP code: 65.085-580. São Luís – MA, email: admorsjr@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1928-0236>; phe1394@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0596-6771>; igeoufma@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6713-5271>; ²State University of Maranhão – (UEMA), Paulo VI University City, Av. Lourenço Vieira da Silva, no. 1000, Jardim São Cristóvão neighborhood, ZIP Code: 65055-310 – São Luís/MA. Email: matos.ne70@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7340-5512>; reschke2009@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8160-2656>; ³Amazon Environmental Research Institute (IPAM), SCLN 211 BLOCK B. ROOM 201. Brasília-DF, ZIP Code 70834-520 Email: celsohlsj@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1052-5551>

Artigo recebido em 04/16/2024 artigo aceito em 07/17/2024

ABSTRACT

The Maranhão Amazon is a crucial carbon reservoir, storing large amounts of CO₂, which is vital for combating global warming. This study utilized remote sensing technologies and satellite data to quantitatively assess the carbon in the region's tropical forests. The main aim was to quantify and economically evaluate the carbon stocks in the Amazon forests of the state of Maranhão, Brazil. Remote sensing data was used to analyze the vegetation, including the characteristics of terra firme forests, secondary vegetation, mangroves, and protected areas. It was found that the areas with the highest carbon concentration are the mature forests and secondary vegetation, particularly in the Rebio do Gurupi conservation unit and Indigenous Lands. The region is home to approximately 279 million tons of CO₂, valued at 6.70 billion dollars. The study emphasizes the importance of adopting integrated and sustainable strategies that promote environmental protection alongside socioeconomic development, ensuring a resilient and prosperous future for the forests and their communities.

Keywords: Remote Sensing. REDD+. Carbon Stock. Carbon Credit. Climate Change.

Quantificação dos estoques de carbono acima do solo da Amazônia Maranhense

R E S U M O

A Amazônia Maranhense é um reservatório de carbono essencial, armazenando grandes quantidades de CO₂, que é vital para combater o aquecimento global. Este estudo usou tecnologias de sensoriamento remoto e dados de satélite para avaliar quantitativamente o carbono nas florestas tropicais da região. O objetivo principal foi quantificar e avaliar economicamente os estoques de carbono nas florestas da Amazônia Maranhense, utilizando dados de sensoriamento remoto para analisar a vegetação, incluindo as características das florestas de terra firme, vegetação secundária, manguezais e áreas protegidas. Descobriu-se que as áreas com maior concentração de carbono são as florestas maduras e a vegetação secundária, particularmente na unidade de conservação Rebio do Gurupi e terras indígenas. A região abriga aproximadamente 279 milhões de toneladas de CO₂, avaliados em 6,70 bilhões de dólares. O estudo enfatiza a importância de adotar estratégias integradas e sustentáveis que promovam a proteção ambiental junto ao desenvolvimento socioeconômico, garantindo um futuro resiliente e próspero para as florestas e suas comunidades.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. REDD+. Estoque de Carbono. Crédito de Carbono. Mudanças Climáticas.

INTRODUÇÃO

A temperatura terrestre aumentou 1,40°C desde 1850, e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) elevaram-se em 50% em relação à essa mesma época (OMM, 2023). As florestas tropicais desempenham um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas globais devido à sua capacidade de retirar carbono da atmosfera (Kassa & Molla, 2024; Santos et al., 2024). Embora ocupem apenas 31% da superfície terrestre, esses ecossistemas armazenam mais de 86% do carbono presente na vegetação global (Chen et al., 2023). Isso ocorre devido a capacidade das florestas atuarem como sumidouros de CO₂, com potencial para capturar e armazenar grandes quantidades de dióxido de carbono da atmosfera. Esse processo é fundamental para o equilíbrio do ciclo do carbono e para mitigar o aumento do aquecimento global (Benício et al., 2023; Chen et al., 2023; Kassa & Molla, 2024).

Dada a importância das florestas na mitigação das mudanças climáticas, durante o Acordo de Paris, muitos países se comprometeram a implementar atividades de restauração florestal para reduzir as emissões líquidas de carbono. O Brasil, por exemplo, se comprometeu a reflorestar 12 milhões de hectares (Mha) de floresta até 2030 (Benício et al., 2023). Para tentar cumprir esse acordo, foram criados três projetos de restauração. O primeiro é a restauração natural, onde estima-se que 11,5 Mha serão recuperados, sendo que mais de 9,5 Mha de floresta estão sendo restaurados desde 2008, somente na Amazônia. O segundo é o reflorestamento, onde aproximadamente 9 Mha estão nesse processo. Esse projeto tem o potencial de evitar a necessidade de desmatar novas áreas para suprir a demanda da indústria florestal, ao mesmo tempo que consiga extrair CO₂ da atmosfera. E o terceiro projeto é a recuperação florestal, que visa restaurar cerca de 79.000 hectares (Wir, 2021).

A Floresta Amazônica abrange uma área de cerca de 7 milhões de km², dos quais aproximadamente 60% estão localizados no Brasil (Silva Júnior et al., 2022). É conhecida como a maior floresta tropical do mundo e possui a maior diversidade ecológica do país, sendo responsável por abrigar mais de 10% de toda a biodiversidade do planeta (Flores et al., 2024). Por ser uma floresta tropical, a Amazônia tem uma capacidade ainda maior de retirar CO₂ da atmosfera (Benício et al., 2023). A diversidade florestal tende a influenciar tanto na captura de CO₂ quanto no armazenamento de carbono (Yang et al., 2023), já que áreas com maior diversidade de espécies vegetais possuem maiores quantidades de CO₂, (Chen et al., 2024) tanto abaixo quanto acima do solo.

A degradação das florestas tropicais, especialmente na Amazônia, aumentou substancialmente. Entre 1985 e 2021, houve uma perda de 11,5% da vegetação original (Santos et al., 2024), resultando em perda de biodiversidade, redução nos estoques de carbono e aumento nas emissões de CO₂, o que contribui para o aumento das temperaturas globais (Assis et al., 2022; Santos et al., 2023). Assis et al. (2022) projetaram o percurso ambiental na Amazônia brasileira de 2020 a 2050, considerando dois cenários: um sustentável e outro de fragmentação. No cenário sustentável, prevê-se a redução do desmatamento ilegal até 2030 e uma diminuição das emissões líquidas de CO₂, que foram estimadas em 0,74 Gt no período de 30 anos. Em contraste, no cenário de fragmentação, as taxas das emissões líquidas de CO₂ estimadas no mesmo período atingiram os valores de 22,63 Gt.

A Amazônia armazena o equivalente a 150-200 Pg C das emissões globais, o que seria equivalente a 15-20 anos das emissões de CO₂ para a atmosfera (Flores et al., 2024). No entanto, nos últimos trinta anos, o setor de uso e mudança da terra demonstra que, devido ao desmatamento, incêndios florestais e à agricultura intensiva, a Amazônia brasileira foi transformada de um sumidouro de carbono em uma fonte de emissão (Hampl, 2024). Em 2021, a Amazônia brasileira capturou menos da metade de suas emissões, resultando em um excedente de 740 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, o que representa 42% das emissões líquidas do Brasil (Hampl, 2024).

As terras indígenas desempenham um papel importante na conservação da biodiversidade, na redução do desmatamento e na preservação dos recursos naturais, o que afeta diretamente a quantidade de carbono emitido e armazenado. Entretanto o desmatamento ilegal dessas áreas desde 2013 subiu cerca de 135%, devido a invasões dessas terras para a agricultura, e atividades de mineração ilegal (Nascimento et al., 2024). Atualmente dos 111.083.888 hectares demarcados como terra indígena cerca de 54.491.982 hectares estão dentro da Amazônia Legal (Hampl, 2024). A Amazônia Maranhense é uma área de transição entre o Cerrado e a Amazônia, caracterizada por uma vasta formação de ecótonos naturais e antrópicos. A fragmentação desses biomas tende a fragilizar ainda mais esse ecossistema, favorecendo à perda de florestas (Leão et al., 2024) e, conseqüentemente, à redução do carbono estocado.

