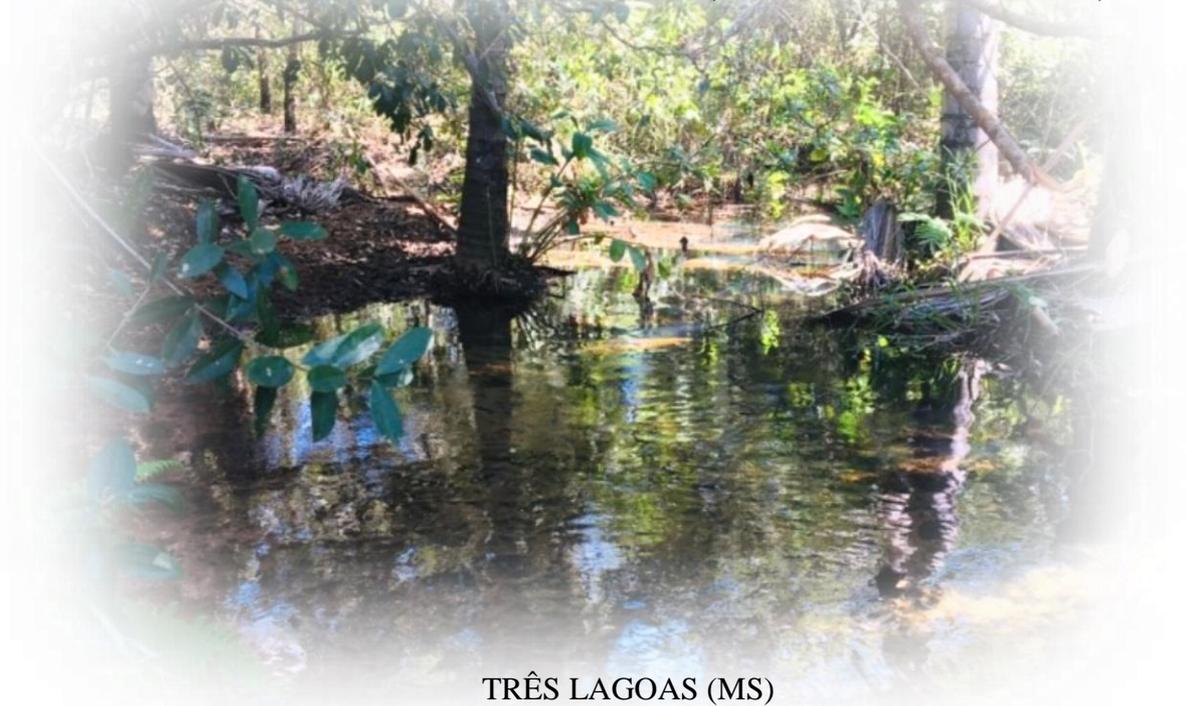




UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
CAMPUS DE TRÊS LAGOAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

BRUNA DIENIFER SOUZA SAMPAIO

**MODELAGEM PREDITIVA, AVALIAÇÃO E VALORAÇÃO DE SERVIÇOS  
ECOSSISTÊMICOS DE ESTOQUE E SEQUESTRO DE CARBONO NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO, MATO GROSSO DO SUL, BRASIL.**



TRÊS LAGOAS (MS)

2023

**BRUNA DIENIFER SOUZA SAMPAIO**

**MODELAGEM PREDITIVA, AVALIAÇÃO E VALORAÇÃO DE SERVIÇOS  
ECOSSISTÊMICOS DE ESTOQUE E SEQUESTRO DE CARBONO NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO, MATO GROSSO DO SUL, BRASIL**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Campus de Três Lagoas, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) para a obtenção do título de Doutora em Geografia. Área de Concentração: **Análise Geoambiental e Produção do Território**. Linha de pesquisa: **Dinâmica Ambiental e Planejamento**.

**Orientador:** Prof. Dr. Vitor Matheus Bacani.

TRÊS LAGOAS (MS)

2023

Ficha de identificação da obra.

SAMPAIO, BRUNA DIENIFER SOUZA

MODELAGEM PREDITIVA, AVALIAÇÃO E VALORAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS DE ESTOQUE E SEQUESTRO DE CARBONO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÔRREGO BEBEDOURO, MATO GROSSO DO SUL, BRASIL. / BRUNA DIENIFER SOUZA SAMPAIO; orientador, Vitor Matheus Bacani, 2023.

237 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus de Três Lagoas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Três Lagoas, 2023.

Inclui referências.

1. Geografia. 2. Serviços ecossistêmicos. 3. Sequestro

de carbono. 4. Sensoriamento remoto. 5. Valoração ambiental. I. , Vitor Matheus Bacani. II. Universidade

Federal de Mato Grosso do Sul. Programa de Pós-Graduação em

Geografia. III. Título.

Bruna Dienifer Souza Sampaio

**MODELAGEM PREDITIVA, AVALIAÇÃO E VALORAÇÃO DE SERVIÇOS  
ECOSSISTÊMICOS DE ESTOQUE E SEQUESTRO DE CARBONO NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO, MATO GROSSO DO SUL, BRASIL**

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

---

Prof. Dr. Edson Luís Piroli  
Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ourinhos, SP

---

Prof. Dr. José Mariano Caccia Gouveia  
Universidade Estadual Paulista – UNESP, Presidente Prudente, SP

---

Prof.a Dr. <sup>a</sup> Patrícia Helena Mirandola Garcia  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, Três Lagoas, MS

---

Prof.a Dr. <sup>a</sup> Taíssa Caroline Silva Rodrigues  
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Imperatriz, MA

---

Dr. Elias Rodrigues da Cunha - UFMS  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, Aquidauana, MS  
(Suplente - Interno)

---

Prof. Dr. Vitor Matheus Bacani  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, Três Lagoas, MS  
Presidente

Três Lagoas (MS), 2023.



Serviço Público Federal  
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



#### ATA DE DEFESA DE TESE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA DOUTORADO

Aos cinco dias do mês de outubro do ano de dois mil e vinte e três, às oito horas, na videoconferência, da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos membros: Vitor Matheus Bacani (UFMS), Elias Rodrigues da Cunha (UFMS), José Mariano Caccia Gouveia (FCT/UNESP), Patricia Helena Mirandola Garcia (UFMS) e Taissa Caroline Silva Rodrigues (UEMASUL), sob a presidência do primeiro, para julgar o trabalho da aluna: **BRUNA DIENIFER SOUZA SAMPAIO**, CPF [redacted] do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Curso de Doutorado, da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, apresentado sob o título "**MODELAGEM PREDITIVA, AVALIAÇÃO E VALORAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS DE ESTOQUE E SEQUESTRO DE CARBONO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO, MATO GROSSO DO SUL, BRASIL.**" e orientação de Vitor Matheus Bacani. O presidente da Banca Examinadora declarou abertos os trabalhos e agradeceu a presença de todos os Membros. A seguir, concedeu a palavra à aluna que expôs sua Tese. Terminada a exposição, os senhores membros da Banca Examinadora iniciaram as arguições. Terminadas as arguições, o presidente da Banca Examinadora fez suas considerações. A seguir, a Banca Examinadora reuniu-se para avaliação, e após, emitiu parecer expresso conforme segue:

#### EXAMINADOR

Vitor Matheus Bacani - UFMS (Presidente)

Edson Luís Piroli - UNESP (Titular - Externo)

José Mariano Caccia Gouveia - UNESP (Titular - Externo)

Patricia Helena Mirandola Garcia - UFMS (Titular - Interno)

Taissa Caroline Silva Rodrigues - UEMASUL (Titular - Externo)

Frederico dos Santos Gradella - UFMS (Suplente - Interno)

Elias Rodrigues da Cunha - UFMS (Suplente - Interno)

**RESULTADO FINAL: Aprovado.**



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufms.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_externo=0](https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_externo=0), informando o código verificador 4330099 e o código CRC 693BA228.

#### COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Avenida Raulino Marques Leal, 3484

Fone: (67) 3609-3701

CEP 79615-000 - Três Lagoas - MS

*A educação sempre teve papel importante na minha vida, pois através dela é possível alcançar os maiores sonhos e objetivos. Hoje realizo um deles. Foram incontáveis vezes que achei que não conseguiria, mas hoje estou aqui. Este trabalho é dedicado a todo caminho que tive até aqui, a todos que acreditam que só a educação é o caminho. O caminho nem sempre é fácil, mas ele é necessário para dar valor quando chegamos ao seu fim. Essa tese de doutorado é a prova de que nenhum sonho é inalcançável e de que só a educação cria pontes indestrutíveis. As dificuldades foram superadas nessa jornada intensa e repleta de conhecimentos. Sigamos firmes!*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço à toda espiritualidade por me trazer até a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - instituição pública de qualidade permitindo-me pesquisar um tema em que na graduação foi um desafio – o temeroso “Sensoriamento Remoto” e hoje se tornou primordial para execução da presente Tese. Foi uma grande honra integrar como a primeira mulher da primeira turma de doutorado do programa de pós-graduação da UFMS/CPTL.*

*Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Vitor Matheus Bacani por me acolher, por toda paciência, compreensão, contribuição, por acreditar na minha capacidade e dedicação na pesquisa. Além, da orientação excepcional na qual aprendi muito e espero ser uma profissional íntegra e competente como você!*

*Agradeço à minha família, especialmente à minha avó Ednalva Vieira de Souza - “Nalva” (in memoriam) que foi meu porto seguro durante toda a minha vida, o amor mais puro que tive e infelizmente desencarnou antes da defesa da Tese, à minha mãe Rosemare Souza da Conceição pela alegria e orgulho da minha trajetória. À minha irmã Brenda Raiane para que se inspire sempre em busca do conhecimento. Às minhas amigas-irmãs Giovana Batistela, Daniéle e Gabriele Uzelotto, Leticia Nalin, Cler Farias, Thais Santos, Maysa e Camila; ao meu amigo Erasmo Bernardo meu total agradecimento. Também agradeço ao Dr. Luciano Donizeti Varanda, pesquisador do Instituto SENAI de Inovação em Biomassa pelo incentivo, por compartilhar os inúmeros momentos de ansiedade e estresse. Obrigada, pela força e por ser luz em minha trajetória!*

*Aos amigos do Laboratório de Sensoriamento Remoto (LaSER), Prof. Me. Erivelton Vick pela amizade ao longo desses 11 anos e por todo incentivo e apoio durante o processo seletivo – em Três Lagoas (MS), desde a logística ao acolhimento nestes anos. Agradeço, em especial, ao Prof. Bruno Machado pela contribuição nos empasses da pesquisa, principalmente em relação ao auxílio na elaboração do código script no Google Earth Engine. Saiba que você e o “Eri” me deram toda força para prosseguir firme diante às adversidades durante a pandemia na UFMS.*

*Ao Departamento de Pós-graduação em Geografia: à Prof.a Dra. Patricia Mirandola por me inspirar e ser exemplo de mulher com destaque na área de geoprocessamento; ao Profs. Drs. Thiago e Mauro por contribuir com a melhoria do projeto de pesquisa inicial, pelas reflexões ao entorno da temática da pesquisa e pela amizade construtiva. Também agradeço ao Prof. Dr. André L. Pinto pelos ensinamentos no Laboratório de Monitoramento Ambiental – FINEP. Ao Departamento do Curso de Graduação em Geografia, especialmente ao coordenador Prof. Dr. Jodenir, às Prof<sup>as</sup>. Dras. Karina, Valéria, Patrícia, Gislene e Rafaela, pelas orientações na docência universitária como professora substituta e voluntária. Também agradeço aos funcionários e técnicos da UFMS/CPTL, e em especial ao Prof. Dr. Fontoura Santos pelos sábios conselhos e alegria que irradia!*

