



**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE MATO GROSSO DO SUL**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

CAMPUS DE TRÊS LAGOAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Amanda Ayumi de Souza Amede Sato

**Modelagem de cenários futuros de estoque e sequestro de carbono gerados por serviços ecossistêmicos nos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal de Mato Grosso do Sul**

Três Lagoas

2025

Amanda Ayumi de Souza Amede Sato

**Modelagem de cenários futuros de estoque e sequestro de carbono gerados por serviços ecossistêmicos nos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal de Mato Grosso do Sul**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Campus de Três Lagoas da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para a obtenção do título de Mestre em Geografia.  
Orientador: Prof. Dr. Vitor Matheus Bacani

Três Lagoas

2025

Ficha de identificação da obra.

Sato, Amanda Ayumi de Souza Amede.

Modelagem de cenários futuros de estoque e sequestro de carbono gerados por serviços ecossistêmicos nos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal de Mato Grosso do Sul / Amanda Ayumi de Souza Amede Sato; orientador, Vitor Matheus Bacani, 2025.

89 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia (Mestrado e Doutorado), Câmpus de Três Lagoas, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas (MS), 2025.

1. Mudanças climáticas. 2. Gases de efeito estufa. 3. Estoque e sequestro de carbono. 5. Geotecnologias. I. Bacani, Vitor Matheus, orient.  
II. Modelagem de cenários futuros de estoque e sequestro de carbono gerados por serviços ecossistêmicos nos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal de Mato Grosso do Sul, título.

Amanda Ayumi de Souza Amede Sato

**Modelagem de cenários futuros de estoque e sequestro de carbono gerados por serviços ecossistêmicos nos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal de Mato Grosso do Sul**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. César Gustavo da Rocha Lima  
UNESP/FEIS

---

Prof. Dr. Frederico dos Santos Gradella  
UFMS/CPTL

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Geografia.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Dr.(a) Vitor Matheus Bacani  
Orientador

Três Lagoas, 2025

Agradeço por todo apoio recebido durante minha trajetória.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso do Sul - FUNDECT (processo nº 71/002.368/2022) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo nº 403993/2021-0 e processo nº 313303/2023-1) pelo financiamento da pesquisa.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 através da concessão de bolsa de pós-graduação.

À Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Campus de Três Lagoas.

Aos professores Vitor, Frederico, Karina, Climbiê, Elias e César, aos técnicos de laboratório Hermiliano e César, e colegas Bruno, Erivelton, Bruna, Leandro e Uelisson, pela colaboração na coleta de dados em trabalhos de campo e envio de análises para laboratório utilizados nesse trabalho.

Ao Sr. Ademir e Sr. Tarcísio, Dona Irene, Dona Nilce e Leo, pela colaboração nas coletas de campo.

## RESUMO

As mudanças climáticas e o aumento das atividades antrópicas no uso e cobertura da terra têm gerado grande preocupação ambiental. Dado o histórico de mudanças no uso e cobertura da terra, é essencial avaliar a capacidade atual e futura dos ecossistemas locais em capturar e armazenar carbono. Parte-se da premissa de que as mudanças no uso e cobertura da terra no Estado têm influenciado no estoque e sequestro de carbono, e a adoção de práticas de manejo sustentável poderá aumentar a capacidade de mitigação das emissões de carbono, alinhando-se às metas de sustentabilidade e conservação ambiental do Estado de Mato Grosso do Sul. O objetivo geral do estudo é realizar a avaliação do estoque e sequestro de carbono no Estado de Mato Grosso do Sul nos anos de 1985, 2007, 2015 e 2020, utilizando os modelos CA-Markov e InVEST para simular cenários futuros para os anos de 2030 e 2050, com o intuito de fornecer subsídios para a formulação de políticas públicas voltadas para a mitigação das emissões de carbono e o cumprimento da meta de neutralidade de carbono do estado. Os procedimentos metodológicos tiveram como base os modelos CA-Markov, na modelagem dos cenários de tendências atuais e cenários de desenvolvimento florestal a partir de variáveis explicativas, e o InVEST, para a modelagem dos serviços ecossistêmicos de estoque e sequestro de carbono, como também realizar sua valoração. Os resultados demonstraram que as alterações provocadas na dinâmica do carbono pelas transições do uso e cobertura da terra, impulsionadas pela expansão agropecuária e pela silvicultura, têm influenciado significativamente o estoque e o sequestro de carbono no Estado, corroborada pelos dados que indicam uma redução expressiva no estoque de carbono no cenário de tendências atuais. No período entre 1985 e 2007, para o Cerrado de Mato Grosso do Sul, houve uma expressiva diferença no sequestro de carbono com a queda do carbono estocado pela classe formação savânica/florestal paralelo ao aumento do estoque por áreas de pastagem, que resultou em uma perda líquida de carbono de -76,49 Tg para a classe, apresentando uma perda substancial de valor econômico de US\$ -2.209,90 milhões apenas no Cerrado, com a possibilidade de recuperação nos CDFs, com valores positivos de US\$ 261,96 milhões em 2030 e US\$ 503,42 milhões para 2050. Para a área de Mata Atlântica do Estado houve a dinâmica de transição de uso da terra, onde a pastagem apresenta uma queda gradativa no estoque de carbono, enquanto a agricultura tem seu crescimento alcançando ambos os cenários futuros, porém apresentando sequestro em valores negativos em todos os períodos, gerando uma perda de US\$ -339,46 milhões previstos entre 2030 e 2050 no CTA. A formação savânica/florestal e a vegetação aluvial desempenham um

importante papel para o estoque e sequestro de carbono durante todo o período de estudo no Pantanal de Mato Grosso do Sul. No CDF, a valoração do sequestro de carbono pode alcançar US\$ 927,72 milhões, fator que indica que a adoção de práticas de manejo florestal sustentáveis poderia reverter a degradação e restaurar a capacidade do Pantanal de sequestrar carbono, gerando um benefício econômico considerável. Conclui-se que, a expansão dessas atividades econômicas, sem o devido manejo sustentável, resultou em uma diminuição na capacidade dos biomas de atuar como sumidouros de carbono, com consequências negativas refletidas tanto nas perdas de carbono quanto na deterioração do valor econômico associado a esse sequestro. O trabalho reforça a necessidade da implementação de políticas de conservação e manejo adaptativas, que amplifiquem os benefícios ambientais e econômicos, garantindo a sustentabilidade e a resiliência dos biomas de Mato Grosso do Sul a longo prazo.

**Palavras-chave:** Mudanças climáticas; Gases de efeito estufa; Estoque e sequestro de carbono; Dióxido de carbono; Geotecnologias.

## ABSTRACT

Climate change and increased anthropogenic changes in land use and land cover have generated great environmental concern. Given the history of changes in land use and land cover, it is essential to assess local ecosystems' current and future capacity to capture and store carbon. The premise is that land use and coverage changes in the State have influenced carbon stock and sequestration. Adopting sustainable management practices may increase the capacity to mitigate carbon emissions, aligning with the sustainability and environmental conservation goals of the State of Mato Grosso do Sul. The general objective of the study is to assess carbon stock and sequestration in the State of Mato Grosso do Sul in the years 1985, 2007, 2015, and 2020, using the CA-Markov and InVEST models to simulate future scenarios for the years 2030 and 2050, to provide subsidies for the formulation of public policies aimed at mitigating carbon emissions and meeting the State's carbon neutrality goal. The methodological procedures were based on the CA-Markov models in modeling current trend scenarios and forest development scenarios from explanatory variables and InVEST for modeling ecosystem services of carbon stock and sequestration, as well as for their valuation. The results demonstrated that the changes caused in the carbon dynamics by the transitions of land use and cover, driven by the expansion of agriculture and forestry, have significantly influenced the carbon stock and sequestration in the State, corroborated by the data that indicates a significant reduction in the carbon stock in the current trend scenario. In the period between 1985 and 2007, for the Cerrado of Mato Grosso do Sul, there was a significant difference in carbon sequestration with the decrease in carbon stored by the savanna/forest formation class parallel to the increase in stock by pasture areas, which resulted in a net carbon loss of -76.49 Tg for the class, presenting a substantial loss of economic value of US\$ -2,209.90 million in the Cerrado, with the possibility of recovery in the CDFs, with positive values of US\$ 261.96 million in 2030 and US\$ 503.42 million for 2050. For the Atlantic Forest area of the State, there was a dynamic of land use transition, where pasture presents a gradual decrease in carbon stock. At the same time, agriculture has its growth reaching both future scenarios, however presenting sequestration in negative values in all periods, generating a loss of US\$ -339.46 million predicted between 2030 and 2050 in the CTA. Savannah/forest formation and alluvial vegetation play an important role in carbon storage and sequestration throughout the Pantanal of Mato Grosso do Sul study period. In the CDF, the valuation of carbon sequestration could reach US\$ 927.72 million, indicating that adopting sustainable forest management practices could reverse degradation and restore the Pantanal's

capacity to sequester carbon, generating considerable economic benefits. It is concluded that the expansion of these economic activities, without proper sustainable management, resulted in a decrease in the biomes' capacity to act as carbon sinks, with negative consequences reflected both in carbon losses and in the deterioration of the economic value associated with this sequestration. The work reinforces the need to implement adaptive conservation and management policies that amplify environmental and economic benefits, ensuring the sustainability and resilience of the biomes of Mato Grosso do Sul in the long term.

**Keywords:** Climate Change; Greenhouse gases; Carbon stock and sequestration; Carbon dioxide; Geotechnologies.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo do carbono.....	19
Figura 2 - Emissões de CO <sub>2</sub> por setor no ano de 2018 no Estado de Mato Grosso do Sul. ....	21
Figura 3 - Mapa de localização do Estado de Mato Grosso do Sul.....	28
Figura 4 - Fluxograma metodológico. ....	29
Figura 5 - Fluxograma metodológico de construção do uso e cobertura da terra. ....	30
Figura 6 - Fluxograma metodológico da modelagem de cenários futuros. ....	33
Figura 7 - Mapa de pontos de coleta de amostra. ....	35
Figura 8 - Definições utilizadas para o estoque e sequestro de carbono no <i>software</i> InVEST.40	
Figura 9 - Definições utilizadas para a valoração dos serviços ecossistêmicos no <i>software</i> InVEST.....	41
Figura 10 - Estatística zonal. ....	42
Figura 11 - Estoque de carbono no Cerrado de Mato Grosso do Sul. ....	45
Figura 12 - Gráfico do estoque de carbono por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.....	46
Figura 13 - Sequestro de carbono total no Cerrado de Mato Grosso do Sul. ....	49
Figura 14 - Gráfico do sequestro de carbono por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.....	50
Figura 15 - Mapa de estoque de carbono na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul. ....	56
Figura 16 - Gráfico do estoque de carbono por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.....	56
Figura 17 - Sequestro de carbono total na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul. ....	61
Figura 18 - Gráfico do sequestro de carbono por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul. ....	61
Figura 19 - Estoque de carbono no Pantanal de Mato Grosso do Sul. ....	67
Figura 20 - Gráfico do estoque de carbono por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul.....	68
Figura 21 - Sequestro de carbono total no Pantanal de Mato Grosso do Sul. ....	72
Figura 22 - Gráfico do sequestro de carbono por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul.....	72

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Definições para os reservatórios terrestres.....	22
Quadro 2 - Referências bibliográficas de valores de reservatórios de carbono.....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limiares do índice <i>kappa</i> . .....	31
Tabela 2 - Valores de armazenamento de carbono utilizados em cada classe de UCT para o Cerrado de Mato Grosso do Sul. ....	39
Tabela 3 - Valores de armazenamento de carbono utilizados em cada classe de UCT para a Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.....	39
Tabela 4 - Valores de armazenamento de carbono utilizados em cada classe de UCT para o Pantanal de Mato Grosso do Sul.....	39
Tabela 5 - Estoque de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.....	43
Tabela 6 - Estoque de carbono entre 2030 e 2050 por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.....	44
Tabela 7 - Sequestro de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul. ....	47
Tabela 8 - Sequestro de carbono entre 2020 e 2050 por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul. ....	48
Tabela 9 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 1985 e 2020 por classe.....	51
Tabela 10 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 2020 e 2050 por classe de UCT em milhões no Cerrado de Mato Grosso do Sul.....	52
Tabela 11 - Estoque de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul. ....	53
Tabela 12 - Estoque de carbono entre 2030 e 2050 por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul. ....	54
Tabela 13 - Sequestro de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.....	58
Tabela 14 - Sequestro de carbono entre 2020 e 2050 por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.....	59
Tabela 15 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 1985 e 2020 por classe.....	62
Tabela 16 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 2020 e 2050 por classe de UCT em milhões na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.....	63
Tabela 17 - Estoque de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul. ....	64

Tabela 18 - Estoque de carbono entre 2030 e 2050 por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul. ....	65
Tabela 19 - Sequestro de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul. ....	69
Tabela 20 - Sequestro de carbono entre 2020 e 2050 por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul. ....	70
Tabela 21 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 1985 e 2020 por classe.....	74
Tabela 22 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 2020 e 2050 por classe de UCT em milhões no Pantanal de Mato Grosso do Sul. ....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
CA	<i>Cellular Automata</i>
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CARS	<i>CA - based on multiple random patch seeds</i>
CDF	Cenário de desenvolvimento florestal
CM	<i>Confusion Matrix</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CTA	Cenário de tendências atuais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCRA	Instituto nacional da Colonização e Reforma Agrária
InVEST	<i>Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LEAS	<i>Land Expansion Analysis Strategy</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MS	Mato Grosso do Sul
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PLUS	<i>Patch-Generating Land Use Simulation</i>
RFR	<i>Random Forest Regression</i>
SIGs	Sistemas de Informação Geográfica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UCT	Uso e cobertura da terra
VPL	Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1	Objetivo geral .....	18
2.2	Objetivos específicos .....	18
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
3.1	Ciclo do carbono: estoque e sequestro de carbono.....	19
3.2	Serviços Ecossistêmicos .....	23
3.3	Políticas relacionadas ao Carbono .....	23
3.4	Geotecnologias .....	25
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
4.1	Área de estudo .....	28
4.2	Banco de dados .....	28
4.3	Uso e cobertura da terra.....	29
4.4	Modelagem de cenários futuros.....	32
4.5	Estoque e sequestro de carbono.....	34
4.5.1	Densidade do solo.....	35
4.5.2	Carbono orgânico no solo.....	36
4.5.3	<i>Carbon pools</i> – Reservatórios de carbono.....	37
4.5.3.1	<i>Cerrado</i> .....	38
4.5.3.2	<i>Mata Atlântica</i> .....	39
4.5.3.3	<i>Pantanal</i> .....	39
4.5.4	Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) .....	40
4.5.4.1	<i>Valoração de serviços ecossistêmicos</i> .....	40
4.6	Quantificação de estoque e sequestro de carbono por UCT.....	41
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>43</b>
5.1	Cerrado de Mato Grosso do Sul.....	43

5.1.1	Estoque de carbono.....	43
5.1.2	Sequestro de carbono.....	46
5.1.3	Valoração do sequestro de carbono.....	51
5.2	Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.....	53
5.2.1	Estoque de carbono.....	53
5.2.2	Sequestro de carbono.....	57
5.2.3	Valoração do sequestro de carbono.....	62
5.3	Pantanal de Mato Grosso do Sul.....	64
5.3.1	Estoque de carbono.....	64
5.3.2	Sequestro de carbono.....	69
5.3.3	Valoração do sequestro de carbono.....	74
5.4	Dinâmica de carbono no Estado de Mato Grosso do Sul.....	76
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>78</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento dos impactos ambientais está diretamente relacionado à intensificação dos métodos de produção e à exploração dos recursos naturais, que não consideram o ritmo de regeneração da natureza nem seus limites físicos, orgânicos e químicos. Fator que agrava a crise ambiental e destaca a necessidade de desenvolver formas eficazes de compensar os danos ao meio ambiente resultantes dessas atividades (Quintana; Hacon, 2011).

A partir do início da revolução industrial e do aprimoramento das técnicas, observaram-se crescentes transformações paisagísticas resultantes da intensa exploração da natureza. Entre os impactos ambientais decorrente das mudanças no uso e cobertura da terra, as mudanças climáticas têm sido destaque para as preocupações, frequentemente relacionadas às constantes emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Wadanambi *et al.*, 2020; Bacani *et al.*, 2024).

Entre os impactos observados, destaca-se a alteração no ciclo biogeoquímico do carbono, cuja dinâmica natural foi modificada pelas ações antrópicas. A extração e a queima de combustíveis fósseis, o desflorestamento e as queimadas, além da perda de sumidouros de carbono, resultam em uma sobrecarga no ciclo natural do carbono em relação às emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), um dos principais GEEs (Embrapa, 2004).

Uma das formas de compensação das emissões, ocorre através da fotossíntese, realizada pelos seres vivos vegetais que possuem diferentes capacidades de sequestro de carbono conforme sua espécie, tendo as formações florestais mais efetivas nesse processo (Carvalho *et al.*, 2010). Dessa forma, compreende-se a necessidade da preservação do meio ambiente e da biodiversidade, como também o reconhecimento dos serviços ecossistêmicos como forma de contribuir à gestão ambiental.

Como resposta às atividades antrópicas que resultam na emissão de CO<sub>2</sub> e outros GEE, passaram a ser estabelecidas mudanças políticas mundiais por meio de acordos, conferências, protocolos que visam colaborar para a maximização do sequestro de carbono buscando a mitigação dos efeitos das emissões de GEE (Carvalho *et al.*, 2010).

A Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu em 2015 os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) em sua Agenda metas mundiais para o ano de 2030, em que é possível associar o contexto do carbono em dois diferentes objetivos, entre eles: a Ação contra a mudança global do clima (13º), visando combater as mudanças climáticas e seus impactos; e a Vida terrestre (15º), que visa o uso sustentável dos ecossistemas terrestres.

Há também outros tratados mundiais que trazem relevâncias para a questão do controle do carbono na atmosfera: o Protocolo de Kyoto visa a redução da emissão de gases de efeito estufa (MMA, 2021a; UNFCCC, 1998); e o Acordo de Paris, que surgiu com a meta de redução da emissão do dióxido de carbono com suas ações iniciadas a partir de 2020 (MCTI, 2021; ONU, 2015; MMA, 2021b).

Em relação ao Estado de Mato Grosso do Sul, há em vigência, desde o ano de 2021, o Plano Estadual MS Carbono Neutro – PROCLIMA, presente no capítulo 5 do Decreto nº 15.798 de 3 de novembro de 2021, que estabelece a meta de balancear as emissões de CO<sub>2</sub>, buscando ser considerado, pelos parâmetros internacionais, como um território carbono neutro até o ano de 2030.

O plano possui grande relevância para a conservação e proteção da biodiversidade local dos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal presentes no Estado, considerando as transformações do uso e cobertura que demonstram capacidade de ocasionar reduções dos sumidouros de carbono, e afetar diretamente na neutralização dos GEE (Silva *et al.*, 2011; Martins *et al.*, 2020; Cunha *et al.*, 2020; Guerra *et al.*, 2020).

Por meio das geotecnologias, a modelagem de cenários futuros permite simular diferentes cenários com base nas escolhas das variáveis explicativas para as mudanças no UCT (Liang *et al.*, 2021). Dessa forma, conforme a amplitude temporal utilizada, torna possível a geração de estimativas e avaliações associadas ao estoque e sequestro de carbono, como também realizar sua valoração a partir de sua combinação com modelos de avaliação dos serviços ecossistêmicos (Fan; Chen, 2019; Galdino *et al.*, 2023).

Em relação às mudanças no UCT do Estado de Mato Grosso do Sul, destaca-se alguns anos para a análise: 1985, em que houve o início de uma série temporal Landsat-5, sensor TM, capaz de mapear um ano por completo, e o mapeamento de UCT do MapBiomas; 2007, em que nota-se o início de áreas de silviculturas voltadas ao monocultivo de eucalipto para a produção de papel e celulose, como também, houve a implantação dos mapeamentos do GeoMS; os anos de 2015 e 2020, são os mais recentes identificados como anos chave para a captura das principais mudanças e realizar a calibração do o modelo preditivo de simulação do UCT (Silva, 2024).

Nesse contexto, os dados gerados buscam o avanço para os estudos referentes às emissões de GEE no Estado de Mato Grosso do Sul, como também visa contribuir com medidas, políticas, estratégias objetivadas à neutralização das emissões de dióxido de carbono

buscam servir de suporte ao poder público no gerenciamento territorial e à tomada de decisões relacionadas aos serviços ambientais.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo contribuir com as políticas públicas de Mato Grosso do Sul através da construção de cenários futuros de serviços ecossistêmicos de estoque e sequestro de carbono com vistas a mitigação das mudanças climáticas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

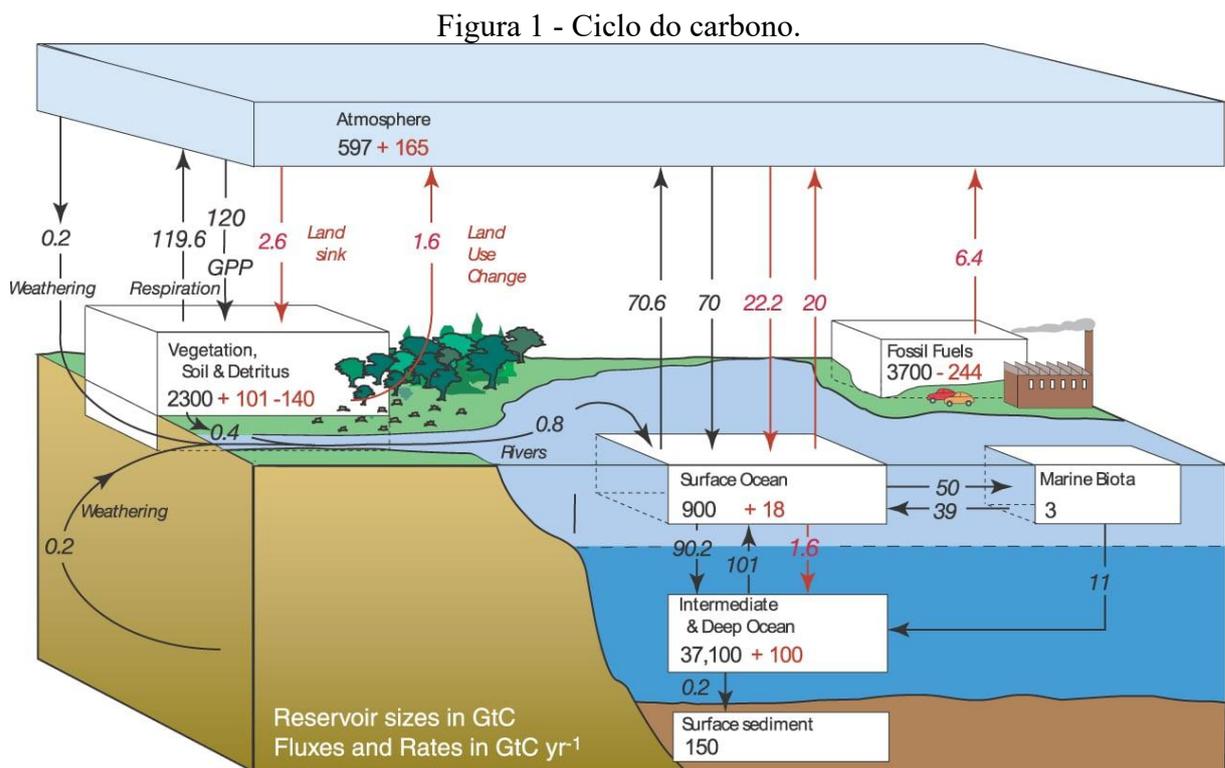
- I. Analisar as mudanças no estoque e sequestro de carbono para os anos de 1985, 2007, 2015 e 2020;
- II. Simular o estoque e o sequestro de carbono para os anos de 2030 e 2050, considerando dois cenários: a manutenção das tendências atuais e o desenvolvimento florestal conforme previsto na legislação ambiental vigente; e
- III. Estimar valor monetário do sequestro de carbono nos diferentes cenários de serviços ecossistêmicos avaliados.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 CICLO DO CARBONO: ESTOQUE E SEQUESTRO DE CARBONO

O carbono (C) é caracterizado como o sexto elemento na tabela periódica, sendo um elemento essencial em vários aspectos, e utilizados comumente na indústria pela sua versatilidade (Lu, 2015). O C representa um dos elementos mais abundantes no universo, possuindo a capacidade de estar presente numa variedade de composições químicas, sendo elas em forma sólida, líquida ou gasosa (Hasirci, 2018; Aduan, 2004). Quando composto com duas moléculas de oxigênio (O), é formado o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), encontrado de forma gasosa em temperatura ambiente.

O C é essencial para a manutenção da vida, e participa do processo biogeoquímico que ocorre naturalmente no planeta Terra definido como “ciclo do carbono” (Figura 2), fundamental na regulação dos níveis de  $\text{CO}_2$  na atmosfera (Walker, 1993).



Fonte: IPCC (2007).