Segundo Lopes (2023) aproximadamente, 75% da vegetação nativa da amazônia maranhense foi suprimida para dar lugar a atividades como agricultura e pecuária. Mesmo com uma redução no desmatamento no estado, ainda persistem altas taxas de perda de

cobertura vegetal devido ao corte ilegal de florestas e desmatamento em áreas de preservação, sendo listado como o 4º estado que mais contribui para o desmatamento do bioma Amazônia, apesar de representar apenas 34% da extensão total do bioma. Leão et al. (2023), ao realizarem um estudo sobre os valores da biomassa acima do solo (AGB) no estado do Maranhão, descobriram que os valores mais elevados foram observados em terras indígenas, com destaque para o Alto Turiaçu, onde atingiram $318,65 \pm 169$ Mg/ha. Em seguida, a terra Araribóia, Caru e Awa apresentaram valores de $174,94 \pm 101$ Mg/ha, e a Reserva Biológica do Gurupi, com $198,66 \pm 115$ Mg/ha. Essas terras estão dentro dos 34,8% do território maranhense que compõem o bioma amazônico (Leão et al., 2023). Leal et al. (2023) chamam a atenção para a preservação do bioma amazônico no Maranhão, principalmente em áreas indígenas, uma vez que essas áreas têm se comprovado cientificamente eficazes tanto na conservação da biodiversidade quanto na regulação do clima global.

Entre as maneiras de se mensurar o carbono destacam-se o in-situ (método direto) e sensoriamento remoto (SR) (método indireto). Os métodos diretos ou de determinação envolvem a medição real feita diretamente na biomassa, enquanto os métodos indiretos envolvem a estimativa da biomassa utilizando técnicas de sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto desempenha um papel fundamental na quantificação do carbono, pois essa técnica permite que essa avaliação ocorra de modo preciso (Feitosa-Júnior et al., 2024).

O sensoriamento remoto por satélite desempenha um papel fundamental na estimativa da AGB. A utilização de dados oferece uma abordagem eficaz e econômica para monitorar mudanças na AGB, pois estima com precisão a clorofila do dossel e monitora informações sobre a composição vegetal. Além disso, o sensoriamento remoto emerge como uma ferramenta valiosa para monitorar a biomassa vegetal (Farzanmanesh et al., 2024). Portanto, a quantificação de carbono via SR gera informações bastante precisas sobre o ganho e a perda de carbono, assim como a variabilidade espacial desse componente. Esses dados são cruciais para calcular as emissões de gases de efeito estufa e entender a dinâmica do carbono (Feitosa- Júnior et al., 2024), contribuindo para a compreensão e gestão sustentável desses importantes ecossistemas.

Segundo Chen et al. (2024), vários fatores influenciam a quantidade de carbono acima do solo, entre eles a biodiversidade das espécies, o tamanho das árvores e as condições ambientais. Considerar esses fatores permite gerar dados para compreender a

variabilidade desse atributo e desenvolver ferramentas para aumentar o armazenamento de carbono. Logo, quantificar o carbono acima do solo em florestas é fundamental para compreender e gerenciar de maneira eficaz os estoques de carbono nos ecossistemas. Ao otimizar o armazenamento do carbono acima do solo, desempenha-se um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas e no equilíbrio do ciclo do carbono.

Vos et al. (2023) citam que cerca de 50% do carbono armazenado em uma área se encontra acima do solo, apresentando pequenas variações entre as espécies e partes vegetais. Em vista disso, a importância de quantificar o carbono acima do solo decorre da necessidade de estimar com maior precisão os estoques de carbono da área estudada, o que é fundamental para compreender a importância do uso e ocupação da terra, bem como o papel das florestas na mitigação das mudanças climáticas e na sustentabilidade dos ecossistemas florestais. Desse modo, a quantificação do carbono acima do solo é essencial para o manejo florestal sustentável e o desenvolvimento de estratégias eficazes de conservação e uso dos recursos naturais.

De acordo com Ma et al. (2024), a quantificação de AGB em ecossistemas florestais torna-se possível para compreender o ciclo de carbono, o que facilita a implementação de medidas sustentáveis para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Além disso, entender a distribuição e variação espacial de AGB, bem como os fatores que influenciam a redução desses valores, auxilia na formulação de políticas de uso e ocupação da terra, promovendo práticas de manejo florestal sustentável. Isso se torna vital para desenvolver estratégias de conservação e uso dos recursos naturais, contribuindo para a manutenção da biodiversidade global e, conseqüentemente, para o equilíbrio vital entre as espécies.

A quantificação do carbono, torna-se importante também para fazer a valoração correta desse elemento, uma vez que quando atribuído um valor monetário, permite promover tanto a sustentabilidade ambiental como a econômica. Já que ao conceder um valor econômico ao serviço de armazenamento de carbono, incentiva-se os agricultores a adotarem práticas agroecológicas, como sistemas agroflorestais biodiversos, que contribuem para a mitigação das mudanças climáticas e a conservação da biodiversidade (Oliveira et al., 2021). Além disso, a valoração do carbono pode representar uma fonte adicional de renda para os produtores rurais, tornando-se um importante instrumento para promover uma agricultura mais sustentável (Hartono, 2024; Oliveira et al., 2021).

Segundo Macreadie et al. (2021), essas iniciativas de valoração de carbono estão sendo usadas para proteger e apoiar florestas degradadas. Nos Sundarbans, foram plantadas 16 milhões de árvores, na Indonésia, 18 milhões, e no Senegal, aproximadamente 8.000 hectares foram reflorestados. Essas áreas têm a capacidade de estocar aproximadamente 2,75 milhões de toneladas de CO₂ ao longo de 20 anos. Citam também, projetos como Tahiry Honko, em Madagascar, e Mikoko Pamoja, no Quênia, que estão entre os primeiros a receber a certificação de créditos de carbono azul pelo Plan Vivo. Em Tahiry Honko, a conservação e restauração de mais de 1.200 hectares de floresta de mangue geram mais de 1.300 créditos de carbono por ano, com metade dos fundos destinados a apoiar as comunidades locais. O projeto Mikoko Pamoja ajuda a conservar 117 hectares e estabeleceu 10 hectares de floresta de mangue, tendo vendido 1.912 créditos em 2019, com 65% da receita destinada a projetos de desenvolvimento comunitário. Por isso, a valoração dos créditos de carbono visa tanto a sustentabilidade ambiental e a diminuição das temperaturas climáticas quanto o desenvolvimento econômico e social dessas áreas.

A degradação florestal no bioma Amazônico brasileiro exerce um impacto direto e quantificável na diminuição dos estoques de carbono das florestas. Diante disso, a pergunta de pesquisa deste trabalho é: Qual o impacto das degradações florestais para a redução do estoque de carbono na floresta amazônica maranhense e para o aumento das emissões dos gases de efeito estufa? Dessa maneira, a justificativa deste estudo reside na necessidade de quantificar e compreender a dinâmica do carbono acima do solo na Amazônia maranhense. Já que, biomassa vegetal tem implicações diretas na biodiversidade e na capacidade dos ecossistemas de atuarem como sumidouros de carbono, o que possibilita a geração de dados que contribuam para a conservação das áreas florestais e assegurem a continuidade dos serviços ambientais essenciais para a região e para o equilíbrio do planeta como um todo. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é fornecer uma quantificação e a valoração dos estoques de carbono florestal da Amazônia maranhense.

