



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ALTAMIRA
FACULDADE DE LICENCIATURA EM GEOGRAFIA

GIULIANA DOS SANTOS COELHO

**Dinâmica de Uso e Cobertura da Terra e sua Relação com
Serviços Ambientais em Área de Floresta Nativa do Estado do
Pará/Brasil.**

ALTAMIRA

2025

GIULIANA DOS SANTOS COELHO

**Dinâmica de Uso e Cobertura da Terra e sua Relação com
Serviços Ambientais em Área de Floresta Nativa do Estado do
Pará/Brasil.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Geografia, do Campus
Universitário de Altamira, da Universidade
Federal do Pará, como requisito parcial para
obtenção do título de Licenciado em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Alves Veloso

ALTAMIRA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de
Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C672d Coelho, Giuliana dos Santos.
Dinâmica de Uso e Cobertura da Terra e sua Relação com Serviços
Ambientais em Área de Florestas Nativas do Estado do Pará/Brasil. /
Giuliana dos Santos Coelho. — 2025.
36 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Gabriel Alves Veloso
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Altamira, Faculdade de Geografia, Altamira,
2025.
1. uso e cobertura da terra. 2. CO₂Flux. 3. NDVI. 4. MapBiomass. 5.
Pará. I. Título.

CDD 621.3678098115

“Mesmo se eu cair e me Machucar, sigo
correndo em direção aos meus Sonhos”

- **Young Forever**

BTS

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, a força que tenho hoje é inteiramente obra dele. Segundamente meus agradecimentos com todo o amor à minha tia Cosmelia Lima dos Santos. Sem ela, eu não estaria onde estou hoje. Ela me criou desde pequena e tudo o que sou devo a ela. Foi por ela que entrei na faculdade e foi por ela que continuei. Muito obrigada por ser a pessoa em quem mais confio no mundo.

Agradeço também à minha família, Geovanna Valente, Paulo Valente, Laise Lima, Solano Santana, Silvana Santos, Genival Lima, Flávia Santos, Vinícius Pereira e Núbia Santos, Raimunda Coelho, pelo apoio ao longo dos anos. Tivemos brigas e desentendimentos, mas qual família não tem? Esse apoio foi extremamente significativo. Obrigada por estarem comigo nessa jornada.

Estendo meus agradecimentos à Universidade Federal do Pará (UFPA), ao corpo docente da Faculdade de Geografia e, em especial, ao Laboratório de Geografia Física e Cartografia (LAGEO), minha segunda casa durante a graduação. Foi nesse espaço que aprendi a pesquisar, a desenvolver um olhar científico e a desejar seguir na carreira acadêmica. A todos os bolsistas e colegas do laboratório, minha sincera gratidão, vocês me ajudaram a dar os primeiros passos no mundo da geotecnologia.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Gabriel Alves Veloso, figura central na minha formação. Sempre disposto a tirar minhas dúvidas, me orientar e incentivar meu interesse por Geotecnologias. Nada mais justo do que tê-lo como orientador. Obrigada por ter me acolhido como bolsista e orientanda.

Agradeço também à minha turma, Geo 2022. Passamos por tantas coisas nesses quatro anos, e sou muito grata por cada momento vivido. Vocês foram uma das razões que me motivaram a continuar na faculdade. Em especial, Camila, Emelly e Marise, meu grupo de sempre, um dos meus pilares. Obrigada por me aguentarem durante todos esses anos, acho que já teria enlouquecido sem vocês.

E, por fim, um agradecimento ao meu amigo Hermogens, por estar sempre ao meu lado desde 2023. Sua amizade foi essencial ao longo desse percurso. E um obrigada a todas as pessoas que passaram pela minha vida ao longo desses quatro anos, vocês de alguma forma contribuíram para a construção desse caminho que estou trilhando. E claro, deixo meus agradecimentos ao BTS, sem as músicas deles minhas sessões de estudos/escrita teriam sido um tédio!

RESUMO

O estudo analisa a relação entre o uso e cobertura da terra e a dinâmica do CO₂Flux na vegetação do estado do Pará entre 2000 e 2023, considerando o papel da floresta amazônica na regulação do ciclo do carbono. A introdução destaca que o desmatamento e a expansão agropecuária comprometem a função da Amazônia como sumidouro de CO₂, especialmente no Pará, que responde por cerca de 36% do desflorestamento da Amazônia Legal. A conversão de florestas para pastagens extensivas tem reduzido a capacidade de sequestro de carbono, embora sistemas de manejo sustentável possam mitigar esse impacto. O trabalho utiliza sensoriamento remoto, integrando dados do MapBiomas (Coleção 9) e imagens MODIS, processadas na plataforma Google Earth Engine, para mapear transições de uso da terra e calcular o índice CO₂Flux, que combina NDVI e PRI para estimar a troca de carbono entre vegetação e atmosfera. A análise espacial revela que 11,76 milhões de hectares (9,34% da área estadual) foram convertidos de floresta para pastagem, principalmente ao longo da BR-230 e no sudeste paraense. A cobertura florestal reduziu 14,17%, enquanto as pastagens aumentaram 116,6% em relação ao período inicial. Esses resultados evidenciam o avanço da pecuária sobre áreas florestais, afetando o equilíbrio ecológico e o balanço de carbono regional. Assim, o estudo contribui para o entendimento das transformações ambientais no Pará e reforça a importância de políticas públicas e monitoramento contínuo para mitigar as emissões e promover a sustentabilidade amazônica.

Palavras-chave: uso e cobertura da terra; CO₂Flux; NDVI; MapBiomas; Pará

ABSTRACT

The study analyzes the relationship between land use and land cover and the dynamics of CO₂Flux in the vegetation of the state of Pará between 2000 and 2023, considering the role of the Amazon rainforest in regulating the carbon cycle. The introduction emphasizes that deforestation and agricultural expansion compromise the Amazon's function as a CO₂ sink, especially in Pará, which accounts for approximately 36% of the deforestation in the Legal Amazon. The conversion of forests into extensive pastures has reduced the carbon sequestration capacity, although sustainable management systems may mitigate this impact. The research employs remote sensing, integrating data from MapBiomas (Collection 9) and MODIS imagery processed on the Google Earth Engine platform to map land-use transitions and calculate the CO₂Flux index, which combines NDVI and PRI to estimate the carbon exchange between vegetation and the atmosphere. Spatial analysis reveals that 11.76 million hectares (9.34% of the state's area) were converted from forest to pasture, mainly along the BR-230 highway and in southeastern Pará. Forest cover decreased by 14.17%, while pastures increased by 116.6% during the study period. These results demonstrate the expansion of livestock activities over forested areas, affecting the ecological balance and regional carbon dynamics. Thus, the study contributes to understanding environmental transformations in Pará and reinforces the importance of public policies and continuous monitoring to mitigate emissions and promote Amazonian sustainability.

Keywords: land use and land cover; CO₂Flux; NDVI; MapBiomas; Pará

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa de localização do Estado do Pará, situado na região Norte do Brasil.....	12
Figura 2: Mapa de Transição de Floresta para Pastagem no Estado do Pará (2000 - 2023).....	18
Figura 3: Mapa de Variação do Índice CO ₂ Flux no Estado do Pará (2000 - 2023).....	21
Figura 4: Histogramas de Distribuição do CO ₂ Flux Pré e Pós (2000–2023).....	22
Figura 5: Histogramas de Distribuição do NDVI Pré e Pós (2000–2023).....	23
Figura 6: Mapa de Variação do Índice NDVI no Estado do Pará (2000 - 2023).....	24
Figura 7: Relação entre CO ₂ Flux e NDVI Pré e Pós (2000–2023).....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dinâmica de Floresta e Pastagem no Pará (2000 – 2023).....	18
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AOI** → Area of Interest (Área de Interesse).
- BLUE** → Banda de reflectância azul (utilizada no cálculo do PRI).
- CO₂Flux** → Índice combinado que integra NDVI e PRI para estimar a troca de carbono entre vegetação e atmosfera.
- FAPESPA** → Fundação Amazônia Paraense de Amparo à Pesquisa.
- FF** → Floresta → Floresta (classe de transição de uso da terra).
- FP** → Floresta → Pastagem (classe de transição de uso da terra).
- GEE** → Google Earth Engine (Plataforma de processamento de dados geoespaciais em nuvem).
- GPP** → Gross Primary Productivity (Produtividade Primária Bruta).
- GREEN** → Banda de reflectância verde (utilizada no cálculo do PRI).
- IBGE** → Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Imazon** → Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia.
- INPE** → Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- MAPBIOMAS** → Plataforma de monitoramento de uso e cobertura da terra no Brasil.
- MCTI** → Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações.
- MOD09A1** → Produto MODIS de Reflectância da Superfície com composição de 8 dias.
- MODIS** → Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Sensor de Sensoriamento Remoto de Resolução Moderada, a bordo dos satélites Terra e Aqua da NASA).
- MMA** → Ministério do Meio Ambiente.
- NDVI** → Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada).
- NIR** → Banda de reflectância no infravermelho próximo (utilizada no cálculo do NDVI).
- PP** → Pastagem → Pastagem (classe de transição de uso da terra).
- PPCDAm** → Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal.
- PRI** → Photochemical Reflectance Index (Índice de Refletância Fotoquímica).
- RED** → Banda de reflectância no vermelho (utilizada no cálculo do NDVI).
- SEEG** → Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa.
- SEMAS** → Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade.
- SHP** → Formato de arquivo vetorial (shapefile).
- WWF** → World Wide Fund for Nature (Fundo Mundial para a Natureza).

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂ → Dióxido de carbono.