*Agradeço ao Prof. Dr. Edson Piroli pelas contribuições na banca de qualificação e aos membros da banca de defesa pelas sugestões e melhorias da presente tese!*

*Agradeço aos amigos do Grupo de pesquisa Gestão Ambiental e Dinâmica Socioespacial (GADIS) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) em que tive a honra de conviver durante a graduação e mestrado. Ao Prof. Dr. Cezar Leal pela oportunidade de adentrar ao mundo da pesquisa científica, á Prof.a. Dra. Marília Coelho, à Prof.a. Dra. Rachel Wrege por me incentivar*

*e acreditar na minha competência, à Profa. Dra. Renata Ribeiro e Profa. Dra. Encarnita Salas Martin por fazer parte da minha trajetória científica no mestrado. Aos Professores Doutores Mariano Caccia, Paulo Cesar Rocha, Arthur Whitacker, Profa. Dra. Isabel Cristina Moroz e Profa. Dra. Maria Gloria Fabregat, meus sinceros agradecimentos. Também agradeço à Prof.a Dra. Fernanda Bomfim (in memorian) na qual tive a honra de conviver e desenvolver projetos na UniEvangélica – Anápolis (GO), à Prof.a Dra. Leticia Trombeta, Rafael e Prof. Dra. Taíssa e Liriane pelas contribuições nos softwares de geoprocessamento, às Prof<sup>as</sup>. Dras. Ana Paula Pires, Beatriz Fagundes, Sílvia Cantóia, ao Frederico Gradella, Ricardo Santos e Daniele Corobina – “ObriGADIS”. Aos meus amigos eternos: Edson Sabatini e Sandra Ribeiro, Guilherme Claudino, Rodolfo Lima, Anna Paulla e Vinicius Stock.*

*Agradeço aos amigos da UFMS, especialmente à Letícia Leonardo, Elias Jr., Amanda Julia, Denis Pivetti, Amandinha (LaSeR), Paulinho, Diego, Jhiovana, Joser e Denis, Mateus, Luciene e Deise pela amizade, cafés e discussões sobre os diversos assuntos da ciência geográfica. À minha amiga Gabrielly Carvalho, Igor Lomba e João Henrique pela amizade sincera e convivência diária meus sinceros agradecimentos. Também agradeço à enfermeira Mônica Almeida pela força e amizade nesta cidade. Agradeço ao Vincler, Júlio, Isabela e especialmente ao biólogo André e a Paula da Eldorado Brasil por acompanhar no trabalho de campo para o monitoramento da qualidade de água.*

*Agradeço ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e ao apoio institucional da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus de Três Lagoas.*

*“Só quando a última árvore for derrubada, o último peixe for morto e o último rio for poluído é que o homem perceberá que não pode comer dinheiro” (Provérbios Indígena).*

## RESUMO

Os serviços ecossistêmicos (SE) são definidos como sendo todos os benefícios diretos e indiretos que a população humana obtém da natureza. O sistema econômico é fortemente dependente do fluxo de bens e serviços, que com a crescente demanda aumenta a pressão sobre os recursos naturais, afetando a capacidade dinâmica dos ecossistemas em oferecer os serviços ecossistêmicos. As transformações no uso e cobertura da terra através dos processos de conversão da vegetação nativa em área de produção agrícola, intensificam a exploração dos recursos naturais – os principais motores da degradação ambiental, de modo que alteram o fluxo dos serviços ecossistêmicos. O bioma Cerrado é considerado como *hotspot* em biodiversidade, serve como um reservatório ou “esponja”, que distribui água para os demais biomas, além de ser berço de nascentes de algumas das maiores bacias da América do Sul. O Cerrado proporciona serviços ecossistêmicos abrangentes como: fornecimento de água por meio do escoamento superficial, recarga de água subterrânea e fluxos atmosféricos de vapor de água; armazenamento de grande quantidade de carbono em suas florestas, especialmente nas raízes profundas das árvores; alta biodiversidade de modo a oferecer recursos para o sustento da vida de agricultores familiares. O Estado de Mato Grosso do Sul se destaca na política de expansão de áreas agrícolas, com uma produção diversificada no agronegócio/agroindústria, fornecedora de produtos como a cana-de-açúcar, milho, minério de ferro, gado/carne, soja e com ênfase na produção de papel e celulose, que por sua vez tem intensificado o processo de transformação na paisagem. O bioma Cerrado está sendo ameaçado devido às atividades antrópicas, com destaque para a pecuária, silvicultura e a redução da vegetação nativa. Os fragmentos de vegetação de Cerrado constituem sumidouros de carbono e possuem um papel importante para a mitigação das mudanças climáticas. Isso ocorre porque, após ser retirado da atmosfera, o carbono se acumula nas plantas e no solo. Porém, a conversão da formação savânica-florestal para outros tipos de uso e cobertura pode liberar grandes quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera. Assim, as transformações no uso e cobertura da terra são fatores importantes que afetam a prestação de serviços ecossistêmicos. A quantificação, mapeamento e avaliação desses serviços desempenham um papel essencial nas estratégias voltadas para a conservação ambiental. O objetivo geral desta tese foi estimar os serviços ecossistêmicos resultantes do estoque e sequestro de carbono em cenários de tendência de mudanças atuais e conservacionista na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS), localizada entre os municípios de Três Lagoas e Selvíria (MS), onde se encontra a indústria motriz da produção de papel e celulose. A metodologia consistiu na utilização do sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento, por meio do processamento digital das imagens dos sensores Landsat 5/TM e Landsat 8/ OLI e utilização da plataforma *Google Earth Engine* (GEE) em linguagem *JavaScript*, utilizando algoritmo classificador baseado em árvore de decisão *Random Forest* (RF). Foram analisadas as mudanças espaço-temporais (1984, 2004, 2009, 2015 e 2021) no uso e cobertura da terra, e a modelagem preditiva para estimar o sequestro de carbono em 2033 e 2051 em diferentes cenários. Foram definidas as seguintes classes: água, vegetação aluvial, formação savânica-florestal, pastagem, silvicultura e áreas construídas. Realizou-se a classificação supervisionada e identificação das principais mudanças para o uso e cobertura da terra ocorridas durante a análise temporal. Para validação da classificação utilizou-se o *software* ENVI e estimou-se a exatidão global e o índice Kappa, além do *software* ArcGIS para edição e quantificação da classificação. Os dados foram correlacionados por meio da tabulação cruzada e do cálculo de áreas. Os resultados demonstram que o algoritmo RF foi um classificador satisfatório com índice Kappa variando de 0,88 (1984) à 0,96 (2021). Houve mudanças no uso e cobertura da terra, primeiramente com a substituição da formação savânica-florestal (vegetação de Cerrado) para pastagem e fragmentações de áreas de Cerrado. Posteriormente, ocorreu a substituição de áreas de pastagens pelo cultivo de eucalipto, sendo estas áreas destinadas em sua grande maioria a produção de celulose. A projeção histórica para o cenário CMA, aponta que 35% da área (2033) e aproximadamente 38% (2051) da área da bacia hidrográfica será de silvicultura. Entretanto para o cenário conservacionista (PF) aponta um crescimento percentual de área na classe vegetação aluvial de 10,2% (2021) para 11,52% (2033) e 11,86% (2051). Conclui-se que no cenário conservacionista a valoração de serviços ecossistêmicos possui o dobro de sequestro de carbono, e consequentemente, de ganhos em relação ao valor presente líquido de C quando comparado com o cenário de tendência atual.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto. Serviços ecossistêmicos. Sequestro de carbono. *Google Earth Engine*. *INVEST*. Valoração ambiental. Córrego Bebedouro. Mato Grosso do Sul. Brasil.

## ABSTRACT

Ecosystem services (ES) are defined as all the direct and indirect benefits that the human population obtains from nature. The economic system is heavily dependent on the flow of goods and services, which, with growing demand, increases pressure on natural resources, affecting the dynamic capacity of ecosystems to offer ecosystem services. Transformations in land use and coverage through the processes of converting native vegetation into agricultural production areas, intensify the exploitation of natural resources – the main drivers of environmental degradation, in a way that alters the flow of ecosystem services. The Cerrado biome is considered a biodiversity hotspot, it serves as a reservoir or “sponge”, which distributes water to other biomes, in addition to being the birthplace of springs in some of the largest basins in South America. The Cerrado provides comprehensive ecosystem services such as: water supply through surface runoff, groundwater recharge and atmospheric water vapor fluxes; storing large amounts of carbon in its forests, especially in the deep roots of trees; high biodiversity in order to offer resources to sustain the lives of family farmers. The State of Mato Grosso do Sul stands out in the policy of expanding agricultural areas, with a diversified production in agribusiness/agroindustry, supplying products such as sugar cane, corn, iron ore, cattle/meat, soybeans and emphasis on the production of paper and cellulose, which in turn has intensified the process of transformation in the landscape. The Cerrado biome is being threatened due to human activities, with emphasis on livestock, forestry and the reduction of native vegetation. Cerrado vegetation fragments constitute carbon sinks and play an important role in mitigating climate change. This occurs because, after being removed from the atmosphere, carbon accumulates in plants and soil. However, the conversion of savanna-forest formation to other types of use and coverage can release large amounts of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) into the atmosphere. Thus, transformations in land use and cover are important factors that affect the provision of ecosystem services. The quantification, mapping and evaluation of these services play an essential role in strategies aimed at environmental conservation. The general objective of this thesis was to estimate the ecosystem services resulting from carbon stock and sequestration in current and conservationist change trend scenarios in the Córrego Bebedouro (MS) watershed, located between the municipalities of Três Lagoas and Selvíria (MS), where is the driving industry for the production of paper and cellulose. The methodology consisted of using remote sensing and geoprocessing techniques, through digital processing of images from Landsat 5/TM and Landsat 8/OLI sensors and use of the Google Earth Engine (GEE) platform in JavaScript language, using a classifier algorithm based on Random Forest (RF) decision tree. Spatio-temporal changes (1984, 2004, 2009, 2015 and 2021) in land use and cover were analyzed, and predictive modeling was used to estimate carbon sequestration in 2033 and 2051 in different scenarios. The following classes were defined: water, alluvial vegetation, savanna-forest formation, pasture, forestry and built areas. Supervised classification and identification of the main changes to land use and cover that occurred during the temporal analysis were carried out. To validate the classification, the ENVI software was used and the global accuracy and Kappa index were estimated, in addition to the *ArcGIS* software for editing and quantifying the classification. The data were correlated through cross-tabulation and area calculations. The results demonstrate that the RF algorithm was a satisfactory classifier with a Kappa index ranging from 0.88 (1984) to 0.96 (2021). There were changes in land use and coverage, primarily with the replacement of savanna-forest formation (Cerrado vegetation) for pasture and fragmentation of Cerrado areas. Subsequently, pasture areas were replaced by eucalyptus cultivation, with the vast majority of these areas destined for cellulose production. The historical projection for the BAU scenario indicates that 35% of the area (2033) and approximately 38% (2051) of the river basin area will be forestry. However, for the conservation scenario (PF), it points to a percentage increase in area in the alluvial vegetation class from 10.2% (2021) to 11.52% (2033) and 11.86% (2051). It is concluded that in the conservationist scenario the valuation of ecosystem services has twice the carbon sequestration, and consequently, gains in relation to the net present value of C when compared to the current trend scenario.