Para tanto, o método adotado consistirá em atividades que visam, com a sua execução, responder perguntas específicas como: Quais as comparações da densidade dos estoques de carbono para diferentes tipos de florestas em diferentes compartimentos na Amazonia Maranhense? Quais as distribuições espaciais dos estoques de carbono e de CO₂? Quais as distribuições por diferentes compartimentos e tipos de florestas dos

estoques de CO₂? Qual a valoração econômica desses estoques de carbono? Para responder a essas perguntas este trabalho parte da hipótese de que de que modo as degradações florestais contribuíram para o declínio do estoque de carbono florestal da Amazônia maranhense. Tal fato exerce um impacto direto e quantificável na diminuição dos estoques de carbono das florestas. Esse fenômeno afeta não somente a biodiversidade local, mas também contribui significativamente para o incremento das emissões de gases de efeito estufa.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A Amazônia maranhense é dona de rica biodiversidade, ocupa 26% do bioma amazônico, engloba 180 municípios do Maranhão e representa em termos de bioma, 34% do território do Estado. Localizada em uma área de transição entre o Nordeste e o Norte, em seus 81.208,40 km² como ilustrado na Figura 1. Sua localização geográfica confere características distintas, sendo um ponto de confluência de elementos ambientais diversificados, o que enriquece ainda mais sua biodiversidade. A conservação deste bioma é crucial, não apenas pelo seu valor intrínseco, mas também pela sua contribuição significativa para o equilíbrio ecológico, climático e ambiental na região.

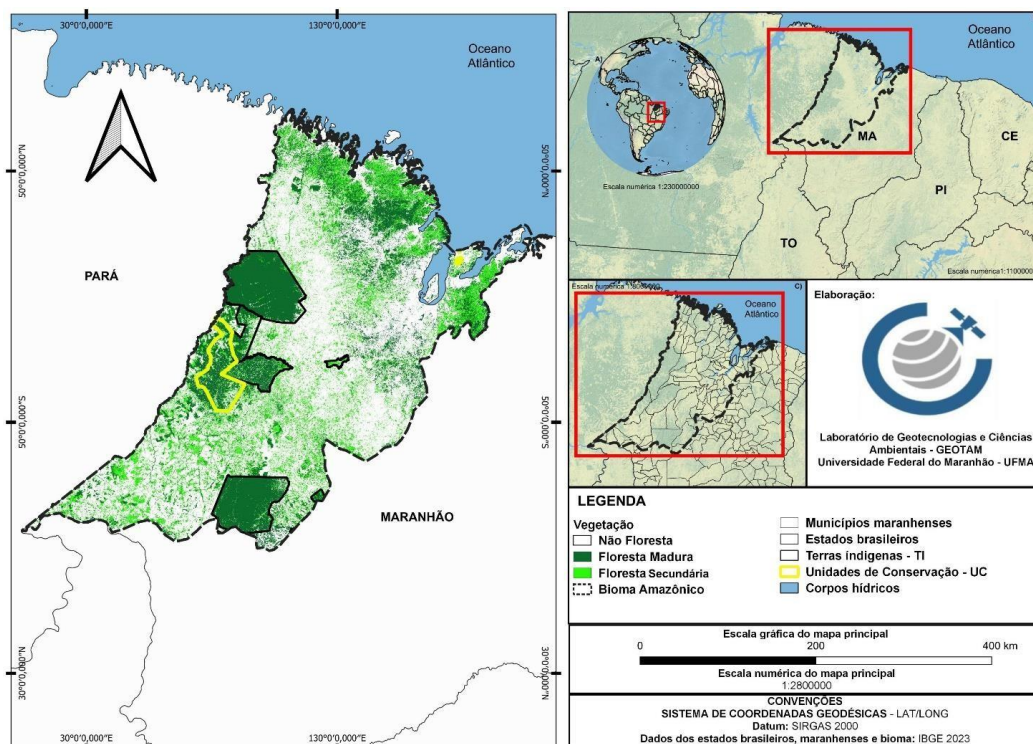


Figura 1. Localização da Área de Estudo

Conjunto de dados

Para alcançar os objetivos estabelecidos, este estudo empregou um conjunto de dados de sensoriamento remoto recentemente e de acesso livre. Os dados incorporam informações, incluindo a altura do dossel da vegetação, características distintivas de florestas de terra firme maduras e secundárias, florestas de mangue, além da delimitação das áreas legalmente protegidas. A utilização desses dados permitiu uma análise abrangente e precisa, contribuindo para insights valiosos e conclusões fundamentadas sobre o presente estudo.

Dado de altura do dossel da vegetação

Este conjunto de dados consiste em um mapa que apresenta a altura da vegetação com uma resolução espacial de 30 metros (0,09 ha). Foi elaborado por Potapov et al. (2021), utilizando uma abordagem integrada que combina dados do Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI/NASA) com as imagens capturadas pelo satélite Landsat-8. O GEDI da NASA, um sofisticado instrumento LiDAR (Light Detection And Ranging), tem contribuído significativamente para essa pesquisa desde que foi instalado na Estação Espacial Internacional em abril de 2019. Graças à sua tecnologia avançada, é possível obter medições precisas e confiáveis da estrutura tridimensional das florestas e outras ecologias vegetais em escala global.

Dados de uso e cobertura da terra

Dados de Floresta de Terra Firme Madura e Manguezais: Os dados precisos, com uma resolução espacial de 30 metros, são adquiridos a partir dos mapas elaborados pelo Projeto MapBiomas Brasil (MAPBIOMAS, 2020). Este projeto é notório por sua precisão na representação cartográfica de diversos biomas. Para assegurar a precisão dos dados, um rigoroso processo de seleção é empregado para excluir áreas de floresta secundária, garantindo que apenas regiões de floresta de terra firme madura sejam representadas. Este nível assegura a integridade dos dados e proporciona informações cruciais para o desenvolvimento do presente estudo.

Os dados de floresta secundária foram obtidos em uma resolução espacial de 30 metros (0,09 ha). Este dado foi derivado do estudo conduzido por Silva Junior et al. (2020b) (https://github.com/celsohlsj/gee_brazil_sv).

Os dados de degradação florestal (fogo e corte seletivo de madeira) foram obtidos a partir do conjunto de dados compilado por Silva Junior et al. (2020) em uma resolução espacial de 30 metros (0,09 ha). A partir desse mesmo trabalho, foram obtidas as delimitações das unidades de conservação e terras indígenas localizadas na área de estudo.

Adicionalmente, os dados sobre florestas degradadas devido a incêndios foram integrados, originários do projeto MapBiomias Fogo (MAPBIOMAS, 2020). Estas informações cruciais ampliam a compreensão dos impactos ambientais relacionados ao fogo na região estudada. Os dados mencionados, juntamente com os adicionais sobre degradação florestal, foram coletados e armazenados em um banco de dados georreferenciado. Este repositório de informações foi estruturado para garantir a integridade e acessibilidade dos dados, facilitando análises subsequentes.

Processamento dos dados

Para a manipulação e análise desses dados, foi empregado o Sistema de Informação Geográfica (SIG). O software QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2017) foi utilizado, conhecido por sua robustez e eficácia na análise espacial. Além disso, a plataforma Google Earth Engine – GEE (GORELICK et al., 2017) foi incorporada ao estudo, permitindo análises avançadas e visualizações interativas dos dados geoespaciais, contribuindo assim para insights mais profundos e ações informadas para a conservação e gestão sustentável das florestas.