MtCO_{2e} → Milhões de toneladas equivalentes de CO₂.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	METODOLOGIA.....	12
2.1	Área de Estudo.....	12
2.2	Material e Método.....	13
2.3	Primeira Etapa: Dados do MapBiomas.....	14
2.4	Segunda Etapa: Dados MODIS e Índice CO ₂ Flux.....	15
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	26
5	REFERÊNCIAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios da atualidade, impulsionadas principalmente pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono (CO_2). Nesse contexto, a cobertura vegetal desempenha papel essencial, pois atua na regulação do balanço de carbono entre biosfera e atmosfera por meio de processos como fotossíntese, respiração e decomposição orgânica (Fearnside, 2008; Gatti et al., 2021). Desse modo, compreender os mecanismos ecológicos que influenciam o sequestro e a liberação de carbono torna-se fundamental para avaliar a resiliência dos ecossistemas e a capacidade do planeta em responder à crise climática.

Nesse cenário, a Amazônia se destaca por ser a maior floresta tropical contínua do mundo e, consequentemente, um dos mais relevantes estoques de carbono globais. Sua vegetação atua como um sumidouro estratégico de CO_2 , mas, nas últimas décadas, pressões antrópicas como desmatamento, degradação florestal e expansão agropecuária vêm comprometendo essa função essencial (Fearnside, 2008; Anderson, 2009). Estudos recentes apontam que determinadas porções da Amazônia já apresentam balanço positivo de emissões, ou seja, emitem mais carbono do que conseguem absorver, revertendo sua função ecológica e ampliando a vulnerabilidade frente às mudanças climáticas (Gatti et al., 2021).

O estado do Pará ocupa posição central nesse processo, não apenas por concentrar parte significativa da cobertura florestal amazônica, mas também por registrar, historicamente, as maiores taxas de desmatamento da região. Entre 2019 e 2023, o estado foi responsável por cerca de 36% do desflorestamento total da Amazônia Legal, evidenciando a intensidade das pressões sobre seu território (FAPESPA, 2024a). Além da perda florestal, a degradação, processo menos visível, mas igualmente impactante, atingiu mais de 3 mil km^2 apenas em 2023, comprometendo serviços ecossistêmicos fundamentais, como a regulação climática e a manutenção da biodiversidade (FAPESPA, 2024b).

Essa transformação acelerada do território está diretamente relacionada ao modelo de ocupação historicamente imposto à região. A conversão de florestas para pastagens, agricultura mecanizada ou áreas urbanizadas tem alterado não apenas a paisagem, mas o funcionamento ecológico dos ecossistemas (Silva; Faria, 2023). Mudanças no uso e cobertura da terra afetam profundamente os ciclos biogeoquímicos, especialmente o ciclo do carbono, comprometendo a capacidade da vegetação de sequestrar CO_2 e, consequentemente, influenciando a estabilidade climática regional e global (Anderson, 2009).

As pastagens, embora frequentemente associadas à perda de biodiversidade e à redução da capacidade de sequestro de carbono quando resultantes do desmatamento, também podem desempenhar papel relevante no balanço de carbono em cenários de manejo adequado (Hercowitz, 2021). Estudos indicam que pastagens bem manejadas, especialmente quando integradas a sistemas de recuperação de áreas degradadas ou de integração lavoura-pecuária-floresta, podem contribuir para o aumento da produtividade primária bruta (GPP) e, conseqüentemente, para o sequestro de CO₂ atmosférico (Veloso, 2018). No entanto, no Pará, a predominância do modelo extensivo, caracterizado por baixas taxas de reposição da fertilidade do solo e sobrepastoreio, tem limitado esse potencial, reforçando o papel das pastagens como vetores de emissão líquida de carbono e de pressão contínua sobre a floresta (Fearnside, 2008; Silva; Faria, 2023).

Esse cenário tem levado ao desenvolvimento de políticas públicas ambientais voltadas à mitigação das mudanças climáticas e ao combate ao desmatamento. No Pará, por exemplo, a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS) implementa iniciativas pioneiras, buscando consolidar o estado como referência nacional na governança climática (SEMAS, 2024). De modo complementar, organizações internacionais como o Fundo Mundial para a Natureza (WWF) destacam que a proteção dos ecossistemas amazônicos é condição indispensável para a sustentabilidade regional (Anderson, 2009).

Nesse contexto, a utilização do sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta fundamental para compreender a dinâmica de uso e cobertura da terra e sua relação com os fluxos de carbono. Os índices de vegetação, como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), permitem avaliar a densidade e a atividade fotossintética da vegetação, fornecendo subsídios importantes para monitorar a saúde dos ecossistemas (Huete et al., 2002 apud Coltri et al., 2009). Além disso, índices como o PRI (Photochemical Reflectance Index) ampliam a capacidade de análise ao se relacionarem com a eficiência do uso da radiação pela vegetação.

Apesar de sua relevância, o monitoramento direto dos fluxos de carbono ainda apresenta desafios, principalmente em grandes áreas e em diferentes biomas (Hercowitz, 2021). Para superar essas limitações, estudos recentes têm desenvolvido índices integrados que combinam informações de múltiplos índices espectrais, permitindo estimativas mais robustas da dinâmica do carbono. Um exemplo é o CO₂Flux, que integra dados do NDVI e do PRI para fornecer uma estimativa direta da troca de carbono entre a vegetação e a atmosfera

(Almeida; Rocha, 2018). Sua aplicabilidade já foi testada em diferentes contextos ambientais, como na avaliação de serviços ecossistêmicos em áreas de manguezais impactados (Silva; Faria, 2023) e em análises comparativas entre sensores hiperespectrais aerotransportados e sensores orbitais multiespectrais na Amazônia meridional (Della-Silva et al., 2022). Esses estudos evidenciam a relevância do CO₂Flux como um indicador inovador da funcionalidade ecossistêmica.

A utilização de índices espectrais para quantificação da biomassa e do sequestro de carbono também tem sido aplicada em outros sistemas produtivos. Pesquisas como a de Coltri et al. (2009) demonstram sua eficiência em lavouras de café arábica, enquanto Veloso (2018) investigou a produtividade primária e biomassa em áreas de pastagem no Cerrado, utilizando modelos como SEBAL/CASA e MOD17. Esses exemplos revelam o potencial dos índices em diferentes realidades ambientais e produtivas.

O desenvolvimento científico relacionado ao CO₂Flux não é isolado, mas parte de um esforço mais amplo que inclui também estudos em florestas boreais. Pesquisas pioneiras como a de Rahman et al. (2001) já indicavam a possibilidade de modelar fluxos ecossistêmicos a partir de índices hiperespectrais, criando um arcabouço teórico que foi posteriormente expandido para a Amazônia. Atualmente, essa linha de investigação é especialmente relevante, uma vez que a conversão de floresta para pastagem ou outros usos altera significativamente o balanço de carbono (Gatti et al., 2021).

Apesar desses avanços, ainda são escassos os estudos que aplicam o índice CO₂Flux em recortes regionais da Amazônia, especialmente no Pará, relacionando-o às mudanças no uso e cobertura da terra em séries temporais mais longas. Essa lacuna justifica a presente pesquisa, que busca compreender de que forma a conversão florestal impacta a dinâmica do carbono em escala estadual.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo geral analisar a relação entre o uso e cobertura da terra e a dinâmica do CO₂Flux na vegetação do estado do Pará no período de 2000 a 2023, por meio da aplicação de índices espectrais. Como objetivos específicos, propõe-se: (i) compreender as mudanças de uso e cobertura da terra, com ênfase na conversão de áreas de floresta para pastagem; (ii) calcular o índice CO₂Flux com base nos índices NDVI e PRI; e (iii) avaliar as variações espaciais e temporais da absorção de carbono, utilizando dados do sensor MODIS e da plataforma MapBiomas.

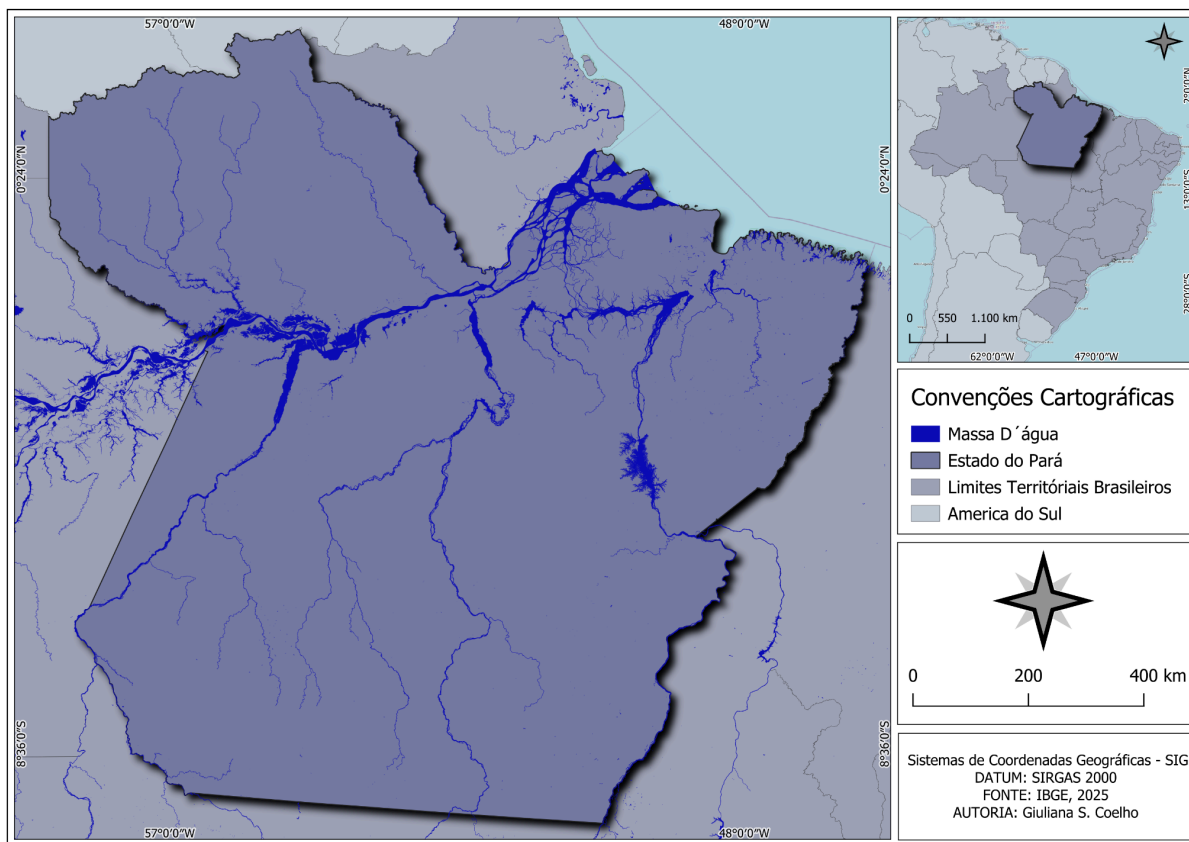
Assim, o estudo contribui para ampliar a compreensão científica sobre o balanço de carbono em ecossistemas amazônicos e para subsidiar estratégias de monitoramento e mitigação das mudanças climáticas na região.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo.