**Keywords:** Remote sensing. Ecosystem services. Carbon sequestration. Google Earth Engine. InVEST. Environmental valuation. Stream Bebedouro. Mato Grosso do Sul. Brazil.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Hierarquização dos Termos para o planejamento e gestão das águas.....	39
<b>Figura 2.</b> Unidades de Planejamento e Gerenciamento adotadas no Plano Estadual de Mato Grosso do Sul.....	43
<b>Figura 3.</b> Sistema taxonômico dividido em níveis hierárquicos do CICES V5.2 .....	49
<b>Figura 4.</b> Ciclo global do carbono e seus fluxos em diferentes compartimentos em Pg C = $10^{15}$ g C.....	63
<b>Figura 5.</b> Principais processos que influenciam o estoque de carbono no solo.....	65
<b>Figura 6.</b> Fluxos do ciclo global do carbono. ....	69
<b>Figura 7.</b> Componentes da plataforma do Google Earth Engine.....	79
<b>Figura 8.</b> Esquematização do modelo da classificação do Random Forest.....	82
<b>Figura 9.</b> Fluxograma dos componentes básicos do processo de elaboração de modelos empíricos. ....	85
<b>Figura 10.</b> Fluxograma da metodologia da pesquisa. ....	88
<b>Figura 11.</b> Fotografias representativas para cada classe de uso e cobertura na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS).....	92
<b>Figura 12.</b> Chave de interpretação dos alvos das classes de uso e cobertura das imagens Landsat e Google Earth na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro. ....	94
<b>Figura 13.</b> Mapa dos Principais Tipos de Uso e Cobertura da Terra na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS). ....	98
<b>Figura 14.</b> Imagem Landsat 8, composição RGB/654 e pontos amostrais de verdade terrestre utilizados no teste de validação. ....	99
<b>Figura 15.</b> Etapas dos procedimentos metodológicos para modelagem preditiva - Software Plus Model.....	103
<b>Figura 16.</b> Agentes modificadores classificados pela lógica Fuzzy como variáveis explicativas para modelagem preditiva. ....	105
<b>Figura 17.</b> Pesos das vizinhanças aplicados no Plus Model.....	106
<b>Figura 18.</b> Representações usadas na detecção das APPs na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS). ....	109
<b>Figura 19.</b> Procedimentos para obtenção do carbono orgânico do solo: coleta de amostras em duplicata em cada classe de uso e cobertura da terra.....	118
<b>Figura 20.</b> Dados do armazenamento de carbono em cada reservatório. ....	119

<b>Figura 21.</b> Localização geográfica da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro, Três Lagoas e Selvíria (MS).....	122
<b>Figura 22.</b> Fisionomia da vegetação na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS). .....	124
<b>Figura 23.</b> Geologia na BHCB de acordo com o CPRM.....	131
<b>Figura 24.</b> Modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro.....	133
Figura 25. Classificação do Uso e Cobertura da terra para os anos de 1984, 2004, 2009 e 2015 - algoritmo Random Forest.....	141
Figura 26. Classificação do Uso e Cobertura da terra para o ano de 2021 - algoritmo <i>Random Forest</i> .....	142
<b>Figura 27.</b> Comparação entre os mapas de uso e cobertura da terra mapeado Google Earth e projetado Plus Model de 2021. ....	149
<b>Figura 28.</b> Modelo de cenários de continuidade de mudanças atuais de uso e cobertura da terra para 2033 e 2051 .....	152
<b>Figura 29.</b> Modelo de tendência de continuidade de mudanças atuais para 2033.....	154
<b>Figura 30.</b> Modelo de continuidade de mudanças atuais (CMA) para o ano de 2051. ....	156
<b>Figura 31.</b> Modelo de cenários de tendências conservacionista, com proteção florestal no uso e cobertura da terra para 2033 e 2051. ....	160
<b>Figura 32.</b> Áreas Restritivas de Áreas de Preservação Permanentes e Reserva Legal na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS).....	162
<b>Figura 33.</b> Classes de Uso e Cobertura da terra nas Áreas Restritivas – Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal.....	164
<b>Figura 34. Limites das</b> Propriedades rurais da bacia hidrográfica Córrego Bebedouro/MS .....	168
<b>Figura 35.</b> Módulo fiscal das propriedades rurais no limite da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro/MS.....	170
<b>Figura 36.</b> Nascentes nos limites dos imóveis rurais da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro/MS.....	172
<b>Figura 37.</b> Total de estoque de carbono para os anos 1984 e 2009, na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro/MS.....	183
<b>Figura 38.</b> Total de estoque de carbono para os anos 2015 e 2021, na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro/MS.....	184
<b>Figura 39.</b> Estoque de Carbono na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS): cenário	

de continuidade de mudanças atuais para os anos de 2033 e 2051. ....	185
<b>Figura 40.</b> Vegetação nativa, plantação de eucalipto e solo exposto com processos erosivos. .....	186
<b>Figura 41.</b> Total de sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS) – períodos de 1984-2009 e 2009-2015.....	191
<b>Figura 42.</b> Total de sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS) – períodos de 2015-2021 e 2021-2033.....	192
<b>Figura 43.</b> Total de sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS) – períodos de 2015-2021 e 2021-2051.....	193
<b>Figura 44.</b> Total de sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS) – períodos de 2021-2033 e 2021-2051.....	194
<b>Figura 45.</b> Estoque de Carbono na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS): cenário conservacionista.....	197

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Conceitos relativos à bacia hidrográfica como unidade de análise. ....	37
<b>Quadro 2.</b> Biomas equivalentes para as classes de uso da terra e valores dos serviços ecossistêmicos. ....	53
<b>Quadro 3.</b> Modalidades e funções dos serviços ecossistêmicos.....	56
<b>Quadro 4.</b> Informação das imagens de satélite utilizada na pesquisa. ....	90
<b>Quadro 5.</b> Amostras de treinamento coletadas no Google Earth Engine (GEE).....	95
<b>Quadro 6.</b> Escala de avaliação do Índice Kappa. ....	101
<b>Quadro 7.</b> Fotografias dos pontos amostrais com a localização geográfica comparados com as imagens do <i>Google Earth</i> .....	112
<b>Quadro 8.</b> Fisionomias da vegetação na BHCB (MS). ....	126
<b>Quadro 9.</b> Geodiversidade na BHCB. ....	129

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Pontos amostrais de verdade terrestre conforme a classe de uso e cobertura... 100	100
<b>Tabela 2.</b> Dados de entrada do modelo de sequestro de carbono do software InVEST 3.12.1. .....	117
<b>Tabela 3.</b> Resultados do cálculo de coeficiente Kappa e avaliação da acurácia global para o mapeamento de uso e cobertura da terra. ....	134
<b>Tabela 4.</b> Matriz de erro com o percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 1984. ....	135
<b>Tabela 5.</b> Matriz de erro com o percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 2004. ....	135
<b>Tabela 6.</b> Matriz de erro com o percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 2009. ....	136
<b>Tabela 7.</b> Matriz de erro com percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 2015. ....	137
<b>Tabela 8.</b> Matriz de erro com o percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 2021. ....	138
<b>Tabela 9.</b> Quantificação e percentagem das classes de uso e cobertura na BHCB, entre os anos de 1984, 2009, 2015 e 2021 - algoritmo Random Forest.....	143
<b>Tabela 10.</b> Variação percentual das classes de uso e cobertura da terra.....	144
<b>Tabela 11.</b> Valores parâmetros estatísticos Kappa do modelo .....	148
<b>Tabela 12.</b> Áreas das classes de uso e cobertura conforme o modelo de tendência de cenário atual para 2021, a partir do Modelo Simulado .....	150
<b>Tabela 13.</b> Valores quantificados das classes de uso e cobertura da terra para o cenário do ano de 2033.....	153
<b>Tabela 14.</b> Valores quantificados das classes de uso e cobertura da terra no cenário do ano de 2051. ....	155
<b>Tabela 15.</b> Valores quantificados das classes de uso e cobertura da terra nos anos 1984, 2004, 2009, 2015, 2021, 2033 e 2051. ....	157
<b>Tabela 16.</b> Valores quantificados das classes de uso e cobertura da terra para o cenário conservacionista de proteção florestal para os anos de 2033 e 2051.....	158
<b>Tabela 17.</b> Áreas restritivas de Áreas de Preservação Permanente por categoria da Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro, 2022. ....	163

<b>Tabela 18.</b> Área das classes de Uso e Cobertura da terra nas áreas restritivas – Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal. ....	165
<b>Tabela 19.</b> Quantidade de Sequestro Potencial de CO <sub>2</sub> nas APPs mapeadas nos cursos d'água. ....	166
<b>Tabela 20.</b> Quantidade de Sequestro Potencial de CO <sub>2</sub> nas APPs mapeadas nas nascentes. ....	166
<b>Tabela 21.</b> Quantidade de Sequestro Potencial de CO <sub>2</sub> nas RL mapeadas conforme o CAR. ....	167
<b>Tabela 22.</b> Simulação do Pagamento Serviços Ambientais do Projeto Mina D'Água nos imóveis rurais da BHCB. ....	174
<b>Tabela 23.</b> Estoque de Carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA) na BHCB (MS). ....	178
<b>Tabela 24.</b> Total de Sequestro de Carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA) na BHCB (MS). ....	187
<b>Tabela 25.</b> Estoque de Carbono no cenário conservacionista (PF) na BHCB (MS). ....	195
<b>Tabela 26.</b> Sequestro de Carbono no cenário conservacionista (PF) na BHCB (MS). ....	198

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Pluviosidade total anual na BHCB (MS).....	127
<b>Gráfico 2.</b> Evolução do uso e cobertura da terra na BHCB nos anos de 1984 a 2021. ....	144
Gráfico 3. Variação do Uso e Cobertura da terra na BHCB, dos anos 1984 e 2021 - algoritmo Random Forest.....	147
<b>Gráfico 4.</b> Total de estoque de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS).....	181
<b>Gráfico 5.</b> Total de sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS).....	189
<b>Gráfico 6.</b> Total de estoque de carbono no cenário conservacionista na BHCB (MS). ....	196
<b>Gráfico 7.</b> Total de sequestro de carbono no cenário conservacionista na BHCB (MS).....	199
<b>Gráfico 8.</b> Total de estoque de carbono no cenário continuidade de mudanças atuais (CMA) e PF na BHCB (MS).....	201
<b>Gráfico 9.</b> Total de sequestro de carbono no cenário CMA e PF na BHCB (MS).....	203
<b>Gráfico 10.</b> Valoração do sequestro de carbono na BHCB (MS).....	204

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
- APP – Área de Preservação Permanente
- Aw – Clima tropical com inverno seco
- BH – Bacia Hidrográfica
- BHCB – Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro
- C – Carbono
- CA – Autômatos Celulares
- CAR – Cadastro Ambiental Rural
- CH<sub>4</sub> – Metano
- CICES – *Common International Classification of Ecosystem Services*
- CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CMA – Continuidade de Mudanças Atuais
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- GEEs – Gases de Efeito Estufa
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- InVEST – *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*
- IMASUL – Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul
- IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
- LANDSAT – *Land Remote Sensing Satellite*
- MCE – *Multi Criteria Evaluation*
- MEA – *Millennium Ecosystem Assessment*
- MF – Módulo Fiscal
- MS – Mato Grosso do Sul
- PERH – Plano Estadual de Recursos Hídricos
- PF – Conservacionista de Proteção Florestal
- PNMC – Plano Nacional sobre Mudança do Clima
- PNRH – Plano Nacional de Recursos Hídricos
- PSA – Pagamentos por Serviços Ambientais
- RL – Reserva Legal
- RF – *Random Forest*
- SE – Serviços Ecossistêmicos