A primeira etapa de processamento envolveu a elaboração de um mapa dos estoques de carbono na Amazônia maranhense. Utilizamos o método elaborado por Longo et al. (2016) para garantir precisão e confiabilidade nos resultados. A adaptação e preparação dos dados foram cruciais; especificamente, o mapa de altura da vegetação foi reamostrado. Alteramos a resolução espacial original de 30 metros para 50 metros, empregando a técnica de média dos valores dos pixels originais para assegurar a integridade dos dados.

Com os dados adequadamente preparados, procedemos à aplicação da Equação 1, utilizando a calculadora raster integrada ao software QGIS. Esse passo permitiu uma avaliação precisa dos estoques de carbono presentes na região. Além disso, avançamos na análise quantificando o carbono em termos de CO₂ total contido em cada pixel do mapa. Baseamos nossa conversão na relação estabelecida que indica que cada tonelada

de carbono é equivalente a 3,667 toneladas de CO₂, conforme documentado por ARAGÃO et al. (2018). Esta conversão foi instrumental para entender o impacto potencial das emissões de carbono na atmosfera e informar estratégias de mitigação eficazes, conforme a Equação 1.

$$C = 10 * 0,025 * AV_{50m}^{1,99} \quad (1)$$

Onde, C é o estoque de carbono para cada pixel de 50 metros de resolução espacial (0,25 ha) dado em toneladas de carbono por hectare (ton C ha⁻¹), 10 é o fator para converter os estoques de kg m⁻² para ton ha⁻¹ e AV_{50m} é o valor da altura da vegetação em cada pixel. A equação tem um R² ajustado de 0,68 e um erro médio quadrático de 4,33 kg C m⁻² (LONGO et al., 2016).

Para valorar cada tonelada de CO₂ equivalente estocado, foi adotada a métrica Custo Social do Carbono (CSC) - um conceito utilizado para quantificar monetariamente os impactos das emissões de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa. O CSC reflete os danos socioeconômicos e ambientais causados por cada tonelada adicional de CO₂ emitida na atmosfera. Aqui, consideramos o valor de US\$ 24 (intervalo de confiança de 95%: 14-41) por tonelada de CO₂, conforme proposta de Ricke et al. (2018) para o Brasil.

Após a elaboração do mapa de estoques de carbono na Amazônia maranhense, iniciou-se uma fase analítica. Este mapa foi criteriosamente sobreposto aos contornos pré-definidos das florestas e áreas legalmente protegidas. O objetivo era estabelecer uma análise quantitativa robusta e comparativa, permitindo insights sobre a distribuição e concentração do carbono.

Para garantir precisão e rigor, empregamos métodos estatísticos não paramétricos, com um nível de confiança de 95%. Utilizando o sofisticado ambiente de programação estatística R (R CORE TEAM, 2020), nos permitiu uma análise profunda e multidimensional dos dados.

Na avaliação entre dois conjuntos distintos de dados, o teste de Wilcoxon foi a ferramenta escolhida, conhecida por sua eficácia em comparar médias de grupos independentes. Para a análise envolvendo três ou mais grupos, o teste de Kruskal- Wallis foi implementado, seguindo as orientações de HETTMANSPERGER e MCKEAN (2010).

Este teste é renomado por sua habilidade em comparar as médias de três ou mais grupos independentes, oferecendo insights valiosos sobre a variabilidade e distribuição dos estoques de carbono entre as diferentes áreas analisadas. Esses métodos forneceram uma base sólida para entender a complexa dinâmica dos estoques de carbono na região, informando estratégias subsequentes de gestão e conservação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teste de Wilcoxon revelou uma diferença significativa na densidade de estoques de carbono entre florestas maduras degradadas e não degradadas, (p-valor < 0,01) evidenciando uma disparidade notável. Esta diferença foi observada independentemente de as florestas estarem situadas em áreas protegidas ou não (Figura 2).

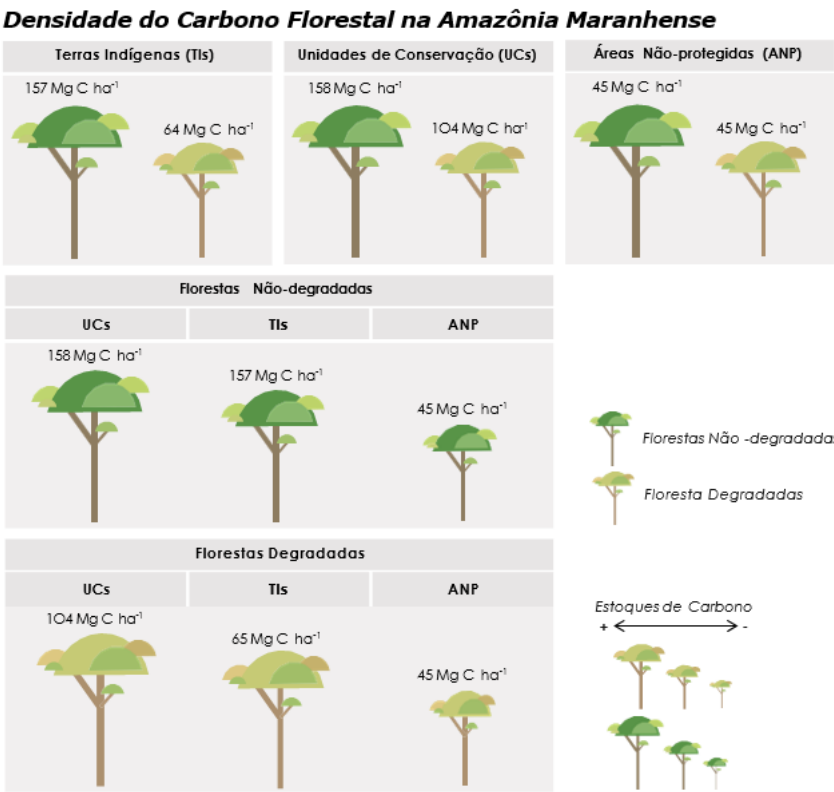


Figura 2. Comparação da densidade dos estoques de carbono para diferentes tipos de florestas em diferentes compartimentos na Amazonia Maranhense

Em terras indígenas especificamente, a degradação da floresta mostrou um impacto acentuado nos estoques de carbono. As florestas degradadas apresentaram uma redução média de 59% nos estoques de carbono, com uma densidade de 64 toneladas de carbono por hectare (ton C ha- 1), em contraste com 157 ton C ha-1 em florestas não-degradadas. Similarmente, nas unidades de conservação de proteção integral, os estoques

de carbono em florestas degradadas eram, em média, 34% menores. A densidade de estoques de carbono nessas áreas degradadas era de 104 ton C ha⁻¹, comparada a 158 ton C ha⁻¹ em áreas não- degradadas.

O impacto pronunciado nos estoques de carbono em terras indígenas pode ser atribuído à pressão contínua exercida nessas áreas ao longo das décadas, uma situação particularmente prevalente no estado do Maranhão. As atividades prejudiciais, como incêndios florestais e corte seletivo de madeira, têm sido persistentes e intensivas, contribuindo para a degradação acentuada dos ecossistemas florestais nessas regiões (Celentano et al., 2017, 2018).

A análise realizada através do teste de Kruskal-Wallis revelou uma diferença estatisticamente significativa ($p\text{-valor} < 0,01$) nos estoques de carbono. Esta diferença foi observada ao comparar florestas maduras degradadas com as não-degradadas, tanto em áreas protegidas quanto não-protegidas. Isso indica a presença de variações marcantes nos níveis de carbono armazenado entre esses diferentes tipos e condições de florestas, enfatizando a necessidade de ações estratégicas para a conservação e manejo desses ecossistemas vitais.

As unidades de conservação de proteção integral apresentaram os maiores estoques de carbono, uma tendência observada tanto em florestas degradadas quanto não-degradadas.