O presente estudo foi desenvolvido no estado do Pará, situado na região Norte do Brasil (Figura 1), com extensão territorial de aproximadamente 1.245.870,70 km², sendo o segundo maior estado do país em superfície (IBGE, 2022). Inserido predominantemente no bioma Amazônia, o território paraense apresenta grande diversidade ambiental, com florestas densas, áreas de transição e ecossistemas aquáticos associados a uma ampla rede hidrográfica, tendo o rio Amazonas e seus principais afluentes como elementos estruturantes da paisagem (Silva; Silva; Chagas, 2015).

Figura 1: Mapa de localização do Estado do Pará, situado na região Norte do Brasil.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025), a partir dos dados do IBGE (2022).

Do ponto de vista climático, o Pará apresenta pluviosidade anual média entre 1.800 e 2.500 mm, com forte sazonalidade marcada por um período chuvoso e outro menos úmido. A

temperatura média anual varia entre 24 °C e 27 °C, apresentando valores mais elevados em áreas de transição para o Cerrado (Codevasf, 2010; Silva; Silva; Chagas, 2015). Essas condições sustentam a elevada produtividade da vegetação e a complexidade de seus ecossistemas.

O estado exerce papel estratégico no contexto das mudanças climáticas, tanto pelo seu elevado potencial de sequestro de carbono, associado à ampla cobertura florestal, quanto pela vulnerabilidade frente a pressões antrópicas, em especial o avanço da fronteira agropecuária e o desmatamento. Dados do Prodes/INPE apontam que, entre agosto de 2022 e julho de 2023, o desmatamento na Amazônia Legal foi de 9.064 km², representando uma queda de aproximadamente 21,8% em relação ao período anterior (MMA; INPE, 2024). No Pará, especificamente, a taxa recuou cerca de 28,4%, embora o estado ainda responda por 36% do desflorestamento acumulado da Amazônia Legal (FAPESPA, 2024; MMA, 2024).

Além da relevância ambiental, o Pará também possui importância socioeconômica significativa. Sua população ultrapassa 8,5 milhões de habitantes, concentrada principalmente na Região Metropolitana de Belém, mas com grandes extensões de áreas rurais (IBGE, 2022). A economia estadual é marcada pelo peso das atividades minerais (ferro, bauxita, cobre, manganês e ouro), da agropecuária (soja, dendê, cacau, mandioca e pecuária bovina) e do extrativismo vegetal, atividades que garantem receitas importantes, mas também configuram pressões intensas sobre os ecossistemas florestais (Codevasf, 2010; Silva; Silva; Chagas, 2015).

Nesse sentido, a relação entre conservação ambiental e desenvolvimento econômico configura-se como um dos principais desafios do estado. Estratégias de gestão territorial e políticas públicas, como o fortalecimento do monitoramento via sensoriamento remoto e iniciativas estaduais de combate ao desmatamento, vêm sendo implementadas para equilibrar essas dinâmicas (FAPESPA, 2024).

2.2 Material e Método.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho é de caráter bibliográfico e documental, com abordagem quali-quantitativa. A etapa bibliográfica foi conduzida a partir de referências teóricas extraídas de livros, artigos científicos, relatórios técnicos e publicações institucionais, incluindo materiais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e de estudos do próprio MapBiomas, os quais

fornece base conceitual para compreender a dinâmica do uso e cobertura da terra e a variabilidade do fluxo de carbono na vegetação.

A pesquisa documental utilizou bases de dados secundários disponibilizadas por plataformas e instituições reconhecidas, com destaque para os produtos do MapBiomas Collection 9 e para os dados dos sensores MODIS/Terra e Aqua da NASA, que serviram como fonte primária para o mapeamento e a quantificação das mudanças de uso da terra no estado do Pará. Essa estrutura metodológica, de natureza quali-quantitativa, possibilitou integrar análises estatísticas e geoespaciais (quantitativas) à interpretação crítica dos resultados frente aos contextos socioambientais (qualitativa).

Todo o processamento dos dados foi realizado na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), que possibilita o manuseio de grandes volumes de dados geoespaciais de forma integrada, em ambiente de computação em nuvem. O processamento foi dividido em duas etapas principais:

1. Primeira Etapa: análise das transições de uso e cobertura da terra com dados do MapBiomas.
2. Segunda Etapa: cálculo do índice CO₂Flux com imagens MODIS.

2.3 Primeira Etapa: Dados do MapBiomas

Para identificar e quantificar as transições entre Formação Florestal e Pastagem no período de 2000 a 2023, foi utilizada a Coleção 9 do MapBiomas, especificamente o produto “Integration v1”. O MapBiomas é uma iniciativa colaborativa que integra universidades, organizações não governamentais e centros de pesquisa, com o objetivo de mapear, de forma sistemática e padronizada, o uso e a cobertura da terra em todo o território brasileiro, a partir de imagens de sensoriamento remoto e técnicas de classificação supervisionada (MAPBIOMAS, 2024).

A plataforma disponibiliza séries temporais anuais desde 1985, com resolução espacial de 30 metros, baseada principalmente em imagens dos satélites Landsat, o que possibilita o monitoramento contínuo da dinâmica da paisagem e das mudanças associadas aos processos de desmatamento, expansão agropecuária e regeneração da vegetação nativa (ALMEIDA et al., 2016; SOUZA et al., 2020). A escolha da Coleção 9 justifica-se por representar a versão mais recente do projeto, incorporando aprimoramentos metodológicos,

maior consistência temporal e validações regionais mais robustas, especialmente para a Amazônia Legal (MAPBIOMAS, 2024).

O processamento dos dados foi realizado integralmente na plataforma Google Earth Engine (GEE), ambiente de computação em nuvem amplamente utilizado em estudos de sensoriamento remoto por permitir o acesso direto a grandes volumes de dados geoespaciais e a execução de algoritmos em escala regional e nacional (et al., 2017). Para este estudo, foi desenvolvido um script específico em JavaScript, (*link do código: <https://code.earthengine.google.com/d346976e760efcabf51b3e3ee5b336d6>*)

O código aplicado seguiu a seguinte lógica: A definição da Área de Interesse (AOI) compreendeu o recorte espacial correspondente ao estado do Pará, delimitado a partir de um arquivo vetorial (formato *shp*) obtido na base de dados do IBGE e inserido na conta do *Google Earth Engine* (GEE). Em seguida, foram selecionadas as classes de uso e cobertura da terra “Formação Florestal” (código 3) e “Pastagem” (código 15) para os anos de 2000 e 2023, com o objetivo de gerar camadas temáticas específicas para cada período.

A partir desse recorte temporal, realizou-se o mapeamento das transições, cruzando os dados de ambos os anos, o que resultou em um raster contendo três categorias principais: FF (Floresta → Floresta), representando áreas estáveis de floresta; FP (Floresta → Pastagem), correspondendo a áreas desmatadas e convertidas em pastagem; e PP (Pastagem → Pastagem), caracterizando áreas estáveis de pastagem. Por fim, cada classe de transição foi exportada individualmente em formato GeoTIFF, com resolução espacial de 30 metros, para posterior análise e elaboração dos mapas temáticos.

A utilização do MapBiomass se justifica pela sua consistência metodológica, alta resolução temporal (anual) e confiabilidade na detecção de mudanças de uso e cobertura da terra em escala nacional, sendo amplamente validado na literatura científica para estudos de monitoramento ambiental.

2.4 Segunda Etapa: Dados MODIS e Índice CO₂Flux

Para avaliar os efeitos da conversão de Formação Florestal em Pastagem sobre a dinâmica da vegetação, foram utilizados produtos do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), especificamente o MOD09A1 (*Surface Reflectance 8-Day*), com resolução espacial de 250 m e periodicidade de oito dias. O processamento foi realizado no *Google Earth Engine* (GEE) por meio de um *script* em *JavaScript* desenvolvido para este

estudo (link do código: <https://code.earthengine.google.com/0c175771e37fe6fe0d5f7466db884c82>).