O ciclo do carbono é composto pelos processos naturais de absorção pela fotossíntese (pelos organismos autotróficos) e pelo plâncton oceânico, e de emissão, pela respiração dos seres vivos, pelo material morto (decomposição) e pela dissolução oceânica, no entanto, através

da queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra o ciclo se apresenta no estágio de desequilíbrio em relação às emissões (Aduan, 2004). Dessa forma, o CO<sub>2</sub> representa um grande impacto no efeito estufa pelo aumento de sua concentração na atmosfera (Shaya, 2018; Anwar, 2019).

Os gases de efeito estufa (GEE) têm a capacidade de retenção de calor na atmosfera ao absorver e emitir radiação do espectro infravermelho (Semenov, 2022), desempenhando um papel crucial na regulação da temperatura terrestre. No entanto, o aumento de sua concentração tem provocado mudanças climáticas significativas (Soeder, 2021).

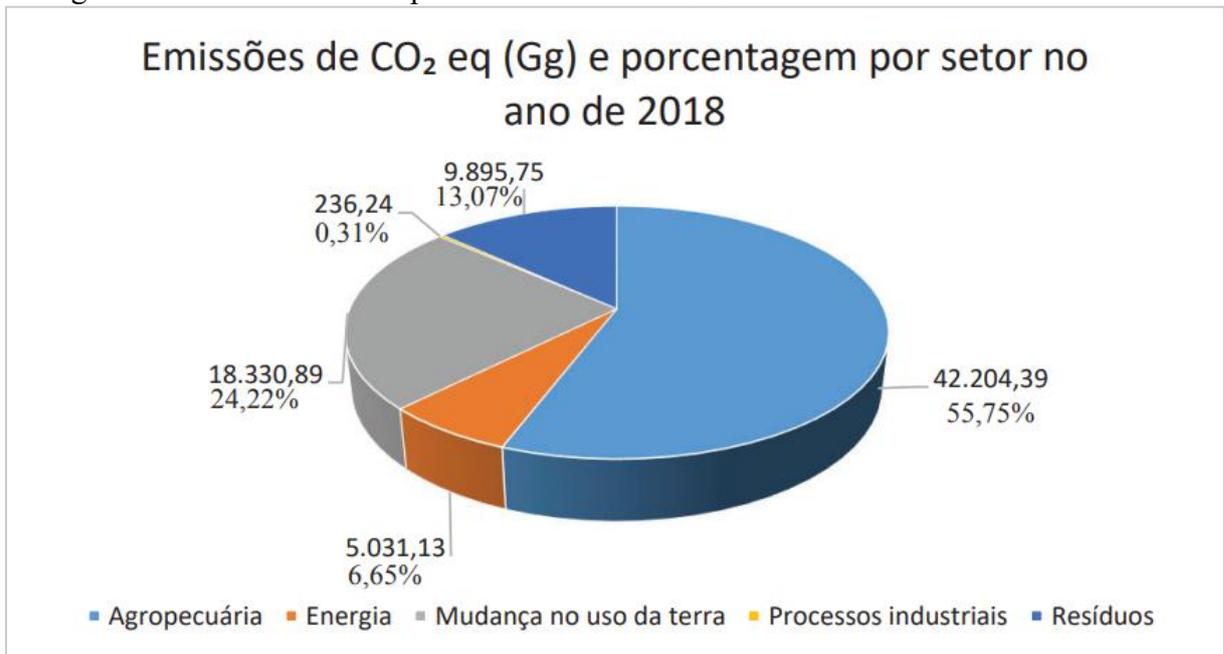
Entre os gases de efeito estufa primários na atmosfera estão: vapor d'água, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>) e ozônio (O<sub>3</sub>). Os gases de efeito estufa de origem antropogênica incluem: hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>), hidrofluorcarbonetos (HFCs), clorofluorcarbonetos (CFCs) e perfluorcarbonetos (PFCs) (Dhakal *et al.*, 2022).

Conforme IPCC (2022), as projeções de médio a longo prazo das mudanças climáticas trazem riscos que envolvem a perda e degradação da biodiversidade, a intensificação da precipitação associadas a inundações, maior ocorrência de ciclones tropicais, aumento no nível do mar, seca, impactos na saúde humana e econômicos, a redução da segurança alimentar e disponibilidade de água, pressão sobre a produção e acesso à alimentos, principalmente em áreas mais vulneráveis.

Através da observação dos impactos causados pelas mudanças climáticas é possível gerar planejamentos de adaptação e implementações que beneficiam na conservação da biodiversidade, na saúde e bem-estar, na segurança alimentar, na subsistência, na produtividade agrícola e inovações, com como na redução de riscos e danos (IPCC, 2022).

Em dados disponibilizados pelo Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Mato Grosso do Sul (SEMAGRO, 2022), foram estimadas as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera para o ano de 2018, apresentando o total de 75.698,40 Gg emitidos, considerando os setores de agropecuária, energia, mudanças no uso da terra, processos industriais e resíduos, destacando as atividades agropecuária como o principal emissor no ano (Figura 3).

Figura 2 - Emissões de CO<sub>2</sub> eq por setor no ano de 2018 no Estado de Mato Grosso do Sul.



Fonte: SEMAGRO, 2022.

Conforme o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (2003) foram caracterizados os reservatórios terrestres como biomassa viva, matéria orgânica morta e solos (Quadro 1). Conforme Walker *et al.* (2011), a biomassa é a massa do tecido vegetal, geralmente representada pela unidade métrica de tonelada (t), onde a porcentagem relativa de carbono corresponde a 50% da biomassa seca (contendo 50% de outros elementos) e 25% da biomassa úmida (contendo 50% de água e 25% de outros elementos).

Quadro 1 - Definições para os reservatórios terrestres.

<b>Definição para os reservatórios terrestres</b>		
<b>Reservatórios</b>		<b>Descrição</b>
<b>Biomassa viva</b>	Biomassa acima do solo	Toda a biomassa viva acima do solo incluindo troncos, tocos, galhos, cascas, sementes e folhagem.
	Biomassa abaixo do solo	Toda a biomassa viva das raízes vivas. Raízes finas com diâmetro menor que 2mm (sugerido) são frequentemente excluídas pois frequentemente não podem ser distinguidas entre matéria orgânica do solo ou serrapilheira empiricamente.
<b>Matéria Orgânica Morta</b>	Matéria Morta	Inclui toda a biomassa da madeira não-viva não contidas na serrapilheira, em pé, deitado na superfície, raízes mortas e tocos maiores ou iguais a 10 cm de diâmetro ou qualquer outro diâmetro usado pelo país.
	Serrapilheira	Inclui toda a biomassa não-viva com um diâmetro menor que o mínimo escolhido pelo país (por exemplo 10 cm), morta, em vários estados de decomposição acima do solo mineral ou orgânico. Isso inclui as camadas de serrapilheira, fúmica e húmica. Raízes finas vivas (menor que o limite de diâmetro sugerido para biomassa abaixo do solo) são incluídas na serrapilheira onde não podem ser distinguidas dela empiricamente.
<b>Solos</b>	Matéria orgânica do solo	Inclui carbono orgânico em solos orgânicos e minerais (incluindo turfa) até uma profundidade específica escolhida pelo país e aplicada consistentemente ao longo da série temporal. Raízes finas vivas (menores do que o limite de diâmetro sugerido para biomassa abaixo do solo) são incluídas com matéria orgânica do solo onde não podem ser distinguidas empiricamente.

Fonte: adaptado de IPCC (2003).

Essas definições são utilizadas no processo de estimar o estoque, sequestro e valoração do carbono através do software InVEST (Galdino *et al.*, 2018) pelas categorias de carbono acima do solo, carbono abaixo do solo, carbono no solo e matéria morta.

### 3.2 SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

Os ecossistemas são caracterizados por sua abrangência da diversidade de organismos que funcionam em um conjunto, envolvendo as esferas do biótico e do abiótico, onde ocorre a ciclagem de materiais, mantendo seu fluxo natural e suas funções ecossistêmicas (Odum, 1983). A existência da natureza dos ecossistemas é capaz de prestar serviços para as sociedades e para as atividades econômicas, conhecidos como serviços ecossistêmicos (Galdino *et al.*, 2023).

Os serviços ecossistêmicos são definidos como benefícios relevantes para a sociedade gerados pelos ecossistemas em termos de manutenção, recuperação ou melhoria de condições ambientais conforme a Lei nº 14.119/2021 (Brasil, 2021). Em situações em que os serviços ecossistêmicos são comprometidos, as consequências geradas são percebidas a partir de impactos, não somente nas regulações naturais, como também no sistema econômico e no funcionamento das sociedades (Embrapa, 2017).

As ações antrópicas têm potencializado as transformações paisagísticas, sendo, em sua maioria, diretamente relacionadas à produção econômica, interferindo assim na dinâmica dos serviços ecossistêmicos (Fan; Chen, 2019). No Estado de Mato Grosso do Sul, as transformações ocorridas no uso e cobertura da terra são marcadas principalmente pela ocorrência da agropecuária extensiva.

Como uma forma de incentivo baseado no sistema econômico, tem-se o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), que busca remunerar pelas áreas que geram serviços ecossistêmicos, como uma forma de compensação pelos benefícios gerados (Galdino *et al.*, 2023). Nesse sentido, passaram a ser desenvolvidos *softwares* de SIG baseados em modelos que buscam valorar os serviços ecossistêmicos.

### 3.3 POLÍTICAS RELACIONADAS AO CARBONO

Relacionada à questão da preocupação global das mudanças climáticas, periodicamente são geradas políticas mundiais objetivadas na mitigação dos impactos ambientais gerados pelas atividades antrópicas, em que os efeitos da liberação de gases de efeito estufa são amplamente discutidos, tendo como um dos principais, a sobrecarga de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera.

O Protocolo de Kyoto foi assinado no ano de 1997 na cidade de Kyoto, Japão, por 37 países industrializados do continente europeu, como um acordo internacional associado ao UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change/ Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima), buscando conter as mudanças climáticas através da redução da emissão de gases de efeito estufa, entre eles o CO<sub>2</sub>, tendo como meta a redução de 5,2% das emissões de GEE entre os anos de 2008 e 2012 em relação à quantidade emitida no ano de 1990 (UNFCCC, 2020). O Brasil passou a aderir ao protocolo apesar de não possuir metas obrigatórias, sendo posteriormente substituído pelo Acordo de Paris.

O Acordo de Paris foi um tratado internacional adotado no ano de 2015, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP21), com o objetivo de limitar as mudanças climáticas reduzindo a emissão dos GEE, o qual definiu como meta manter o aumento da temperatura média global em 2°C acima dos níveis pré-industriais, porém buscando limitar o aumento para apenas 1,5°C (MCTIC, 2017).

No ano de 2015 foi estabelecido pela Organização das Nações Unidas os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, tendo como meta melhorias socioambientais globais a serem atingidas pela Agenda 2030 (ONU, 2015), que entrou em vigor em 1º de janeiro de 2016. Entre as metas associadas às questões relacionadas ao carbono está a 13ª – Ação contra a mudança global do clima, que visa combater as mudanças climáticas e seus impactos, e a 15ª – Vida terrestre, visando o uso sustentável dos ecossistemas terrestres.

O Plano Estadual MS Carbono Neutro - PROCLIMA, oficializado pelo Decreto Estadual nº 15.798, de 3 de novembro de 2021, regulamenta as adaptações aos impactos das mudanças climáticas para o Estado de Mato Grosso do Sul, e visa contribuir para a redução da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera. O decreto busca considerar as questões da emergência climática global e a conservação da biodiversidade na qualidade de vida das sociedades.

O Decreto Estadual nº 15.798, de 3 de novembro de 2021, inclui como meta central, presente no artigo 15:

Art. 15. O PROCLIMA tem como meta central a redução das emissões brutas de Gases de Efeito Estufa (GEE), tendo como linha de base a média de emissões entre os anos de 2014 a 2018, conforme o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima (SEEG) enquanto não forem publicados os dados do

Inventário Estadual de Gases de Efeito Estufa (IEGEE). (Decreto Estadual nº 15.798, de 3 de novembro de 2021).

O PROCLIMA possui como objetivo elevar o Estado de Mato Grosso do Sul ao estágio de Estado Carbono Neutro ou Estado com Emissão Líquida Zero, neutralizando as emissões de dióxido de carbono na atmosfera por meio de compensações até 2030. Dessa forma, estão previstas medidas para os seguintes eixos: Agronegócio; Mudança no Uso da Terra e Florestas; Energia; Tratamento de Resíduos; Processos Industriais.

O Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024, regula o sistema voltado à comercialização de créditos de carbono, em que cada crédito equivale à 1 tonelada de dióxido de carbono equivalente evitado ou removido da atmosfera, registrados pelo Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE).

Conforme a Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024, o mercado regulado de carbono é estabelecido um limite para a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido na atmosfera por empresas, tornando obrigatória a compensação. Dentro desse sistema, é possível negociar créditos de carbono excedentes para empresas que ultrapassem o limite estabelecido para as emissões. No mercado voluntário, não há imposição de metas obrigatórias. Assim, a transação de créditos de carbono é realizada de forma voluntária entre as partes envolvidas.

### 3.4 GEOTECNOLOGIAS

As primeiras aplicações de sensoriamento remoto se deram por meio de uso militar em fotografias aéreas tiradas através de balões, diante disso, sua história se destaca em dois períodos, sendo, o primeiro, de 1860 a 1960, baseado em fotografias aéreas, e, o segundo, a partir do ano de 1960 até os dias de hoje, onde há uma diversidade de tipos de imagens de satélite (Florenzano, 2007).

O sensoriamento remoto busca a captação de dados à distância, podendo ser aplicada a partir de sistemas sensores, obtendo imagens ou outras formas de dados envolvendo a interação entre o sistema sensor e a superfície terrestre a partir da radiação eletromagnética pelos processos de sua emissão e reflexão, dados posteriormente transmitidos para as redes de captação na Terra, podendo ser transformados em dados passíveis de interpretação (Florenzano, 2002).

As tecnologias de sensoriamento remoto proporcionam uma gama de produtos essenciais sobre a superfície terrestre que interessam aos estudos ambientais, assim, levando ao

entendimento de suas dinâmicas. A partir de diversos estudos derivados do sensoriamento remoto e suas possibilidades, tem-se uma visão além do visível (Novo, 2008). A partir disso, a geração de seus produtos atribui-se através dos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) em conjunto com técnicas de geoprocessamento (Florenzano, 2002).

As geotecnologias, ou o geoprocessamento, conforme Rosa (2005), contempla o conjunto de tecnologias vinculadas na coleta, no processamento, na análise e na disposição das informações referenciadas geograficamente, sendo compostos pela estrutura física de processamento (*hardware*), pela estrutura interna de funcionamento das máquinas (*software*), e por quem pode processar e interpretar as informações (*peopleware*), representando um conjunto de recursos para tomadas de decisão.

Dentre as tecnologias, os SIGs possibilitam a utilização integrada dos dados espaciais (Fitz, 2008), tendo assim uma ampla variedade de produtos passíveis de serem gerados e analisados. Os estudos relacionados ao uso e cobertura da terra, têm, ao longo do tempo se desenvolvido progressivamente, havendo diversas formas de serem gerados, sendo de forma manual, automatizada ou semiautomatizada (Sano *et al.*, 2007).

Entre as possibilidades dos estudos de UCT estão os modelos dinâmicos preditivos. Dentre os *softwares* que realizam essa função, destaca-se o PLUS (*Patch-Generating Land Use Simulation*), que utiliza o método de autômatos celulares de Markov (CA-Markov), e o algoritmo de aprendizado de máquina *Random Forest*, que considera variáveis explicativas de crescimento ou supressão para cada classe de UCT com base na interpretação das dinâmicas específicas locais e possibilitando a geração de diferentes cenários futuros (Liang *et al.*, 2021). A modelagem dinâmica preditiva tem sido abordada em estudos como: Vick *et al.* (2024); Asif *et al.* (2023); Zhang *et al.*, (2023); Mathewos *et al.* (2022), podendo também ser combinada com outros modelos.

O software InVEST (*Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs*), livre e de código aberto, destaca-se em relação aos estudos envolvendo as estimativas de serviços ecossistêmicos. Com base nas mudanças no UCT, o InVEST atende a uma ampla gama de objetivos, podendo contribuir nas tomadas de decisões ao considerar alternativas para o gerenciamento dos ecossistemas e desenvolvimento da sociedade (Galdino *et al.*, 2023).

O InVEST permite estimar a quantidade de carbono estocado em uma paisagem num determinado momento, como também valora a quantidade de carbono sequestrado ao longo do tempo com base em valores atribuídos para cada classe de UCT determinadas conforme a necessidade de cada área de estudo (Sharp *et al.*, 2020).

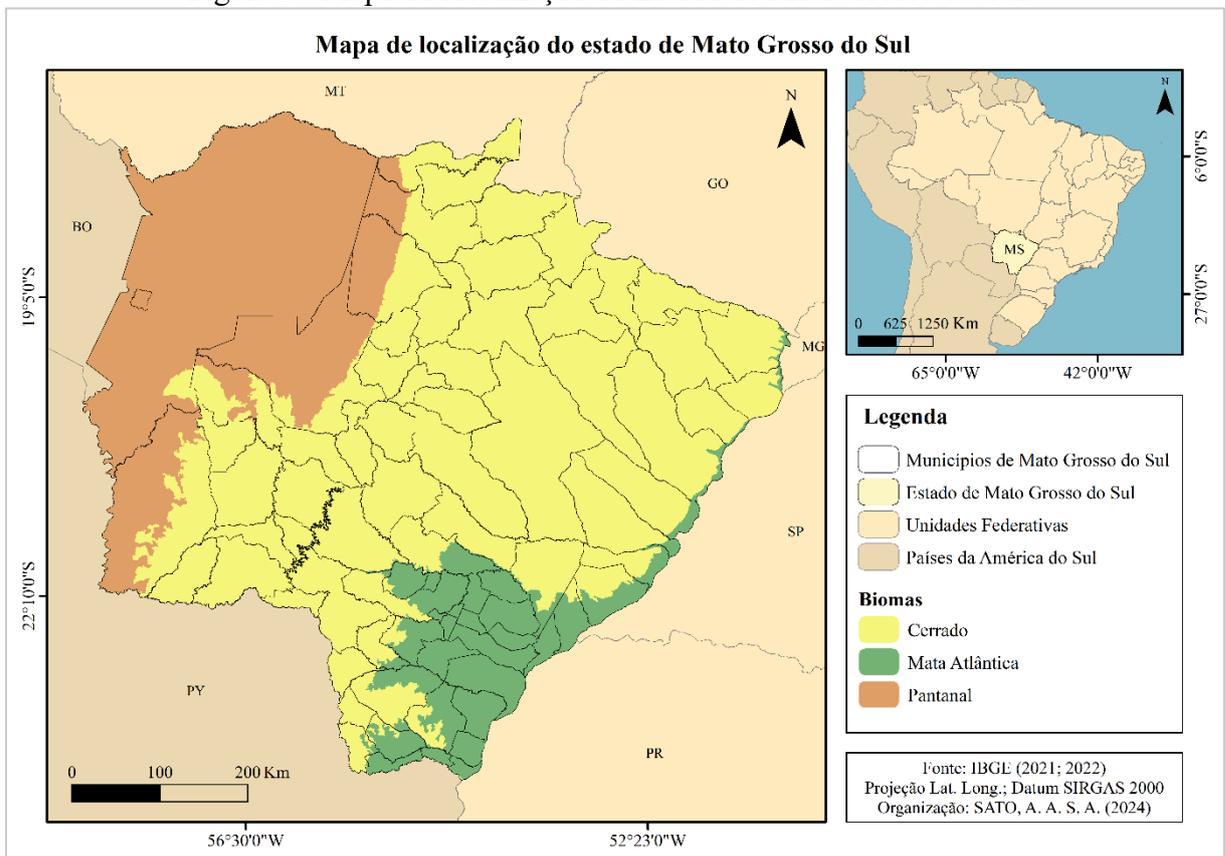
Modelos preditivos de UCT, quando combinados com a modelagem de avaliação dos serviços ecossistêmicos provenientes do estoque e sequestro de carbono, têm demonstrado eficiência na gestão e no planejamento de políticas públicas (Abdo; Prakash, 2021; Fernandes *et al.*, 2020; Fernandes *et al.*, 2021; Bacani *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2019).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

O Estado de Mato Grosso do Sul, na região Centro-Oeste do Brasil, possui área de aproximadamente 357.145,994 km<sup>2</sup> (IBGE, 2021), abrangendo 3 biomas: o Cerrado, a Mata Atlântica e o Pantanal (Figura 1). Os limites de Mato Grosso do Sul fazem divisa com os estados de Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná e com os países Bolívia e Paraguai. Teve sua criação no ano de 1977 e atualmente tem cerca de 2.757.013 habitantes (IBGE, 2022) em 79 municípios, tendo Campo Grande como sua capital.

Figura 3 - Mapa de localização do Estado de Mato Grosso do Sul.

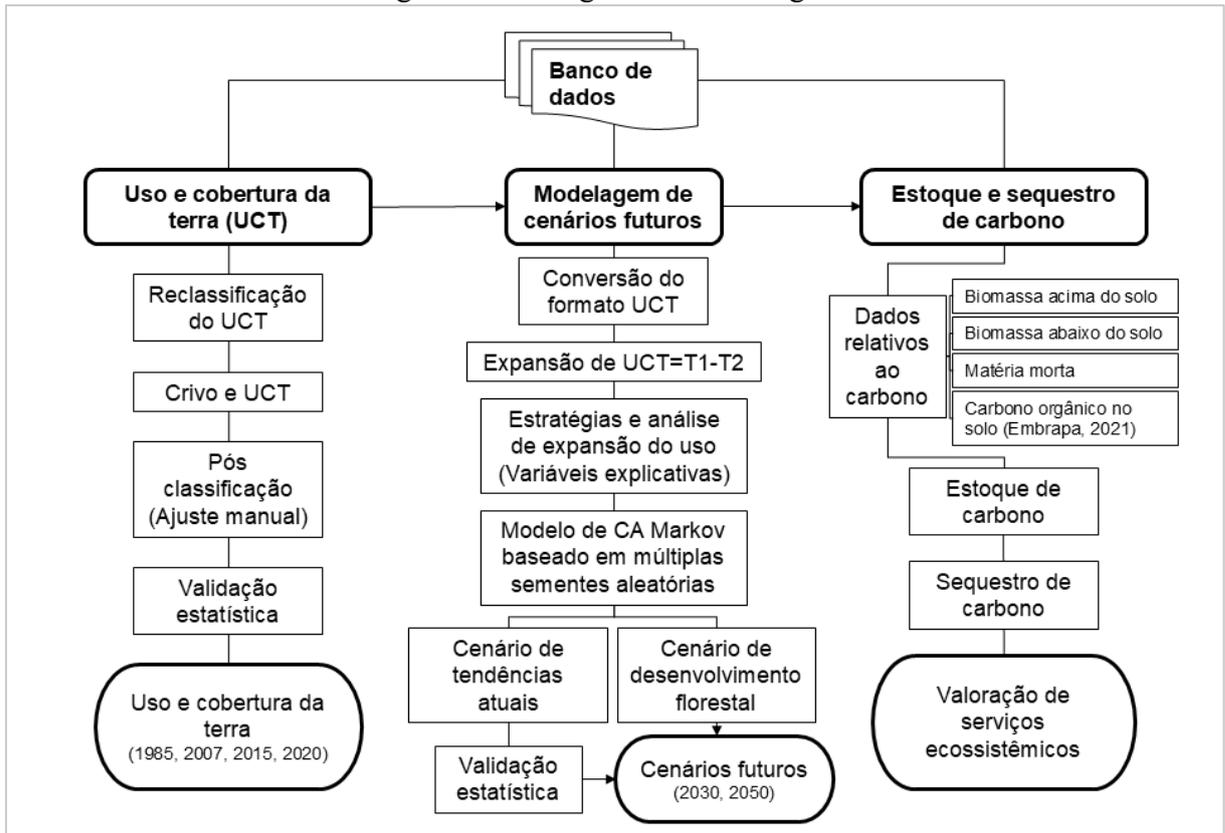


### 4.2 BANCO DE DADOS

O trabalho teve como base três processos principais realizados a partir do banco de dados (Figura 4), sendo eles: a elaboração de mapas de uso e cobertura da terra entre os anos 1985, 2007, 2015 e 2020, que possibilitou a análise temporal da distribuição do estoque e sequestro de carbono; a modelagem de cenários futuros, elaborada a partir do mapeamento do uso e

cobertura da terra, baseada em tempos: T1 (2015) e T2 (2020), com diferentes variáveis explicativas no cenário de tendências atuais e zonas específicas de expansão no cenário de desenvolvimento florestal; e a elaboração dos mapas de estoque e sequestro de carbono, a partir dos dados relativos aos *carbon pools* (reservatórios de carbono), sendo possível realizar a valoração dos serviços ecossistêmicos para MS.

Figura 4 - Fluxograma metodológico.