Em contraste, as áreas não- protegidas exibiram os menores estoques. Uma análise mais aprofundada, conduzida através do teste de Wilcoxon, confirmou uma diferença significativa ($p\text{-valor} < 0,01$) nos estoques de carbono entre florestas degradadas e não- degradadas situadas em áreas não-protegidas. Notavelmente, esses estoques são consideravelmente inferiores, variando entre dois e quatro vezes menores, quando comparados aos encontrados em áreas protegidas. Este contraste acentuado sublinha a importância crítica da conservação e gestão eficaz dos ecossistemas florestais para otimizar o sequestro e armazenamento de carbono, contribuindo assim para os esforços globais de mitigação das mudanças climáticas.

A razão subjacente para a redução dos estoques de carbono pode ser atribuída à intensa fragmentação dos remanescentes florestais localizados fora das áreas protegidas, especificamente na região amazônica do estado do Maranhão (SILVA-JUNIOR et al., 2022; VEDOVATO et al., 2016). Esta fragmentação induz um fenômeno conhecido como

efeito de borda, que é um dos fatores para a propagação do fogo e mudanças microclimáticas adversas (LAURANCE et al., 2018; SILVA JUNIOR et al., 2022).

O efeito de borda promove um ambiente estressante para as árvores, elevando a taxa de mortalidade arbórea (LAURANCE et al., 2018; PONTES-LOPES et al., 2021; SILVA et al., 2018).

Como resultado, observa-se uma diminuição acentuada nos estoques de carbono, uma vez que as árvores desempenham um papel crucial na captura e armazenamento de carbono. A mitigação deste efeito, e consequentemente a preservação dos estoques de carbono, exige estratégias eficazes de conservação e manejo florestal, especialmente em regiões vulneráveis à degradação e desmatamento. A partir disso, obtivemos os seguintes resultados. No mapa, representado na figura 3, de estoques de carbono (Figura 3a), observa-se que as maiores concentrações (representadas em verde escuro) estão predominantemente localizadas no centro da região mapeada. Estas áreas de alta concentração indicam regiões de floresta madura e/ou vegetação secundária sendo que, nessas áreas, estão a unidade de conservação – U.C. Rebio do Gurupi e as Terras Indígenas. Consequentemente, as áreas circundantes, em tons mais claros, mostram concentrações mais baixas, podendo representar regiões de transição ou áreas degradadas e consequentemente no mapa, representado na figura 3, de estoque de CO₂ (Figura 3b) corresponde a maiores concentrações na U.C. Rebio do Gurupi e nas Terras Indígenas.

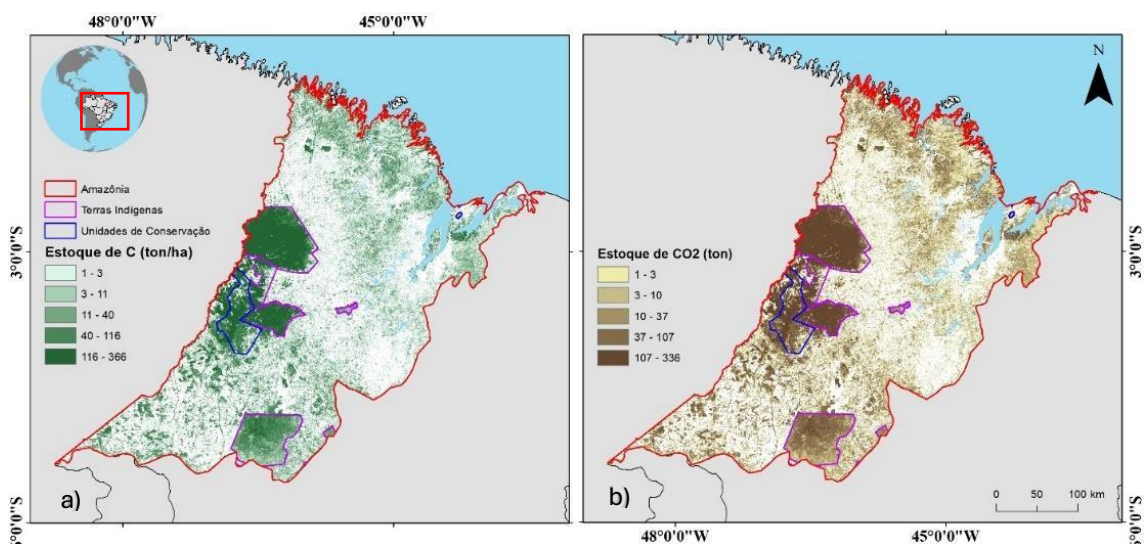


Figura 3. Mapa de estoques de carbono (a) e de CO₂ (b) para a Amazônia Maranhense

Consequentemente, as áreas circundantes, em tons mais claros, mostram concentrações mais baixas, podendo representar regiões de transição ou áreas degradadas

e consequentemente no mapa, representado na figura 3, de estoque de CO₂ (Figura 3b) corresponde a maiores concentrações na U.C. Rebio do Gurupi e nas terras indígenas. No mapa da esquerda (Figura 3a), que representa os estoques de carbono, nota-se que as maiores concentrações estão destacadas em verde escuro, localizadas principalmente no centro do mapa. Esta distribuição sugere que a área central é uma região de floresta densa e bem conservada, o que é corroborado pela presença da Unidade de Conservação Rebio do Gurupi e das Terras Indígenas, conhecidas por suas práticas de manejo sustentável e conservação ambiental. Essas áreas podem ser consideradas essenciais para a manutenção do equilíbrio ecológico e são vitais para a biodiversidade local, atuando como importantes sumidouros de carbono.

Em contraste, as áreas circundantes, marcadas com tons mais claros de verde, indicam estoques de carbono mais baixos. Isso pode ser interpretado como áreas de transição ou até mesmo zonas que sofreram degradação ambiental, o que ressalta a importância das áreas de alta concentração de carbono para a saúde ecológica da região. A degradação dessas áreas circundantes pode ser resultado de atividades humanas, como desmatamento e agricultura, que reduzem a capacidade da floresta de armazenar carbono.

No mapa da direita (Figura 3b), que mostra os estoques de CO₂, as maiores concentrações, representadas por tons mais escuros de marrom, também estão na mesma área central, onde se localiza a Unidade de Conservação Rebio do Gurupi e as Terras Indígenas. Isto é consistente com o mapa de estoques de carbono, reiterando a relevância dessas áreas para o sequestro de CO₂. A presença de grandes quantidades de CO₂ nessas áreas pode ser atribuída à densa vegetação que, através do processo de fotossíntese, captura CO₂ da atmosfera, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Apesar de ser um resultado inédito para o estado e consequentemente para o bioma maranhense, pesquisas dessa natureza, nos últimos anos estão crescendo de forma significativa em todo o mundo. Portanto, é evidente que as características de distribuição espacial em nossa área de estudo estão de acordo com as pesquisas de outros estudiosos, como Cheng, F. et al (2024), em um estudo realizado na China, utilizando dados de sensoriamento remoto e Google Earth Engine (GEE). Isso sugere que a construção de modelos de estimativa de armazenamento de carbono para diferentes tipos de florestas em uma grande região resulta em maior precisão e melhores estimativas dos valores de sequestro de carbono em uma escala regional ampliada. A principal vantagem desse presente estudo é a utilização da plataforma GEE para tarefas de classificação de imagens.

A nossa pesquisa revelou que em 2019, as florestas da Amazônia Maranhense representando um estoque de cerca de 279 milhões de toneladas de CO₂, essas florestas desempenham um papel significativo na mitigação das mudanças climáticas. A distribuição do estoque de CO₂ é notavelmente inclinada para as florestas maduras, que abrigam 78% do total. As florestas de crescimento secundário e as florestas de mangue contribuem com 17% e 5%, respectivamente. Essa distribuição destaca a importância crítica de preservar e proteger as florestas maduras, que são reservatórios significativos de carbono (Figura 4).