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SMA – Secretaria do Meio Ambiente

SRTM – *Shuttle Radar Topographical Mission*

tC – Tonelada de Carbono

UFMS – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

## SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	24
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	30
1.2 HIPÓTESE .....	33
1.3 OBJETIVOS.....	33
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	33
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	34
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO .....</b>	<b>35</b>
2.1 BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO TERRITORIAL .....	35
2.1.1 <i>Políticas de Recursos Hídricos: Mato Grosso do Sul</i> .....	41
2.1.2 <i>Instrumentos para o Planejamento e Ordenamento Físico-Territorial</i> .....	45
2.2 SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS E VALORAÇÃO AMBIENTAL: POLÍTICAS E INCENTIVOS DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS.....	47
2.2.1 <i>O Armazenamento e Sequestro de Carbono</i> .....	60
2.2.2 <i>Modelo InVEST: Armazenamento e Sequestro de Carbono</i> .....	71
2.3 CLASSIFICAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA.....	72
2.3.1 <i>Geotecnologias</i> .....	75
2.3.2 <i>Google Earth Engine</i> .....	77
2.3.3 <i>Algoritmo de Classificação Random Forest</i> .....	81
2.4 MODELAGEM PREDITIVA DE USO E COBERTURA DA TERRA .....	83
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>86</b>
3.1 PROCEDIMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	86
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA CLASSIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA.....	87
3.2.1 <i>Mapeamento das Mudanças no uso e Cobertura da Terra na Plataforma Google Earth Engine - GEE</i> .....	89
3.2.2 <i>Treinamento e Classes de Uso e Cobertura da Terra</i> .....	91
3.2.3 <i>Pós-processamento</i> .....	96
3.2.4 <i>Validação da Classificação Supervisionada: Matriz de Erro</i> .....	97

3.3 PROCEDIMENTOS PARA MODELAGEM PREDITIVA - CADEIAS DE MARKOV E AUTÔMATOS CELULARES .....	102
3.3.1 <i>Etapas para execução do software Plus Model</i> .....	105
3.4 PROCEDIMENTOS PARA A SIMULAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS E ESTIMATIVA DE VALORAÇÃO DE SEQUESTRO DE CARBONO – IPCC.....	107
3.4.1 <i>Quantificação das classes de uso e cobertura em áreas restritivas</i> .....	107
3.4.2 <i>Estimativa de Sequestro de Carbono em áreas restritivas conforme o IPCC</i> .....	108
3.4.3 <i>Simulação de Pagamentos por Serviços Ambientais: Projeto Mina d’água</i> .....	110
3.5 MODELO DE SEQUESTRO DE CARBONO – <i>InVEST</i> .....	116
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>121</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO .....	121
4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA CLASSIFICAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA .....	134
4.2.1 <i>Análise Multitemporal de Uso e Cobertura da terra, a partir do algoritmo Random Forest</i> .....	139
<i>Figura 25. Classificação do Uso e Cobertura da terra para os anos de 1984, 2004, 2009 e 2015 - algoritmo Random Forest</i> .....	141
<i>Figura 26. Classificação do Uso e Cobertura da terra para o ano de 2021 - algoritmo Random Forest</i> .....	142
<i>Tabela 9. Quantificação e percentagem das classes de uso e cobertura na BHCB, entre os anos de 1984, 2009, 2015 e 2021 - algoritmo Random Forest</i> .....	143
4.2.2 <i>Variação da Classificação de Uso e Cobertura - algoritmo Random Forest</i> .....	146
<i>Gráfico 3. Variação do Uso e Cobertura da terra na BHCB, dos anos 1984 e 2021 - algoritmo Random Forest</i> .....	147
<b>4.3 MODELAGEM PREDITIVA DE CENÁRIOS FUTUROS DE USO E COBERTURA DA TERRA NA BHCB (MS).....</b>	<b>148</b>
4.3.1 Validação estatística do modelo .....	148
4.3.2 Simulação de mudanças de cenários futuro para 2033 e 2051: continuidade de mudanças atuais (CMA) a partir do Modelo .....	150
4.3.3 Análise Multitemporal preditiva do uso e cobertura da terra na BHCB (MS) .....	157
4.3.4 Simulação de mudanças de cenários futuros para 2033 e 2051: tendência conservacionista de proteção florestal (PF).....	158
<b>4.4 AVALIAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS E SIMULAÇÃO DE</b>	

<b>PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO .....</b>	<b>161</b>
4.4.1 Quantificação das áreas das classes dentro das áreas restritivas – APP e RL .....	161
4.4.2 Estimativa do potencial de Sequestro de Carbono nas Áreas Restritivas – APPs e RL .....	165
4.4.3 Simulação de Pagamentos por Serviços Ambientais.....	167
<b>4.5 MODELAGEM DO ESTOQUE E O SEQUESTRO DE CARBONO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO (MS).....</b>	<b>176</b>
4.5.1 Estoque e Sequestro de Carbono no Cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA) .....	177
4.5.2 Estoque e Sequestro de Carbono no cenário Conservacionista.....	195
4.5.3 Análise Monetária do Sequestro de Carbono na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro - MS .....	200
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>206</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>213</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>228</b>
A - APLICAÇÃO DO ALGORITMO <i>CLIMATE HAZARDS GROUP INFRARED PRECIPITATION WITCH SATATIONS – CHIRPS</i> .....	228
B - APLICAÇÃO DO ALGORITMO <i>RANDOM FOREST</i> NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO (MS) .....	230
C - VALIDAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA: <i>KAPPA</i> OBTIDO NO <i>SOFTWARE ENVI</i> .....	234
D - RESULTADOS DO <i>InVEST</i> : CENÁRIO DE CONTINUIDADE DE MUDANÇAS ATUAIS (CMA).....	236
E - RESULTADOS DO <i>InVEST</i> : CENÁRIO PF .....	237

## APRESENTAÇÃO

Em relação à estrutura física do trabalho, o mesmo apresenta 5 capítulos, estruturados da seguinte maneira:

### ✚ Capítulo 1. Introdução, Hipótese e Objetivos

O primeiro capítulo, trata de apresentar de maneira sintética, uma contextualização do atual momento da sociedade em relação ao tema emergente em escala mundial, além da hipótese, onde foram apresentadas as problemáticas a serem investigadas, bem como a relevância dessa pesquisa em nível sócio-econômico-ambiental e seus desafios na Ciência Geográfica. Refere-se às etapas que serão desenvolvidas, ou seja, os objetivos que se pretende atingir com essa pesquisa.

### ✚ Capítulo 2. Revisão da Literatura

Esse capítulo trata da revisão bibliográfica para embasar o trabalho, ou seja, o referencial teórico-metodológico. O capítulo está dividido em 4 tópicos, onde cada um abordará um determinado tema:

(i) aborda a bacia hidrográfica como unidade de planejamento ambiental, apresentando a Política Nacional de Recursos Hídricos que definiu a bacia hidrográfica como instrumento para o planejamento físico-territorial e a importância de aplicar o mapeamento dos serviços ecossistêmicos no planejamento de bacias hidrográficas.

(ii) discute sobre o surgimento e desenvolvimento do conceito de Serviços Ecossistêmicos, bem como, a importância do armazenamento e sequestro do carbono atmosférico para o solo que são considerados como SE de regulação do clima, visto que tem o potencial de mitigar os efeitos das mudanças climáticas; Também discute sobre a valoração dos serviços ecossistêmicos no *software InVest* e sobre os programas de Pagamentos por Serviços Ambientais, também apresenta a Política Nacional de Pagamentos por Serviços Ambientais no Brasil e uma breve descrição da Política Estadual de Preservação dos Serviços Ambientais no Mato Grosso do Sul.

(iii) discute sobre a classificação supervisionada do uso e cobertura da terra por intermédio do emprego de geotecnologias – SIGs, em especial, a plataforma online *Google Earth Engine (GEE)* com aplicação do algoritmo *Randon Forest (RF)*.

(iv) discute sobre a modelagem preditiva como importante ferramenta para o planejamento, pois por meio da modelagem de cenários futuros é possível identificar as alterações no uso e cobertura da terra, especialmente com o emprego da técnica *CA Markov*.

### ✚ Capítulo 3. Metodologia

Esse capítulo trata da metodologia utilizada em toda investigação para atingir os objetivos específicos da tese. Dividiu-se a descrição dos procedimentos para: (i) primeiramente, tem-se uma caracterização da área de estudo utilizando dados do GeoMS, os quais foram tabulados, quantificados e apresentados em forma de mapas e tabelas, pode-se comparar com a classificação realizada nesta tese; (ii) classificação supervisionada do uso e cobertura da terra via *Google Earth Engine*, treinamento das classes, processamento digital e validação da classificação; (iii) modelagem preditiva da tendência atual e do cenário de conservacionista de proteção florestal no software *PLUS Model* com a aplicação da técnica *CA-Markov*; (iv) discute os procedimentos para avaliação dos serviços ecossistêmicos nas propriedades rurais, por meio da aplicação da técnica de valoração do IPCC e da simulação de modelo de programa de PSA nas propriedades rurais, conforme os dados obtidos no Cadastro Ambiental Rural (CAR); (v) procedimentos metodológicos para estimativa de avaliação e valoração do estoque e do sequestro de carbono, utilizando o software *InVEST*;

#### Capítulo 4. Resultados e Discussão

Esse capítulo traz a discussão dos resultados obtidos nessa pesquisa. Inicialmente apresenta-se os resultados da caracterização da área de pesquisa; a avaliação do desempenho da classificação de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica, mediante o índice kappa e acurácia global e realiza-se a análise multitemporal juntamente com os cálculos da área de cada classe de UCT ao longo do período estudado. Posteriormente, têm-se os resultados da modelagem preditiva de cenários futuros de uso e cobertura da terra, em dois cenários (tendência atual de UCT e a tendência conservacionista de proteção florestal, considerando a legislação ambiental brasileira), a discussão da validação estatística do modelo e as análises multitemporais e espaciais da modelagem preditiva. Neste capítulo, realiza-se a avaliação dos serviços ecossistêmicos por meio da quantificação das áreas das classes de UCT e a estimativa do potencial de sequestro de carbono dentro das áreas restritivas – APPs e RL, conforme a metodologia do IPCC (2006). Também traz os resultados da aplicação do projeto Mina D'água considerando módulos fiscais dos imóveis rurais tem-se a simulação de PSA na bacia hidrográfica. Por fim, tem-se os resultados da modelagem do estoque e sequestro de carbono, bem como, a sua valoração em termos monetários em dois cenários preditivos.

Convém ressaltar que esta tese se encaixa na linha “Dinâmica Ambiental e Planejamento”. O planejamento ambiental é importante para estudos de bacias hidrográficas, pois, são unidades geográficas onde os recursos naturais se interagem, além das intervenções da sociedade que causam efeitos impactantes no meio natural (Santos, 2004). As bacias

hidrográficas se caracterizam como unidades de planejamento de aceitação universal, inclusive, definida pela Política Nacional de Recursos Hídricos – a Lei das Águas no Brasil (Brasil, 1997).

No planejamento ambiental é preciso decidir sobre cenários futuros, bem como ações adequadas de manejo para promover adequadas combinações de usos da terra e sistemas florestais, de forma a garantir a conservação dos recursos florestais e seus serviços ecossistêmicos (Fürst *et al.*, 2014; Hackbart, 2016).