O procedimento metodológico seguiu a seguinte lógica: a Área de Interesse (AOI), correspondente ao estado do Pará, foi definida a partir do mesmo arquivo vetorial (shp) obtido na base do IBGE e previamente incorporado ao GEE. Em seguida, com base no raster de transição gerado na Primeira Etapa (MapBiomas *Collection* 9), foi criada uma máscara espacial identificando exclusivamente os pixels que sofreram a conversão de Floresta para Pastagem (FP) entre 2000 e 2023. Essa máscara foi reprojetada para a resolução de 250 m, garantindo compatibilidade com a escala dos produtos MODIS.

Para a análise temporal, foram selecionadas duas janelas representativas: período pré-impacto (2001–2005), caracterizando as condições de vegetação antes da conversão, e período pós-impacto (2019–2023), refletindo o cenário posterior às mudanças de uso da terra. A definição dessas janelas considerou critérios técnicos e ambientais. O recorte inicial (2001–2005) corresponde ao início da série histórica de dados MODIS, garantindo consistência e comparabilidade dos índices espectrais (Rahman et al., 2001; Rodrigues et al., 2015). Além disso, esse período coincide com uma fase de intensa expansão da fronteira agropecuária no Pará e em toda a Amazônia, marcada por elevadas taxas de desmatamento no chamado arco do desmatamento e anterior à implementação efetiva do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) a partir de 2004 (Fearnside, 2005; Imazon, 2023). Já o recorte final (2019–2023) foi escolhido por representar um contexto recente de forte pressão antrópica, incluindo novos picos de desmatamento entre 2019 e 2022, seguido por uma redução de 21,8% em 2023 (MCTI, 2024; Greenpeace, 2024). Assim, a comparação entre esses extremos possibilita avaliar a magnitude das alterações na vegetação e no fluxo de carbono ao longo de mais de duas décadas, abrangendo desde a fase de maior cobertura florestal até o cenário atual.

Sobre esse recorte, foi aplicado um filtro de qualidade (Quality Assurance – QA) para eliminar pixels comprometidos por nuvens, sombras, ou outros artefatos atmosféricos, assegurando maior confiabilidade aos valores espectrais. A partir das bandas de reflectância corrigida do MOD09A1, foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o NDVI (Equação 1) é um índice espectral amplamente utilizado para avaliar a vitalidade e o vigor da vegetação, baseado na diferença entre a reflectância do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED) (Coltri et al., 2009). A vegetação saudável tende a

refletir intensamente no NIR e a absorver fortemente no vermelho, em função da presença de clorofila. Os valores do NDVI variam de -1 a 1, sendo que valores negativos correspondem a corpos d'água ou superfícies artificiais, valores próximos de zero indicam áreas sem cobertura vegetal significativa, valores intermediários (entre 0,2 e 0,5) representam vegetação esparsa ou degradada, e valores superiores a 0,5 caracterizam vegetação densa e saudável, como florestas.

Equação 1: NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada).

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

Em seguida, foi utilizado o Índice de Refletância Fotoquímica (PRI) normalizado (Equação 3), que é um indicador espectral sensível à eficiência do uso da luz pela vegetação durante o processo fotossintético. Diferente do NDVI, que quantifica a densidade de biomassa verde, o PRI reflete variações fisiológicas associadas aos pigmentos carotenóides, os quais respondem rapidamente às mudanças na atividade fotossintética (Rahman et al., 2001). Seus valores variam de -1 a 1, sendo que índices negativos indicam estresse ou senescência, próximos de zero correspondem a uma eficiência intermediária e positivos refletem maior capacidade de conversão da energia luminosa em energia química pela vegetação.

Equação 2: PRI (Índice de Refletância Fotoquímica)

$$\text{PRI} = (\text{BLUE} - \text{GREEN}) / (\text{BLUE} + \text{GREEN})$$

Considerando que o Photochemical Reflectance Index (PRI) pode assumir valores negativos, foi realizado um reescalonamento dos seus valores para o intervalo entre 0 e 1, de modo a viabilizar sua integração com outros índices espectrais. Esse procedimento resultou no índice sPRI, calculado conforme a Equação 3, que normaliza os valores originais do PRI sem alterar sua variabilidade relativa.

Equação 3: sPRI

$$\text{sPRI} = (\text{PRI} + 1) / 2$$

A partir desse reescalonamento, procedeu-se à combinação do sPRI com o NDVI, originando o índice CO₂Flux (Equação 4), integrando informações sobre a quantidade e a eficiência funcional da vegetação. Esse índice permite estimar indiretamente o potencial de absorção de CO₂ pela vegetação, ao considerar simultaneamente a densidade da cobertura vegetal (representada pelo NDVI) e sua eficiência fotossintética (representada pelo PRI). Seus valores variam de 0 a 1, onde valores mais altos indicam vegetação densa e metabolicamente

ativa, com maior capacidade de sequestro de carbono, e valores mais baixos indicam vegetação degradada, estressada ou ausente.

Equação 4 : CO₂Flux: Índice Combinado.

$$\text{CO}_2\text{Flux} = \text{sPRI} \times \text{NDVI}$$

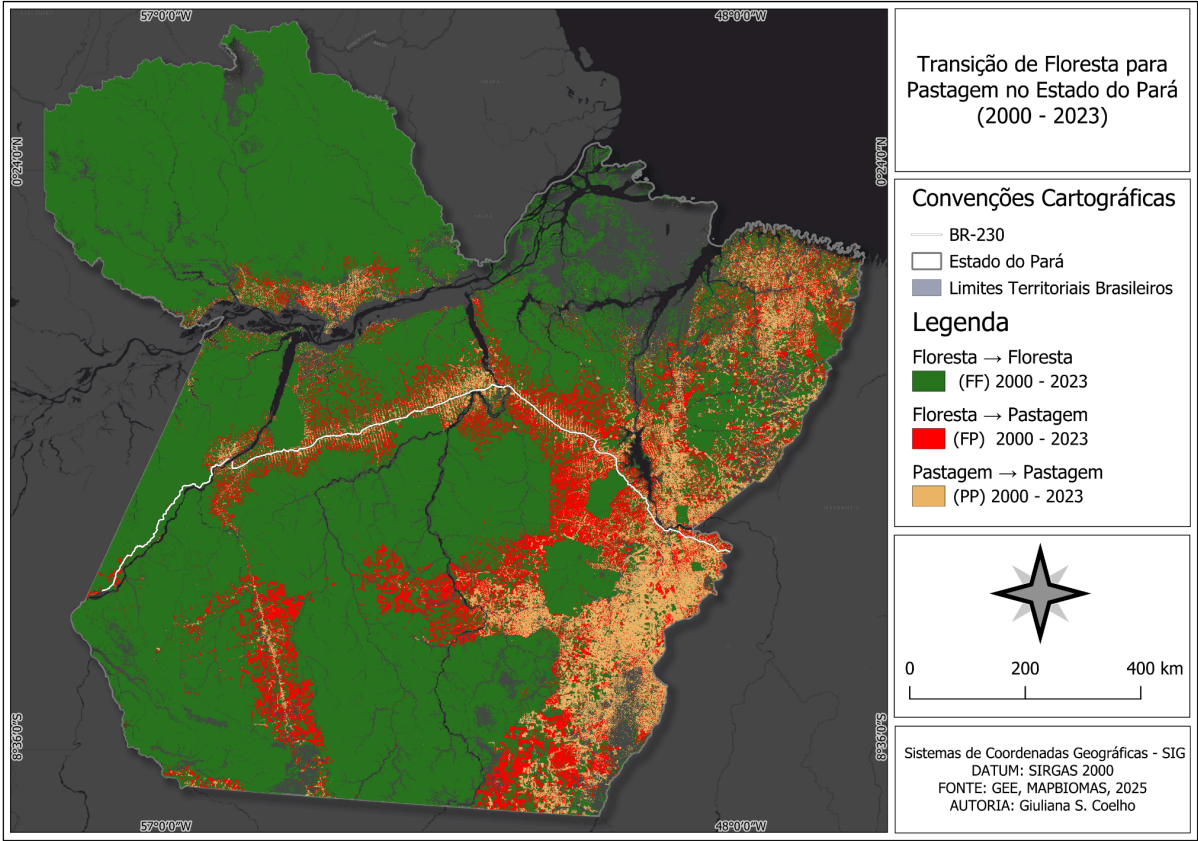
Para cada pixel da AOI, foram geradas médias temporais do NDVI e do CO₂Flux para os dois períodos (pré e pós-impacto), possibilitando a detecção de variações espaciais e a quantificação das alterações no funcionamento ecossistêmico decorrentes da mudança no uso do solo.

Por fim, os resultados foram exportados em diferentes formatos para facilitar a análise e a integração com outras ferramentas: rasters GeoTIFF com as médias de NDVI e CO₂Flux para cada período, além de mapas de variação entre as janelas temporais, e um arquivo CSV contendo estatísticas descritivas (média, desvio-padrão e amplitude) para cada métrica. A utilização do MODIS se justifica por sua alta frequência temporal, que permite monitorar processos de dinâmica da vegetação em larga escala, e pela ampla validação científica, sendo considerado um dos principais sensores para estudos de mudanças climáticas, fluxo de carbono e produtividade da vegetação em regiões tropicais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação espacial das mudanças de uso e cobertura da terra no estado do Pará entre 2000 e 2023 revela um quadro dinâmico de conversão florestal, no qual a expansão da pecuária e da agricultura se consolidam como os principais vetores de transformação da paisagem (Andrade et al., 2016). Conforme representado no mapa da Figura 2.