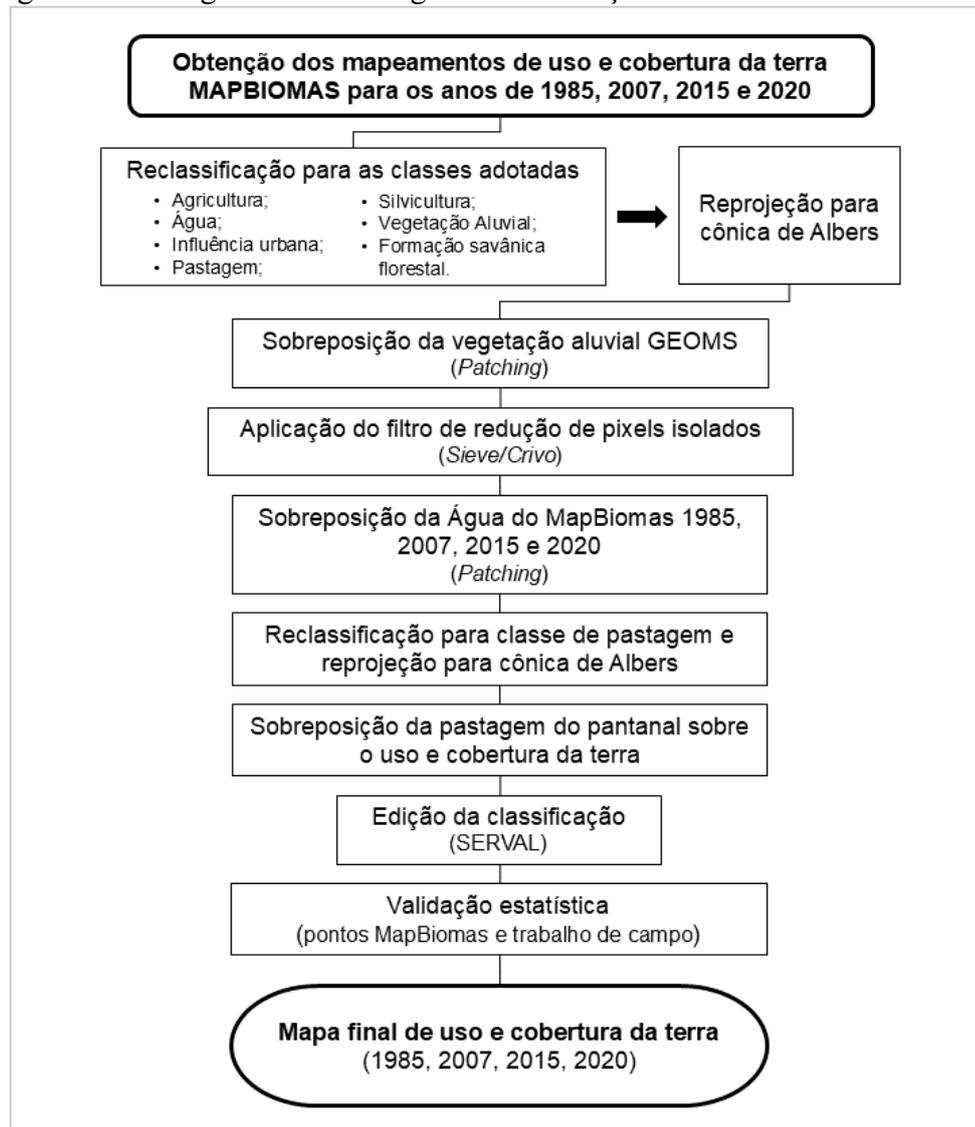


Fonte: adaptado de Silva (2024).

#### 4.3 USO E COBERTURA DA TERRA

A geração dos mapas e análise do estoque e sequestro de carbono foram realizadas inicialmente a partir da Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil por Silva (2024), para os anos de 1985, 2007, 2015 e 2020, tendo como base os dados elaborados e disponibilizados pelo MapBiomass (MapBiomass, 2024), na escala de 1:250.000, em que foi realizado ajustes manuais para melhor detalhamento dos mapas conforme fluxograma na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma metodológico de construção do uso e cobertura da terra.



Fonte: Silva (2024).

A classificação do uso e cobertura da terra foi validada com uso de parâmetros estatísticos clássicos para validação do mapeamento temático do uso e cobertura da terra, tais como: o índice de concordância *Kappa* (Eq. 1), parâmetros de avaliação de desempenho da classificação por classe (Eq. 2), valores dos erros de omissão e inclusão (Eq. 3 e 4 respectivamente) e acurácia global da classificação (Eq. 5). Dessa forma, foram selecionados pontos amostrais obtidos em trabalhos de campo, interpretados como verdade terrestre conforme preconizado por Congalton (1991). Estes pontos estarão dispostos em uma matriz de erros e confrontados com a classificação obtida.

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \cdot x_{+i})} \quad (1)$$

$$Precisão_{classe\_x} = \left( \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \right) \quad (2)$$

$$Erros_{omissão} = 1 - \left( \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \right) \quad (3)$$

$$Erros_{inclusão} = 1 - \left( \frac{x_{ii}}{x_{i+}} \right) \quad (4)$$

$$Acurácia_{global} = \left( \frac{\sum_{i=1}^k x_{ii}}{N} \right) \quad (5)$$

Onde:

$\hat{K}$ : valor estimado *Kappa*;

$k$ : número de linhas;

$x_{ii}$ : número de observações na linha  $i$  e coluna  $i$ ;

$\sum_{i=1}^k x_{ii}$ : soma dos elementos da matriz em sua diagonal principal;

$x_{i+}$ : soma total das observações para as linhas;

$x_{+i}$ : soma total das observações para as colunas;

$N$ : número de observações total.

Para auxiliar na análise das classificações, os valores do índice *kappa* (Tabela 1) foram comparados aos limiares estabelecidos por Landis e Koch (1977).

Tabela 1 - Limiares do índice <i>kappa</i> .	
Índice Kappa	Concordância
0,00	Péssima
0,01 a 0,20	Ruim
0,21 a 0,40	Razoável

<b>0,41 a 0,60</b>	Boa
<b>0,61 a 0,80</b>	Muito boa
<b>0,81 a 1,00</b>	Excelente

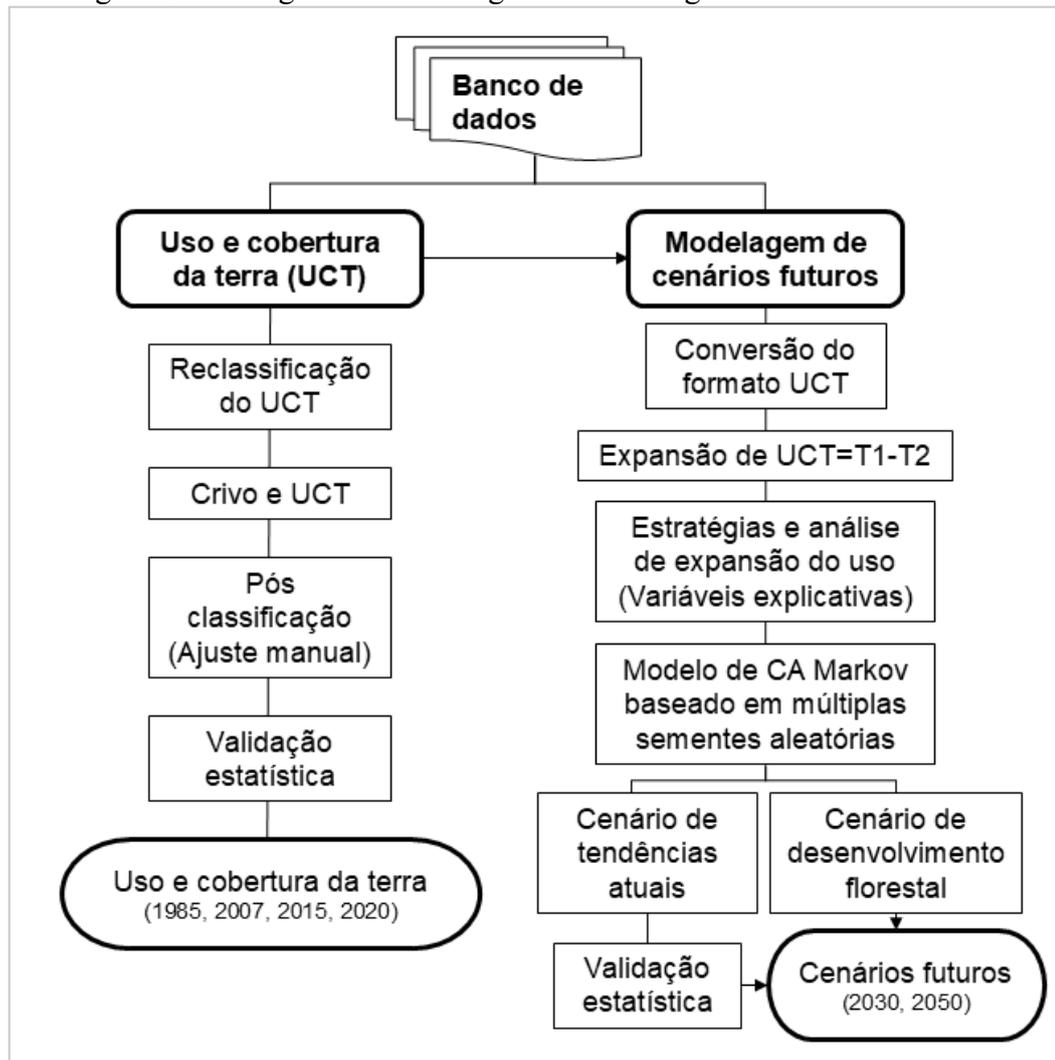
---

Fonte: Landis e Koch (1997, p.165).

#### 4.4 MODELAGEM DE CENÁRIOS FUTUROS

A modelagem preditiva do UCT foi realizada a partir do *software* Patch-Generating Land Use Simulation (PLUS) no método CA-Markov (Liang *et al.*, 2021), onde foram gerados modelos para a simulação das mudanças no UCT em 2 diferentes cenários para 2030 e 2050: cenários de tendência atual e cenários de desenvolvimento florestal (Silva, 2024). Dessa forma, a partir dos dois últimos anos, 2015 (T1) e 2020 (T2), foram geradas a modelagem preditiva dos anos de 2030 e 2050 conforme fluxograma na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma metodológico da modelagem de cenários futuros.



Fonte: Silva (2024).

Para o aprimoramento da modelagem, foi utilizada a ferramenta Land expansion analysis atrategy (LEAS), em que foram atribuídas as variáveis explicativas para as mudanças no UCT de cada cenário.

O cenário de tendências atuais teve como objetivo demonstrar as mudanças futuras conforme a progressão atual, dessa forma, foram utilizadas as seguintes variáveis: distância das rodovias e estradas rurais; distância da rede de drenagem; distância de centros de influência urbana; distância de áreas de agricultura; distância de plantios de silvicultura, sendo utilizadas no *software* PLUS a partir da geração da distância euclidiana e a função *fuzzy*; e o modelo digital de elevação (MDE) a partir da imagem de radar Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), aplicado à função *fuzzy* (Vick e Bacani, 2019).

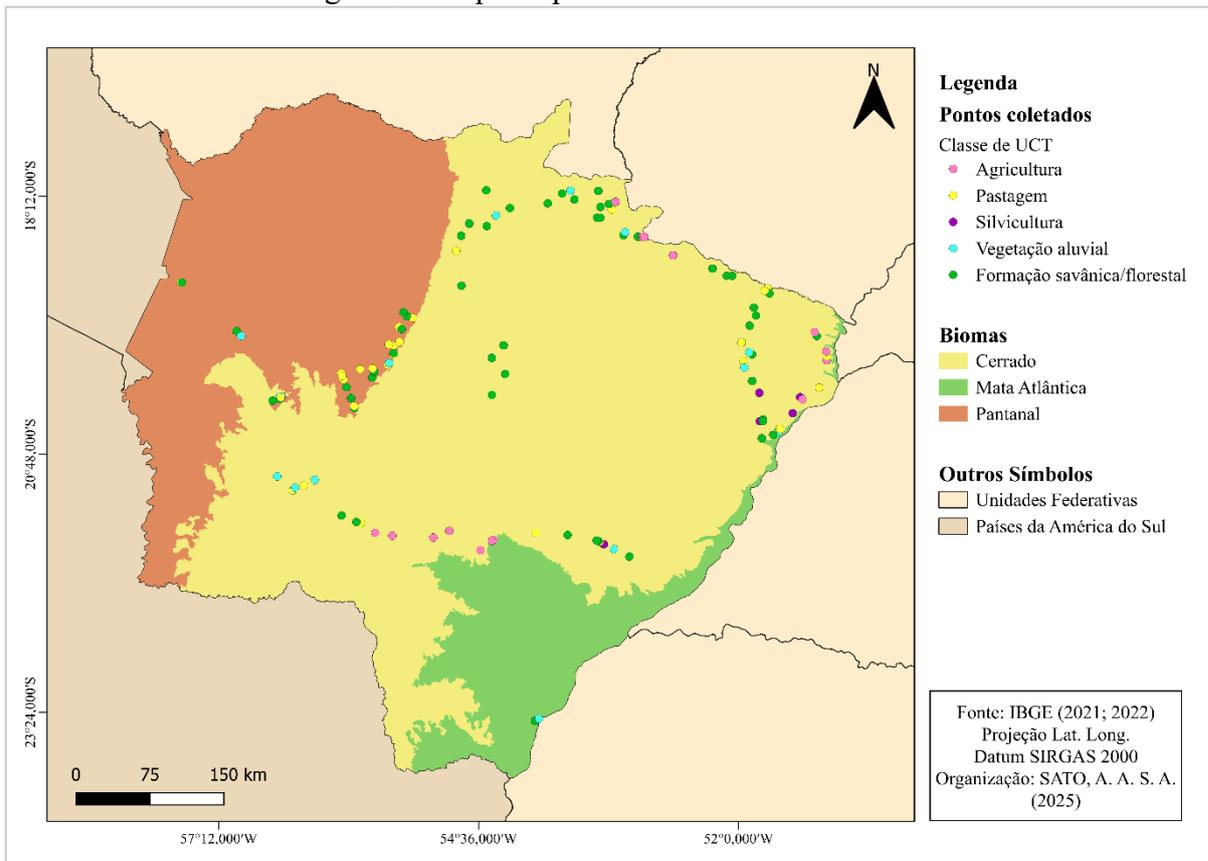
O cenário de desenvolvimento florestal tem como base a expansão e desenvolvimento de áreas através de zonas, as quais foram definidas: áreas de preservação permanente; áreas de vegetação aluvial; corredores ecológicos; comunidades quilombolas; terras indígenas; unidades de conservação estaduais e federais visando uma criação de um cenário conservacionista e preservacionista na perspectiva ambiental ecológica (Silva *et al.*, 2024).

#### 4.5 ESTOQUE E SEQUESTRO DE CARBONO

Com base no mapeamento e modelagem do UCT, recortados para os biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal, foi realizado o mapeamento do estoque e sequestro de carbono para os anos de 1985, 2007, 2015, 2020, 2030 e 2050, para os cenários futuros de tendências atuais e de desenvolvimento florestal, sendo utilizadas as definições do IPCC (2003) para os sumidouros terrestres.

Para a elaboração de dados no trabalho, foram realizados trabalhos de campo, sendo coletadas 234 amostras em anéis volumétricos, para os dados de densidade de solo, e amostras em trado holandês para as análises de carbono orgânico no solo, para as classes de UCT: Agricultura, Pastagem, Silvicultura, Vegetação Aluvial e Formação Savânica/Florestal (Figura 7).

Figura 7 - Mapa de pontos de coleta de amostra.



#### 4.5.1 Densidade do solo

Para o cálculo de densidade do solo foram aplicados procedimentos descritos no Manual de métodos de análise de solo para densidade do solo (Embrapa, 2017). As amostras foram coletadas utilizando anéis volumétricos de aço inoxidável com 4 e 6 centímetros de altura. Antes da coleta, cada anel teve seu peso e volume interno medidos individualmente para o cálculo de densidade do solo.

Os anéis foram inseridos no solo com o auxílio de ferramentas como castelinho e martelo, e removidos com o auxílio de uma pá e espátula. As amostras de solo foram coletadas em profundidades de 0 a 20 centímetros, e profundidades de 0 a 30 centímetros conforme disponibilidade dos instrumentos de coleta. Posteriormente, os valores foram ajustados para a proporção da profundidade de 0 a 20 centímetros, considerando o padrão da maioria das amostras, utilizando da seguinte equação:

$$Proporção = \frac{20}{30} = 0,666 \quad (6)$$

Para o tratamento das amostras, foi feita a limpeza do excesso de solo coletado nos anéis, e para os anéis de 4 cm de altura, um tecido foi fixado em uma das extremidades com uma borracha para manter o solo no interior do anel, sendo o peso do tecido e da borracha, previamente registrado. As tampas utilizadas para os anéis de 6 cm de altura, também tiveram seu peso previamente registrado.

Em seguida, as amostras foram levadas à estufa a 105 °C por 24 horas para a remoção da umidade e, posteriormente, foram pesadas em uma balança digital. Para calcular a massa total da amostra, os pesos do anel volumétrico, do tecido e da borracha ou da tampa previamente registrados foram subtraídos do peso total.

Dessa forma, para obter a quantificação da densidade do solo foi utilizada a seguinte equação:

$$D_s = \frac{m_a}{V} \quad (7)$$

Onde:

$D_s$ : densidade do solo, em  $\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (equivalente a  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );

$m_a$ : massa da amostra de solo seco a 105 °C até o peso constante, em g;

$V$ : volume do cilindro, em  $\text{cm}^3$ .

#### 4.5.2 Carbono orgânico no solo

Para estimar o estoque de carbono no solo, foram coletadas amostras utilizando trado do tipo holandês, seguindo o protocolo adaptado da Embrapa (2014) para quantificação dos estoques de carbono do solo (Oliveira, 2014). O método utilizado para a determinação do carbono foi o de oxidação por dicromato de Walkley-Black (Walkley e Black, 1934).

A coleta de amostras em campo teve como objetivo estimar o estoque de carbono no solo, utilizando dados de densidade e quantidade de carbono orgânico. O cálculo dos estoques de carbono foi realizado com base no método descrito pela Embrapa (2008), que é voltado para a avaliação dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo:

$$Est C = \frac{(CO \times D_s \times e)}{10} \quad (8)$$

Onde:

$Est C$ : estoque de carbono orgânico em determinada profundidade ( $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );

$CO$ : teor de carbono orgânico total na profundidade amostrada ( $\text{g.kg}^{-1}$ );

$D_s$ : densidade do solo da profundidade ( $\text{kg.dm}^{-3}$ );

$e$ : espessura da camada considerada (cm).

Em relação às amostras coletadas de 0 a 30 centímetros de profundidade, o resultado de carbono orgânico foi multiplicado pelo valor de 0,666, conforme Equação 6, para adequar proporcionalmente para a profundidade de 0 a 20 centímetros, conforme a seguinte equação:

$$Est C_{20cm} = Est C_{30cm} \times 0,666 \quad (9)$$

Onde:

$Est C_{20cm}$ : estoque de carbono orgânico em profundidade de 0 a 20 centímetros;

$Est C_{30cm}$ : estoque de carbono orgânico em profundidade de 0 a 30 centímetros.

#### 4.5.3 Carbon pools – Reservatórios de carbono

Com base nas bibliografias (Kerdan *et al.*, 2019; MMA, 2017; IPCC, 2006; Schulz *et al.*, 2016; Turner *et al.*, 1998; Fujisaka *et al.*, 1998; Stape *et al.*, 2008; Miteva *et al.*, 2014) e nos dados coletados a partir de trabalhos de campo, foram definidos os valores de *carbon pools*, utilizados no software *InVEST* para cada bioma presente no Estado de Mato Grosso do Sul. Os valores atribuídos variaram conforme a relevância de cada UCT apresentados em cada bioma.

Quadro 2 - Referências bibliográficas de valores de reservatórios de carbono.

Classe de UCT	C acima do solo	C abaixo do solo	C no solo	Matéria morta
<b>Formação Savânica/Florestal</b>	Kerdan <i>et al.</i> (2019a); MMA (2017); Schulz <i>et al.</i> (2016) <sup>a</sup>	Kerdan <i>et al.</i> (2019a); MMA (2017); Schulz <i>et al.</i> (2016) <sup>a</sup>	Obtido em trabalho de campo	Kerdan <i>et al.</i> (2019a); MMA (2017); Schulz <i>et al.</i> (2016) <sup>a</sup>
<b>Silvicultura</b>	Kerdan <i>et al.</i> (2019a); Stape <i>et al.</i> (2008)	Kerdan <i>et al.</i> (2019a); Stape <i>et al.</i> (2008)	Obtido em trabalho de campo	Kerdan <i>et al.</i> (2019a); Stape <i>et al.</i> (2008)
<b>Pastagem</b>	Kerdan <i>et al.</i> (2019a);	Bacani <i>et al.</i> (2024)	Obtido em trabalho de campo	Bacani <i>et al.</i> (2024)

	Fujisaka <i>et al.</i> (1998)			
<b>Vegetação aluvial</b>	MMA (2017) <sup>ab</sup> ; Turner <i>et al.</i> (1998) <sup>c</sup> ; Bacani <i>et al.</i> (2024) <sup>c</sup>	MMA (2017) <sup>ab</sup> ; Bacani <i>et al.</i> (2024) <sup>c</sup>	Obtido em trabalho de campo	Turner <i>et al.</i> (1998) <sup>c</sup> ; Bacani <i>et al.</i> (2024) <sup>c</sup>
<b>Agricultura</b>	Kerdan <i>et al.</i> (2019a); Turner <i>et al.</i> (1998); Miteva <i>et al.</i> (2014) <sup>b</sup>	Kerdan <i>et al.</i> (2019a); Turner <i>et al.</i> (1998); Miteva <i>et al.</i> (2014) <sup>b</sup> .	Obtido em trabalho de campo	Kerdan <i>et al.</i> (2019a); Turner <i>et al.</i> (1998); Miteva <i>et al.</i> (2014) <sup>b</sup> .

<sup>a</sup> Valor utilizado para o Cerrado; <sup>b</sup> Valor utilizado para Mata Atlântica; <sup>c</sup> Valor utilizado para o Pantanal.

As quantificações de estoque de carbono utilizadas no *carbon pools* no software *InVEST* foram retiradas de dados da literatura que incluem o armazenamento de carbono acima do solo, carbono abaixo do solo, carbono orgânico do solo e matéria morta em diferentes classes de uso e cobertura da terra.

Cada bioma apresenta diferentes características de produção, sendo criados três blocos de nota com os pesos atribuídos, sendo o formato utilizado (.txt) no software *InVEST*, sendo assim, gerados diferentes resultados para cada bioma, e analisados considerando suas especificidades.

#### 4.5.3.1 Cerrado

Os valores de armazenamento de carbono atribuídos a cada classe de uso e cobertura da terra no Cerrado de Mato Grosso do Sul (Tabela 2) levaram em consideração a expressiva presença da silvicultura, cuja expansão foi iniciada em 2007 e tem se intensificado desde então. Para a classe de formação savânica florestal, foram atribuídos pesos diferenciados, baseando-se tanto na bibliografia, quanto nos dados obtidos em trabalhos de campo relacionados ao carbono no solo.

Tabela 2 - Valores de armazenamento de carbono utilizados em cada classe de UCT para o Cerrado de Mato Grosso do Sul.

<b>Classe de UCT</b>	<b>C acima do solo Mg/ha</b>	<b>C abaixo do solo Mg/ha</b>	<b>C no solo Mg/ha</b>	<b>Matéria morta Mg/ha</b>
Formação Savânica/Florestal	29	23	31	0
Silvicultura	61	12	24	1
Pastagem	7	16	30	11
Vegetação aluvial	26	7	45	1
Agricultura	8	1	38	0

#### 4.5.3.2 *Mata Atlântica*

Os dados referentes ao bioma Mata Atlântica (Tabela 3) levaram em conta a influência predominante da agricultura, especialmente dos monocultivos de soja, milho e cana-de-açúcar presentes na área. Os valores atribuídos às demais classes foram baseados na bibliografia.

Tabela 3 - Valores de armazenamento de carbono utilizados em cada classe de UCT para a Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

<b>Classe de UCT</b>	<b>C acima do solo Mg/ha</b>	<b>C abaixo do solo Mg/ha</b>	<b>C no solo Mg/ha</b>	<b>Matéria morta Mg/ha</b>
Formação Savânica/Florestal	62	15	47	4
Silvicultura	61	12	24	1
Pastagem	7	16	30	11
Vegetação aluvial	26	7	45	1
Agricultura	12	8	44	0,5

#### 4.5.3.3 *Pantanal*

Os valores de armazenamento de carbono atribuídos para o Pantanal (Tabela 4) foram fortemente influenciados pelas áreas de vegetação aluvial, incluindo também as áreas úmidas. Os dados obtidos em trabalhos de campo foram fundamentais para representar as áreas de formação savânica/florestal e pastagem quanto ao carbono no solo. Para as demais classes, foram considerados com base na bibliografia.

Tabela 4 - Valores de armazenamento de carbono utilizados em cada classe de UCT para o Pantanal de Mato Grosso do Sul.