A presente Tese contribuirá para as pesquisas desenvolvidas no *Laboratório de Sensoriamento Remoto (La-SeR)*, vinculadas aos projetos “*Modelagem preditiva de serviços ecossistêmicos gerados pelo estoque e sequestro de carbono no Estado de Mato Grosso do Sul*”, financiado pela Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) e “*Modelagem dinâmica de serviços ecossistêmicos gerados pelo estoque e sequestro de carbono no Cerrado brasileiro*” financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). A utilização do sensoriamento remoto e da modelagem preditiva permitirá a simulação do estoque e sequestro de carbono. Além de possibilitar a projeção de cenários futuros de uso e cobertura da terra na costa leste de Mato Grosso do Sul que possui destaque internacional pelo manejo de Eucalipto Comercial, onde está situada a área de estudo, a bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS), a fim de fortalecer a manutenção dos serviços ecossistêmicos e sua valoração.

## 1 INTRODUÇÃO

A sociedade sempre dependeu dos recursos naturais para satisfazer as necessidades básicas e promover o bem-estar humano. Com o rápido crescimento populacional, econômico e acelerada urbanização, tem-se o aumento das necessidades básicas e, conseqüentemente, maior pressão sobre a disponibilidade de recursos naturais - como água, energia e alimentos.

Sabe-se que os recursos naturais são finitos, portanto, o desafio em escala mundial é garantir a segurança hídrica, energética e alimentícia da atualidade, além de atender as necessidades das gerações futuras, de forma, a conciliar a relação da sociedade com a natureza, conforme a Agenda 2030 dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS (ONU, 2021<sup>1</sup>). Entretanto, a disponibilidade de recursos naturais e manutenção dos serviços ecossistêmicos vêm sendo ameaçada e são necessárias ações para mitigar essa problemática em âmbito mundial (Turner, 2015; Samberger, 2022).

Os pesquisadores buscam diferentes maneiras de compreender a relação do homem com a natureza. No Brasil, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) juntamente com o Ministério da Agricultura e Pecuária, em 2019, publicaram o “*Marco Referencial em Serviços Ecossistêmicos*” com intuito de compartilhar a relevância do tema em serviços ecossistêmicos em prol da sustentabilidade socioeconômica e ambiental da agricultura brasileira (Raymond, 2013; Martim-Ortega, 2016).

Os Serviços Ecossistêmicos (SE) compõem toda gama de benefícios diretos ou indiretos que um determinado ecossistema é capaz de prover à população. Altmann e Stanton (2018) enfatizam que os serviços ecossistêmicos são mais amplos e englobam os serviços ambientais. Este conceito é integrado ao estudo ambiental por meio da valoração e avaliação individual ou coletiva dos diversos serviços prestados por um determinado ambiente.

Costanza *et al.* (1997) juntamente com pesquisadores da área da ecologia e economia constituíram-se como pioneiros ao realizarem um levantamento global dos serviços ecossistêmicos providos pelos biomas em todos continentes. Assim, a ideia de valoração econômica dos serviços ecossistêmicos recebeu forte impulso, juntamente com a publicação da *Avaliação Ecossistêmica do Milênio* (2005) que contribuiu para implementar o conceito de SE na agenda política (Mea, 2005; Altmann; Stanton, 2018). A publicação do *Millennium Ecosystem Assessment – MEA* (2005) instituiu o conceito de serviços

---

<sup>1</sup> [https://brasil.un.org/sites/default/files/2022-04/ONUBrasil\\_RelatorioAnual\\_2021\\_web.pdf](https://brasil.un.org/sites/default/files/2022-04/ONUBrasil_RelatorioAnual_2021_web.pdf)

ecossistêmicos e a partir desta, o conceito começou a ganhar cada vez mais atenção dos tomadores de decisão (Altmann; Stanton, 2018). O MEA contribuiu na valoração dos serviços ecossistêmicos, com a mobilização de cientistas em todo mundo, com o intuito de reunir bases científicas para avaliar as consequências de alterações dos ecossistemas e aumentar a conservação e uso sustentável desses benefícios (Carvalho *et al.*, 2021).

A valoração ambiental consiste em atribuir um valor quantitativo aos recursos naturais, serviços ecossistêmicos e ao meio ambiente em geral. Guijarro e Tsinaslanidis (2020) analisaram a literatura, notando um crescimento constante de publicações sobre o tema nas últimas três décadas após a introdução do termo em 1987. A valoração ambiental tem sido tradicionalmente considerada no contexto da valoração fora do mercado. Seu objetivo é obter uma medida monetária do benefício ou custo para o bem-estar de indivíduos e grupos sociais de intervenções de melhoria ambiental ou as consequências da degradação ambiental.

De acordo com Ogassavara (2008) tem-se a necessidade de estimar os valores para os ativos ambientais de modo a adotar medidas que visem a utilização sustentável do recurso natural, como é o caso dos bens e serviços ambientais. Afinal, os recursos naturais, como água, ar limpo, florestas, solos férteis e biodiversidade, desempenham um papel vital no sustento da vida humana. Portanto, os serviços ecossistêmicos, como a polinização de culturas por insetos, a regulação climática, as purificações da água, entre outros, também são essenciais para o funcionamento saudável dos ecossistemas e para o bem-estar humano.

Assim, por meio da abordagem de valoração ambiental, traduz-se os benefícios que o meio ambiente oferece para a sociedade em termos financeiros ou bem-estar, de forma a facilitar a tomada de decisões que envolvem questões ambientais. A valoração é incorporada em uma equação definida de acordo com a metodologia aplicada, ela conferirá um valor subjetivo ou objetivo a um determinado ambiente/ecossistema (Constanza *et al.*, 1997; Andrade, 2012; Oscar Jr., Cavalcante e Ruhberg, 2021).

A valoração ambiental destaca-se como importante ferramenta metodológica para subsidiar a tomada de decisões no uso dos recursos naturais (Andrade *et al.*, 2012). A valoração dos serviços ecossistêmicos é uma parte de um conjunto de informações necessários para a gestão do capital natural, sendo importante conhecer o valor desses serviços para sua efetiva gestão, podendo incluir os incentivos econômicos para sua preservação (Constanza, 2006).

No âmbito da ciência geográfica, Oscar Jr., Cavalcante e Ruhberg (2021) enfatizam

sobre a dificuldade em encontrar artigos de geógrafos a respeito dos serviços ecossistêmicos, seja com temáticas teórico-metodológicas ou práticas. Entretanto, as pesquisas sobre o tema vêm ganhando destaque na temática dos pesquisadores ao redor do mundo (Wilson e Boumans, 2002; Burkhard, 2012; Altmann; Stanton, 2018; Groot, Tusznió, 2020; Han *et al.* 2021; Wilde e Newell, 2021; Anley, 2022; Sun *et al.*, 2022; Zhang e Zhou, 2022; dentre outros).

Sob o mesmo ponto de vista, Hackbart (2016) salienta sobre a preocupação em fazer um vínculo entre as paisagens resultantes das forças social-econômica-tecnológicas que direcionam as mudanças no uso e cobertura da terra que ocorreram ao longo da história e a disponibilidade dos serviços ecossistêmicos, bem como apresentar as perdas de ordem econômica, ecológica ou social atual.

Existe uma peculiaridade dos estudos de Serviços Ecossistêmicos, de acordo com Oscar Jr., Cavalcante e Ruhberg (2021) é uma “atualização” da *Geografia Ambiental*, na qual não há diferenciação entre as dicotomias<sup>2</sup>, ocorrida na ciência geográfica - relação sociedade e natureza. Sendo assim, o estudo do ambiente está intrinsecamente ligado ao estudo da sociedade, na qual o sujeito é parte individual de um composto social.

Trabalhar a temática de SE é um desafio para a Geografia, em âmbito metodológico. Entretanto, esse desafio é um meio eficiente e prático de alavancar a Geografia de forma a integrar todas as suas vertentes e transformá-las em uma ciência unicista (Mendonça, 1992). Compreender as inter-relações e as funções dos ecossistemas para os serviços prestados à sociedade é fundamental para compreensão da relação do homem com a natureza considerando a dinâmica espacial em que determinada sociedade está inserida – objeto de estudo da Geografia (Santos *et al.*, 2019).

Há uma necessidade em buscar um arranjo complementar entre a Geografia brasileira e o tema de serviços ecossistêmicos. A análise ecossistêmica do ambiente é multidisciplinar, na qual só é possível realizar uma verdadeira análise por intermédio de serviços ecossistêmicos (SE), utilizando-se de pesquisadores de diversas áreas, de acordo com as especificidades de cada pesquisa – e os geógrafos devem apropriar-se de uma posição de destaque neste campo (Oscar Jr., Cavalcante e Ruhberg, 2021).

Assim, a geografia tem muito a contribuir com os estudos de serviços ecossistêmicos, pois ambos se qualificam. A geografia é a disciplina perfeita para entender os atuais desafios dos complexos sistemas humano-ambientais, pois, tem-se o conhecimento

---

<sup>2</sup> Geografia física versus Geografia Humana; crítica ou positivista.

das Geografias física e humana e métodos relacionados como a utilização de Sistemas de Informações Geográficas - SIG, baseado no sensoriamento remoto, modelagem preditiva, cartografia, abordagens quantitativas e qualitativas (Oscar Jr., Cavalcante e Ruhberg, 2021). Com isso, os geógrafos são capazes de trabalhar sistematicamente e a executar análises holísticas, de modo a pensar espacialmente os fenômenos em determinada escala espaço-temporal e como essas manifestações se relacionam. Desta maneira, todos os serviços ecossistêmicos são, na verdade, fenômenos espaciais (Burkhard, 2012).

Acredita-se que o desafio em relação a problemática de avaliação e valoração de serviços ecossistêmicos, principalmente em relação ao estoque e sequestro de carbono e a manutenção dos cursos d'água estão sendo superados, diante das discussões em nível mundial e a quantidade de trabalhos internacionais publicados – independente da área científica sobre a temática que serve como norte para as pesquisas. Do mesmo modo, as legislações nacionais específicas sobre serviços ecossistêmicos servem para direcionar as ações de ordenamento físico-territorial, assim como essa tese que busca contribuir como arcabouço teórico-metodológico e estudo aplicado que contribuirão para a Ciência Geográfica brasileira.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A motivação que nos levou à escolha desse tema para a elaboração da presente pesquisa foi a preocupação com a constante transformação no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS), que pertence ao Bioma Cerrado – o segundo maior bioma brasileiro - considerado como *Hotspot*<sup>3</sup> mundial pela sua elevada riqueza da biodiversidade, considerado de muito alta a extremamente alta prioridade para conservação da biodiversidade (Brasil, 2007; Chaplin-Kramer *et al.*, 2015). Além disso, tem-se o compromisso do Brasil firmado no acordo de Paris em 2015 para o ano de 2050. O Estado de Mato Grosso do Sul firmou o compromisso, na COP26, de neutralização das emissões de carbono até 2030, tendo como destaque a Política Estadual de Mudanças Climáticas – PEMC, em Mato Grosso do Sul e o Plano Estadual MS Carbono Neutro – PROCLIMA.

---

<sup>3</sup> Áreas naturais que possuem uma grande diversidade ecológica. Essas áreas sofrem elevadas ameaças de extinção, tendo perdido metade de sua vegetação original e tendo milhares de espécies endêmicas em risco de extinção. Disponível em: <https://arvoreagua.org/biomas/cerrado/cerrado-e-hotspot>  
<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/hotspots-mundias.htm>

A Federação de Agricultura e Pecuária de Mato Grosso do Sul (Famasul<sup>4</sup>, 2022) afirma que a costa leste de Mato Grosso do Sul possui mais de 1,1 milhão de hectares de área plantada de eucalipto concentrada, na qual a produção é liderada pelo município de Três Lagoas (MS) com 23,4%, seguido por Ribas do Rio Pardo e Água Clara, com 19% e 11,7%, respectivamente.