Figura 2: Mapa de Transição de Floresta para Pastagem no Estado do Pará (2000 - 2023).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As áreas em vermelho (FP) evidenciam a mudança de floresta para pastagem, concentrando-se principalmente ao longo da BR-230 (Transamazônica) e no sudeste do estado, abrangendo municípios como São Félix do Xingu, Novo Progresso e Paragominas, tradicionalmente reconhecidos como parte do “arco do desmatamento” (Andrade et al., 2016; Pinto et al., 2023). De acordo com a Tabela 1, a conversão de floresta para pastagem (F/P) totalizou 11.766.125 ha, representando 9,34% da área total do estado. Esse padrão espacial confirma a forte associação entre a expansão da pecuária e a abertura de novas áreas, reforçando diagnósticos que apontam a atividade agropecuária como vetor primário da supressão florestal na Amazônia (Ferreira et al., 2023; Santos et al., 2022).

Tabela 1: Dinâmica de Floresta e Pastagem no Pará (2000 – 2023)

Classe	Área (ha) Situação inicial	% Situação inicial	Área (ha) Situação atual	% Situação atual	Mudança em relação à área original
Floresta	83.038.075	65,92%	71.271.950	56,60%	Perda: 14,17%
Pastagem	10.093.050	8,02%	21.859.175	17,40%	Ganho: 116,6%

Floresta → Pastagem (F/P)	—	—	11.766.125	9,34%	—
Total Pará	125.898.285, 20	100%	125.898.285,20	100%	—

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As áreas em verde (FF) representam florestas que permaneceram estáveis no período, concentrando-se principalmente no oeste e noroeste do Pará, como nas regiões da Calha Norte e entorno da Terra do Meio, onde a presença de Unidades de Conservação e Terras Indígenas tem desempenhado papel importante na contenção do desmatamento (FAPESPA, 2024). Segundo a Tabela 1, a área de floresta em 2023 foi de 71.271.950 ha, mostrando uma perda de 14,17% em relação à cobertura original de 83.038.075 ha em 2000. A manutenção dessas áreas indica a eficácia relativa de instrumentos de comando e controle, como o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), especialmente após 2004, e mais recentemente das ações estaduais de monitoramento (SEMAS, 2023).

Por outro lado, a presença de extensas manchas em amarelo (PP), indicando áreas de pastagem que permaneceram como pastagem, revela a consolidação de atividades pecuárias em grandes porções do sudeste paraense. A Tabela 1 evidencia que a área de pastagem aumentou de 10.093.050 ha em 2000 (8,02% do território) para 21.859.175 ha em 2023 (17,4%), indicando um ganho de 116,6% no período. Esse crescimento reflete a transformação estrutural da paisagem, com substituição duradoura da vegetação nativa por sistemas de uso intensivo do solo (Pinto et al., 2023). Mesmo com a recente queda de 21% no desmatamento em 2023 (SEMAS, 2023), o legado de áreas convertidas continua exercendo pressão sobre os serviços ecossistêmicos, com impactos diretos sobre o ciclo do carbono (Andrade et al., 2016; Santos et al., 2022).

A conversão de florestas em pastagens reduz a biodiversidade, altera o balanço de carbono e aumenta as emissões de CO₂, impactando diretamente índices como o CO₂Flux analisado neste trabalho (Marengo et al., 2024; Ferreira et al., 2023). A remoção da cobertura florestal diminui significativamente a capacidade de sequestro de carbono e altera o microclima regional (Marengo et al., 2024; Ferreira et al., 2023), enquanto o aumento de áreas de pastagem está associado à degradação do solo, à diminuição da evapotranspiração e à modificação do regime hidrológico (Santos et al., 2022; Pinto et al., 2023).

Contudo, pastagens bem manejadas podem sequestrar carbono por meio da produtividade primária bruta (GPP), que expressa a taxa de fixação do CO₂ atmosférico pela

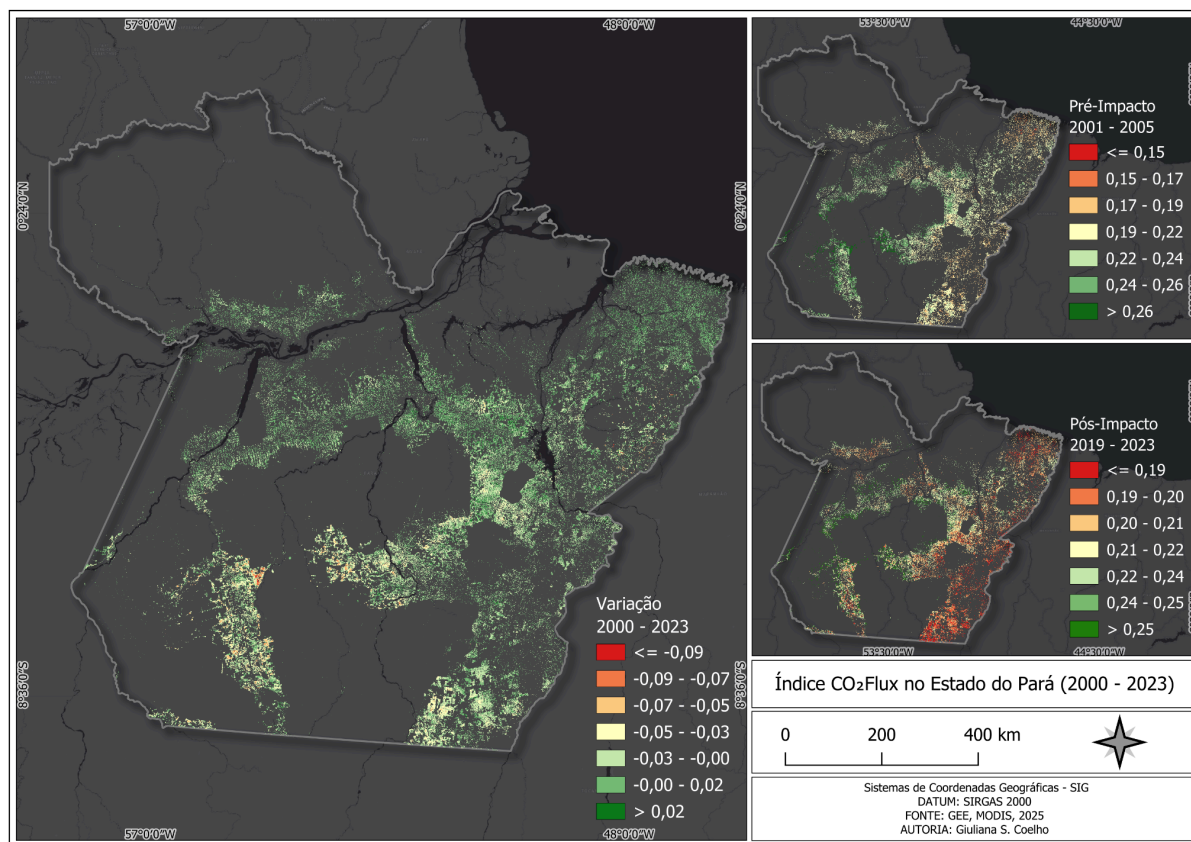
fotossíntese (Veloso, 2018). Estudos em ecossistemas antrópicos, como as pastagens do Cerrado, indicam que o incremento da GPP contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, especialmente quando associado a práticas de recuperação de áreas degradadas e integração lavoura-pecuária-floresta (Veloso, 2018).

Embora o estudo de Veloso (2018) seja focado no Cerrado goiano, seus resultados oferecem paralelos importantes para o Pará, sugerindo que a intensificação sustentável da pecuária, aliada ao monitoramento via sensoriamento remoto, pode aumentar a retenção de carbono em áreas já convertidas e reduzir a pressão sobre novas áreas de floresta (Veloso, 2018).

Essa perspectiva reforça a importância de analisar a dinâmica do CO₂Flux como indicador da eficiência da vegetação em assimilar carbono, uma vez que a substituição de florestas por pastagens mal manejadas tende a reduzir significativamente esse fluxo (Baptista, 2003). A análise do índice CO₂Flux no estado do Pará entre 2001 e 2023 evidencia padrões espaciais e temporais que refletem diretamente as mudanças no uso e cobertura da terra (Figura 3) (Della-Silva et al., 2022; Hercowitz, 2021).

Observa-se, nos mapas, uma predominância de valores mais elevados no período pré-impacto (2001 - 2005) nas áreas de florestas preservadas, enquanto o período pós-impacto (2019 - 2023) revela uma redução significativa do fluxo de carbono em porções do sudeste e sudoeste paraense, regiões historicamente associadas ao avanço do desmatamento e da pecuária extensiva (Fearnside, 2005; Hercowitz, 2021). A variação negativa do índice entre 2000 e 2023, destacada pelas tonalidades vermelhas, indica a perda de capacidade da vegetação em absorver CO₂, resultado da conversão florestal em pastagens e áreas agrícolas, sobretudo ao longo do arco do desmatamento (Baptista, 2003; Santos et al., 2024).