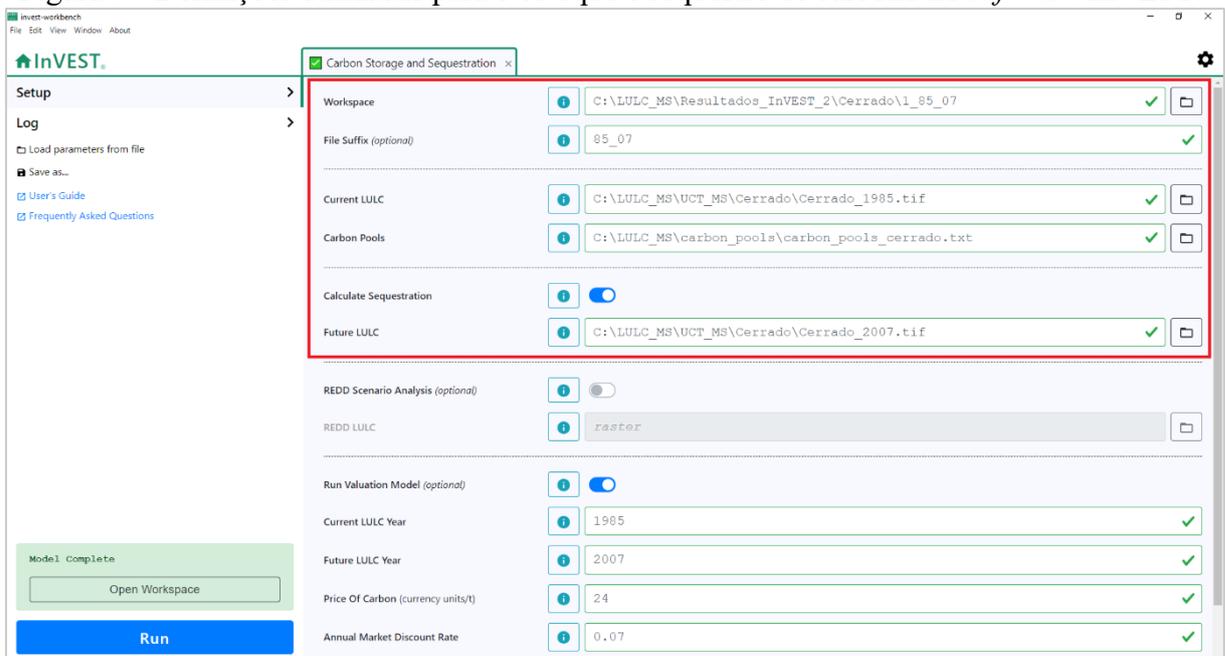
<b>Classe de UCT</b>	<b>C acima do solo Mg/ha</b>	<b>C abaixo do solo Mg/ha</b>	<b>C no solo Mg/ha</b>	<b>Matéria morta Mg/ha</b>
Formação Savânica/Florestal	60	15	26	5
Silvicultura	61	12	24	1
Pastagem	7	16	23	11

Vegetação aluvial	28	16	57	0
Agricultura	8	1	38	0

#### 4.5.4 Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST)

A geração dos resultados foi realizada utilizando o software InVEST, conforme as definições apresentadas na Figura 8. Na guia “*carbon storage and sequestration*”, foram especificados a pasta de trabalho e o nome do arquivo, bem como o arquivo de Uso e Cobertura da Terra (UCT) correspondente ao período atual da análise e a tabela de armazenamento de carbono. Para o cálculo do sequestro de carbono, a função “*Calculate Sequestration*” foi ativada, e foi selecionado o arquivo de UCT referente ao período futuro para comparação.

Figura 8 - Definições utilizadas para o estoque e sequestro de carbono no *software* InVEST.

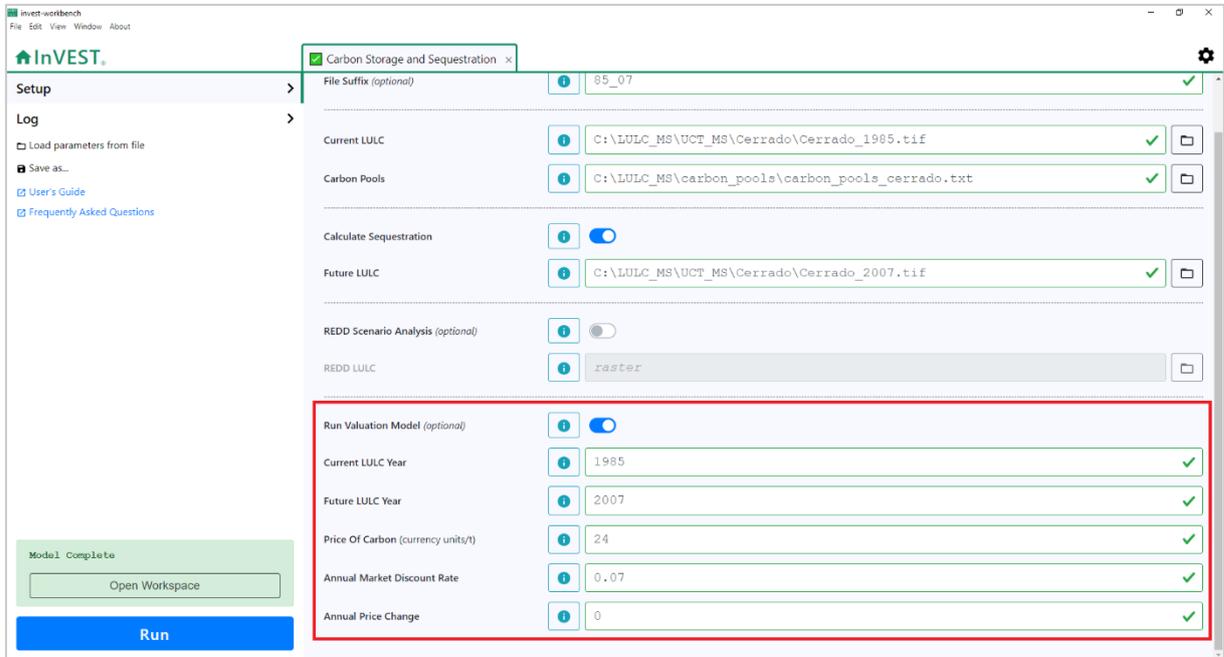


##### 4.5.4.1 Valoração de serviços ecossistêmicos

A partir do software InVEST, realizou-se a estimativa dos valores monetários do sequestro de carbono pelos serviços ecossistêmicos de cada bioma. Foi ativado o modelo de valoração e informados os períodos de comparação: de 1985 a 2007, de 2007 a 2015, de 2015 a 2020, e para os cenários futuros de 2020 a 2030 e de 2030 a 2050. Conforme Ricke *et al.* (2008), o custo social do carbono foi estabelecido em US\$24 por tonelada de CO<sub>2</sub>, utilizando

uma taxa de desconto anual de mercado de 7% (0,07). Não foram consideradas variações anuais de preço, conforme ilustrado na Figura 9.

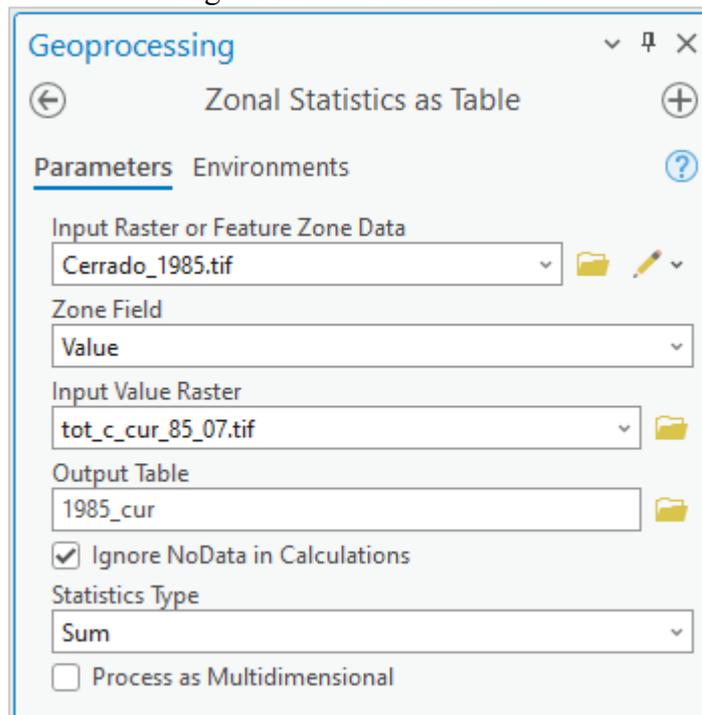
Figura 9 - Definições utilizadas para a valoração dos serviços ecossistêmicos no *software* InVEST.



#### 4.6 QUANTIFICAÇÃO DE ESTOQUE E SEQUESTRO DE CARBONO POR UCT

A quantificação do estoque e sequestro de carbono por classe foi gerada pelo software ArcGIS Pro, a partir da ferramenta “*Zonal Statistics as Table*” (Figura 10) encontrada em “*ArcToolbox*” → “*Spatial Analyst Tools*”. Foram selecionados os arquivos raster da modelagem e do uso e cobertura da terra (UCT) recortados para os biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal de Mato Grosso do Sul, os resultados gerados pelo software InVEST para cada bioma, selecionando a estatística de soma.

Figura 10 - Estatística zonal.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram organizados, apresentados e discutidos conforme os biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal presentes no Estado de Mato Grosso do Sul.

### 5.1 CERRADO DE MATO GROSSO DO SUL

#### 5.1.1 Estoque de carbono

Os resultados obtidos para o Cerrado de Mato Grosso do Sul ao longo do período de 1985 a 2020 (Tabela 5) revelam uma dinâmica complexa no estoque total de carbono, que sofreu oscilações significativas devido às mudanças no uso e cobertura da terra. De maneira geral, observou-se redução no estoque total de carbono, que passou de 1.590,87 Tg em 1985 para 1.505,03 Tg em 2020. Essa redução reflete a transformação das paisagens naturais em áreas destinadas a atividades agropecuárias e silviculturais, o que resultou em ganhos e perdas em diferentes classes de uso e cobertura da terra.

Tabela 5 - Estoque de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.

<b>Estoque</b>	<b>1985</b>	<b>2007</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>
	<b>Tg</b>	<b>Tg</b>	<b>Tg</b>	<b>Tg</b>
Formação				
Savânica/Florestal	623,08	302,56	295,68	293,52
Silvicultura	3,17	17,60	68,74	87,89
Pastagem	711,85	858,62	797,55	759,47
Vegetação Aluvial	232,59	229,78	231,07	230,87
Agricultura	20,18	89,55	112,98	133,28
<b>Total</b>	<b>1.590,87</b>	<b>1.498,11</b>	<b>1.506,02</b>	<b>1.505,03</b>

Entre 1985 e 2007, as áreas de Formação Savânica/Florestal no Cerrado de Mato Grosso do Sul sofreram redução expressiva no estoque de carbono, que passou de 623,08 Tg para 302,56 Tg. Essa diminuição, correspondente a mais da metade do valor inicial, ocorreu principalmente devido ao desflorestamento ao longo desse período de 32 anos.

Apesar dessa queda inicial, o estoque total de carbono apresentou recuperação parcial em 2015, com 1.506,02 Tg, seguido por leve diminuição para 1.505,03 Tg em 2020. A redução nas áreas de Formação Savânica/Florestal deu lugar à expansão de atividades agropecuárias,

especialmente para a Pastagem, tendo crescente no estoque de carbono de 711,85 Tg em 1985 para 858,62 Tg em 2007, porém sofreu queda gradual nos anos seguintes, para 759,47 Tg em 2020.

O estoque de carbono na silvicultura aumentou consideravelmente, de 3,17 Tg em 1985 para 17,60 Tg em 2007, ano marcado pela chegada de indústrias de papel e celulose (Silva, 2024), que utilizaram o eucalipto como matéria-prima. Essa espécie possui alta capacidade de armazenamento de carbono, especialmente nos primeiros anos de desenvolvimento (Ribeiro *et al.*, 2023). Como resultado, o estoque de carbono na silvicultura cresceu continuamente, atingindo 68,74 Tg em 2015, com a expansão dos plantios, e alcançou 87,89 Tg em 2020.

Nos cenários de tendências atuais (CTA) e de desenvolvimento florestal (CDF) para 2030 e 2050 foram apresentadas expressivas diferenças, principalmente em relação à classe de Formação Savânica/Florestal e à Agricultura, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Estoque de carbono entre 2030 e 2050 por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.

Estoque	CTA – 2030	CTA – 2050	CDF – 2030	CDF – 2050
	Tg	Tg	Tg	Tg
Formação Savânica/Florestal	290,68	281,55	351,79	402,54
Silvicultura	122,78	166,47	96,47	147,40
Pastagem	700,96	627,68	699,29	613,92
Vegetação Aluvial	224,52	211,47	223,91	210,85
Agricultura	165,29	212,13	144,53	162,36
<b>Total</b>	<b>1.504,23</b>	<b>1.499,30</b>	<b>1.515,98</b>	<b>1.537,07</b>

No CTA, observou-se queda progressiva no armazenamento de carbono, com redução de 0,8 Tg entre 2020 e 2030, e de 4,9 Tg entre 2030 e 2050. Em 2020, o estoque era de 1.505,03 Tg, diminuindo para 1.504,23 Tg em 2030 e para 1.499,30 Tg em 2050. Embora essa queda não tenha sido brusca, reflete a perda de áreas de Formação Savânica/Florestal e Vegetação Aluvial, além da transição entre classes de uso e cobertura da terra produtivas. O estoque de carbono nas áreas de Pastagem reduziu-se de 700,96 Tg em 2030 para 627,68 Tg em 2050, enquanto o estoque de carbono nas áreas de Silvicultura aumentou de 122,78 Tg em 2030 para 166,47 Tg em 2050, e nas áreas de Agricultura, de 165,29 Tg em 2030 para 212,13 Tg em 2050.

No CDF, o estoque de carbono apresentou aumento, com incremento de 10,95 Tg entre 2020 e 2030, e de 21,09 Tg entre 2030 e 2050. O estoque total passou de 1.515,98 Tg em 2030 para 1.537,07 Tg em 2050. Nesse cenário, as áreas de Pastagem sofreram queda importante no estoque de carbono, de 699,29 Tg em 2030 para 613,92 Tg em 2050, assim como ocorreu redução no estoque de Vegetação Aluvial, de 223,91 em 2030, para 210,85 Em contraste, as classes de Agricultura e Silvicultura registraram aumentos no estoque de carbono, enquanto a Formação Savânica/Florestal destacou-se com crescimento superior a 50,75 Tg entre 2030 e 2050.

A Figura 11 apresenta o mapa de estoque de carbono no Cerrado do Estado de Mato Grosso do Sul, ilustrando as distribuições espaciais do carbono estocado em diferentes anos e nos cenários futuros para 2030 e 2050, representados por classe no gráfico na Figura 12.

Figura 11 - Estoque de carbono no Cerrado de Mato Grosso do Sul.

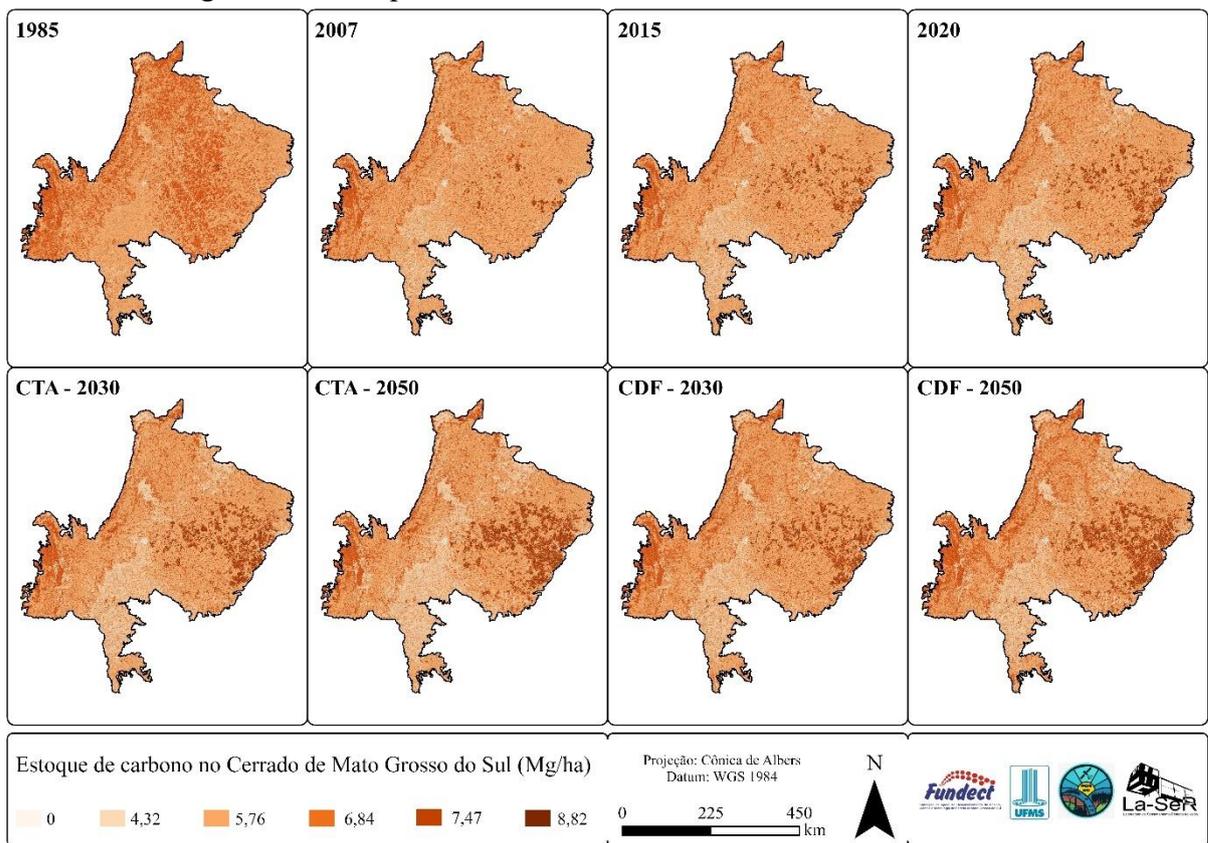
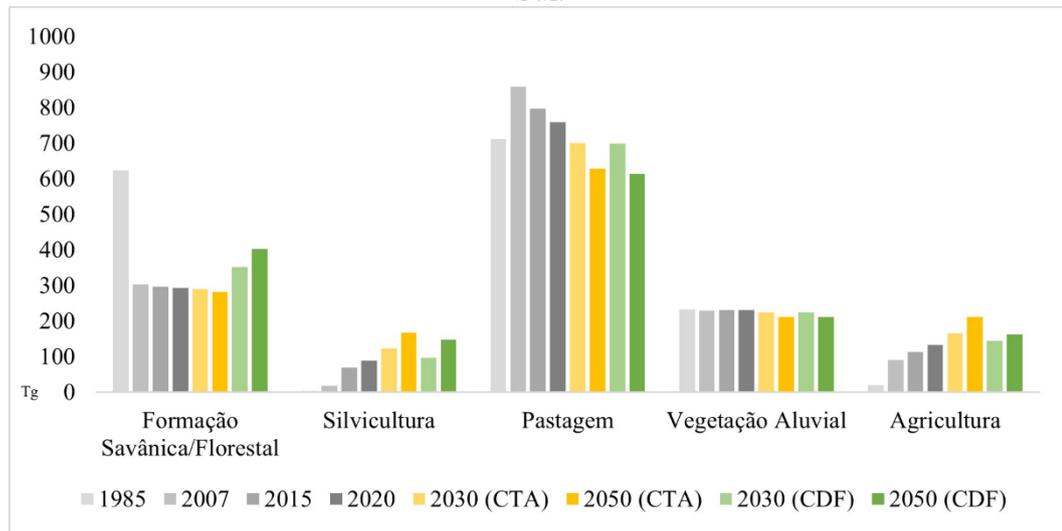


Figura 12 - Gráfico do estoque de carbono por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.



No ano de 1985 o estoque de carbono demonstrou-se de forma mais distribuída na área do Cerrado de Mato Grosso do Sul em razão da Formação Savânica/Florestal, classe que teve um estoque de 623,08 Tg, porém, nos próximos anos o estoque para a classe passa a cair gradativamente. A partir do ano de 2007 é possível reconhecer, na porção leste da área o início das atividades de Silvicultura, se intensificando até 2020. A Pastagem se mantém em destaque com altos valores de estoque de carbono devido à sua abrangente cobertura no Estado.

Para ambos os cenários futuros, a Silvicultura permanece em destaque com grande potencial de estoque de carbono, principalmente acima do solo. No CDF é possível notar o desenvolvimento dos corredores ecológicos, o que corresponde ao aumento de estoque pela Formação Savânica/Florestal. No CTA, destaca-se o aumento de estoque para as classes de Silvicultura e Agricultura, apresentadas no sul e leste do Cerrado no Estado.

### 5.1.2 Sequestro de carbono

A análise dos resultados de sequestro de carbono entre 1985 e 2020 no Cerrado de Mato Grosso do Sul revela variação considerável entre as diferentes classes de uso e cobertura da terra. De forma geral, observa-se que o total de carbono sequestrado apresentou flutuações ao longo dos períodos analisados, com sequestro negativo expressivo no período de 1985 a 2007, seguido por leve sequestro positivo entre 2007 e 2015, e novamente sequestro negativo entre 2015 e 2020 (Tabela 7).

Tabela 7 - Sequestro de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.

Sequestro	1985 – 2007	2007 – 2015	2015 – 2020
	Tg	Tg	Tg
Água	-0,71	-0,68	-0,39
Influência Urbana	-1,55	-0,54	-0,25
Formação Savânica/Florestal	6,33	3,96	2,91
Silvicultura	3,70	18,26	6,94
Pastagem	-76,49	-4,29	-2,70
Vegetação Aluvial	3,20	1,67	0,99
Agricultura	-27,23	-10,47	-8,49
<b>Total</b>	<b>-92,76</b>	<b>7,91</b>	<b>-0,99</b>

Entre 1985 e 2007, a classe de Pastagem destacou-se expressivamente, com sequestro negativo de -76,49 Tg, que em conjunto com a Agricultura, com sequestro negativo de -27,23, apresentou perda líquida de carbono no total de -92,76 Tg. No entanto, outras classes demonstraram sequestro positivo como a Formação Savânica/Florestal com sequestro de 6,33 Tg, Silvicultura com 3,70 Tg, e a Vegetação Aluvial com 3,20 Tg.

No período de 2007 a 2015, o cenário alterou-se, resultando em sequestro total positivo de 7,91 Tg. Esse crescimento foi impulsionado principalmente pela Silvicultura, que registrou sequestro de 18,26 Tg, o mais alto entre todas as classes. A Formação Savânica/Florestal continuou a apresentar sequestro, embora em menor escala, com 3,96 Tg. As pastagens continuaram demonstrando valor negativo de sequestro de carbono com -4,29 Tg, sugerindo possível degradação ou conversão dessas áreas.

Entre 2015 e 2020, houve novamente sequestro negativo total de -0,99 Tg. A Formação Savânica/Florestal, manteve o padrão de queda gradativa do sequestro, com 2,91 Tg, enquanto a Silvicultura, apesar de ainda apresentar sequestro positivo, registrou valor menor de 6,94 Tg em comparação ao período anterior. A Pastagem manteve o sequestro negativo, com -2,70 Tg, e a Agricultura, apesar do sequestro negativo, teve gradativo aumento de valor ao longo dos períodos, com -8,49.

A análise dos cenários futuros de sequestro de carbono para 2030 e 2050 no Cerrado de Mato Grosso do Sul, conforme apresentado na Tabela 8, mostra comportamentos distintos entre as classes de uso e cobertura da terra nos cenários de tendências atuais (CTA) e de desenvolvimento florestal (CDF).

Tabela 8 - Sequestro de carbono entre 2020 e 2050 por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.

Sequestro	CTA	CTA	CDF	CDF
	2020 – 2030	2030 – 2050	2020 – 2030	2030 – 2050
	Tg	Tg	Tg	Tg
Água	-0,13	-0,05	-0,07	-0,05
Influência Urbana	-0,52	-0,50	-0,50	-0,26
Formação Savânica/Florestal	2,35	2,41	12,35	13,67
Silvicultura	12,25	16,65	3,84	18,07
Pastagem	-2,29	-5,45	0,13	-2,69
Vegetação Aluvial	0,08	0,21	0,05	-0,04
Agricultura	-12,54	-18,20	-4,85	-7,59
<b>Total</b>	<b>-0,80</b>	<b>-4,93</b>	<b>10,95</b>	<b>21,12</b>

No CTA, o sequestro total de carbono entre 2020 e 2030 apresenta ligeira perda de -0,80 Tg, que se acentua no período de 2030 a 2050, resultando em perda de -4,93 Tg. Essa tendência negativa reflete principalmente a redução significativa de sequestro de carbono nas classes de Agricultura e Pastagem, que registram sequestros negativos de -12,54 Tg e -2,29 Tg, respectivamente, entre 2020 e 2030. A situação se agrava entre 2030 e 2050, com as mesmas classes apresentando sequestros negativos de -18,20 Tg para a Agricultura e -5,45 Tg para as Pastagens. A Vegetação Aluvial também contribui para essa tendência de perda, com sequestros negativos de -6,60 Tg entre 2020 e 2030 e -13,57 Tg entre 2030 e 2050. Por outro lado, a Silvicultura e a Formação Savânica/Florestal mostram sequestros positivos que compensaram parcialmente essas perdas, com a Silvicultura sequestrando 12,25 Tg entre 2020 e 2030 e 16,65 Tg entre 2030 e 2050, enquanto a Formação Savânica/Florestal sequestra 2,35 Tg e 2,41 Tg nos mesmos períodos.