De acordo com Oliveira *et al.* (2020) na fronteira Leste do Estado de Mato Grosso do Sul, compreendendo Três Lagoas (conhecida como a Cidade das Águas), Água Clara e Ribas do Rio Pardo, vivenciaram nas últimas décadas uma revolução em suas atividades econômicas, da pecuária extensiva para o plantio de eucalipto. Com o crescimento acelerado do cultivo de eucalipto na região para abastecer as fábricas de papel e celulose do município de Três Lagoas/MS, o Estado de Mato Grosso do Sul elevou-se ao ranking nacional na produção de celulose.

Portanto, a região na qual está inserida a bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) tem forte destaque agrícola, com o uso e cobertura da terra dominado pela silvicultura do eucalipto da espécie *grandis*. Na bacia hidrográfica está sediada a fábrica da empresa internacional de produção de papel e celulose, também tem a peculiaridade por estar situada na faixa de transição Cerrado/Mata Atlântica, possuindo um pequeno enclave (transição) na sua foz, próximo ao Rio Paraná, conforme análise do mapeamento do Projeto GeoMS (Embrapa, 2011). As bacias hidrográficas são espaços físico-territoriais estratégicos para a gestão ambiental, compreendendo como importantes unidades de análise dos impactos da ação antrópica sobre as paisagens naturais, seus rebatimentos sobre a dinâmica dos fluxos de serviços ecossistêmicos e seus efeitos sobre o bem-estar humano (Brasil, 1997). Assim, os serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas e sua valoração são temáticas fundamentais.

Com as transformações no uso e cobertura da terra e consequente modificação da oferta de serviços ecossistêmicos – devido as pressões antropogênicas, especialmente na área da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) advindas das ações econômicas, surgem algumas indagações: Quais são os impactos da dinâmica do uso da terra sobre os serviços ecossistêmicos providos pela bacia hidrográfica? O uso e cobertura da terra influenciam no estoque e sequestro de carbono? Como propor valores ideais de avaliação dos serviços

---

<sup>4</sup> <https://portal.sistemafamasul.com.br/noticias/mato-grosso-do-sul-exporta%C3%A7%C3%B5es-de-produtos-florestais-somaram-us-15-bilh%C3%A3o-em-2021#:~:text=Eucalipto%20E2%80%93%20Mais%20de%201%2C1,e%2011%2C7%25%20respectivamente.>

ecossistêmicos presentes nas propriedades rurais da bacia hidrográfica? A dinâmica do uso da terra pode afetar os valores dos serviços ecossistêmicos?

Diante dos questionamentos, fica evidente a necessidade de analisar os benefícios advindos das funções dos ecossistemas – e por contrapartida os danos, evidenciando que os efeitos das ações humanas sobre o ambiente natural trazem impactos/consequências negativas (ou positivas) para os próprios agentes modificadores do meio (Costanza, 1997; Daily, 1997; Kremen, 2005; Hackbart, 2016).

Nesse contexto, a pesquisa tem a proposta de realizar a avaliação e valoração de serviços ecossistêmicos com ênfase no estoque e sequestro de carbono, na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro, Mato Grosso do Sul – Brasil, a fim de propor cenários futuros com o auxílio da modelagem preditiva na bacia hidrográfica para os anos de 2033 e 2051, considerados anos chave para avaliação do cumprimento das metas dos acordos internacionais sobre as mudanças climáticas.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 2019, p.112) busca ampliar o conhecimento e desenvolvimento de tecnologias que aumentem a provisão de serviços ecossistêmicos. Para isso, as geotecnologias desempenham um papel crucial na compreensão e no monitoramento dos serviços ecossistêmicos, pois permitem a coleta de dados espaciais e a análise geoespacial. Além de facilitar a identificação, a quantificação e o mapeamento dos serviços fornecidos pelos ecossistemas.

Com a aplicação de geotecnologias para análise espacial e temporal da paisagem (rural) pode-se identificar as multifuncionalidades, as áreas frágeis e as áreas potenciais à prestação de SE, realizar a modelagem e geração de cenários futuros de SE, bem como avaliar as mudanças nos serviços ecossistêmicos ao longo do tempo e entender as relações complexas entre os ecossistemas e as atividades humanas. Também, ajuda na valoração econômica da provisão de SE em sistemas naturais e produtivos, permitindo assim modelar e prever os serviços ecossistêmicos em determinadas áreas, apoiando a tomada de decisões relacionadas ao ordenamento físico-territorial, gestão de recursos naturais e conservação ambiental (EMBRAPA, 2019).

A aplicação do sensoriamento remoto por satélite permite monitorar o uso e cobertura da terra, identificar áreas de desmatamento e degradação ambiental que afetam diretamente os serviços ecossistêmicos, especialmente relacionados ao carbono (Iverson, Echeverria, Nahuelhual, 2014; De Araujo Barbosa, Atkinson, Dearing, 2015; Vargas, Willemen, Hein, 2019; Fu *et al.*, 2022; Tian *et al.* 2022; Jiang *et al.*, 2023). Dessa forma, a

ligação entre as geotecnologias e os serviços ecossistêmicos é fundamental para promover o manejo adequado dos recursos naturais, a conservação da biodiversidade e a sustentabilidade ambiental.

Por intermédio das técnicas de sensoriamento remoto pode-se reconhecer as diferentes coberturas da terra e, por conseguinte, monitorar as transformações no uso e cobertura da terra (UCT). Além disso, com a utilização de modelos de Autômatos Celulares (AC) combinado com as cadeias de Markov é possível simular e prever os padrões das mudanças espaço-temporais nas paisagens em função de diversos fatores, como a continuidade de mudanças atuais (CMA), ou no cenário conservacionista de proteção florestal (PF). As mudanças no UCT, a degradação acentuada e a perda da biodiversidade ao longo do tempo comprometem o funcionamento dos ecossistemas, e conseqüentemente, causam impactos nos serviços ecossistêmicos (SE) (Pereira, 2020).

## **1.2 HIPÓTESE**

Tem-se como premissa que o levantamento de uso e cobertura da terra, a predição de cenários futuros e as análises de estoque e sequestro de carbono por meio do modelo de avaliação *InVEST* integrados nos modelos CA-Markov, podem oferecer um novo cenário para valoração dos serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas no contexto do Pagamento por Serviços Ambientais.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Realizar a avaliação de serviços ecossistêmicos com ênfase no estoque e sequestro de carbono na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro, Mato Grosso do Sul - Brasil, a fim de propor cenários futuros com o auxílio da modelagem preditiva baseada no modelo CA-Markov.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos a seguir estão associados ao desenvolvimento dos capítulos apresentados nesta Tese.

- a) Analisar as mudanças espaço-temporais (1984, 2004, 2009, 2015 e 2021) no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro, por meio de técnicas de classificação supervisionada utilizando o algoritmo *Random Forest* na plataforma *Google Earth Engine - GEE*;
- b) Simular cenários futuros (modelo preditivo da tendência atual e de proteção florestal) de uso e cobertura da terra na área de estudo, aplicando as técnicas de *CA-Markov* no *software PLUS Model* para o ano de 2033 e 2051;
- c) Avaliar os serviços ecossistêmicos de estoque e sequestro de carbono e simular o Pagamento por Serviços Ambientais na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS);
- d) Estimar o estoque e o sequestro de carbono com aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, utilizando o *software InVEST*.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO**

O presente capítulo traz uma discussão teórico-metodológica dos principais temas e conceitos trabalhados na tese. Por se tratar de um recorte espacial por bacia hidrográfica, a discussão sobre os instrumentos de políticas que embasam a bacia hidrográfica como unidade de planejamento físico-territorial é fundamental.

Além das discussões sobre as políticas de incentivos de pagamentos por serviços ambientais de modo a evidenciar os serviços ecossistêmicos e a valoração ambiental, especialmente com as questões de discussões atuais que estamos vivendo, no contexto de mudanças climáticas, transformações no uso e cobertura da terra.

Traz-se a discussão sobre o armazenamento/estoque e sequestro de carbono e a importância das geotecnologias para modelagem preditiva de cenários futuros em bacias hidrográficas, e assim contribuir para a implementação de ações que visem equilibrar as atividades econômicas com a conservação ambiental.

### **2.1 BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO TERRITORIAL**

O Brasil é um país que dispõe da maior quantidade de recursos hídricos endógenos, de superfície e subterrâneo, devido à sua dimensão continental e localização tropical e equatorial (Pereira Jr., 2004). Entretanto, apesar de possuir essa grande reserva, possui problemas em relação à quantidade e qualidade da água, uma vez que a população está mais concentrada em algumas regiões do país (ANA, 2018).

Diante disso, tem-se a Lei Federal Nº. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, a fim de realizar uma adequada gestão dos recursos hídricos no país e equacionar os conflitos gerados pela disponibilidade-demanda em função do crescimento urbano, agrícola e industrial que ocasiona o quadro de degradação ambiental dos cursos d'água (ANA, 2018, p.3).

Os fundamentos (Art.1) da Política Nacional dos Recursos Hídricos – PNRH são:

- I - A água é um bem de domínio público;
- II - A água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III - Em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV - A gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das

águas;

V - *A bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;*

VI - *A gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades (Brasil, 1997).*

Observa-se o uso da bacia hidrográfica como unidade territorial da PNRH e da Atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH. A bacia hidrográfica é uma área de drenagem topograficamente delimitada e formada por um rio principal e seus afluentes ou tributários. Segundo Santos (2004, p.85),

Uma bacia hidrográfica circunscreve um território drenado por um rio principal, seus afluentes e subafluentes permanentes ou intermitentes. Seu conceito está associado à noção de sistema, nascentes, divisores de águas, cursos hierarquizados e foz. Toda ocorrência de eventos em uma bacia hidrográfica, de origem antrópica ou natural, interfere na dinâmica desse sistema, na quantidade dos cursos de água e sua qualidade (Santos, 2004, p. 85).

Vale destacar sobre o termo utilizado, como as bacias hidrográficas, as sub-bacias e as microbacias. No livro intitulado “Água e bacias hidrográficas: Planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas”, Piroli (2022, p.14) traz aspectos conceituais esclarecendo qual termo é mais recomendado utilizar para fins de planejamento e gestão das águas. O Quadro 1 apresenta os conceitos relativos à bacia hidrográfica.