Figura 3: Mapa de Variação do Índice CO₂Flux no Estado do Pará (2000 - 2023).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

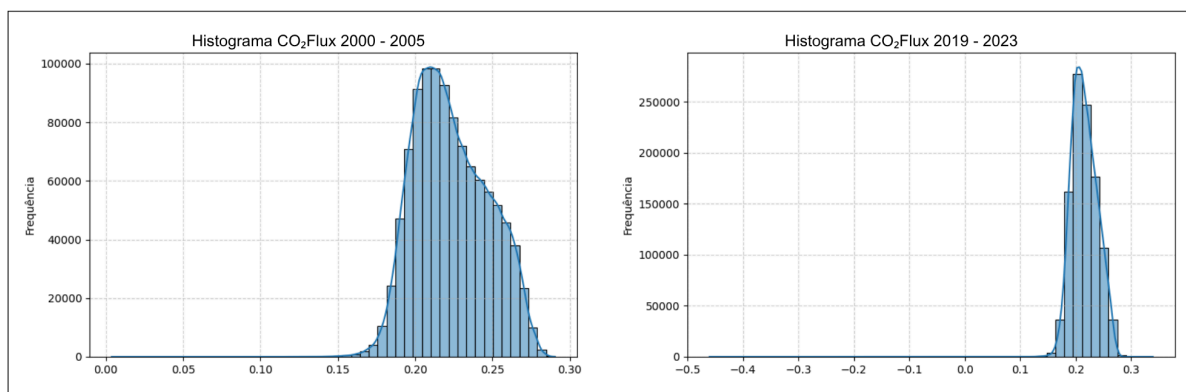
Os resultados estatísticos confirmam essa tendência de redução. O CO₂Flux médio passou de 0,22 para 0,21, representando uma variação negativa de -0,01, o que, embora pareça pequeno, indica uma diminuição constante na capacidade de sequestro de carbono ao longo de mais de duas décadas. Estudos anteriores confirmam que a redução do CO₂Flux está intimamente relacionada à degradação da vegetação e à substituição de áreas florestais por usos antrópicos (Gomes et al., 2018; Santos & Gomes, 2021).

De acordo com dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (2024), o Pará emitiu 312,26 milhões de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (MtCO₂e) em 2023, sendo 77,4% provenientes de mudanças de uso da terra e florestas (241,60 MtCO₂e) e 17,3% do setor agropecuário (54,15 MtCO₂e). As remoções totais somaram 167,54 MtCO₂e, resultando em emissões líquidas de 144,72 MtCO₂e. Nos últimos dez anos, o estado apresentou um crescimento médio anual de 2,5% nas emissões líquidas, com o desmatamento respondendo sozinho por 239,18 MtCO₂e (99% das emissões brutas do setor MUT).

Esses valores reforçam a relação direta entre o avanço da fronteira agropecuária e a intensificação das emissões de carbono, o que compromete os serviços ecossistêmicos e a capacidade de resiliência da vegetação nativa (Fearnside, 2005; SEEG, 2024). A categoria de Mudança de Uso da Terra e Florestas permanece, portanto, como a principal responsável pela contribuição do Pará às emissões nacionais, seguida pela agropecuária e, em menor escala, pelos setores de energia (3,9%) e resíduos (1,0%) (SEEG, 2024).

Além disso, os resultados observados dialogam com o contexto recente de redução das taxas de desmatamento em 2023, que, embora positivas, ainda não são suficientes para reverter a tendência histórica de perda florestal (MCTI, 2024; Greenpeace, 2024). Os histogramas (Figura 4) reforçam essa ideia, os valores médios de CO₂Flux deslocaram-se para faixas menores ao longo das duas décadas, evidenciando a intensificação da pressão antrópica sobre a vegetação. A persistência de áreas com baixos valores de CO₂Flux sugere a necessidade de políticas de manejo que integrem a conservação da vegetação nativa e a recuperação de áreas degradadas, corroborando a importância do índice como indicador de degradação ambiental (Folharini & Oliveira, 2017; Silva & Faria, 2023).

Figura 4: Histogramas de Distribuição do CO₂Flux Pré e Pós (2000–2023).



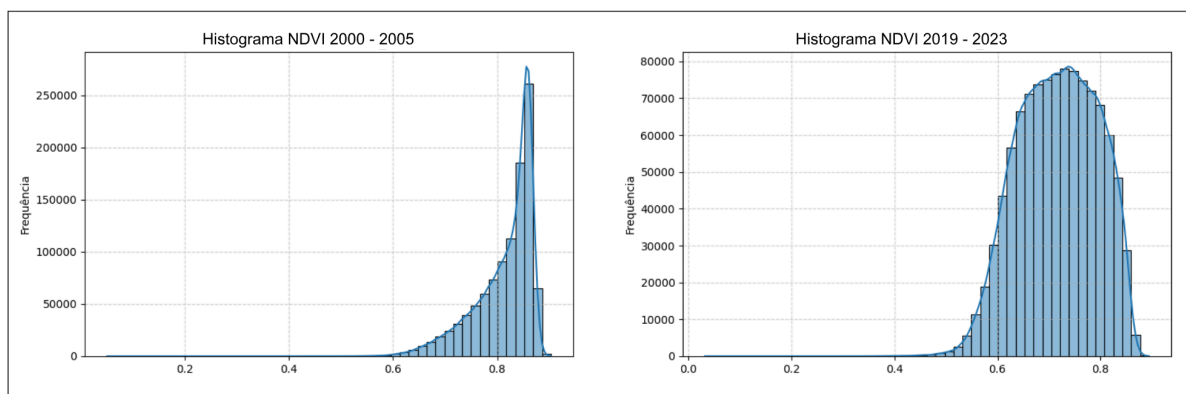
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Apesar de uma leve recuperação em áreas pontuais, especialmente no oeste do estado, onde há predominância de floresta ombrófila densa, o comportamento geral é de redução progressiva da absorção de CO₂. Essa tendência acompanha a dinâmica histórica de desmatamento e fragmentação florestal na Amazônia paraense, onde a abertura de novas áreas agropecuárias tem sido um dos principais vetores de emissão de carbono (Fearnside, 2005; Santos et al., 2024; SEEG, 2024).

Ainda que políticas públicas recentes tenham reduzido as taxas anuais de desmatamento, os resultados sugerem que a recuperação do fluxo de carbono é lenta, refletindo a baixa resiliência estrutural e funcional dos ecossistemas convertidos (Folharini; Oliveira, 2017).

Essa dinâmica do CO₂Flux encontra respaldo nos padrões detectados pelo NDVI, uma vez que ambos os índices refletem processos complementares do funcionamento ecossistêmico, relacionando o sequestro de carbono à densidade e à atividade fotossintética da vegetação (Baptista, 2003; Almeida; Rocha, 2018). A avaliação do NDVI (Figura 5) para o mesmo período confirma a forte correlação entre a cobertura vegetal e a produtividade primária. Os valores médios do índice diminuíram de 0,81 (2000–2005) para 0,71 (2019–2023), representando uma queda média de 0,09, principalmente no sul e sudeste do estado, áreas historicamente impactadas pelo desmatamento (Fearnside, 2005). A variação negativa entre 2000 e 2023 indica a diminuição da biomassa e da atividade fotossintética, especialmente em regiões de expansão agropecuária, reforçando a vulnerabilidade da vegetação frente às mudanças no uso da terra (Rodrigues et al., 2015).

Figura 5: Histogramas de Distribuição do NDVI Pré e Pós (2000–2023).

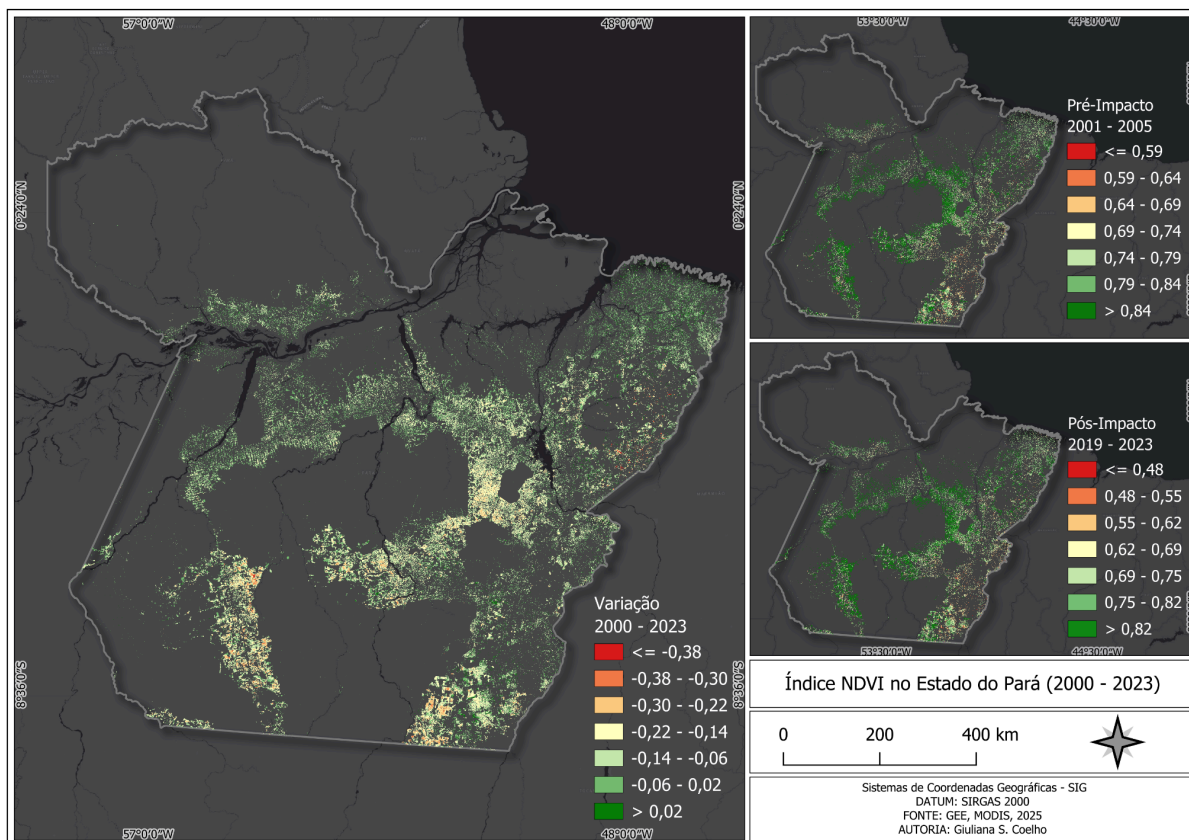


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Segundo Baptista (2003) e Almeida e Rocha (2018), o NDVI apresenta sensibilidade à densidade de biomassa, permitindo inferir tanto a dinâmica da cobertura vegetal quanto o grau de degradação. No estado do Pará, os valores mais elevados observados nas regiões norte e oeste indicam a manutenção da floresta densa, enquanto os valores mais baixos no sudeste e sudoeste refletem áreas dominadas por pastagem e agricultura. Essa distribuição espacial coincide com os dados históricos de desmatamento na Amazônia, que apontam o chamado arco do desmatamento como a área mais crítica para a perda florestal (Fearnside, 2005; Imazon, 2023).