No CDF, o cenário é mais favorável ao sequestro de carbono, com total positivo de 10,95 Tg entre 2020 e 2030, que aumenta para 21,12 Tg entre 2030 e 2050. Esse ganho é impulsionado pela Formação Savânica/Florestal, que registra sequestros positivos significativos de 12,35 Tg entre 2020 e 2030 e 13,67 Tg entre 2030 e 2050. A Silvicultura também contribui de forma positiva, com o sequestro de 3,84 Tg entre 2020 e 2030, que aumentam para 18,07 Tg entre 2030 e 2050. A Agricultura mantém o sequestro negativo,

embora em menor escala em comparação ao CTA, com -4,85 Tg entre 2020 e 2030 e -7,59 Tg entre 2030 e 2050. Em contrapartida, as Pastagens e a Vegetação Aluvial apresentam sequestros negativos no período entre 2030 e 2050, o que demonstra que, mesmo no cenário de desenvolvimento florestal, essas classes não contribuem para o aumento do sequestro de carbono.

A Figura 13 apresenta mapas de sequestro de carbono no Cerrado de Mato Grosso do Sul em diferentes períodos históricos (1985-2007, 2007-2015, 2015-2020) e cenários futuros (2020-2030 CTA, 2020-2030 CDF, 2030-2050 CTA, 2030-2050 CDF). A Figura 14 apresenta em gráfico o sequestro de carbono por classe.

Figura 13 - Sequestro de carbono total no Cerrado de Mato Grosso do Sul.

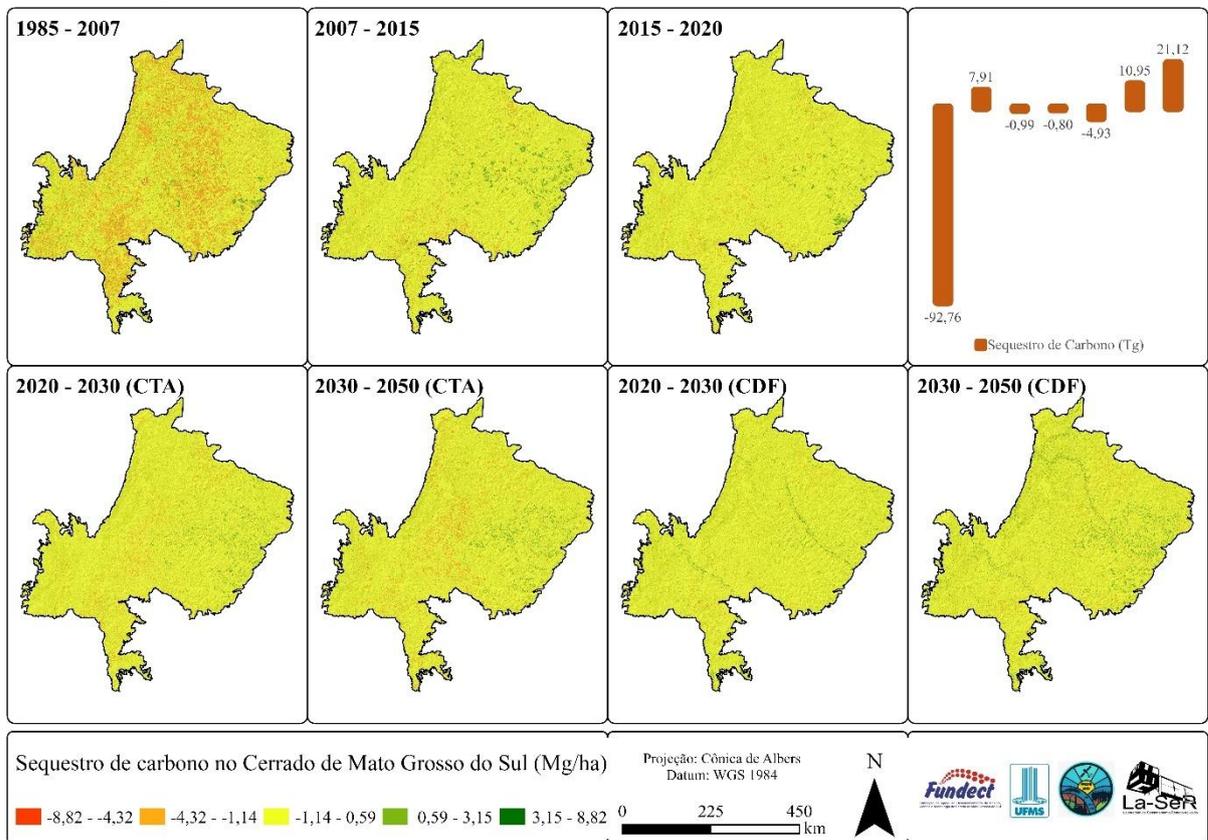
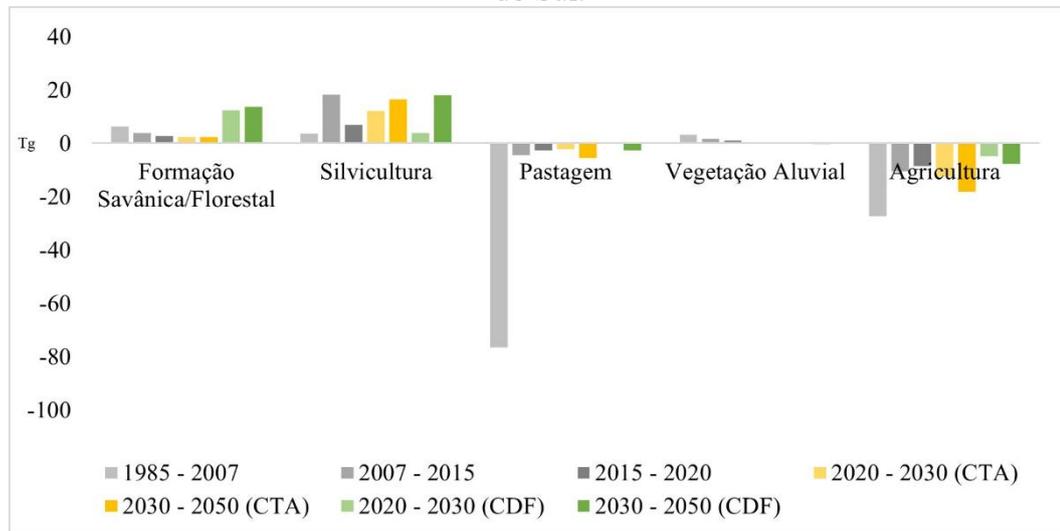


Figura 14 - Gráfico do sequestro de carbono por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.



A análise dos resultados de sequestro de carbono no Cerrado de Mato Grosso do Sul entre 1985 e 2050, conforme ilustrado na Figura 13, revela variações importantes ao longo do tempo e entre os diferentes cenários futuros. Durante o período de 1985 a 2007, observa-se perda expressiva de carbono, associada principalmente ao desflorestamento e à conversão de áreas naturais, especialmente na Formação Savânica/Florestal, resultando no sequestro negativo de -92,76 Tg. Essa tendência de perda, embora reduzida, ainda se mantém entre 2007 e 2015, com sequestro positivo total de 7,91 Tg, sugerindo recuperação parcial impulsionada pela introdução e expansão da silvicultura, que contribuiu significativamente para a estabilização do sequestro de carbono.

Entre 2015 e 2020, o sequestro de carbono apresenta leve oscilação, com ligeira perda total de -0,99 Tg. Este período é caracterizado por estabilização relativa no uso da terra, apesar de ainda haver áreas de perda de carbono associadas à degradação e conversão de pastagens. O CTA para 2020-2030 projeta continuidade dessa tendência negativa, com perda adicional de -0,80 Tg, refletindo a pressão contínua sobre as áreas naturais e produtivas, sem a implementação de intervenções de conservação.

Em contraste, o CDF para o mesmo período de 2020-2030 apresenta perspectiva promissora, com sequestro total positivo de 10,95 Tg. Este resultado sugere que a adoção de políticas de manejo florestal e de conservação pode promover a recuperação de áreas naturais e aumentar a capacidade de sequestro de carbono no Cerrado. A partir de 2030 até 2050, o CTA projeta a intensificação das perdas de carbono, resultando no sequestro negativo de -4,93 Tg, evidenciando os impactos adversos da falta de intervenções conservacionistas eficazes. Por

outro lado, o CDF para o mesmo período indica aumento substancial no sequestro de carbono, alcançando 21,12 Tg, o que reforça a eficácia das práticas de desenvolvimento florestal e conservação na mitigação das emissões de carbono.

Esses resultados evidenciam a importância de políticas de uso sustentável da terra e manejo florestal no Cerrado de Mato Grosso do Sul, com o CDF mostrando-se mais eficaz na promoção do sequestro de carbono em comparação ao CTA. Esses achados destacam a necessidade de estratégias de conservação para mitigar as mudanças climáticas e preservar os estoques de carbono na região.

### 5.1.3 Valoração do sequestro de carbono

A Tabela 9 apresenta o Valor Presente Líquido (VPL) do carbono sequestrado no Cerrado de Mato Grosso do Sul, calculado com base na taxa de desconto e no valor social do carbono, conforme valores estabelecidos por Ricke *et al.* (2018) em dólares americanos. O VPL foi determinado a partir da comparação entre os períodos de 1985 a 2007, 2007 a 2015, 2015 a 2020.

Tabela 9 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 1985 e 2020 por classe de UCT no Cerrado de Mato Grosso do Sul.

Classe	1985 – 2007	2007 – 2015	2015 – 2020
	US\$	US\$	US\$
Água	-16,91	-16,18	-9,30
Influência Urbana	-36,82	-13,02	-6,04
Formação Savânica/Florestal	150,75	94,80	69,81
Silvicultura	88,11	437,12	166,21
Pastagem	-1.822,35	-102,79	-64,61
Vegetação Aluvial	76,17	40,08	23,63
Agricultura	-648,84	-250,70	-203,45
<b>Total</b>	<b>-2.209,90</b>	<b>189,32</b>	<b>-23,75</b>

Entre 1985 e 2007, houve perda substancial de valor econômico, com VPL negativo superior a US\$ -2,2 bilhões. Essa perda reflete a grande redução das áreas de Formação Savânica/Florestal e Vegetação Aluvial, que são fundamentais para o armazenamento de carbono.

No período de 2007 a 2015, observa-se ganho de US\$ 189,32 milhões, atribuível à introdução do eucalipto e ao aumento do sequestro de carbono associado à expansão da

silvicultura. No entanto, entre 2015 e 2020, o valor econômico volta a apresentar VPL negativo, com perda de US\$ -23,75 milhões, refletindo os desafios contínuos na gestão do uso da terra e na preservação das áreas naturais.

Na Tabela 10 estão apresentados o VPL do sequestro de carbono entre os períodos 2020 a 2030 e 2030 a 2050 para o bioma Cerrado de Mato Grosso do Sul.

Tabela 10 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 2020 e 2050 por classe de UCT em milhões no Cerrado de Mato Grosso do Sul.

Classe	CTA	CTA	CDF	CDF
	2020 – 2030	2030 – 2050	2020 – 2030	2030 – 2050
	US\$	US\$	US\$	US\$
Água	-3,17	-1,24	-1,68	-1,25
Influência Urbana	-12,43	-11,89	-11,99	-6,18
Formação Savânica/Florestal	56,33	57,49	295,35	325,85
Silvicultura	293,19	396,90	91,92	430,80
Pastagem	-54,90	-130,00	3,16	-64,05
Vegetação Aluvial	1,86	5,01	1,12	-0,92
Agricultura	-300,02	-433,89	-115,92	-180,84
<b>Total</b>	<b>-19,15</b>	<b>-117,62</b>	<b>261,96</b>	<b>503,42</b>

Para os cenários futuros, no CTA, projeta-se perda contínua de valor, com VPL negativo de aproximadamente US\$ -19,15 milhões entre 2020 e 2030, e perda ainda maior de US\$ -117,62 milhões entre 2030 e 2050. Isso sugere que, sem intervenções adicionais, a degradação das áreas naturais e a perda de sequestro de carbono continuarão a impactar negativamente a economia da região.

Por outro lado, o CDF apresenta perspectiva econômica mais otimista. Entre 2020 e 2030, o VPL positivo de US\$ 261,96 milhões indica ganhos substanciais com a implementação de políticas de manejo florestal e conservação. Esse valor continua a aumentar progressivamente, alcançando US\$ 503,42 milhões entre 2030 e 2050, destacando o potencial econômico das práticas sustentáveis de uso da terra no Cerrado.

## 5.2 MATA ATLÂNTICA DE MATO GROSSO DO SUL

### 5.2.1 Estoque de carbono

A Tabela 11 apresenta o estoque de carbono nas diferentes classes de uso e cobertura da terra na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul entre os anos de 1985 e 2020. Os resultados refletem as mudanças no uso da terra e suas implicações no armazenamento de carbono ao longo desse período.

Tabela 11 - Estoque de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

<b>Estoque</b>	<b>1985</b>	<b>2007</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>
	<b>Tg</b>	<b>Tg</b>	<b>Tg</b>	<b>Tg</b>
Formação Savânica/Florestal	38,87	16,68	16,92	17,61
Silvicultura	-	0,09	0,48	0,58
Pastagem	173,23	145,13	117,71	108,09
Vegetação Aluvial	65,38	57,78	59,55	59,86
Agricultura	8,07	30,28	42,72	47,09
<b>Total</b>	<b>285,56</b>	<b>249,97</b>	<b>237,39</b>	<b>233,23</b>

Em 1985, a Formação Savânica/Florestal apresenta estoque de carbono de 38,87 Tg, que sofreu redução expressiva para 16,68 Tg em 2007, como resultado do desflorestamento e da conversão dessas áreas para outros usos. Nos anos subsequentes, observou-se leve recuperação no estoque, alcançando 16,92 Tg em 2015 e 17,61 Tg em 2020, sugerindo possíveis iniciativas de conservação ou regeneração natural.

A silvicultura, embora não demonstrasse relevância em 1985, registrou crescimento contínuo a partir de 2007, quando o estoque de carbono foi de 0,09 Tg, aumentando para 0,48 Tg em 2015 e atingindo 0,58 Tg em 2020. Esse aumento reflete a expansão da silvicultura como uma atividade produtiva e de subsistência na região, contribuindo para o aumento do sequestro de carbono.

Por outro lado, a classe de Pastagem exibiu tendência de declínio, com o estoque de carbono diminuindo de 173,23 Tg em 1985 para 108,09 Tg em 2020. Essa redução pode ser atribuída à conversão de áreas de pastagem para outros usos, como a agricultura, ou à degradação dessas áreas. A Vegetação Aluvial manteve relativa estabilidade no estoque de carbono, apresentando leve queda de 65,38 Tg em 1985 para 57,78 Tg em 2007, seguida pela

recuperação gradual para 59,86 Tg em 2020. Essa estabilidade indica que as áreas de vegetação aluvial foram menos impactadas pelas mudanças no uso da terra, preservando sua capacidade de armazenamento de carbono ao longo do tempo.

A Agricultura, por sua vez, apresentou aumento significativo no estoque de carbono, que passou de 8,07 Tg em 1985 para 47,09 Tg em 2020. Esse crescimento acentuado reflete a expansão das áreas agrícolas na região, em detrimento de outras classes de uso da terra, como pastagens e formações naturais.

No conjunto, o estoque total de carbono na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul apresentou redução, passando de 285,56 Tg em 1985 para 249,97 Tg em 2007. Contudo, a partir de 2015, houve a estabilização da queda do estoque de carbono, que se manteve próximo a 237,39 Tg em 2015 e 233,23 Tg em 2020. Essa estabilização pode ser explicada pelo equilíbrio entre as perdas em áreas naturais e pastagens e os ganhos nas áreas de agricultura.

A Tabela 12 apresenta os cenários futuros de estoque de carbono para os anos de 2030 e 2050 nas diferentes classes de uso e cobertura da terra na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul, considerando dois cenários: CTA e CDF.

Tabela 12 - Estoque de carbono entre 2030 e 2050 por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

Estoque	CTA – 2030	CTA – 2050	CDF – 2030	CDF – 2050
	Tg	Tg	Tg	Tg
Formação Savânica/Florestal	16,75	15,38	27,86	33,22
Silvicultura	0,72	1,00	0,50	1,00
Pastagem	89,51	62,21	96,02	78,63
Vegetação Aluvial	59,75	59,17	59,75	59,11
Agricultura	56,81	71,56	49,32	56,33
<b>Total</b>	<b>223,54</b>	<b>209,30</b>	<b>233,44</b>	<b>228,29</b>

No cenário de tendências atuais (CTA), a Formação Savânica/Florestal continua a sofrer uma redução no estoque de carbono, com queda de 16,75 Tg em 2030 para 15,38 Tg em 2050. Em contraste, no cenário de desenvolvimento florestal (CDF), essa classe mostra aumento substancial, com o estoque passando de 27,86 Tg em 2030 para 33,22 Tg em 2050. Isso indica que políticas de manejo florestal e conservação poderiam reverter a tendência de perda de carbono observada no CTA.

A classe de Silvicultura, no CTA, registra aumento gradual no estoque de carbono, de 0,72 Tg em 2030 para 1 Tg em 2050. Já no CDF, embora o estoque de carbono em 2030 seja ligeiramente menor, 0,5 Tg, ele aumenta para 1 Tg em 2050, sugerindo desenvolvimento sustentável das atividades silviculturais ao longo do tempo.

As pastagens, sob o CTA, demonstram tendência de declínio acentuado no estoque de carbono, reduzindo-se de 89,51 Tg em 2030 para 62,21 Tg em 2050. No CDF, embora também haja redução, o estoque de carbono nas pastagens é projetado para ser mais elevado, com 96,02 Tg em 2030 e 78,63 Tg em 2050, o que sugere que a gestão sustentável dessas áreas pode mitigar as perdas de carbono.

A Vegetação Aluvial mantém estabilidade no estoque de carbono em ambos os cenários. No CTA, o estoque se mantém em torno de 59,75 Tg em 2030, com leve diminuição para 59,17 Tg em 2050. No CDF, os valores são similares, indicando que essa classe é menos suscetível às mudanças no uso da terra, preservando sua capacidade de armazenamento de carbono ao longo do tempo.

A Agricultura, no CTA, mostra aumento significativo no estoque de carbono, passando de 56,81 Tg em 2030 para 71,56 Tg em 2050, refletindo a intensificação do uso da terra para fins agrícolas. No CDF, embora o crescimento seja mais moderado, com o estoque aumentando de 49,32 Tg em 2030 para 53,33 Tg em 2050, ainda se observa a expansão agrícola, porém de forma mais controlada e sustentável.

O estoque total de carbono no cenário CTA apresenta leve redução, passando de 223,54 Tg em 2030 para 209,30 Tg em 2050. Em contrapartida, no CDF, o estoque total aumenta, com os valores passando de 233,44 Tg em 2030 para 228,29 Tg em 2050. Esses resultados indicam que, enquanto o CTA projeta a tendência de redução do estoque de carbono, o CDF sugere que práticas de manejo sustentável e políticas de conservação podem preservar, e contribuir para aumentar o estoque de carbono na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

A Figura 15 apresenta o mapa de estoque de carbono na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul, ilustrando as distribuições espaciais do carbono estocado em diferentes anos e cenários futuros (CTA e CDF) para 2030 e 2050. Na Figura 16 é representada por gráfico o estoque de carbono por classe de UCT.

Figura 15 - Mapa de estoque de carbono na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

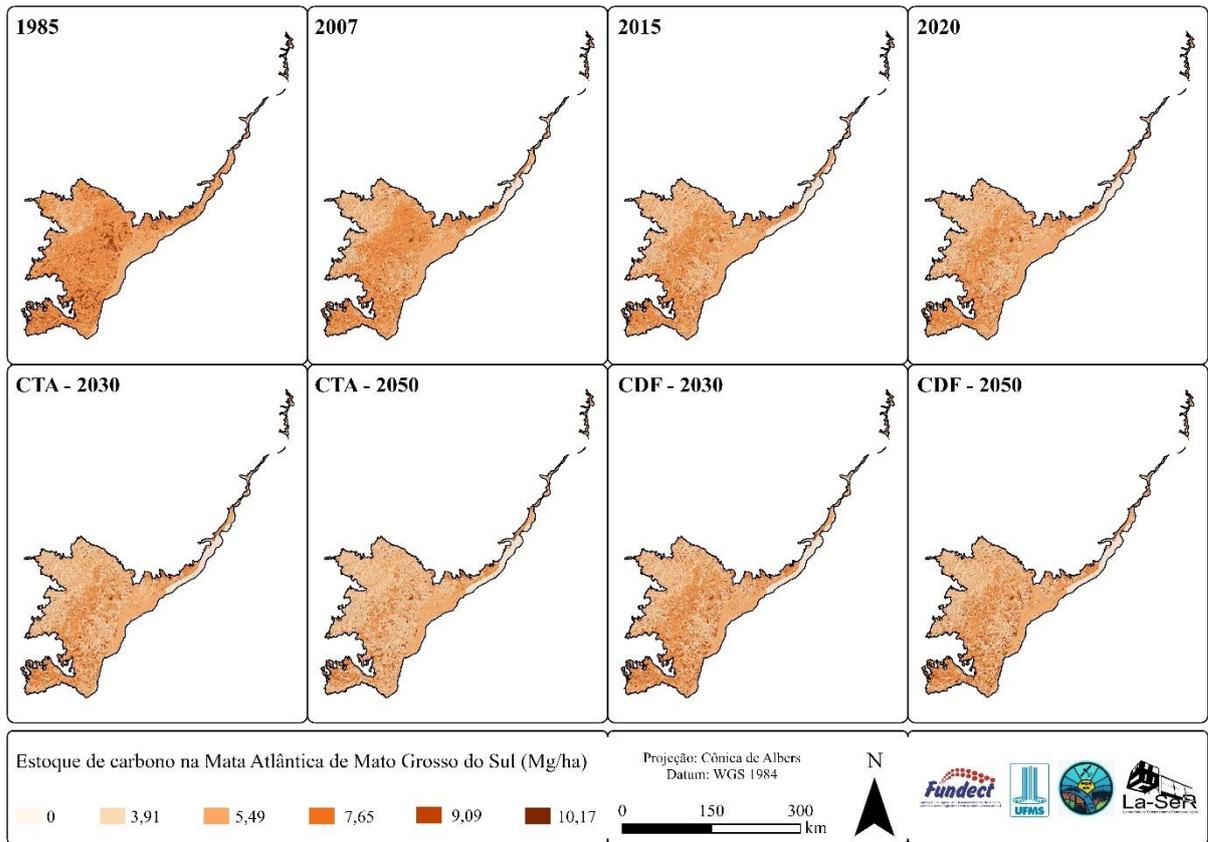
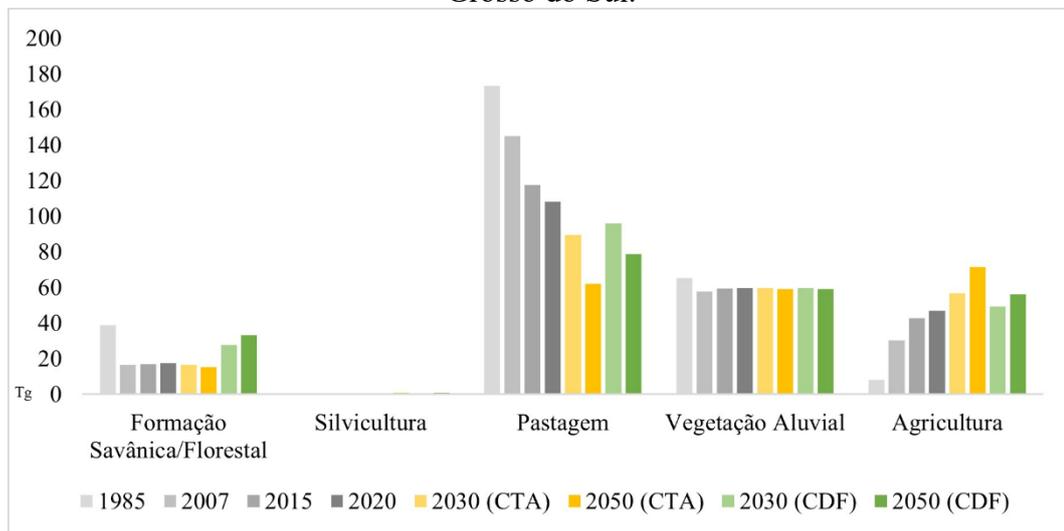


Figura 16 - Gráfico do estoque de carbono por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.