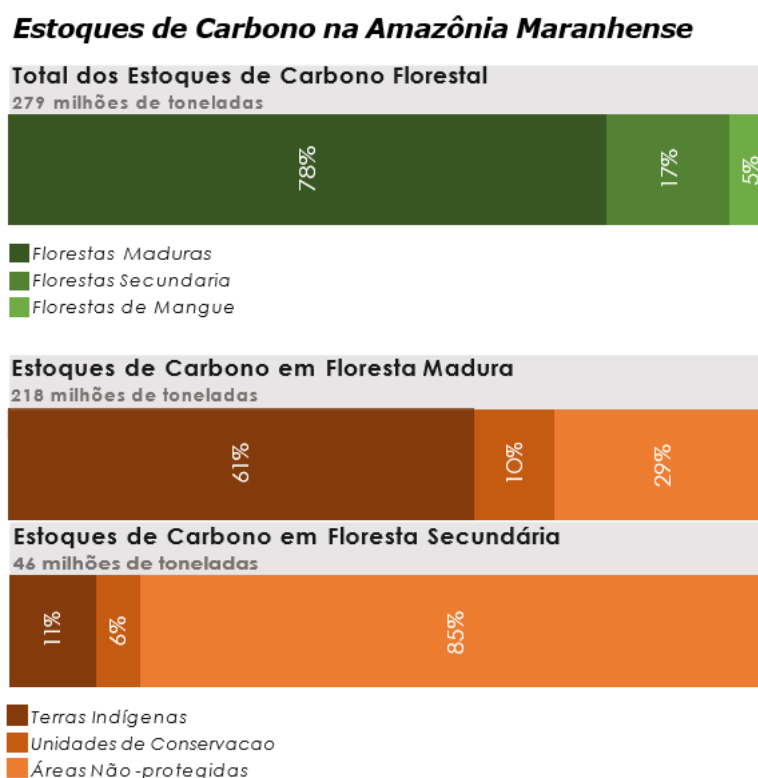


Figura 4. Distribuição por diferentes compartimento e tipos de florestas dos estoques de CO₂ na Amazonia maranhense.

Ao analisar a localização desses estoques, 71% do CO₂ armazenado nas florestas maduras encontrava-se em áreas protegidas. Deste total, 61% estavam em terras indígenas e 10% em unidades de conservação de proteção integral. Por outro lado, uma proporção significativa, 83%, dos estoques de CO₂ nas florestas secundárias estava localizada em áreas não protegidas.

Essa descoberta é de grande importância para a formulação de políticas públicas. A proteção das florestas secundárias emerge como uma estratégia baseada na natureza e eficaz para reter o CO₂ sequestrado, contribuindo significativamente para a mitigação das

emissões atmosféricas históricas (Heinrich et al., 2021; Silva Junior et al., 2020). A implementação de medidas de conservação nessas áreas pode potencializar o papel das florestas como sumidouros de carbono, colaborando para os esforços globais de combate às mudanças climáticas.

Em nosso estudo, encontramos um valor de 5,23 (intervalo de confiança de 95%: 3,05-8,94) bilhões de dólares para as florestas maduras, considerando seu papel crucial como sumidouros de carbono. As florestas secundárias, embora mais jovens e em processo de crescimento, foram valoradas em 1,10 (0,64-1,89) bilhões de dólares, evidenciando sua importância emergente na mitigação das mudanças climáticas. Adicionalmente, as florestas de mangue, ecossistemas ricos em biodiversidade e essenciais para a resiliência costeira, foram estimadas em 0,36 (0,21-0,62) bilhões de dólares, de acordo com a Figura 5.

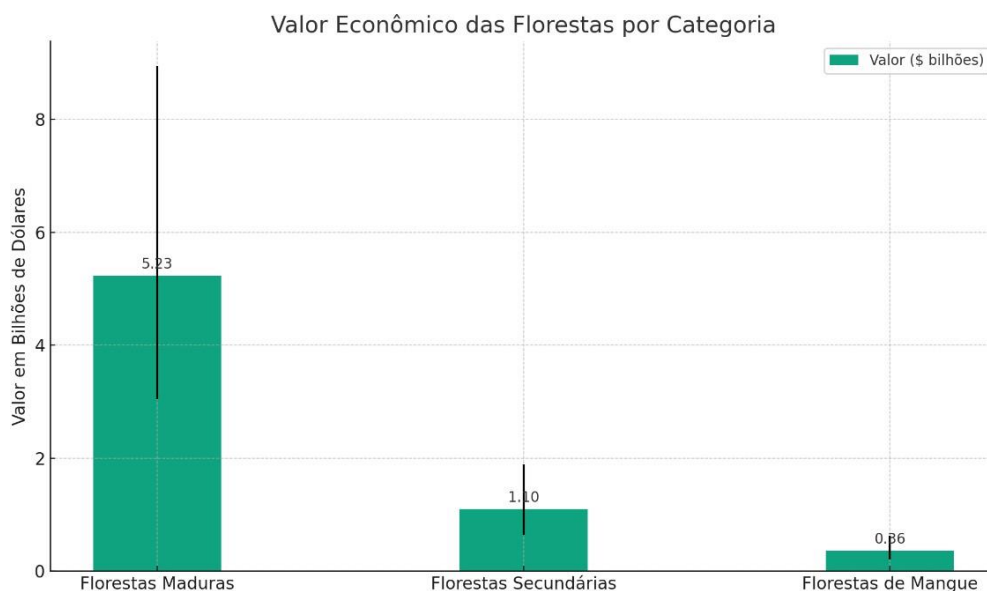


Figure 5. Valor Econômico das Florestas por Categoria.

No total, a riqueza combinada desses ecossistemas florestais alcançou a marca expressiva de 6,70 (3,91-11,44) bilhões de dólares, ressaltando a imperatividade econômica de conservar e restaurar essas áreas. Esses valores não apenas sublinham a contribuição vital dessas florestas para a estabilidade climática global, mas também reforçam a urgência de integrar considerações ambientais nas decisões políticas e econômicas para garantir um futuro sustentável para a Amazônia Maranhense e para o planeta como um todo.

Em um estudo feito por Hartono E. M. (2024), no Parque Nacional Telaga Warna, na Indonésia, a valoração do estoque de carbono excede 15 milhões de dólares. Em outra pesquisa, realizada pela Benício R. M. A. et al (2023) na Chapada do Araripe, na cidade de Cratos, no estado do Ceará – Brasil, estima-se que as 27,14 t ha⁻¹ de carbono armazenado na biomassa viva (volume comercial) representam um total de 2252,62 € ha⁻¹. O carbono sequestrado anualmente totalizou 3,99 t ha⁻¹ [carbono incorporado na serapilheira (2,73 t ha⁻¹) + incremento médio anual de carbono no volume comercial (1,26 t ha⁻¹), totalizando um valor de € 331,17 ha⁻¹. Somando os dois valores, o fragmento estudado poderia receber um total de € 2583,79 ha⁻¹ se participasse de um programa de pagamento por sequestro e armazenamento de carbono, com isso, essa valoração econômica na nossa área de estudo surpreende cada vez mais se compararmos com esses estudos citados.