**Quadro 1.** Conceitos relativos à bacia hidrográfica como unidade de análise.

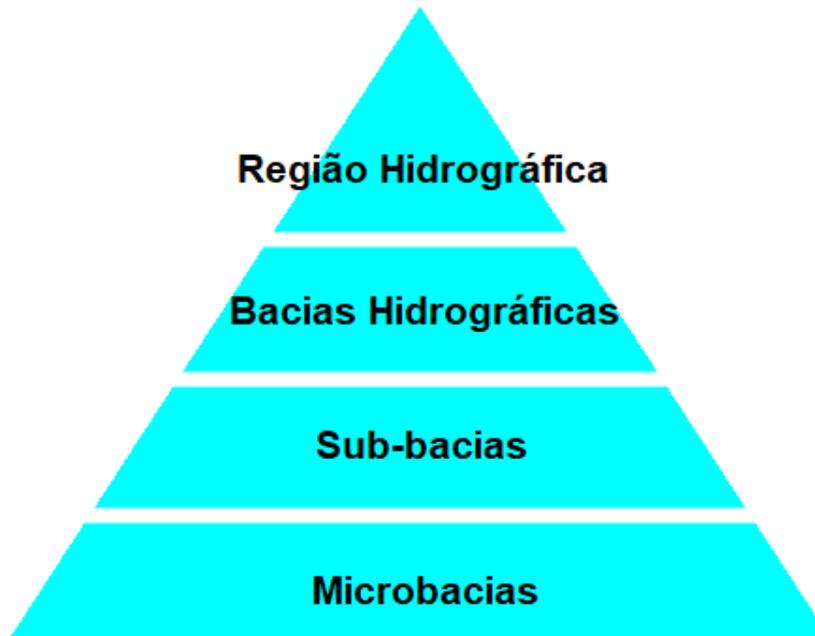
<b>Christofolletti (1980)</b>	Área drenada por determinado rio ou rede fluvial, cuja drenagem é constituída por um conjunto de canais de escoamento interligados. A área drenada por esse sistema fluvial é definida como bacia de drenagem, e essa rede de drenagem depende não só do total e do regime das precipitações, como também das perdas por evapotranspiração e infiltração.
<b>Mota (1995)</b>	A bacia hidrográfica é uma unidade para a preservação dos recursos hídricos, pois, as atividades desenvolvidas nela têm influência em toda a bacia. Numa perspectiva global, a bacia hidrográfica é uma unidade básica de gestão, sendo que para o autor “a unidade geográfica para o planejamento, avaliação e controle dos recursos hídricos deve ser a bacia hidrográfica”.
<b>Leal (1995)</b>	Cada elemento da bacia, matérias e energias possuem uma função própria, sendo que estes estão estruturados e intrinsecamente relacionados entre si, qualquer ocorrência em algum desses elementos terá reflexos sobre os demais.
<b>Faustino (1996)</b>	Unidade geográfica compreendida entre divisores de água. Trata-se de um espaço limitado por partes mais altas (como montanhas, morros ou ladeiras), com um sistema de drenagem superficial que concentra suas águas em um rio principal ligado ao mar, a um lago ou a outro rio maior.
<b>Guerra e Cunha (2000)</b>	Integra as paisagens natural e social, os impactos e a gestão, por isso, o conceito de bacia hidrográfica traz uma visão integradora. É uma forma de rede que drena a água para um ponto terminal comum, seja este um rio, lago ou reservatório. Integra uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades humanas nelas desenvolvidas uma vez que, mudanças significativas em qualquer dessas unidades, podem gerar alterações na dinâmica da bacia .
<b>Rodrigues e Adami (2005)</b>	Um sistema que compreende um volume de materiais, predominantemente sólidos e líquidos, próximo à superfície terrestre, delimitado interna e externamente por todos os processos que, a partir do fornecimento de água pela atmosfera, interferem no fluxo de matéria e de energia de um rio ou de uma rede de canais fluviais. Inclui, portanto, todos os espaços de circulação, armazenamento saídas da água e do material por ela transportado, que mantêm relações com esses canais
<b>Gonzalez (2004) e Rodriguez (2008)</b>	Constituem um tipo especial de sistema ambiental, em particular de geossistema, que pode ser definido como um espaço físico organizado de acordo com o escoamento de determinados fluxos de água. É a superfície terrestre drenada por um sistema fluvial contínuo e bem definido, cujas águas vertem a outros sistemas fluviais ou a outros corpos de água, e seus limites são geralmente determinados pelo divisor principal segundo o relevo.

<b>Coelho Netto (2005)</b>	Área da superfície que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, num determinado ponto de um canal fluvial. Bacias variam de tamanho e articulam-se a partir de divisores de drenagens principais, drenando a água em direção a um canal-tronco ou coletor principal, e constituem um sistema de drenagem hierarquicamente organizado, que podem ainda ser desmembrados em sub-bacias.
<b>Lima (2006)</b>	Compreende toda a área de captação natural da água da chuva que proporciona escoamento superficial para o canal principal e seus tributários. O limite superior de uma bacia hidrográfica é o divisor de águas (divisor topográfico), e a delimitação inferior é a saída da bacia (confluência)
<b>Santos (2013)</b>	Na bacia hidrográfica “são visíveis às transformações engendradas pela ação antrópica na bacia como um todo, bem como no recurso principal que a mesma dispõe: a água”.
<b>Sampaio (2015)</b>	Com a perspectiva de estudos ambientais na escala da bacia hidrográfica, é possível trazer essa integração de assuntos físicos e históricos de ocupação da natureza, pois, o sistema de drenagem juntamente com a atividade antrópica, na visão socioeconômica-ambiental (aspecto social, econômico e ambiental) ocasiona alguns impactos na bacia, pela relação do homem/sociedade com os recursos naturais locais.

Elaboração: Sampaio (2023). Fonte: Piroli (2022) e Sampaio (2015).

Conforme Piroli (2022), as bacias hidrográficas são reconhecidas como a unidade fundamental mais apropriada para o gerenciamento dos recursos naturais, visto que sua formação foi moldada pela natureza ao longo de sua evolução histórica. A Figura 1 apresenta a lógica esquemática sobre a hierarquização dos termos.

**Figura 1.** Hierarquização dos Termos para o planejamento e gestão das águas.



Elaboração: Sampaio (2023). Fonte: Piroli (2022).

O termo Região Hidrográfica é a base físico-territorial para planejamento e gestão das águas, composta por 12 regiões hidrográficas (Resolução CNRH n.32/2003), representa a maior unidade de gerenciamento de recursos hídricos no Brasil (PNRH). O termo Bacias Hidrográficas possui diversos conceitos de acordo com cada autor, por conseguinte, o termo sub-bacias é definido por Piroli (2022, p.55) como parte de uma bacia hidrográfica, podendo alcançar aproximadamente 700 km<sup>2</sup> e as microbacias são conhecidas como “bacias de cabeceiras” e são menores do que 100km<sup>2</sup> (Faustino, 1996).

O gerenciamento deve partir sempre das menores bacias (microbacias), vez que o conjunto delas forma as bacias maiores (denominadas de sub-bacias) e, por conseguinte, o conjunto delas firmam as bacias hidrográficas. Apesar dos termos serem usados como sinônimos, tem suas diferenciações em relação à hierarquização, podendo ultrapassar fronteiras nacionais. Entretanto, quando se trabalha com as bacias hidrográficas individualmente, “todas podem ter a denominação de bacias, uma vez que o conceito para os diferentes níveis hierárquicos é o mesmo” (Piroli, 2022, p.56).

Assim, o que realmente importa é ter o planejamento e manejo em pequenas áreas, pois a partir desta é possível estender as ações realizadas nas microbacias, para sub-bacias e posteriormente para “grande bacia”.

Dessa forma, optou-se pela escolha da bacia hidrográfica como recorte territorial

da área de estudo, como forma de trabalhar a integração dos componentes presentes na bacia, aspectos físicos e humanos, uma vez que uma atividade antrópica pode afetar a bacia como um todo. Em relação ao quesito econômico-ecológico, segundo Andrade (2012, p.55) as bacias hidrográficas podem ser consideradas como “ativos” naturais que geram bens e serviços para a sociedade, conhecidos como serviços ecossistêmicos.

A Lei Federal Nº. 9.433, de 1997 atribuiu um valor econômico à água, com o seu uso mensurado a partir dos preceitos da economia, em que “quanto mais escasso um recurso, maior valor econômico ele tem”. Porém, como a água é considerada de “domínio público”, no Brasil ela não pode ser negociada no mercado, logo, o seu valor não pode ser definido pela relação oferta e procura, mas sim por meio de metodologias estabelecidas pela PNRH, como a cobrança pelos usos dos recursos hídricos (PNRH, 1997, Art.19), a fim de mostrar para a sociedade que a água é um bem limitado e que deve ser valorizado (ANA, 2018, p.9).

Conforme o Art. 5º da Lei Federal nº. 9.433 de 1997, os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos são: “I - os Planos de Recursos Hídricos; II - o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; III - a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; IV - a cobrança pelo uso de recursos hídricos; V - a compensação a municípios; VI - o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos”.

Os Planos de Recursos Hídricos são planos diretores, elaborados por bacia hidrográfica, por Estado e para o País, que visam a fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos, que devem conter (PNRH, 1997, Art.6 e 7): I - diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos; II - análise de alternativas de crescimento demográfico, de evolução de atividades produtivas e de modificações dos padrões de ocupação do solo; III - balanço entre disponibilidades e demandas futuras dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade, com identificação de conflitos potenciais; IV - metas de racionalização de uso, aumento da quantidade e melhoria da qualidade dos recursos hídricos disponíveis; V - medidas a serem tomadas, programas a serem desenvolvidos e projetos a serem implantados, para o atendimento das metas previstas; VIII - prioridades para outorga de direitos de uso de recursos hídricos; IX - diretrizes e critérios para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos; X - propostas para a criação de áreas sujeitas a restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos.

Os usos múltiplos da água são muitos, dentre eles: o consumo humano;

dessedentação animal; abastecimento público; diluição, transporte ou a disposição final de efluentes; aproveitamento de potenciais hidrelétricos; transporte aquaviário; além do uso em indústrias para fabricação de produtos e na irrigação para a produção de alimentos, na aquicultura; esportes e lazer (ANA, 2018, p.10). Para cada uso da água requer um determinado padrão de qualidade”, por exemplo, uma água para abastecimento humano precisa de uma qualidade superior à da água utilizada para o transporte aquaviário.

Assim, as bacias hidrográficas são consideradas espaço físico-territorial estratégico para a gestão ambiental, com ênfase nos recursos hídricos. Elas são importantes como unidades de análise dos impactos da ação antrópica sobre as paisagens naturais, seus rebatimentos sobre a dinâmica dos fluxos e serviços ecossistêmicos e seus efeitos finais sobre o bem-estar humano (Andrade *et al.*, 2012).

Portanto, as bacias hidrográficas prestam serviços ecossistêmicos, como os serviços hidrológicos (purificação e filtragem de água), regulação dos fluxos estacionais, controle de erosão e sedimentos e preservação de habitats naturais. Uma bacia hidrográfica com alta proporção de áreas florestadas possui maior capacidade de moderação de escoamento superficial e purificação dos recursos hídricos.

A bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) é importante para essa investigação por constituir-se como bacia modelo da empresa de papel e celulose, na qual encontra-se situada a sede da fábrica (Sampaio; Pinto, 2019; Silva, 2020).

### **2.1.1 Políticas de Recursos Hídricos: Mato Grosso do Sul**

A legislação federal da Política Nacional de Recursos Hídricos e a Política Estadual de Recursos Hídricos preveem a elaboração de planos de recursos hídricos, a Outorga de Direitos de uso dos Recursos Hídricos, as infrações e penalidades, a cobrança pelo uso dos Recursos Hídricos, Rateio de Custos das Obras. No Plano Estadual de Recursos Hídricos deverá constar a Divisão Hidrográfica do Estado que definirá unidades hidrográficas, com dimensões e características que permitam e justifiquem o gerenciamento descentralizado dos recursos hídricos.

No que diz respeito à legislação, em nível estadual tem-se a Política Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul e o Sistema Estadual de Gerenciamento dos Recursos Hídricos instituída pela Lei Estadual N.º.2.406/2002, seguindo os mesmos princípios e diretrizes estabelecidas na PNRH. Assim, define alguns princípios, como: o

gerenciamento descentralizado, participativo e integrado, o reconhecimento do recurso hídrico como um bem público de valor econômico, cuja utilização deve ser cobrada conforme os aspectos de quantidade e qualidade, além da adoção da bacia hidrográfica como unidade físico-territorial de planejamento e gerenciamento.