Entre 1985 e 2020, nota-se a manutenção relativamente estável das áreas com altos estoques de carbono, especialmente nas regiões centrais, ao noroeste e ao longo da borda leste da Mata Atlântica. Em 1985, as áreas de alta densidade de carbono estavam amplamente distribuídas, refletindo a vegetação nativa ainda preservada. Ao longo do tempo, observou-se

leve fragmentação dessas áreas, porém sem degradação severa. Em 2007, as áreas de maior estoque de carbono apresentaram pequena redução, principalmente nas regiões centrais, mas ainda mantiveram presença significativa. Esse padrão se manteve em 2015, com leve recuperação ou estabilização, sugerindo que as áreas mais densas em carbono conseguiram resistir às pressões antrópicas ou passaram por processos de regeneração natural.

No mapa de 2020, a distribuição espacial do carbono continua estável em relação a 2015, com as áreas de alta densidade de carbono preservadas, ainda que fragmentadas. Não se observa a degradação acentuada, mas a continuidade na presença de áreas com estoques moderados a altos de carbono. Essa estabilidade sugere que, apesar das pressões ambientais, as práticas de manejo e conservação possivelmente implementadas nas últimas décadas contribuíram para evitar uma degradação significativa do estoque de carbono.

Ao projetar os cenários futuros, diferenças marcantes emergem entre as projeções de CTA e CDF. No cenário CTA para 2030, a manutenção das áreas de estoque de carbono é observada, mas com leve tendência de diminuição das áreas de alta densidade. Em 2050, essa tendência de redução continua, com diminuição progressiva, das áreas de maior estoque de carbono. A continuidade das tendências atuais sugere que, sem intervenções significativas, a Mata Atlântica pode experimentar lenta, mas constante, redução na capacidade de sequestro de carbono.

Por outro lado, no cenário CDF para 2030 projeta-se a recuperação ou, pelo menos, a preservação das áreas de alta densidade de carbono observadas nos anos anteriores. Essa tendência positiva é reforçada em 2050, onde o CDF apresenta a expansão ou a manutenção das áreas de alto estoque de carbono, especialmente nas regiões centrais. Este cenário sugere que políticas eficazes de manejo florestal e conservação têm o potencial de preservar ou aumentar a capacidade de sequestro de carbono da Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

### 5.2.2 Sequestro de carbono

A Tabela 13 apresenta os valores de sequestro de carbono por classe na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul entre 1985 e 2020. Os resultados mostram as variações no sequestro de carbono ao longo desse período, refletindo as mudanças no uso da terra e nas práticas de manejo na região.

Tabela 13 - Sequestro de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

Sequestro	1985 – 2007	2007 – 2015	2015 – 2020
	Tg	Tg	Tg
Água	-9,80	-0,18	-0,13
Influência Urbana	-0,46	-0,22	-0,08
Formação Savânica/Florestal	0,67	0,34	0,41
Silvicultura	0,003	0,10	0,03
Pastagem	-2,22	2,43	2,15
Vegetação Aluvial	-1,05	-0,81	-0,54
Agricultura	-22,72	-14,22	-6,01
<b>Total</b>	<b>-35,59</b>	<b>-12,58</b>	<b>-4,16</b>

Os resultados apresentados indicam variações substanciais no sequestro de carbono por classe na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul entre 1985 e 2020. Ao longo desse período, a classe de Formação Savânica/Florestal demonstrou sutil taxa de sequestro de carbono, especialmente entre 1985 e 2007, quando foram registrados 0,67 Tg de carbono, refletindo provavelmente o desmatamento e a conversão dessas áreas para outros usos. No entanto, observou-se a recuperação entre 2007 e 2015, com pequeno sequestro positivo de 0,34 Tg, e de 2015 a 2020, com 0,41 Tg, sugerindo possível regeneração ou implementação de práticas de manejo mais eficazes.

A Silvicultura apresentou o sequestro de carbono consistentemente positivo ao longo dos três períodos analisados, com valores de 0,003 Tg entre 1985 e 2007, 0,1 Tg entre 2007 e 2015, e 0,03 Tg entre 2015 e 2020. Esses dados indicam que as áreas manejadas para silvicultura contribuíram de forma benéfica para o sequestro de carbono na região, possivelmente devido à introdução e manutenção de áreas florestais manejadas.

Em contraste, a classe de Pastagem apresentou aumento de sequestro de carbono ao longo do período estudado. Entre 1985 e 2007, foram perdidos -2,2 Tg de carbono, e entre 2007 e 2015, 2,43 Tg. Embora o aumento tenha ocorrido entre 2015 e 2020, ainda foram registrados 2,15 Tg de carbono. Esses resultados indicam que as práticas de manejo das pastagens na região não foram suficientes para evitar a degradação e a consequente perda de carbono, apontando para a necessidade de intervenções mais eficazes.

A Vegetação Aluvial também experimentou perdas de carbono, com o valor negativo de -1,05 Tg entre 1985 e 2007. No entanto, manteve-se um valor negativo entre 2007 e 2015, com sequestro de -0,81 Tg, e leve aumento adicional para -0,54 Tg entre 2015 e 2020, sugerindo possível pressão antrópica, colocando em risco a resiliência natural dessas áreas.

A classe de Agricultura destacou-se por seu sequestro negativo de carbono, especialmente entre 1985 e 2007, quando foram sequestrados -22,72 Tg. Esse valor aumentou nos períodos subsequentes, com -14,22 Tg entre 2007 e 2015, e -6,01 Tg entre 2015 e 2020, possivelmente refletindo a intensificação das práticas agrícolas.

No total, o sequestro de carbono na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul apresentou balanço negativo entre 1985 e 2007, com perda de -35,59 Tg, indicando pressão antrópica intensa sobre a região. Contudo, foi observada a recuperação modesta nos períodos subsequentes, com sequestro total de -12,58 Tg entre 2007 e 2015, e -4,6 Tg entre 2015 e 2020. Esses resultados sugerem que, apesar das perdas, medidas de manejo mais sustentáveis e práticas de conservação começaram a surtir efeito, revertendo parcialmente as perdas de carbono na região.

A Tabela 14 apresenta os dados de sequestro de carbono projetados para os cenários futuros de 2030 e 2050 na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul, divididos entre as tendências atuais (CTA) e o desenvolvimento florestal (CDF). As projeções indicam as variações no sequestro de carbono por classe, refletindo o impacto diferenciado das políticas de manejo e conservação ambiental.

Tabela 14 - Sequestro de carbono entre 2020 e 2050 por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

Sequestro	CTA	CTA	CDF	CDF
	2020 – 2030	2030 – 2050	2020 – 2030	2030 – 2050
	Tg	Tg	Tg	Tg
Água	-0,08	-0,04	-0,06	-0,06
Influência Urbana	-0,20	-0,17	-0,18	-0,12
Formação Savânica/Florestal	0,03	0,08	3,79	3,63
Silvicultura	0,05	0,07	0,02	0,10
Pastagem	0,36	0,48	0,24	0,06
Vegetação Aluvial	0,00	0,01	-0,0007	-0,01
Agricultura	-9,84	-14,68	-3,60	-8,74

<b>Total</b>	-9,69	-14,24	0,21	-5,14
--------------	-------	--------	------	-------

Sob o CTA, entre 2020 e 2030, a região experimentará a redução no sequestro de carbono, com total de -9,69 Tg, que se intensifica ligeiramente até 2050, alcançando -14,24 Tg. Este declínio é mais acentuado na classe de Agricultura, que mostra a diminuição contínua, com -9,69 Tg em 2030 e -14,68 Tg em 2050, sugerindo que as práticas atuais podem não ser suficientes para sustentar o sequestro de carbono nessa classe. A Pastagem apresenta aumento brando no sequestro, de 0,36 Tg em 2030 para 0,48 Tg em 2050, destacando desafios importantes em manter o sequestro de carbono em áreas de uso intensivo. A Vegetação Aluvial demonstra poucas alterações de 0 Tg em 2030 e 0,01 Tg em 2050.

No CDF, a perspectiva revelou-se mais otimista. Entre 2020 e 2030, espera-se o aumento no sequestro de carbono de 0,21 Tg, que decai até 2050, alcançando -5,14 Tg. A Formação Savânica/Florestal responde positivamente às políticas de desenvolvimento florestal, destacando-se com 3,79 Tg em 2030 e 3,63 Tg em 2050, como resultado dos benefícios das práticas de manejo florestal e conservação. A Silvicultura enfrenta um desafio inicial com pequena perda de 0,02 Tg em 2030, mas recupera em 2050, adicionando 0,1 Tg, sugerindo ajustes nas práticas de manejo que podem levar a uma melhor performance em longo prazo.

A Vegetação Aluvial, e principalmente a Agricultura, sob o CDF ainda enfrentam reduções, embora as perdas sejam atenuadas em comparação ao cenário CTA, sugerindo que mesmo sob políticas de desenvolvimento florestal, essas áreas requerem atenção específica para maximizar o sequestro de carbono.

A Figura 17 apresenta o sequestro de carbono no Pantanal de Mato Grosso do Sul para diferentes períodos entre os anos de 1985 e 2050, incluindo as projeções para os cenários CTA e CDF. Na Figura 18, é apresentado o gráfico que demonstra o sequestro de carbono por classe de UCT.

Figura 17 - Sequestro de carbono total na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

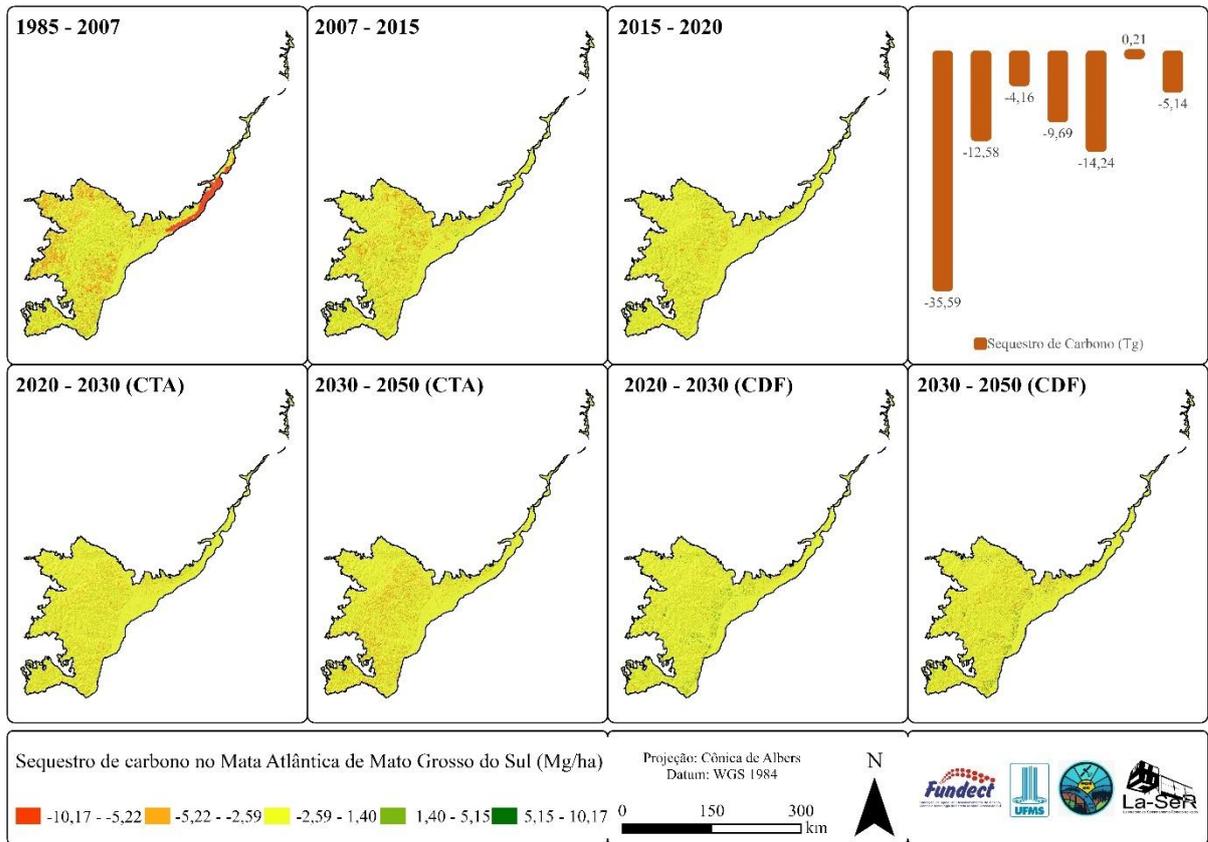
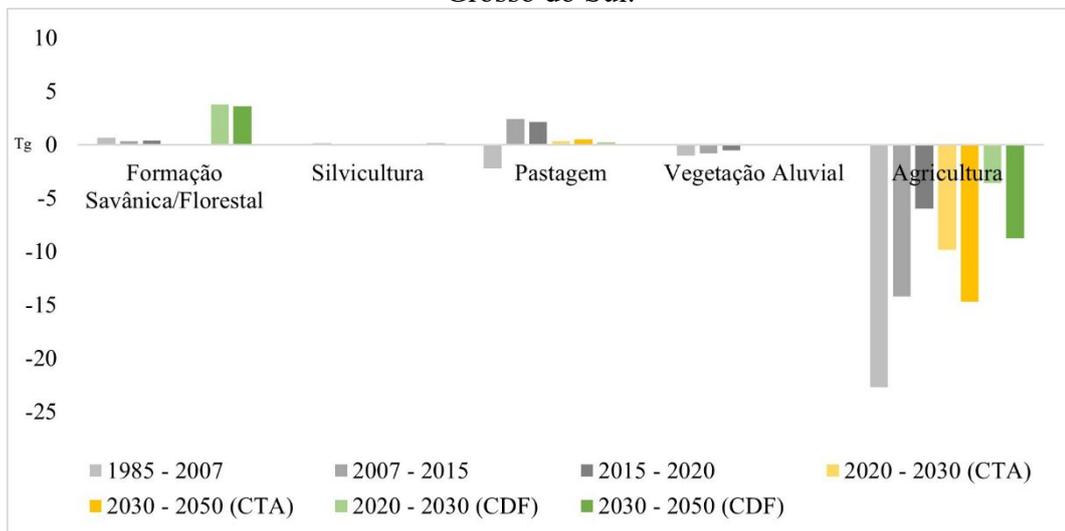


Figura 18 - Gráfico do sequestro de carbono por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.



Entre o período de 1985 e 2007 é possível observar pontos de perda de carbono distribuída por toda a área da Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul, com destaque às áreas úmidas na costa leste do Estado, apresentando um valor negativo de sequestro em -35,59 Tg.

Nos próximos períodos, entre 2007 e 2015 e 2015 a 2020, o sequestro total se apresenta como positivo, com -12,58 Tg e -4,16 Tg respectivamente.

No CTA, no período entre 2020 e 2030, tendência negativa de sequestro em -9,69 Tg, enquanto no CDF apresenta o valor positivo de 0,21 Tg. Para o período de 2030 a 2050, o sequestro de carbono no CTA apresenta ligeira queda em relação ao período anterior, com perda de -14,24 Tg. O sequestro do carbono do CDF de 2030 a 2050, apesar de negativo, apresentando o valor de -5,14 Tg, é mais alto em relação ao período anterior.

### 5.2.3 Valoração do sequestro de carbono

A Tabela 15 demonstra o Valor Presente Líquido (VPL) do carbono sequestrado na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul, calculado com base na taxa de desconto e no valor social do carbono, conforme metodologia proposta por Ricke *et al.* (2018). O VPL foi avaliado em dólares americanos, oferecendo uma perspectiva econômica sobre o benefício monetário do sequestro de carbono ao longo de vários períodos temporais: de 1985 a 2007, de 2007 a 2015, de 2015 a 2020.

Tabela 15 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 1985 e 2020 por classe de UCT na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

Classe	1985 – 2007	2007 – 2015	2015 – 2020
	US\$	US\$	US\$
Água	-233,55	-4,39	-3,23
Influência Urbana	-11,04	-5,38	-1,90
Formação Savânica/Florestal	15,94	8,11	9,90
Silvicultura	0,06	2,34	0,82
Pastagem	-52,87	58,16	51,57
Vegetação Aluvial	-25,02	-19,42	-12,85
Agricultura	-541,40	-340,54	-143,98
<b>Total</b>	<b>-847,88</b>	<b>-301,11</b>	<b>-99,66</b>

Durante o período de 1985 a 2007, observou-se o VPL negativo substancial, totalizando -847,88 milhões de dólares, o que indica perda expressiva de valor associada ao sequestro de carbono. Esse resultado reflete práticas de uso da terra que provavelmente promoveram o desmatamento e a conversão de áreas naturais em usos menos eficientes para o sequestro de carbono. A magnitude dessa perda evidencia a gravidade da degradação ambiental ocorrida na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul durante esse período.

Entre 2007 e 2015, houve uma mudança positiva, com o VPL registrando o valor positivo de -301,11 milhões de dólares. Esse aumento sugere a recuperação devido à adoção de práticas mais sustentáveis de manejo da terra ou à implementação de políticas de conservação que reduziram o ritmo de desmatamento e degradação. No período subsequente, de 2015 a 2020, o VPL continuou a mostrar desempenho positivo, atingindo -99,66 milhões de dólares. Embora negativo, é maior em comparação ao período anterior, o que indica a continuidade na recuperação, sugerindo que as estratégias de manejo e conservação continuaram a ter um impacto benéfico na valorização do carbono sequestrado.

A Tabela 16 apresenta o VPL de sequestro de carbono por classe de UCT para os períodos de 2020 a 2030 e de 2030 a 2050 nos cenários futuros de tendências atuais e de desenvolvimento florestal.

Tabela 16 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 2020 e 2050 por classe de UCT em milhões na Mata Atlântica de Mato Grosso do Sul.

Classe	CTA	CTA	CDF	CDF
	2020 – 2030	2030 – 2050	2020 – 2030	2030 – 2050
	US\$	US\$	US\$	US\$
Água	-2,02	-0,96	-1,43	-1,35
Influência Urbana	-4,84	-3,97	-4,35	-2,78
Formação Savânica/Florestal	0,66	1,90	90,71	86,44
Silvicultura	1,12	1,72	0,46	2,39
Pastagem	8,61	11,49	5,82	1,43
Vegetação Aluvial	0,00	0,27	-0,02	-0,20
Agricultura	-235,36	-349,90	-86,15	-208,46
<b>Total</b>	<b>-231,83</b>	<b>-339,46</b>	<b>5,04</b>	<b>-122,53</b>

No CTA, para o período de 2020 a 2030, as projeções indicam o retorno ao VPL negativo, com uma estimativa de -231,83 milhões de dólares. Esse resultado aponta para o declínio no valor econômico do sequestro de carbono, sugerindo que as práticas de uso da terra previstas para esse cenário podem não ser suficientes para sustentar os benefícios econômicos do sequestro de carbono, refletindo possíveis lacunas nas estratégias de conservação e manejo ambiental. O cenário CTA para o período de 2030 a 2050 projeta a continuidade dessa tendência negativa, com um VPL de -339,46 milhões de dólares, reforçando a necessidade de revisões nas práticas de manejo da terra para evitar perdas econômicas adicionais relacionadas ao sequestro de carbono.

Na direção contrária, o CDF apresentou perspectiva mais otimista. Entre 2020 e 2030, o VPL projetado revelou-se significativamente positivo, alcançando 5,04 milhões de dólares, o que indica que estratégias de manejo florestal eficazes e medidas de conservação podem resultar em ganhos substanciais no sequestro de carbono. Porém, para o período de 2030 a 2050, o VPL sob o CDF apresenta valor negativo de -122,53 milhões de dólares. Essa redução, pode indicar a necessidade de ajustes nas estratégias de manejo para sustentar os ganhos de sequestro de carbono a longo prazo.

### 5.3 PANTANAL DE MATO GROSSO DO SUL

#### 5.3.1 Estoque de carbono

A Tabela 17 apresenta os dados de estoque de carbono no Pantanal de Mato Grosso do Sul para os anos de 1985, 2007, 2015 e 2020, divididos por classe de uso e cobertura da terra. Os valores indicam as variações no estoque de carbono ao longo do tempo, refletindo as mudanças no uso e manejo das terras na região.

Tabela 17 - Estoque de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul.

Estoque	1985	2007	2015	2020
	Tg	Tg	Tg	Tg
Formação Savânica/Florestal	382,47	316,07	313,90	308,89
Silvicultura	-	-	0,002	0,001
Pastagem	111,79	214,52	303,59	360,91
Vegetação Aluvial	229,28	240,01	137,40	65,08
Agricultura	0,11	0,35	0,45	0,45
<b>Total</b>	<b>723,65</b>	<b>770,95</b>	<b>755,35</b>	<b>735,33</b>

Entre 1985 e 2007, o estoque total de carbono no Pantanal de Mato Grosso do Sul aumentou de 723,65 Tg para 770,95 Tg. Esse crescimento pode ser atribuído principalmente ao aumento expressivo do estoque de carbono na classe de Pastagem, que praticamente dobrou, passando de 111,79 Tg em 1985 para 214,54 Tg em 2007. Esse incremento reflete a expansão das áreas de pastagem na região, que, apesar de contribuírem para o aumento do estoque de carbono, também sugerem a possível conversão de áreas naturais em pastagens. A Formação Savânica/Florestal, por outro lado, apresentou redução significativa, com o estoque de carbono

caindo de 382,47 Tg em 1985 para 316,07 Tg em 2007. Essa diminuição aponta para a degradação das áreas florestais, provavelmente devido ao desmatamento e à conversão para outros usos.

De 2007 para 2015, o estoque total de carbono no Pantanal sofreu redução, caindo de 770,95 Tg para 755,35. Essa queda pode ser atribuída, em grande parte, à diminuição acentuada do estoque de carbono na Vegetação Aluvial, que reduziu de 240,01 Tg em 2007 para 137,40 Tg em 2015. A queda no estoque de carbono na Formação Savânica/Florestal continuou, embora de forma moderada, passando para 313,90 Tg em 2015. A classe de Pastagem, no entanto, continuou a crescer, atingindo 303,59 Tg em 2015, o que sugere a intensificação do uso da terra para a pecuária na região.

Entre 2015 e 2020, o estoque total de carbono continuou a diminuir, atingindo 735,33 Tg em 2020. A queda mais acentuada ocorreu novamente na Vegetação Aluvial, cujo estoque de carbono reduziu drasticamente para 65,08 Tg em 2020. Essa tendência reflete uma provável degradação contínua das áreas de vegetação aluvial, possivelmente devido a mudanças hidrológicas, desmatamento e conversão para outras formas de uso da terra. A Formação Savânica/Florestal também apresentou redução adicional no estoque de carbono, atingindo 308,89 Tg em 2020. Por outro lado, a classe de Pastagem continuou a apresentar um aumento no estoque de carbono, alcançando 360,91 Tg, o que reforça a tendência de conversão de áreas naturais para uso agrícola e pecuário.

O Pantanal de Mato Grosso do Sul experimentou mudança significativa na distribuição do estoque de carbono, com redução geral observada entre 1985 e 2020. As áreas de Formação Savânica/Florestal e Vegetação Aluvial sofreram as maiores perdas, enquanto as áreas de Pastagem continuaram a expandir-se, aumentando seu estoque de carbono. Esses resultados ressaltam a necessidade de intervenções eficazes para preservar as áreas naturais remanescentes e mitigar as perdas de carbono, garantindo a sustentabilidade ambiental do Pantanal.

A Tabela 18 apresenta as projeções de estoque de carbono para os cenários futuros de 2030 e 2050 no Pantanal de Mato Grosso do Sul, distribuídos entre as tendências atuais (CTA) e o cenário de desenvolvimento florestal (CDF).

Tabela 18 - Estoque de carbono entre 2030 e 2050 por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul.

Estoque	CTA – 2030	CTA – 2050	CDF – 2030	CDF – 2050
	Tg	Tg	Tg	Tg

Formação				
Savânica/Florestal	300,82	289,18	419,78	439,00
Silvicultura	0,0007	0,0002	0,0007	0,0002
Pastagem	386,50	394,87	318,51	311,73
Vegetação Aluvial	34,65	31,80	35,37	29,31
Agricultura	0,50	0,60	0,45	0,41
<b>Total</b>	<b>722,47</b>	<b>716,45</b>	<b>774,10</b>	<b>780,45</b>

No CTA, o estoque total de carbono no Pantanal projetado revelou queda de 722,47 Tg em 2030 para 716,45 Tg em 2050. Essa leve redução sugere uma continuidade da pressão sobre as áreas naturais, especialmente a Formação Savânica/Florestal, que vê seu estoque de carbono diminuir de 300,82 Tg em 2030 para 289,18 Tg em 2050. A classe de Vegetação Aluvial também continua a sofrer perdas, com uma projeção de queda de 34,65 Tg em 2030 para 31,80 Tg em 2050. Em contraste, a classe de Pastagem demonstrou aumento do seu estoque de carbono, subindo de 386,50 Tg em 2030 para 394,87 Tg em 2050, o que sugere uma expansão contínua das áreas de pastagem, possivelmente em detrimento das áreas naturais.