O mapa de variação do NDVI (Figura 6) evidencia essa diferença espacial, permitindo visualizar diretamente as áreas com maior preservação e aquelas submetidas à degradação. Apesar da recente redução nas taxas de desmatamento, os resultados sugerem que a recuperação da vegetação ocorre de forma lenta, demandando ações efetivas de monitoramento e restauração.

Figura 6: Mapa de Variação do Índice NDVI no Estado do Pará (2000 - 2023).



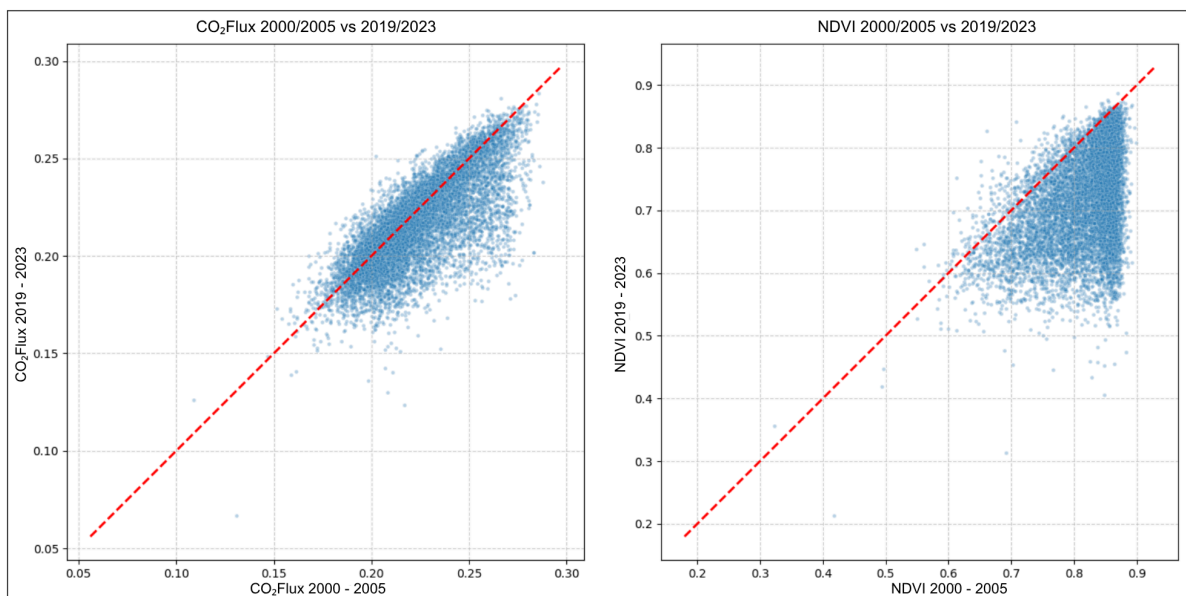
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As maiores reduções de NDVI ocorreram no sudeste e sudoeste do Pará, coincidindo com as regiões que registraram maior perda de CO₂Flux, enquanto as áreas norte e oeste mantiveram valores elevados, associados à floresta ombrófila densa ainda preservada. Essa correspondência espacial entre NDVI e CO₂Flux reforça a relação funcional entre a estrutura da vegetação e o fluxo de carbono atmosférico (Della-Silva et al., 2022; Rodrigues et al., 2015). Essa relação entre os dois índices é apresentada de forma clara na Figura 7.

A disposição dos pontos revela uma correlação positiva: áreas com maiores valores de NDVI tendem a apresentar maior absorção de carbono, enquanto regiões com vegetação mais degradada concentram valores reduzidos em ambos os índices. Essa associação

demonstra que a estrutura e a densidade da vegetação são determinantes para o equilíbrio do ciclo do carbono, uma vez que a perda de cobertura florestal implica não apenas redução da biomassa, mas também da capacidade de regulação climática (Della-Silva et al., 2022).

Figura 7: Relação entre CO₂Flux e NDVI Pré e Pós (2000–2023).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Esses resultados indicam que, entre 2000 e 2023, o estado do Pará passou por uma transformação significativa em sua dinâmica vegetacional e ecológica. A perda de vegetação, evidenciada pela redução do NDVI, está diretamente associada ao enfraquecimento do fluxo de carbono, conforme demonstrado pelo índice CO₂Flux. Essa interação reforça a importância dos índices espectrais na análise integrada do funcionamento ecossistêmico, pois permitem compreender como as modificações antrópicas afetam os processos de sequestro e emissão de carbono (Baptista, 2003; Almeida; Rocha, 2018).

De modo geral, a análise integrada dos índices NDVI e CO₂Flux revela que as mudanças no uso e cobertura da terra têm efeitos diretos sobre a dinâmica do carbono na vegetação paraense. O avanço da fronteira agropecuária, aliado à fragmentação florestal, comprometeu o equilíbrio do ciclo do carbono e reduziu a capacidade de sequestro da vegetação. Assim, a integração entre sensoriamento remoto e análises espectrais, como as apresentadas neste estudo, constitui uma ferramenta essencial para o monitoramento ambiental e a formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade dos ecossistemas amazônicos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados evidenciam que o estado do Pará, embora mantenha extensas áreas de cobertura florestal, vem passando por um processo contínuo de conversão da vegetação nativa em pastagens, refletindo a persistência de um modelo de ocupação territorial historicamente baseado na expansão agropecuária. Entre 2000 e 2023, a perda de aproximadamente 11,7 milhões de hectares de floresta para pastagem, equivalente a 9,34% da área estadual, demonstra a intensidade das pressões antrópicas e o avanço da fronteira agropecuária sobre ecossistemas de elevada importância ambiental.

A análise espacial revelou forte concentração dessas transformações ao longo da BR-230 (Transamazônica) e no sudeste do estado, regiões historicamente associadas ao chamado “arco do desmatamento”. Tal padrão confirma que a dinâmica territorial paraense segue condicionada por fatores econômicos e logísticos, como infraestrutura viária e expansão da pecuária, que continuam orientando o uso do solo em detrimento da conservação ambiental.

A integração entre os produtos do MapBiomas e os dados espectrais do sensor MODIS permitiu uma compreensão mais detalhada dos efeitos dessas mudanças sobre o funcionamento ecológico da vegetação. A redução dos valores médios de NDVI e CO₂Flux nas áreas convertidas indica uma queda significativa na densidade e na eficiência fotossintética da vegetação, sugerindo comprometimento do sequestro de carbono e aumento das emissões líquidas de CO₂. Esses resultados reforçam que a conversão florestal no Pará não implica apenas perda de cobertura vegetal, mas também redução da capacidade do ecossistema em atuar como sumidouro de carbono, impactando diretamente o balanço climático regional.

Além disso, as diferenças observadas entre os períodos pré e pós-impacto revelam que, mesmo após a estabilização de certas áreas de pastagem, o potencial de sequestro de carbono permanece inferior ao das formações florestais originais. Tal constatação evidencia que a recuperação funcional dos ecossistemas degradados é um processo lento e dependente de estratégias de manejo e restauração ambiental adequadas.

Do ponto de vista metodológico, o uso combinado de índices espectrais (NDVI e CO₂Flux) demonstrou ser uma abordagem eficaz para avaliar a dinâmica do carbono em larga escala, especialmente em regiões tropicais extensas como o Pará. O CO₂Flux mostrou-se um

indicador sensível às variações fisiológicas da vegetação e, portanto, um instrumento promissor para o monitoramento contínuo dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre os fluxos de carbono.

Entretanto, é fundamental reconhecer as limitações inerentes ao uso exclusivo de dados de sensoriamento remoto e plataformas automatizadas. Apesar da robustez dos produtos do MapBiomas e da eficiência computacional do *Google Earth Engine*, tais ferramentas estão sujeitas a incertezas relacionadas à resolução espacial, à confusão espectral entre classes de uso e cobertura da terra e à ausência de informações diretas sobre aspectos estruturais e socioambientais observáveis em escala local. Dessa forma, os resultados obtidos representam uma aproximação da realidade, devendo ser interpretados à luz dessas limitações metodológicas.