Contudo, é alarmante que uma fração significativa desse valor esteja ameaçada. Para contextualizar, em 2019, as florestas maduras situadas em áreas protegidas, incluindo terras indígenas e unidades de conservação de proteção integral, retinham carbono equivalente a 13,64 bilhões de dólares. Em contrapartida, as florestas secundárias localizadas foram dessas zonas protegidas continham um valor equivalente a 3,33 bilhões de dólares em carbono estocado. Esses dados evidenciam a urgência de ampliar as medidas de proteção às florestas secundárias na Amazônia Maranhense. A conservação dessas áreas não só é imperativa para assegurar a contínua remoção de CO₂ da atmosfera, conforme destacado por Heinrich et al. (2021), mas também é crucial para a recuperação e manutenção da biodiversidade (Poorter et al. 2021).

É importante implementar e reforçar políticas de conservação e manejo sustentável que garantam a integridade e resiliência desses ecossistemas vitais. A preservação dessas florestas secundárias não é apenas uma questão ambiental, mas também econômica e social, intrinsecamente ligada ao bem-estar e ao futuro das comunidades locais e da biodiversidade da região.

No Maranhão, a situação é particularmente preocupante, dado o vácuo de políticas públicas específicas para a proteção das florestas secundárias. A ameaça a essas florestas é exacerbada por desenvolvimentos legislativos recentes que podem precipitar sua degradação. Em 2019, a Assembleia Legislativa do Maranhão aprovou, em um procedimento acelerado, a Lei nº 11.269. Essa lei estabelece o Zoneamento Econômico Ecológico do Bioma Amazônico do Estado do Maranhão (ZEE-MA). Contudo, a

introdução do ZEE-MA é motivo de alarme para ambientalistas e conservacionistas. A nova legislação possibilita a redução da área de reserva legal de 80% para 50% nas propriedades rurais. Essa flexibilização poderia resultar em uma perda significativa de florestas secundárias, um cenário sombrio e economicamente negligenciada (Silva Junior et al. 2020).

Esta mudança legislativa levanta questões críticas sobre a sustentabilidade ambiental e a conservação da biodiversidade na região. Ressalta a necessidade urgente de estratégias de conservação robustas e políticas públicas inovadoras para salvaguardar as florestas secundárias, que são essenciais para o sequestro de carbono e a preservação da biodiversidade.

A Amazônia Maranhense enfrenta desafios contínuos devido ao desmatamento, tanto legal quanto ilegal, uma realidade documentada em estudos recentes (Silva Junior et al., 2022; Silva Junior et al., 2020). Esta região rica e diversificada tem sido submetida a pressões intensas que vão além do desmatamento, incluindo uma variedade de distúrbios ambientais. Por décadas, a floresta tem sido afetada não apenas pelo desmatamento, mas também por incêndios, corte seletivo e efeitos de borda, que coletivamente contribuíram para a degradação substancial dos remanescentes de floresta madura (Silva Junior et al. 2020; Ellwanger Jh et al. 2020). Estes distúrbios, frequentemente exacerbados por práticas ilegais e políticas insuficientes, comprometeram a integridade ecológica e a biodiversidade da Amazônia Maranhense.

A urgência de abordagens integradas para a conservação e recuperação desta região não pode ser subestimada. É imperativo implementar estratégias eficazes de manejo e conservação para proteger e revitalizar esta parte crucial da Amazônia, garantindo a preservação de sua biodiversidade e funções ecológicas essenciais.

CONCLUSÃO

O estudo conduzido apresentou uma abordagem robusta para a quantificação e valoração dos estoques de carbono florestal na Amazônia Maranhense, utilizando métodos de sensoriamento remoto. Esta técnica não só facilitou a identificação precisa dos níveis de carbono, mas também proporcionou uma visão detalhada sobre a distribuição geográfica desse recurso vital. Com um total de 279 milhões de toneladas de CO₂ estocadas, a pesquisa evidenciou a importância das florestas maduras, que abrigam

78% desse carbono, e das florestas secundárias e manguezais, responsáveis por 17% e 5%, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi apoiado pelo financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do projeto YBYRÁ-BR: Quantificação Espaço-temporal das Emissões e Remoções de CO₂ pelas Florestas Brasileiras (Processo CNPq 401741/2023-0).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., Silva, C. V. J., Silva Junior, C. H. L., Arai, E., Aguiar, A. P., Barlow, J., Berenguer, E., Deeter, M. N., Domingues, L. G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J. A., Miller, J. B., Phillips, O. L., & Saatchi, S. (2018). 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, 9(1), 536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>.

Assis, T. O., Aguiar, A. P. D., von Randow, C., & Nobre, C. A. (2022). Projections of future forest degradation and CO₂ emissions for the Brazilian Amazon. *Science Advances*, 8(24), eabj3309.

Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia. (2010). Sumário de emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de gases de efeito estufa por gás. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança de Clima, 139-152.

Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. (2022). Painel de dados por Unidade Federativa do setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF). [s. l.]. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/painel-de-dados-por-uf-do-setor-lulucf>. Acesso em: 26 abr. 2022. DOCUMENTO CONSULTADO ON-LINE.

Benício, R. M. A., Linhares, K. V., Lisboa, M. A. N., Cruz, G. V., da Silva, L. V. A., da Silva Nascimento, A., ... & Júnior, J. T. C. (2023). Carbon stock and sequestration as a form of payment for environmental services in a sedimentary basin humid forest refuge in brazilian semiarid. *Environmental Development*, 45, 100796.

Chen, Y., Mao, Z., Myers, J. A., Yu, J., & Wang, X. (2024). Tree mycorrhizal associations determine how biodiversity, large trees, and environmental factors drive aboveground carbon stock in temperate forests. *Forest Ecosystems*, 11, 100205.

Cheng, F.; Ou, G.; Wang, M.; Liu, C. Remote Sensing Estimation of Forest Carbon Stock Based on Machine Learning Algorithms. *Forests* 2024, 15, 681. <https://doi.org/10.3390/f15040681>.

Du, Y., Chen, D., Li, H., Liu, C., Liu, S., Zhang, N., ... & Jiang, D. (2023). Research on Estimating and Evaluating Subtropical Forest Carbon Stocks by Combining Multi-Payload High-Resolution Satellite Data. *Forests*, 14(12), 2388.

Ellwanger, J. H., Kulmann-Leal, B., Kaminski, V. L., Valverde-Villegas, J. M., da Veiga, A. B. G., Spilki, F. R., Fearnside, P. M., Caesar, L., Giatti, L. L., Wallau, G. L., Almeida, S. E. M., Borba, M. R., da Hora, V. P., & Chies, J. A. B. (2020). Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 92(1), e20191375. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191375>.

Junior, F. R. F., dos Santos, A. M., Alvarado, S. T., da Silva, C. F. A., & Nunes, F. G. (2023). Remote sensing applied to the study of fire in savannas: A literature review. *Ecological Informatics*, 102448.

Farzanmanesh, R., Khoshelham, K., Volkova, L., Thomas, S., Ravelonjatovo, J., & Weston, C. J. (2024). Quantifying Mangrove aboveground biomass changes: Analysis of conservation impact in blue forests projects using sentinel-2 satellite imagery. *Forest Ecology and Management*, 561, 121920.

Flores, B. M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R. A., & Hirota, M. (2024). Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, 626(7999), 555-564.

Fisher, J. T. (2024). Optimizing aboveground carbon mapping in Afrotropical forests to fulfil IPCC carbon reporting standards. *Forest Ecology and Management*, 552, 121583.

Google Earth Engine. (2020). What is Earth Engine? Disponível em: <https://earthengine.google.com/faq/>. Acesso em: 23 dez. 2023.

Google Inc. (2016). Google Earth Engine API. Disponível em: <https://earthengine.google.com/>.

Hartono, E. M. (2024). Valuation Of Carbon Storage in Telaga Warna National Park. Indonesia: doi:10.20944/preprints202403.1434.v1.