No CDF, o panorama demonstrou-se mais otimista, com aumento projetado no estoque total de carbono de 754,10 Tg em 2030 para 780,45 Tg em 2050. Nesse cenário, a Formação Savânica/Florestal experimenta crescimento significativo, com o estoque de carbono aumentando de 419,78 Tg em 2030 para 439,00 Tg em 2050. Este aumento reflete os benefícios das práticas de manejo florestal sustentáveis e políticas de conservação, que poderiam promover a regeneração dessas áreas e aumentar sua capacidade de sequestro de carbono. No entanto, as classes de Pastagem e Vegetação Aluvial mostram comportamentos diferentes: enquanto o estoque de carbono nas pastagens é projetado para diminuir, de 318,51 Tg em 2030 para 311,73 Tg em 2050, a Vegetação Aluvial também sofre leve redução, passando de 35,37 Tg em 2030 para 29,31 Tg em 2050. Esses resultados indicam que, embora o cenário de desenvolvimento florestal promova a recuperação de áreas florestais, ainda há desafios para a preservação e recuperação de outras classes, como a Vegetação Aluvial. Tal desafio, possivelmente se dá em razão da complexa dinâmica hidrológica atuante no Pantanal, que interfere periodicamente na alternância de períodos secos e úmidos nessas áreas.

Enquanto o CTA sugere contínua degradação das áreas naturais, o CDF oferece uma visão positiva, com a possibilidade de aumentar o estoque de carbono por meio de práticas de manejo sustentável. Esses resultados evidenciam a necessidade de estratégias específicas para

cada classe de uso da terra, a fim de maximizar a capacidade de sequestro de carbono e preservar a integridade ecológica do Pantanal.

A Figura 19 apresenta a distribuição espacial do estoque de carbono no Pantanal de Mato Grosso do Sul para os anos de 1985, 2007, 2015 e 2020, e projeções para os cenários futuros de 2030 e 2050 sob duas condições: CTA e CDF, representadas por classe na Figura 20 por meio de gráfico.

Figura 19 - Estoque de carbono no Pantanal de Mato Grosso do Sul.

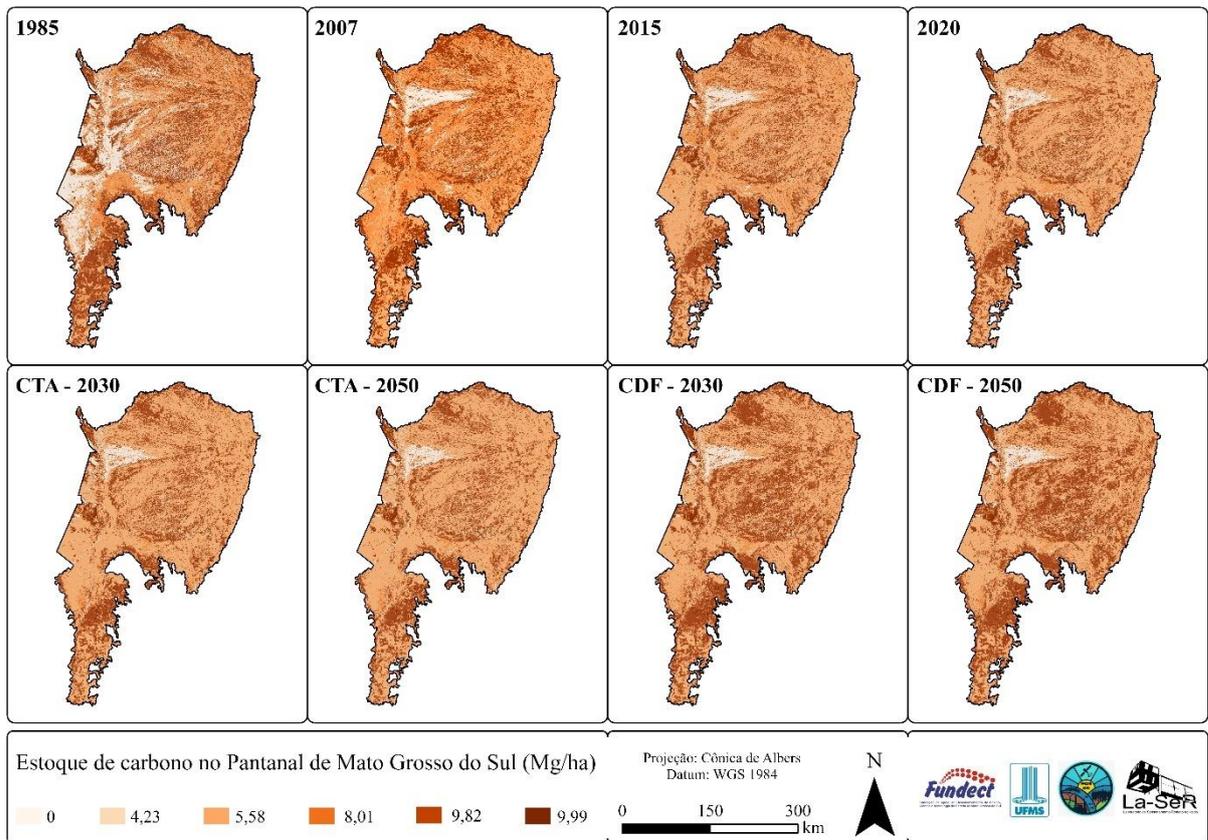
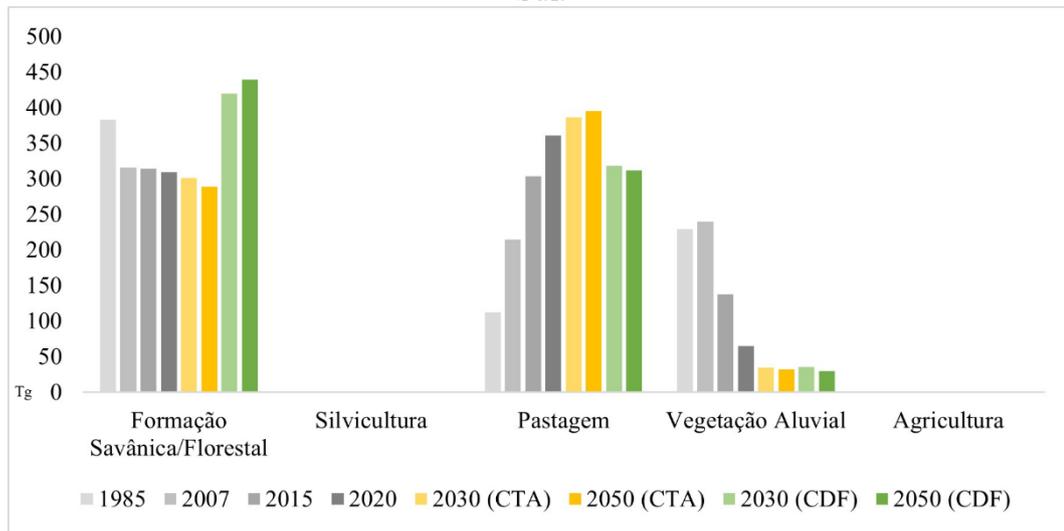


Figura 20 - Gráfico do estoque de carbono por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul.



Em 1985, o mapa indica distribuição relativamente homogênea do estoque de carbono, com predominância de áreas com estoques de carbono intermediários a altos, especialmente nas regiões centrais e ao longo das margens dos corpos d'água. As áreas mais escuras representam as zonas com maior densidade de carbono, sugerindo a vegetação nativa bem preservada que desempenha papel importante no sequestro de carbono. Até 2007, observa-se uma leve intensificação na densidade de carbono em algumas áreas, com as regiões centrais mantendo altos estoques de carbono. No entanto, pequenas zonas de menor densidade começam a aparecer, especialmente nas regiões periféricas, indicando possível degradação ou conversão de áreas naturais para outros usos. Ainda assim, o mapa mostra que grande parte do Pantanal preservou sua capacidade de armazenamento de carbono.

Em 2015, o padrão de distribuição do carbono torna-se mais fragmentado, com maior dispersão de áreas de menor densidade de carbono. As regiões que anteriormente apresentavam altos estoques começam a mostrar sinais de degradação. As áreas centrais ainda retêm uma boa parte do estoque de carbono, mas há evidente redução nas regiões mais ao norte e ao sul do Pantanal. O mapa de 2020 confirma a tendência observada em 2015, com a continuação da fragmentação das áreas de alto estoque de carbono. A perda de densidade de carbono nas regiões periféricas é mais pronunciada, e as áreas de maior densidade são mais isoladas. Isso sugere que as pressões antrópicas sobre o Pantanal, como o desmatamento e a conversão para pastagens, podem estar contribuindo para essa redução na capacidade de sequestro de carbono.

Nos cenários CTA para 2030 e 2050, a continuidade da degradação é evidente. Em 2030, há uma diminuição notável nas áreas de alta densidade de carbono, especialmente nas regiões centrais, com expansão das áreas de menor densidade. Essa tendência se intensifica em 2050, onde o mapa mostra a predominância de áreas de baixa densidade de carbono. Isso indica que, sem mudanças significativas nas políticas de manejo e conservação, o Pantanal poderá sofrer perda substancial de sua capacidade de sequestro de carbono ao longo das próximas décadas. Entretanto, os cenários de Desenvolvimento Florestal (CDF) para 2030 e 2050 apresentam a visão otimista. Em 2030, há preservação e recuperação das áreas de alta densidade de carbono, especialmente nas regiões centrais. Essa tendência continua em 2050, com maior conectividade e expansão das áreas de alta densidade de carbono. Isso sugere que práticas de manejo sustentável e políticas de conservação podem efetivamente aumentar a capacidade de sequestro de carbono no Pantanal, revertendo a tendência de degradação observada no CTA.

Os resultados indicam que, entre 1985 e 2020, o Pantanal de Mato Grosso do Sul obteve uma fragmentação gradual das áreas de alto estoque de carbono, especialmente nas regiões periféricas. Contudo, as projeções futuras destacam a importância das políticas de manejo e conservação.

### 5.3.2 Sequestro de carbono

A Tabela 19 apresenta os dados de sequestro de carbono por classe no Pantanal de Mato Grosso do Sul para os períodos de 1985 a 2007, 2007 a 2015, e 2015 a 2020.

Tabela 19 - Sequestro de carbono entre 1985 e 2020 por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul.

Sequestro	1985 – 2007	2007 – 2015	2015 – 2020
	Tg	Tg	Tg
Água	-19,63	-6,23	-5,14
Influência Urbana	-0,06	-0,02	-0,01
Formação Savânica/Florestal	19,59	13,78	6,26
Silvicultura	-	0,0006	-0,000001
Pastagem	-39,74	-43,37	-29,73
Vegetação Aluvial	87,36	20,30	8,65
Agricultura	-0,22	-0,06	-0,04
<b>Total</b>	<b>47,30</b>	<b>-15,60</b>	<b>-20,02</b>

Durante o período de 1985 a 2007, o Pantanal de Mato Grosso do Sul experimentou sequestro total de carbono positivo, totalizando 47,30 Tg. Esse ganho é predominantemente atribuído à classe de Vegetação Aluvial, que sequestrou 87,36 Tg de carbono. Este aumento reflete a expansão das áreas úmidas durante esse período. A Formação Savânica/Florestal apresentou sequestro positivo de 19,59 Tg, indicando aumento substancial de carbono.

No período de 2007 a 2015, observou-se a inversão no balanço total de sequestro de carbono, que passou a ser negativo, com perda de -15,60 Tg. Essa mudança é fortemente influenciada pela classe de Pastagem, que apresentou perda significativa de -43,37 Tg de carbono, refletindo degradação acentuada dessas áreas, possivelmente devido a mudanças hidrológicas ou desmatamento ligado à conversão para outros usos da terra. A Formação Savânica/Florestal apresentou aumento de carbono, com sequestro de 3,78 Tg.

Entre 2015 e 2020, o sequestro total de carbono manteve-se negativo, com perda total de -20,02 Tg. As classes de Vegetação Aluvial e Formação Savânica/Florestal continuaram a apresentar sequestro significativo de carbono, com valores de 8,65 Tg e 6,26 Tg, respectivamente. A classe de Pastagem afetou negativamente com -29,73 Tg de sequestro de carbono, valor que teve destaque para a perda de carbono no período.

Entre 1985 e 2020, os resultados relativos ao sequestro de carbono no Pantanal de Mato Grosso do Sul evidenciam uma dinâmica complexa que confirma as expectativas previamente estabelecidas. As áreas de pastagem, como esperado, apresentaram impacto negativo no balanço de carbono, enquanto as classes de Formação Savânica/Florestal e Vegetação Aluvial registraram ganhos expressivos, refletindo processos previstos de resiliência ecológica e a manutenção de serviços ecossistêmicos nessas formações naturais.

A Tabela 20 apresenta as projeções de sequestro de carbono para os cenários futuros de 2030 e 2050 no Pantanal de Mato Grosso do Sul, considerando dois cenários distintos: CTA e CDF.

Tabela 20 - Sequestro de carbono entre 2020 e 2050 por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul.

Sequestro	CTA	CTA	CDF	CDF
	2020 – 2030	2030 – 2050	2020 – 2030	2030 – 2050
	Tg	Tg	Tg	Tg
Água	-0,04	-0,01	-1,58	-0,96
Influência Urbana	-0,02	-0,002	-0,01	0,00

Formação				
Savânica/Florestal	0,27	3,05	46,08	23,54
Silvicultura	0,00	0,00005	0,00	0,00006
Pastagem	-14,69	-9,39	-7,25	-16,49
Vegetação Aluvial	1,64	0,37	1,57	0,37
Agricultura	-0,02	-0,03	-0,04	-0,03
<b>Total</b>	<b>-12,86</b>	<b>-6,02</b>	<b>38,78</b>	<b>6,43</b>

Sob o CTA, o sequestro total de carbono projetado foi negativo tanto entre 2020 e 2030, quanto entre 2030 e 2050, com valores de -12,86 Tg e -6,02 Tg, respectivamente. Esses resultados indicam continuidade na degradação das áreas naturais do Pantanal, com a Formação Savânica/Florestal continuando com a projeção de queda com 0,25 Tg entre 2020 e 2030, porém com aumento até 2050, atingindo 3,05 Tg. A Vegetação Aluvial enfrenta quedas significativas no CTA, com projeção de 1,64 Tg entre 2020 e 2030 e redução para 0,37 Tg entre 2030 e 2050. A classe de Pastagem apresenta sequestro negativo de -14,69 Tg entre 2020 e 2030, mas demonstra aumento entre 2030 e 2050, com projeção de apenas -9,39 Tg. A Silvicultura e a Agricultura apresentam impactos mínimos no sequestro de carbono, com variações relativamente pequenas ao longo do período.

O CDF demonstrou sequestro total de carbono positivo, especialmente entre 2020 e 2030, com 38,78 Tg. Isso é impulsionado por um aumento significativo no sequestro de carbono na Formação Savânica/Florestal, que se projeta para sequestrar 46,08 Tg entre 2020 e 2030, embora esse valor reduza para 23,54 Tg entre 2030 e 2050. A classe de Pastagem, por outro lado, apresenta sequestro negativo no cenário CDF, com projeção de -7,25 Tg entre 2020 e 2030 e queda para -16,49 Tg entre 2030 e 2050. A Agricultura e a Silvicultura permanecem com contribuições relativamente pequenas, com ligeiras perdas de carbono projetadas.

As projeções para os cenários futuros no Pantanal de Mato Grosso do Sul destacam a importância crítica das políticas de manejo e conservação. O CTA prevê a continuação das perdas de carbono, sugerindo que as práticas atuais de uso da terra não são suficientes para mitigar os impactos ambientais. Contudo, o CDF oferece a visão mais positiva, com potencial para aumentar significativamente o sequestro de carbono, especialmente nas áreas de Formação Savânica/Florestal.

A Figura 21 ilustra o sequestro de carbono no Pantanal de Mato Grosso do Sul para diferentes períodos entre 1985 e 2050, incluindo as projeções para os cenários CTA e CDF, sendo representado por classe no gráfico da Figura 22.

Figura 21 - Sequestro de carbono total no Pantanal de Mato Grosso do Sul.

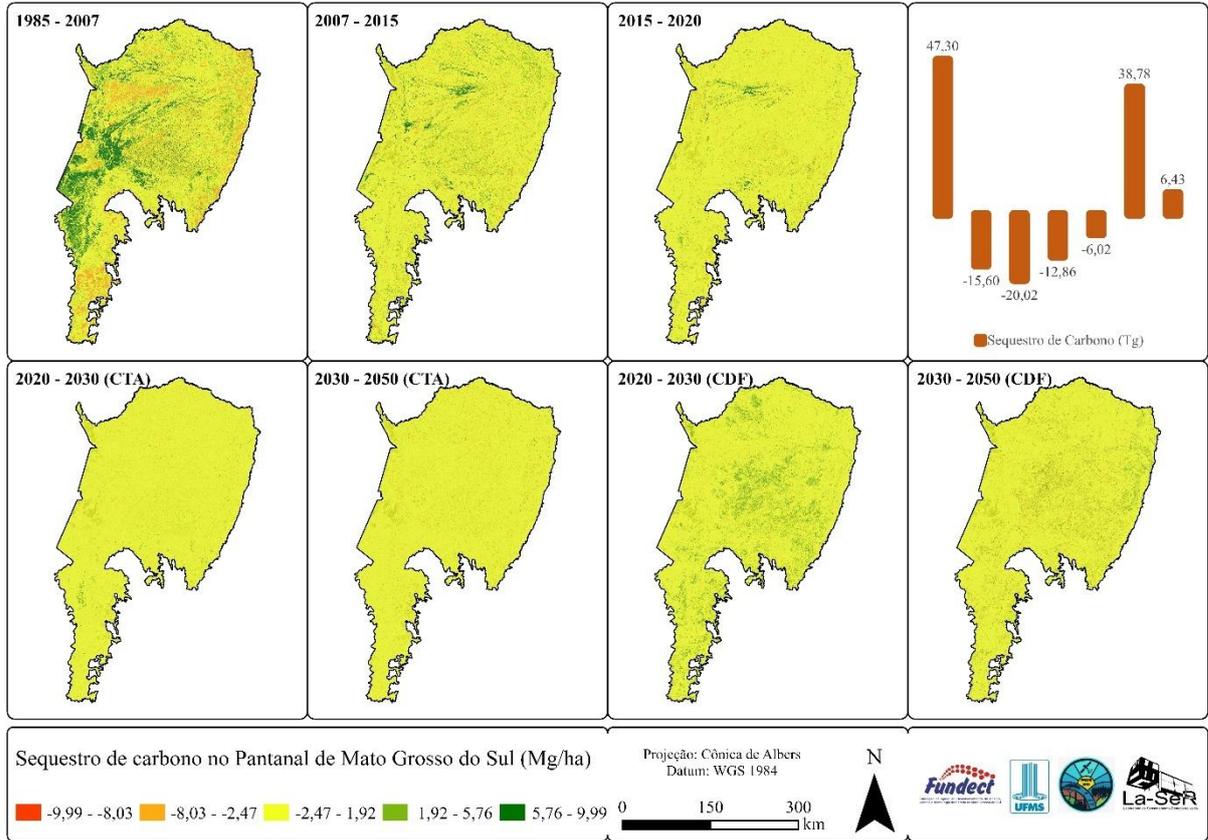
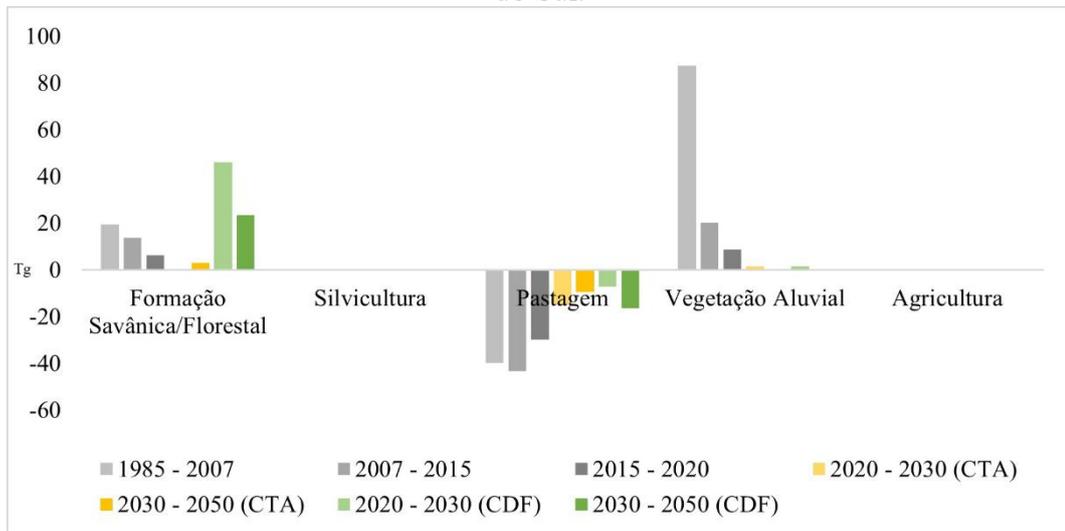


Figura 22 - Gráfico do sequestro de carbono por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul.



Entre 1985 e 2007, o sequestro de carbono no Pantanal apresenta distribuição espacial relativamente diversificada, com áreas significativas de sequestro positivo, especialmente nas regiões central e sul do bioma. Esse período inicial mostra variação considerável, sugerindo que diferentes práticas de uso da terra estavam em operação, resultando tanto em sequestro quanto em liberação de carbono em várias partes do Pantanal.

No período de 2007 a 2015, observa-se uma redução nas áreas de sequestro positivo, com a maior parte do Pantanal apresentando uma estabilização ou leve redução no sequestro de carbono. Isso indica uma mudança nas práticas de manejo ou uma maior pressão antrópica, que pode ter reduzido a capacidade de certas áreas de continuar sequestrando carbono de maneira eficaz.

Entre 2015 e 2020, a tendência de redução no sequestro de carbono se intensifica, com a maioria do Pantanal mostrando uma capacidade muito limitada de sequestrar carbono. As áreas de sequestro positivo tornam-se mais esparsas, e regiões anteriormente robustas em termos de sequestro de carbono começam a mostrar sinais de degradação.

Para o período de 2020 a 2030, sob CTA, há continuidade dessa tendência de degradação, com grandes áreas do Pantanal mostrando sequestro de carbono muito reduzido ou até mesmo negativo. Essa distribuição espacial indica que, sem intervenções significativas, o Pantanal poderá perder ainda mais de sua capacidade de sequestrar carbono, exacerbando os efeitos das mudanças climáticas.

Por outro lado, o CDF para 2020 a 2030 apresentou resultados promissores para o sequestro de carbono. Observa-se uma recuperação considerável nas áreas de sequestro positivo, especialmente nas regiões central e sul do Pantanal, sugerindo que práticas de manejo florestal sustentáveis poderiam reverter parte das tendências negativas observadas em cenários anteriores. No entanto, mesmo sob este cenário, ainda existem áreas que apresentam sequestro negativo, o que aponta para desafios persistentes na recuperação total do bioma.

As projeções para 2030 a 2050 mostram a continuidade das tendências observadas no início da década de 2030. Sob o cenário CTA, o Pantanal continua a mostrar a capacidade limitada de sequestro de carbono, com vastas áreas apresentando valores próximos a zero ou negativos. No entanto, no cenário CDF, há uma manutenção da recuperação observada no início da década, com áreas substanciais continuando a mostrar sequestro positivo, embora a extensão e a intensidade dessas áreas sejam menores em comparação ao período de 2020 a 2030.

### 5.3.3 Valoração do sequestro de carbono

A Tabela 21 apresenta a análise do Valor Presente Líquido (VPL) do carbono sequestrado no Pantanal de Mato Grosso do Sul, expresso em dólares americanos, com base na taxa de desconto e no valor social do carbono, conforme a metodologia proposta por Ricke *et al.* (2018). O VPL foi calculado para diferentes períodos temporais, abrangendo desde 1985 até projeções para 2050, permitindo uma comparação ao longo do tempo e sob diferentes condições de manejo da terra.

Tabela 21 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 1985 e 2020 por classe de UCT no Pantanal de Mato Grosso do Sul.

Classe	1985 – 2007	2007 – 2015	2015 – 2020
	US\$	US\$	US\$
Água	-467,59	-149,26	-123,20
Influência Urbana	-1,39	-0,46	-0,27
Formação Savânica/Florestal	466,69	329,88	149,99
Silvicultura	-	0,01	-0,00003
Pastagem	-946,82	-1.038,34	-712,57
Vegetação Aluvial	2.081,24	486,06	207,22
Agricultura	-5,29	-1,47	-0,98
<b>Total</b>	1.126,85	-373,58	-479,79

Entre 1985 e 2007, o VPL registrado foi positivo, totalizando 1,126 bilhões de dólares, sugerindo que as práticas de manejo adotadas durante esse período favoreceram o sequestro de carbono, gerando significativo benefício econômico. Esse resultado indica que o Pantanal atuou como importante sumidouro de carbono, contribuindo positivamente para a mitigação das mudanças climáticas e agregando valor econômico à região.