Em termos de implicações práticas, os resultados deste estudo reforçam a necessidade de fortalecimento das políticas públicas de conservação e restauração florestal, bem como a adoção de práticas produtivas sustentáveis, como o manejo rotacionado de pastagens e sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta. Tais medidas podem contribuir para mitigar as emissões e restaurar parte da capacidade de sequestro de carbono perdida ao longo das últimas décadas.

Por fim, destaca-se que o presente trabalho oferece uma base científica relevante para o aprimoramento das estratégias de monitoramento climático no estado do Pará, integrando ferramentas de sensoriamento remoto e análise geoespacial à discussão sobre mudanças ambientais globais. Recomenda-se, para estudos futuros, a ampliação da série temporal e a incorporação de variáveis adicionais, como saldo de radiação, temperatura de superfície e umidade do solo, a fim de aprofundar a compreensão sobre a resiliência ecológica da vegetação amazônica frente às transformações antrópicas.

5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. R. R.; ROCHA, K. S. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, PRI e CO₂Flux na caracterização da cobertura vegetativa da Área de Proteção Ambiental Raimundo Irineu Serra. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 7., 2018, Jardim-MS. Anais [...]. Jardim-MS: Embrapa/INPE, 2018. p. 985–994.

ANDERSON, A. B. Redução de emissões oriundas do desmatamento e degradação florestal: desafios e oportunidades. Brasília: WWF-Brasil, 2009. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?17540>. Acesso em: 7 ago. 2025.

ANDRADE, D. C. et al. O custo econômico do desmatamento da Floresta Amazônica brasileira (1988–2014). *Nova Economia*, v. 26, n. 3, p. 601-627, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/305313317>. Acesso em: 19 set. 2025.

BAPTISTA, G. M. M. Avaliação da produção de biomassa e fluxo de CO₂ em vegetação tropical secundária com imagens hiperespectrais. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 55, n. 2, p. 65–76, 2003.

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Caderno de caracterização do estado do Pará. Brasília: CODEVASF, 2010. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/biblioteca-geral-do-rocha/publicacoes/outras-publicacoes/caderno-de-caracterizacao-do-estado-do-para.pdf>. Acesso em: 30 set. 2025.

COLTRI, P. P.; OLIVEIRA, S. N.; SANCHES, I. D. Influência da resolução espacial na estimativa do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em áreas de floresta ombrófila. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 3, p. 315–321, 2009.

DELLA-SILVA, W. V. et al. CO₂ Flux Model Assessment and Comparison between an Airborne Hyperspectral Sensor and Orbital Multispectral Imagery in Southern Amazonia. *Sustainability*, v. 14, n. 9, p. 5458, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14095458>.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. *Acta Amazônica*, v. 38, n. 2, p. 395–400, 2008.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências. *Megadiversidade*, v. 1, n. 4, p. 113–123, 2005.

FAPESPA – Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas. Painel de Indicadores Sociais e Econômicos do Pará – Meio Ambiente. Belém: FAPESPA, 2024a. Disponível em: <https://fapespa.pa.gov.br/sistemas/pcn2024>. Acesso em: 6 ago. 2025.

FAPESPA – Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas. Área de florestas (km²) – 2018 a 2022. Belém: FAPESPA, 2024b. Disponível em: <https://fapespa.pa.gov.br/sistemas/pcn2024>. Acesso em: 6 ago. 2025.

FERREIRA, C. A. et al. Impactos ambientais e urbanos da UHE Belo Monte em Altamira-PA. *Revista Geonorte*, v. 11, n. 39, p. 155–172, 2020.

FERREIRA, R. S. et al. Dinâmica de uso e cobertura da terra e balanço de carbono na Amazônia. *Floresta e Ambiente*, v. 29, e20220055, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/loram/a/gyXFGkZ3CPqd7HHCwbyTrVM/>. Acesso em: 19 set. 2025.

FOLHARINI, S. O.; OLIVEIRA, R. C. Cálculo do índice espectral CO₂ Flux em área de mata atlântica e sua relação com processos gravitacionais no município de Cubatão. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*, v. 1, 2017. DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.2175.

GATTI, L. V. et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, v. 595, p. 388–393, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.

GOMES, D. S. et al. CO₂Flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de Caatinga. Anais do SBGFA, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/354800413>. Acesso em: 16 abr. 2025.

GOOGLE. Google Earth Engine. Disponível em: <https://earthengine.google.com/>. Acesso em: 15 out. 2025.

GREENPEACE. Desmatamento no bioma Amazônia em 2023 é o menor em cinco anos. São Paulo: Greenpeace, 2024. Disponível em: <https://www.greenpeace.org/brasil/imprensa/desmatamento-no-bioma-amazonia-em-2023-e-o-menor-em-cinco-anos-no-cerrado-a-taxa-e-a-maior-em-sete-anos/>. Acesso em: 29 out. 2025.

HERCOWITZ, M. Fluxos e estoques de carbono nos diferentes usos da terra. Projeto Planafior, n. 3, p. 1–34, 2021. Disponível em: <https://planafior.org/wp-content/uploads/2023/06/Planafior-estudo-03-fluxo-carbono-BR.pdf>. Acesso em: 15 set. 2025.

HUETE, A. R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, v. 83, p. 195–213, 2002. (citado apud COLTRI et al., 2009).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Divisão político-administrativa e malha territorial. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15774-malhas.html>. Acesso em: 27 ago. 2025.

IMAZON – Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia. Desmatamento e degradação florestal do bioma Amazônia 2000–2010. Belém: Imazon, 2023. Disponível em: <https://imazon.org.br/desmatamento-e-degradacao-florestal-do-bioma-amazonia-2000-2010/>. Acesso em: 29 out. 2025.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas – Coleção 9 de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 15 out. 2025.

MARENGO, J. A. et al. Variabilidade de longo prazo, extremos e mudanças de temperatura e hidrometeorologia na Região Amazônica: uma revisão. Acta Amazonica, v. 54, n. esp. 1, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/>. Acesso em: 22 set. 2025.

MMA; INPE – Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Taxa consolidada de desmatamento na Amazônia em 2022/2023: 9.064 km². Brasília: MMA; INPE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2024/taxa-consolidada-de-desmatamento-na-amazonia-em-2022-2023-e-de-9.064-km2>. Acesso em: 30 set. 2025.

MMA – Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Desmatamento cai 30,6 % na Amazônia e 25,7 % no Cerrado em 2024. Brasília: MMA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/taxa-de-desmatamento-na-amazonia-cai-30-6-e-25-7-no-cerrado-em-2024>. Acesso em: 30 set. 2025.

MCTI. Desmatamento na Amazônia cai 21,8% em 2023. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/05/desmatamento-na-amazonia-cai-21-8-em-2023>. Acesso em: 29 out. 2025.

NASA. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/> . Acesso em: 15 out. 2025.

PINTO, E. et al. Áreas de floresta degradadas na Amazônia em setembro de 2024. Ecoamazonia, 2024. Disponível em: <https://www.ecoamazonia.org.br/2024/10/para-tem-57-areas-de-floresta-degradadas-na-amazonia-em-setembro/>. Acesso em: 19 set. 2025.

RAHMAN, A.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D. A.; PRENTISS, D. Modeling distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. Journal of Geophysical Research, v. 106, p. 579–591, 2001.

RODRIGUES, C. A. et al. Utilização de índices de vegetação para estimativas de produtividade e cobertura vegetal na Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. Anais [...]. São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em: http://martedpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.14.10.20/doc/06_126.pdf. Acesso em: 29 out. 2025.

SANTOS, E. C. et al. CO₂Flux como indicador da degradação ambiental em microbacias hidrográficas urbanas. Anais do SBGFA, 2024. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/sbgfa/2024/TRABALHO_COMPLETO_EV206_MDI_ID668_TB68_30072024165944.pdf. Acesso em: 29 out. 2025.

SANTOS, M. A. A.; GOMES, D. S. Aplicação do índice CO₂Flux em áreas degradadas do semiárido nordestino. Research, Society and Development, v. 10, n. 11, p. e13577110140, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i11.13577.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Panorama de emissões no estado do Pará (1990–2023). Observatório do Clima, 2024. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/para> . Acesso em: 10 out. 2025.

SEMAS – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (Pará). Política ambiental pioneira consolida o Pará como referência no combate às mudanças climáticas. Belém, 15 jun. 2024. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/2024/06/15/politica-ambiental-pioneira-consolida-o-para-como-referencia-no-combate-as-mudancas-climaticas/>. Acesso em: 8 ago. 2025.

SEMAS – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (Pará). Pará registra queda de 21% no desmatamento segundo o INPE. Belém, 2023. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/2023/11/10/para-registra-queda-de-21-no-desmatamento-segundo-o-o-inpe/>. Acesso em: 19 set. 2025.

SILVA, C. H. L. et al. Amazon forest on the edge of collapse. Nature Communications, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18911-9>.

SILVA, M. A. S.; FARIA, A. L. L. Índice CO₂Flux para avaliar perdas de serviços ecossistêmicos em mangues impactados por tempestade de granizo no Sudeste do Brasil. Geosp, v. 27, n. 3, e200530, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2023.200530>.

SILVA, C. N. da; SILVA, J. M. P. da; CHAGAS, C. A. N. (org.). Geografia na Amazônia paraense: territórios e paisagens. Belém: GAPTA/UFGA, 2015.

UFPA – Universidade Federal do Pará. Relatórios técnicos do GAPTA: Territórios da Calha Norte. Belém: UFPA, 2021.

VELOSO, G. A. Produtividade primária bruta e biomassa em pastagem no bioma Cerrado: uma análise a partir dos modelos SEBAL/CASA e MOD17 no estado de Goiás. 2018. 184 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.