Heinrich, V. H. A., Dalagnol, R., Cassol, H. L. G., Rosan, T. M., Torres de Almeida, C., Silva Junior, C. H. L., Campanharo, W. A., House, J. I., Sitch, S., Hales, T. C., Adami, M., Anderson, L. O., & Aragão, L. E. O. C. (2021). Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. *Nature Communications*, 12, 1785. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2021). Disponível em:

<http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9>. Acesso em: 24 set. 2023. DOCUMENTO CONSULTADO ON-LINE.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2022). Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat>. Acesso em: 24 dez. 2023. DOCUMENTO CONSULTADO ON-LINE.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). Climate change 2001: impacts. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kassa, G., & Molla, E. (2024). Carbon sequestration potential of Qimbaba forest: Implications of managing forests for climate change mitigation. Amhara Agricultural Research Institute & Bahir Dar University. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3963611/v1>.

Khan Academy. (2021). Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/Science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/introduction-to-biogeochemical-cycles>. Acesso em: 24 set. 2023. DOCUMENTO CONSULTADO ON- LINE.

Leão, P. H. A., Freitas, A. L. R. de, Alvarado, S. T., Reis, J. B. C. dos, Carvalho, I. de, Silva- Junior, C., Braga, E. V., Rodrigues, T. C. S., Medeiros, T. P. de, Carvalho, N. S. de, Campanharo, W. A., Pessôa, A. C. M., Brito, F., Alves, D. B., Bezerra, D., Ferraz, T. M., Aragão, L. E. O. e C. de, & Anderson, L. (2023). Influência da recorrência do fogo no estoque de biomassa do Maranhão. In Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (Vol. 20, p. 156384). ISBN: 978-65-89159-04-9.

Leão, H., Dutra, D., Medeiros, T., Silva-Junior, C., Alvarado, S., Peripato, V., Silveira, M., De Freitas, A. L., Aragão, L., & Anderson, L. (2024). Estimation of aboveground biomass recovery through chronosequence in forests degraded by fire in the Legal Amazon. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, Research, Brazil; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia; Universidad del Rosario. EGU24-1158. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-115>.

Lopes, S. M. C. (2024). Análise da configuração espacial da paisagem na Região Ocidental do Golfão Maranhense, para fins de conservação e planejamento territorial. Dissertação de mestrado, Programa de Pós- graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Maranhão. <https://tede2.ufma.br/jspui/handle/te de/5273>.

Ma, T., Zhang, C., Ji, L., Zuo, Z., Beckline, M., Hu, Y., Li, X., & Xiao, X. (2024). Estimativa de biomassa acima do solo em ecossistemas florestais: avanços e desafios. Ecological Indicators, 159, 111653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111653>.

MapBiomass. (2020). Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo

do Brasil. Disponível em: <https://mapbiomas.org/o-projeto>. Acesso em: 24 dez. 2023. DOCUMENTO CONSULTADO ON-LINE.

Maranhão. Secretaria de Turismo. (2021). Amazônia Maranhense. Disponível em: <https://www.turismo.ma.gov.br/amazonia-maranhense>. Acesso em: 20 nov. 2023. DOCUMENTO CONSULTADO ON-LINE.

Macreadie, P. I., Duarte, C. M., Robinson, C., & Connolly, R. M. (2021). Nature-based solutions for climate change: A review of the science, policy and practice. *Nature Reviews Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>.

Nascimento, M. N., Aukes, T. F. N., & McMichael, C. N. H. (2024). Indigenous and colonial influences on Amazonian forests. *Plants People Planet*, 6(1), 1-21. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10515>.

Oliveira, G. A., Ferreira, Silva, F. L., Agostinho, P. R., Balbino Soares, J. A., Rodrigues Serrano, M. S., Valdivina Pereira, Z., Nascimento, J. S., & Padovan, M. P. (2021). Valoração econômica de sequestro de carbono em sistemas agroflorestais biodiversos no bioma cerrado. *Agroecologia: métodos e técnicas para uma agricultura sustentável - Volume 5*, 30(10), 357-366. <https://doi.org/10.37885/210504459>.

OMM. (2024, 11 de junho). Organização Meteorológica Mundial (OMM) . 2023 quebra recordes climáticos, com grandes impactos. <https://wmo.int/news/media-centre/2023-shatters-climate-records-major-impacts>.

Pontes-Lopes, A., Silva, C. V. J., Barlow, J., Rincón, L. M., Campanharo, W. A., Nunes, C. A., de Almeida, C. T., Silva Júnior, C. H. L., Cassol, H. L. G., Dalagnol, R., Stark, S. C., Graça, P. M. L. A., & Aragão, L. E. O. C. (2021). Drought-driven wildfire impacts on structure and dynamics in a wet Central Amazonian forest. *Proceedings of the Royal Society B*, 288(202100942). <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0094>.

Pooter, L. et al. Multidimensional tropical forest recovery. *Science*, [s. l.], v. 374, n. 6573, p. 1370–1376, 2021. doi:10.1126/science.abh3629

Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., Pickens, A., Turubanova, S., Tang, H., Silva, C. E., Armston, J., Dubayah, R., Blair, J. B., & Hofton, M. (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165>.

QGIS Development Team. (2017). QGIS Geographic Information System. [S. l.]. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.

R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [S. l.]. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em: 22 jun. 2023.

Rodríguez-Albarracín, H. S., Demattê, J. A. M., Rosin, N. A., Contreras, A. E. D., Silvero, N. E. Q., Cerri, C. E. P., Mendes, W. S., & Tayebi, M. (2023). Soil Organic

Carbon Sequestration Potential of Clay Fraction in Tropical Soils: A Case Study in Brazil. *Geoderma*, 340, 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116549>.

Santos, S. C., Brito, H. C., Rufino, I. A. A., & Maia, S. M. F. (2024). Changes in Soil Organic Carbon Stocks Due to Land Use Changes in the Extended São Francisco River Basin. *Sociedade & Natureza*, 36, e69655. <https://doi.org/10.14393/SN-v36-2024-69655>.

Silva-Junior, C., Celentano, D., Rousseau, G., Moura, E., Varga, I., Martínez, C., & Martins, M. (2020). Amazon forest on the edge of collapse in the Maranhão State, Brazil. *Land Use Policy*, 97, 104806. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104806>

Silva Junior, C. H. L., Heinrich, V. H. A., Freire, A. T. G., Broggio, I. S., Rosan, T. M., Doblas, J., Anderson, L. O., Rousseau, G. X., Shimabukuro, Y. E., Silva, C. A., House, J. I., & Aragão, L. E. O. C. (2020). Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. *Scientific Data*, 7, 269. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00600-4>.

Silva-Junior, C. H. L., Buna, A. T. M., Bezerra, D. S., Costa, O. S. Jr., Santos, A. L., Basson, L. O. D., Santos, A. L. S., Alvarado, S. T., Almeida, C. T., Freire, A. T. G., Rousseau, G. X., Celentano, D., Silva, F. B., Pinheiro, M. S. S., Amaral, S., Kampel, M., Vedovato, L. B., Anderson, L. O., & Aragão, L. E. O. C. (2022). Forest Fragmentation and Fires in the Eastern Brazilian Amazon–Maranhão State, Brazil. *Fire*, 5(3), 77. <https://doi.org/10.3390/fire5030077>.

Silva, L. J., Tavares, R. L. M., Loss, A., Madari, B. E., Cerri, C. E. P., Alves, B. J. R., Pereira, M. G., & Cherubin, M. R. (2023). Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: a systematic review. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 47, e022005.

Vos, M. A. E., de Boer, D., de Vries, W., den Ouden, J., & Sterck F. J. (2023). Aboveground carbon and nutrient distributions are hardly associated with canopy position for trees in temperate forests on poor and acidified sandy soils. *Forest Ecology and Management*, 529, 120731.