Entretanto, nos períodos subsequentes, de 2007 a 2015 e de 2015 a 2020, o VPL apresentou uma reversão drástica, com valores negativos de -373,58 milhões de dólares e -479,79 bilhões de dólares, respectivamente.

Esses resultados apontam para a deterioração significativa na capacidade do Pantanal de sequestrar carbono, possivelmente devido ao aumento do desmatamento, degradação das áreas naturais e conversão de terras para usos que não favorecem o sequestro de carbono. A perda de valor econômico associada a essas mudanças destaca os impactos negativos das práticas de manejo inadequadas e das alterações no uso da terra, que contribuíram para a diminuição da eficiência do Pantanal como sumidouro de carbono.

A seguinte Tabela 22 apresenta o VPL do sequestro de carbono por classe nos cenários futuros dos períodos de 2020 a 2050 para o Pantanal.

Tabela 22 - Valoração do sequestro de carbono em milhões entre 2020 e 2050 por classe de UCT em milhões no Pantanal de Mato Grosso do Sul.

Classe	CTA		CDF	
	2020 – 2030	2030 – 2050	2020 – 2030	2030 – 2050
	US\$	US\$	US\$	US\$
Água	-1,05	-0,33	-37,71	-22,89
Influência Urbana	-0,46	-0,05	-0,31	-0,09
Formação Savânica/Florestal	6,53	72,64	1102,55	561,34
Silvicultura	-	0,001	-	0,001
Pastagem	-351,47	-223,80	-173,46	-393,19
Vegetação Aluvial	39,27	8,84	37,59	8,91
Agricultura	-0,47	-0,81	-0,95	-0,78
<b>Total</b>	<b>-307,65</b>	<b>-143,52</b>	<b>927,72</b>	<b>153,30</b>

Para o período de 2020 a 2030, sob o CTA, as projeções indicam a continuidade da tendência negativa, com perda estimada de -307,65 milhões de dólares. Esse valor reflete a insuficiência das práticas de manejo correntes para reverter ou mitigar a degradação contínua das capacidades de sequestro de carbono no Pantanal. No período subsequente, de 2030 a 2050, ainda sob o cenário CTA, o VPL projetado revela a redução na magnitude da perda, alcançando -143,52 milhões de dólares, sugerindo possível estabilização, embora ainda represente perda econômica substancial.

Em contrapartida, o CDF apresenta perspectiva substancialmente melhor. Entre 2020 e 2030, o VPL projetado é positivo, totalizando 927,72 milhões de dólares, indicando que a adoção de práticas de manejo florestal sustentáveis poderia reverter a degradação e restaurar a capacidade do Pantanal de sequestrar carbono, gerando benefício econômico considerável. Para o período de 2030 a 2050, embora o VPL sob o cenário CDF se reduza para 153,30 milhões de dólares, ele ainda permanece positivo, sugerindo que a continuidade dessas práticas sustentáveis pode garantir ganhos econômicos e ambientais a longo prazo.

Desse modo, tona-se evidente a urgência de adotar estratégias sustentáveis de manejo da terra para potencializar os benefícios ambientais e econômicos, assegurando a preservação do Pantanal e sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas.

#### 5.4 DINÂMICA DE CARBONO NO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL

A introdução da Silvicultura na região leste do Estado de Mato Grosso do Sul, gerou um impacto significativo para o estoque de carbono para o bioma Cerrado, que teve aumento principalmente a partir de 2015 e em ambos os anos do Cenário de Tendências Atuais. Questão também presente em Bacani *et al.* (2024), em que demonstra as alterações no UCT em que as áreas de monocultivo de Silvicultura passam a ocupar áreas que posteriormente havia pastagens, revertendo o cenário do carbono no município de Três Lagoas.

A dinâmica da Pastagem do UCT no Estado de Mato Grosso do Sul é apresentada de forma expressiva, sendo predominante na área entre os anos de 1985 e 2020 (Silva, 2024). O valor em armazenamento de carbono acima do solo e no solo é relativamente mais baixo em relação às outras classes de UCT, porém a classe teve grande destaque no estoque de carbono em todos os biomas do Estado, possuindo relação com sua predominância.

No estoque de carbono no Cerrado houve um destaque para a classe de Pastagem, com o aumento de 711,85 Tg em 1985, para 858,62 Tg em 2007, resultando no sequestro negativo de -76,49 Tg. A classe manteve queda gradual nos anos seguintes que se estende para ambos os cenários futuros, mantendo o sequestro negativo, porém de forma menos expressiva. A queda no estoque de carbono nas áreas de pastagem, acompanha o aumento do estoque nas áreas de agricultura, principalmente por monocultivos de soja, milho e cana, e silvicultura principalmente pelo monocultivo de eucalipto, demonstrando também a dinâmica do UCT (Silva, 2024; SEMAGRO, 2022).

As classes Formação Savânica/Florestal e a Vegetação Aluvial desempenham um importante papel no estoque de carbono, em sua maioria apresentando valores positivos no sequestro e valoração do carbono para o Estado. Entretanto, as classes demonstraram grande perda de área e biodiversidade, registrada principalmente no período entre 1985 e 2007, fator que reduz a capacidade de armazenamento de carbono, podendo afetar sua dinâmica ecossistêmica (Weiskopf *et al.*, 2024).

Pereira *et al.* (2020) destaca a importância do estabelecimento de áreas protegidas e estratégias de conservação que visam estimular a biodiversidade e sobrevivência da vegetação como as melhores opções para manter o estoque de carbono. Questão presente no cenário de desenvolvimento florestal, que demonstra o desenvolvimento de corredores ecológicos entre os biomas no Estado, sendo de grande relevância na redução de impactos da fragmentação florestal, resiliência dos ecossistemas e conservação da biodiversidade, contribuindo com o

ciclo do carbono (Teixeira; Borges, 2024), a qual está de acordo com a Lei do Pantanal nº 6.160, de 18 de dezembro de 2023 para a recuperação da vegetação nativa.

De acordo com os resultados obtidos no cenário de tendências atuais, as classes que obtiveram aumento de estoque de carbono estão: a Silvicultura (no Cerrado); a Agricultura (no Cerrado e Mata Atlântica); e a Pastagem (apenas no Pantanal), reforçando o aumento das áreas voltadas à produção econômica agrossilvipastoril. Entre as classes citadas, apenas a Silvicultura manteve o sequestro positivo, juntamente às classes de Formação Savânica/Florestal e Vegetação Aluvial, as quais sofreram uma queda significativa no estoque de carbono de 2030 para 2050, classes que mantêm importância para contribuir na absorção de carbono (Ribeiro *et al.*, 2023).

No cenário de desenvolvimento florestal destacou-se no Estado de Mato Grosso do Sul a classe Formação Savânica/Florestal, a qual continuou a apresentar aumento no estoque de carbono e o sequestro positivo se manteve positivo para a classe em todos os períodos, demonstrando a eficiência da Formação Savânica/Florestal na absorção de carbono (Kerdan *et al.*, 2019; Schulz *et al.*, 2016). Foram apresentados resultados inferiores de estoque de carbono para o ano de 2050 em comparação a 2030 nos biomas Pantanal e Mata Atlântica, resultando na diminuição do sequestro. O CDF segue de acordo com a abrangência da legislação brasileira, se apresentando como um cenário mais benéfico para um desenvolvimento sustentável no Estado quando relacionado ao CTA.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na análise do estoque e sequestro de carbono em Mato Grosso do Sul, abrangendo tanto os dados históricos quanto as projeções para cenários futuros, fornecem evidências que confirmam, em grande parte, a hipótese inicial formulada. A premissa de que as mudanças no uso e cobertura da terra, impulsionadas pela expansão agropecuária e pela silvicultura, têm influenciado significativamente o estoque e o sequestro de carbono no Estado foi corroborada pelos dados que indicam uma redução expressiva no estoque de carbono em áreas críticas, como as de Formação Savânica/Florestal e Vegetação Aluvial. A expansão dessas atividades econômicas, sem o devido manejo sustentável, resultou em uma diminuição na capacidade dos biomas de atuar como sumidouros de carbono, com consequências negativas refletidas tanto nas perdas de carbono quanto na deterioração do valor econômico associado a esse sequestro.

No entanto, a hipótese também sugeria que a adoção de práticas de manejo sustentável poderia aumentar a capacidade do Estado de mitigar as emissões de carbono, contribuindo para alcançar a meta de neutralidade de carbono até 2030. Os cenários projetados no modelo de CDF oferecem um forte suporte para essa parte da hipótese. Sob o CDF, observou-se um aumento no estoque e sequestro de carbono em comparação com as tendências atuais, indicando que práticas de manejo florestal sustentável, se implementadas de maneira eficaz, têm o potencial de reverter as tendências negativas e de aumentar a capacidade do Estado de Mato Grosso do Sul de contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas.

Especificamente, a análise do estoque e sequestro de carbono no Estado de Mato Grosso do Sul, revela padrões preocupantes e destaca a importância das escolhas de manejo e políticas ambientais que serão adotadas nos próximos anos. Os resultados demonstram uma tendência geral de redução no estoque de carbono em diversas áreas do Estado, particularmente nas áreas de Formação Savânica/Florestal e Vegetação Aluvial, onde a conversão de áreas naturais para pastagem e agricultura e a degradação das terras têm levado a uma diminuição substancial na capacidade de armazenamento de carbono. Essa tendência de declínio no estoque de carbono foi especialmente notável no Pantanal, onde a continuidade do desmatamento e a pressão antrópica contribuíram para a perda de áreas de alta densidade de carbono.

No que diz respeito ao sequestro de carbono, os dados sugerem uma dinâmica igualmente preocupante. O Estado de Mato Grosso do Sul experimentou uma inversão de captura para emissão de CO<sub>2</sub> ao longo dos últimos anos, indicando uma redução na capacidade

dos biomas de sequestrar carbono de forma eficaz. A degradação das áreas naturais, combinada com a expansão de atividades agropecuárias, reduziu a capacidade dos ecossistemas de atuar como sumidouros de carbono, resultando em perdas expressivas que se refletem tanto no Valor Presente Líquido (VPL) quanto na contribuição desses biomas para a mitigação das mudanças climáticas.

As simulações para os cenários futuros oferecem uma visão contrastante entre as tendências atuais e as possibilidades de um manejo mais sustentável. Sob o cenário de Tendências Atuais (CTA), as projeções indicam a continuidade das perdas de carbono, sugerindo que, sem mudanças significativas nas práticas de uso da terra, o Estado poderá enfrentar uma degradação contínua de suas capacidades de sequestro de carbono. Em contrapartida, o cenário de Desenvolvimento Florestal (CDF) projeta uma recuperação potencial, onde práticas de manejo florestal sustentável poderiam estabilizar e aumentar o estoque de carbono, especialmente nas áreas mais vulneráveis. Essa recuperação é essencial para reverter as perdas observadas nas últimas décadas e para assegurar que os biomas de Mato Grosso do Sul possam continuar a desempenhar um papel vital na regulação climática.

Conclui-se que o futuro do Estado de Mato Grosso do Sul, em termos de sua capacidade de sequestro e estoque de carbono, depende criticamente das decisões políticas e de manejo que forem tomadas. A continuidade das práticas atuais poderá levar a uma degradação contínua e a perdas econômicas e ambientais substanciais. Por outro lado, a adoção de estratégias de manejo sustentável, conforme sugerido pelas projeções do cenário CDF, oferece uma oportunidade de recuperação, contribuindo para a preservação dos ecossistemas e mitigação das mudanças climáticas. Estes achados reforçam a necessidade urgente de implementar políticas de conservação e manejo adaptativas, que amplifiquem os benefícios ambientais e econômicos, garantindo a sustentabilidade e a resiliência dos biomas de Mato Grosso do Sul a longo prazo.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABDO, Z. A.; PRAKASH, S. **Modeling urban dynamics and carbon sequestration in Addis Ababa, Ethiopia, using satellite images**. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 14, n. 6, p. 1-8, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06726-y>.
- ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; DOS REIS JÚNIOR, F. B. **Os grandes ciclos biogeoquímicos do planeta**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.
- ANWAR, M. N. *et al.* **Sources of Carbon Dioxide and Environmental Issues**. In: INAMUDDIN, ASIRI, A., LICHTFOUSE, E. (eds) *Sustainable Agriculture Reviews 37*. *Sustainable Agriculture Reviews*, v. 37. Springer, Cham. 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29298-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29298-0_2).
- ASIF, M. *et al.* **Modelling of land use and land cover changes and prediction using CA-Markov and Random Forest**. *Geocarto International*, v. 38, n. 1, p. 2210532, 2023. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2210532>.
- BACANI, V. M. *et al.* **Carbon storage and sequestration in a eucalyptus productive zone in the Brazilian Cerrado, using the Ca-Markov/Random Forest and InVEST models**. *Journal of Cleaner Production*, v. 444, p. 141291, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141291>.
- BACANI, V. M.; VICK, E. P. **Future scenario prediction using cellular automata and Markov Chain in expansion area of forestry over brazilian Cerrado**. *Mercator, Fortaleza*, v. 18, 2019. <https://doi.org/10.4215/rm2019.e18026>.
- BRASIL. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021 Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.119-de-13-de-janeiro-de2021-98899394>. Acesso em: 17 set. 2021.
- BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2023-2026/2024/Lei/L15042.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L15042.htm).
- CARVALHO, J. L. N. *et al.* **Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 277-290, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001>.
- CONGALTON, R. G. **A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data**. *Remote Sensing of Environment*, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B).
- CUNHA, E. R. *et al.* **Mapping LULC types in the Cerrado-Atlantic Forest ecotone region using a Landsat time series and object-based image approach: A case study of the Prata**

**River Basin, Mato Grosso do Sul, Brazil.** Environmental monitoring and assessment, v. 192, n. 2, p. 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8093-9>.

DHAKAL, S. *et al.* **Emissions Trends and Drivers** (Chapter 2). In: IPCC 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Eds.* SHUKLA, A.R. *et al.*, p. 215-294 Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.004>.

Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Serviços ambientais.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-servicos-ambientais/sobre-o-tema>. Acesso em: 14 mar. 2023.

FAN, M.; CHEN, L. **Spatial characteristics of land uses and ecological compensations based on payment for ecosystem services model from 2000 to 2015 in Sichuan Province, China.** Ecological informatics, v. 50, p. 162-183, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.01.001>.

FERNANDES, M. M. *et al.* **Assessment of land use and land cover changes and valuation of carbon stocks in the Sergipe semi-arid region, Brazil: 1992–2030.** Land use policy, v. 99, p. 104795, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104795>.

FERNANDES, M. M. *et al.* **Land use and land cover changes and carbon stock valuation in the São Francisco river basin, Brazil.** Environmental Challenges, p. 100247, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100247>.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais.** 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto.** São Paulo: Oficina de textos, 2007.

FUJISAKA, S. *et al.* **The effects of forest conversion on annual crops and pastures:: Estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon colony.** Agriculture, ecosystems & environment, v. 69, n. 1, p. 17-26, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(98\)00091-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00091-7).

GALDINO, S. *et al.* **InVEST - Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs.** In: TOSTO, S. G.; PEREIRA, L. C.; GOMES, M. A. F.; RODRIGUES, J. A. (ed.). **Serviços ecossistêmicos e serviços ambientais de solo, água e carbono - Amazônia.** Brasília, DF: Embrapa, 2023. cap. 9. p. 201-210.

GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL. Decreto Estadual nº 15.798, de 3 de novembro de 2021. Disponível em: <http://aacpdappls.net.ms.gov.br/appls/legislacao/secoge/govato.nsf/fd8600de8a55c7fc04256b210079ce25/06560da2a430588c042587840043f077>.

GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL. Decreto nº 15.798, de 3 de novembro de 2021.

GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL. Lei nº 6.160, de 18 de dezembro de 2023. Dispõe sobre a conservação, a proteção, a restauração e a exploração ecologicamente sustentável da Área de Uso Restrito da Planície Pantaneira (AUR-Pantanal) e cria o Fundo Estadual de Desenvolvimento Sustentável do Bioma Pantanal. Publicada no Diário Oficial nº 11.355, de 19 de dezembro de 2023, páginas 2 a 15. Regulamentada pelo Decreto nº 16.556, de 6 de fevereiro de 2025.

GUERRA, A. *et al.* **The importance of Legal Reserves for protecting the Pantanal biome and preventing agricultural losses.** Journal of environmental management, v. 260, p. 110128, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110128>.

HASIRCI, V.; HASIRCI, N. **Carbon as a Biomaterial.** In: Fundamentals of Biomaterials. Springer, New York, NY. 2018. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8856-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8856-3_6).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades.** Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ms/panorama>> Acesso em: 03 jan. 2022.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry.** In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. 2007.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.** Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan. 2003, ISBN 4-88788-003-0

IPCC. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** In: Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds). IPCC RenovaBio National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan, p. 664, 2006.

KERDAN, I. G. *et al.* **Carbon Sequestration Potential from Large-Scale Reforestation and Sugarcane Expansion on Abandoned Agricultural Lands in Brazil.** Polytechnica, v. 2, n. 1, p. 9-25, 2019. <https://doi.org/10.1007/s41050-019-00012-3>.

KERDAN, I. G.; GIAROLA, S.; HAWKES, A. **A novel energy systems model to explore the role of land use and reforestation in achieving carbon mitigation targets: A Brazil case study.** Journal of Cleaner Production, v. 232, p. 796-821, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.345>.

LIANG, X. *et al.* **Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China.** Computers, Environment and Urban Systems, v. 85, p. 101569, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569>.

LU, A. H.; BAO, X. **Carbon in the catalysis community.** ChemCatChem, v. 7, n. 18, p. 2724-2725, 2015. <https://doi.org/10.1002/cctc.201500953>.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomass – Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Disponível em: <http://mapbiomas.org/>. Acesso em: 30 abr. 2022.

MARTINS, L. F. B. N. *et al.* **Soil carbon stock in different uses in the southern cone of Mato Grosso do Sul.** Revista de Agricultura Neotropical, v. 7, n. 4, p. 86-94, 2020. <https://doi.org/10.32404/rean.v7i4.5351>.

MATHEWOS, M.; LENCHA, S. M.; TSEGAYE, M. **Land use and land cover change assessment and future predictions in the Matenchose Watershed, Rift Valley Basin, using CA-Markov simulation.** Land, v. 11, n. 10, p. 1632, 2022. <https://doi.org/10.3390/land11101632>.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Acordo de Paris.** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/acordo-de-paris>. Acesso em: 20 abr. 2024.

MCTIC. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Acordo de Paris e NDC.** 2017. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo\\_paris.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf).

MITEVA, D. A.; KENNEDY, C. M.; BAUMGARTEN, L. Carbon biophysical parameters applied to the Brazilian Cerrado. **The Nature Conservancy**, 2014. Disponível em: [http://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/EcosystemServices/tnc\\_dow\\_collaboration/brazil/Pages/default.aspx](http://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/EcosystemServices/tnc_dow_collaboration/brazil/Pages/default.aspx).

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris.** 2021b. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html#portal-siteactions>. Acesso em: 20 abr. 2024.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Brazil's Forest Reference Emission Level for Reducing Emissions from Deforestation in the Cerrado Biome for Results-Based Payments for REDD+ under the United Nations Framework Convention on Climate Change.** Brasília, DF, Brazil. 2017. Disponível em: [https://redd.unfccc.int/media/brazil\\_frel-cerrado-en-20160106-final.pdf](https://redd.unfccc.int/media/brazil_frel-cerrado-en-20160106-final.pdf). Acesso em: 15 dez. 2023.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Protocolo de Quioto.** 2021a. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html#startOfPageId306>. Acesso em: 20 abr. 2024.

NOVO, E. M. **Sensoriamento remoto: Princípios e Aplicações.** São Paulo: Edgard Blücher, 2008.

ODUM, H. T. **Systems Ecology: and Introduction.** New York: Wiley, 1983.

OLIVEIRA, P. P. A. **Protocolo para quantificação dos estoques de carbono do solo da rede de pesquisa Pecu.** Embrapa Pecuária Sudeste, 2014.

ONU Brasil. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>

ONU. Assembleia Geral das Nações Unidas. **Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 15 set. 2021.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Acordo de Paris sobre o clima**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima>. Acesso em: 20 abr. 2024.

PEREIRA, K. M. G. *et al.* **Protection status as determinant of carbon stock drivers in Cerrado sensu stricto**. *Journal of Plant Ecology*, v. 13, n. 3, p. 361-368, 2020. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtaa024>.

QUINTANA, A. C.; HACON, V. **O desenvolvimento do capitalismo e a crise ambiental**. *O social em questão*, n. 25/26, p. 427-444, 2011.

RICKE, K. *et al.* **Country-level social cost of carbon**. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 10, p. 895-900, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0282-y>.

ROSA, R. **Geotecnologias na Geografia aplicada**. *Revista do Departamento de Geografia*, [S. l.], v. 16, p. 81-90, 2011. <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0009>.

SANO, E. E. *et al.* **Mapeamento de cobertura vegetal do bioma Cerrado: estratégias e resultados**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007.

SCHULZ K. *et al.* **Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil**. *Forest Ecology and Management*, v. 367, p. 62-70, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.01>.

SEMAGRO. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Produção e Agricultura Familiar. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Mato Grosso do Sul: 2017-2018**. Governo do Estado de Mato Grosso do Sul – SEMAGRO/IMASUL. 2022. Disponível em: [www.semadesc.ms.gov.br/inventario-gee-ms/](http://www.semadesc.ms.gov.br/inventario-gee-ms/).

SEMENOV, S. M. **Greenhouse Effect and Modern Climate**. *Russ. Meteorol. Hydrol.* v. 47, p. 725–734, 2022. <https://doi.org/10.3103/S1068373922100016>.

SHARP, R. *et al.* **InVEST User's Guide**. Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2020. 308 p.

SHAYA, J.; SROUR, H.; KARAME, I. **Introductory Chapter: An Outline of Carbon Dioxide Chemistry, Uses and Technology**. InTech. 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79461>.

SILVA, B. H. M. **Modelagem preditiva do uso e cobertura da terra do Estado de Mato Grosso Sul, Brasil**. 2024. Dissertação (Mestrado) – Curso de Geografia, Universidade de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/8715>.

SILVA, J. S. V. *et al.* **Projeto GeoMS: Cobertura vegetal e uso da terra do Estado de Mato Grosso do Sul**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2011.

SOEDER, D. J. **Greenhouse gas sources and mitigation strategies from a geosciences perspective.** *Advances in Geo-Energy Research*, v. 5, n. 3, p. 245-260, 2021. <https://doi.org/10.46690/ager.2021.03.04>.

SOUZA JR, C. M. *et al.* **Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine.** *Remote Sensing*, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.

STAPE J. L., BINKLEY D., RYAN M. G. **Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations.** *Forest Ecology and Management*, v. 255, n. 3-4, p. 920-930, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.085>.

TEIXEIRA, J. A; BORGES, F. F. **A importância de corredores ecológicos para a preservação da biodiversidade.** *Simpósio de Tecnologia Fatec Jaboticabal*, v. 4, n. 1, p. e4109-e4109, 2024. <https://doi.org/10.52138/sitec.v4i1.364>.

TURNER, D. P. *et al.* **Estimating the terrestrial carbon pools of the former Soviet Union, conterminous US, and Brazil.** *Climate Research*, v. 9, n. 3, p. 183-196, 1998 <https://doi.org/10.3354/cr009183>.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.** 1998. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2024.

UNFCCC. **Kyoto Protocol.** 2020. Disponível em: [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol). Acesso em: 19 jan. 2024.

VICK, E. P. *et al.* **Dynamic environmental zoning using the CA–Markov model and multicriteria analysis in a Brazilian Cerrado Watershed.** *Ecological Indicators*, v. 167, p. 112598, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112598>.

WADANAMBI, R. T. *et al.* **The effects of industrialization on climate change.** *J. Res. Technol. Eng.*, v. 1, n. 4, p. 86-94, 2020.

WALKER, J. C. G. **Biogeochemical Cycles of Carbon on a Hierarchy of Time Scales.** In: Oremland, R.S. (eds) *Biogeochemistry of Global Change.* Springer, Boston, MA. 1993. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2812-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2812-8_1).

WALKER, W. *et al.* **Guia de campo para estimativa de biomassa florestal e estoque de carbono.** Centro de Pesquisas Woods Hole, Massachusetts, p. 1-72, 2011.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. **An examination of the method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method.** *Soil Science*, Philadelphia, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934.

WEISKOPF, S. R. *et al.* **Biodiversity loss reduces global terrestrial carbon storage.** *Nat Commun* 15, 4354, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47872-7>.

ZHANG, Z. *et al.* **A Random Forest-Based CA-Markov Model to Examine the Dynamics of Land Use/Cover Change Aided with Remote Sensing and GIS.** *Remote Sensing*, v. 15, n. 8, p. 2128, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15082128>.

ZHAO, M. *et al.* **Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models.** *Ecological Indicators*, v. 98, p. 29-38, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.052>.