O Estado de Mato Grosso do Sul é privilegiado em relação aos recursos hídricos estando inserido nas Regiões Hidrográficas do Rio Paraná e do Rio Paraguai, conforme divisão contida na Resolução nº 32, de 25 de junho de 2003 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

O Conselho Estadual de Recursos Hídricos, por meio da Resolução CERH-MS nº 011/2009 aprovou o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul, Lei Estadual nº7.598/2009, como instrumento para orientar o planejamento e a implementação da PERH.

Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul, este é um dos Estados mais rico em água e detentor de uma das maiores reservas de água doce superficial, além de expressiva reserva de água subterrânea com destaque para o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá da Bacia Sedimentar do Paraná (CPRM, 2012). Com esse privilégio, o Estado tem elevada responsabilidade na proteção dos mananciais para garantir as funções ecológicas, econômicas e sociais dos recursos hídricos, de maneira a aplicar um modelo sustentável de desenvolvimento de seus usos múltiplos (Mato Grosso do Sul, 2010). Entretanto, vale destacar sobre essa sensação de abundância de recursos hídricos, pois no extenso território brasileiro tem-se a presença de três das bacias hidrográficas que contêm o maior volume<sup>5</sup> de água doce do mundo – Amazonas, São Francisco e Paraná.

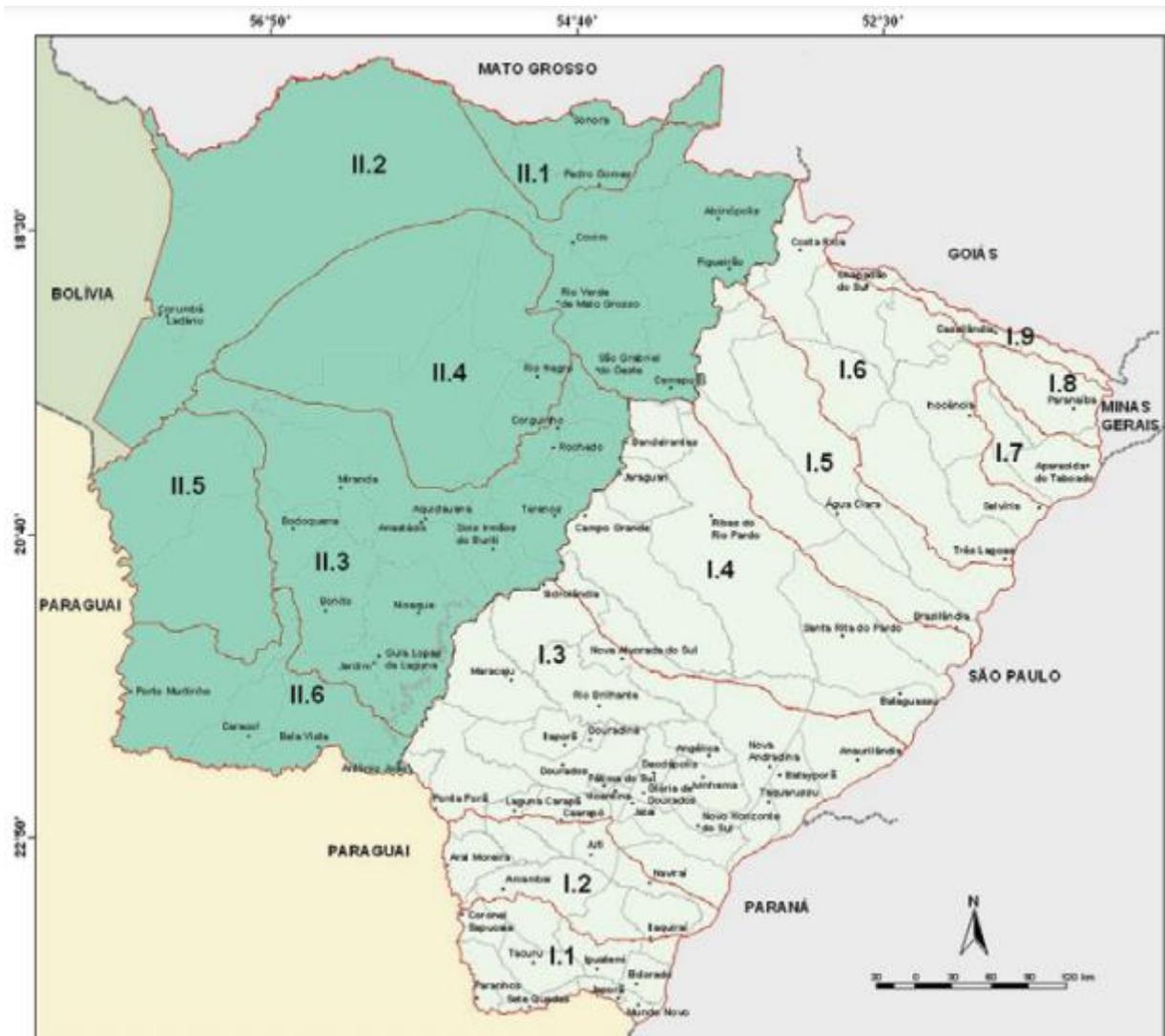
O Plano Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul (PERH<sup>6</sup>-MS) e a coordenação da Secretaria de Estado de Meio Ambiente, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia (SEMAC) definiram 15 Unidades de Planejamento e Gerenciamento de Mato Grosso do Sul (UPGs), cada uma das sub-bacias hidrográficas correspondem a toponímia de seu rio principal, como mostra a Figura 2. Na (I) Região Hidrográfica do Paraná tem as UPGs: (I.1) Iguatemi; (I.2) Amambai; (I.3) Iviema; (I.4) Pardo; (I.5) Verde; (I.6) Sucuriú; (I.7) Quitéria; (I.8) Santana; e (I.9) Aporé. Na (II) Região Hidrográfica do Paraguai tem-se as seguintes UPGs: (II.1) Correntes; (II.2) Taquari; (II.3) Miranda; (II.4) Negro; (II.5) Nabileque; e (II.6) Apa. (Mato Grosso do Sul, 2010).

---

<sup>5</sup> <https://www.ebc.com.br/especiais-agua/agua-no-brasil/>

<sup>6</sup> <https://www.imasul.ms.gov.br/plano-estadual-de-recursos-hidricos-de-ms/>

**Figura 2.** Unidades de Planejamento e Gerenciamento adotadas no Plano Estadual de Mato Grosso do Sul.



**Plano Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul**  
**UNIDADES DE PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO - UPG**

**REGIÃO HIDROGRÁFICA**

PARANÁ      PARAGUAI

**Unidades de Planejamento e Gerenciamento**

- |                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| UPGs Paraná        | UPGs Paraguai        |
| I.1 - UPG Iguatemi | II.1 - UPG Correntes |
| I.2 - UPG Amambai  | II.2 - UPG Taquari   |
| I.3 - UPG Ivinhema | II.3 - UPG Miranda   |
| I.4 - UPG Pardo    | II.4 - UPG Negro     |
| I.5 - UPG Verde    | II.5 - UPG Nabileque |
| I.6 - UPG Sucuriú  | II.6 - UPG Apa       |
| I.7 - UPG Quiteria |                      |
| I.8 - UPG Santana  |                      |
| I.9 - UPG Aporé    |                      |

**Convenções**

- Sede Municipal
- Divisão Municipal
- ▭ Limite da UPG
- Limite Estadual
- Limite Internacional
- - - - - Divisor de Região Hidrográfica



Fonte: IBGE - SEMAC / SUPEMA

Escala 1: 4.500.000

Fonte: PNRH-MS (2009).

De acordo com as Unidades de Planejamento e Gerenciamento (UPGs) de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul (PERH-MS), os municípios Três Lagoas, Selvíria, Inocência, Figueirão, Costa Rica, Chapadão do Sul, Cassilândia e Água Clara são integrantes da UPG (1.6) Sucuriú.

Todo aparato exposto serve para auxiliar o Planejamento Ambiental, principalmente na questão de proteção dos recursos hídricos. Conforme Dibieso (2009, p.3),

No processo de planejamento e gestão dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica devem ser considerados todos os elementos que compõem a sua paisagem (água, relevo, solo, flora, fauna, pastagem, agricultura, residências, indústrias, população, economia, etc.) e compreendê-la como uma totalidade, composta por elementos naturais e sociais, os quais são dinâmicos e estão inter-relacionados.

Para Santos (2004),

O objetivo do planejamento ambiental é estabelecer normas para territórios complexos e, para tanto, ele precisa estar suficientemente ligado à realidade em seus múltiplos aspectos. Tem que interpretar o meio em relação à sua composição, estrutura, processo e função, como um todo contínuo no espaço. Por essa razão, seu diagnóstico procura compreender o meio de forma global, por intermédio do levantamento de dados ligados a diversas disciplinas (Santos, 2004, p. 72).

Ross (2009) destaca a estreita conexão entre a geografia aplicada e o planejamento ambiental, que fornece suporte essencial para a gestão territorial e o ordenamento do espaço. Isso auxilia na compreensão dos componentes que constituem o conjunto de recursos naturais e ambientais, por meio de etapas como diagnóstico, análise, avaliação e manejo. A interação entre a complexidade do sistema e as atividades humanas, que frequentemente ocasionam alterações, é também enfatizada por Christofolletti (2009). Andrade (2012, p.56) discorre sobre a importância de se considerar as bacias hidrográficas como unidades básicas de análise e elaboração de políticas ambientais. Porém, segundo o autor, ainda não é frequente o estudo das trajetórias dos fluxos de serviços ecossistêmicos utilizando a bacia hidrográfica como escala de referência, assim como não é comum a análise da provisão de serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas em função das mudanças no tipo de cobertura de suas terras.

Dentro da bacia hidrográfica destaca-se o recurso hídrico como o mais importante, onde a qualidade da água de um manancial está intimamente ligada com os usos e atividades desenvolvidas em sua bacia hidrográfica. Portanto é necessária a manutenção do manancial hídrico para garantir água em quantidade e qualidade adequada para o abastecimento público (Dibieso, 2007) e assim proporcionar o fornecimento dos serviços ambientais.

Vale destacar o não investimentos em políticas de bacias hidrográficas no Estado de Mato Grosso do Sul, sendo importante a criação de Comitês de Bacias Hidrográficas

(CBH), previstos no Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Os CBH são órgãos colegiados onde são debatidas as questões referentes à gestão das águas, ou seja, aos recursos hídricos da bacia; articulam a atuação das entidades que trabalham com o tema; arbitram, em primeira instância, os conflitos relacionados a recursos hídricos; aprovam e acompanham a execução do Plano de Recursos Hídricos da Bacia. Os comitês são compostos por representantes do poder público, dos usuários das águas e das organizações da sociedade com ações na área de recursos hídricos (Instituto De Meio Ambiente De Mato Grosso Do Sul – IMASUL<sup>7</sup>). Atualmente, existem três comitês de bacias estaduais: CBH do Rio Miranda; CBH Ivinhema e CBH Rios Santana e Aporé; além do comitê de bacia federal – CBH Paranaíba.

Para Pirolí (2022), o planejamento e gestão por microbacias é fundamental para alcançar as condições adequadas em pequenas áreas, por meio da extensão dessa atividade é possível atingir todas as microbacias de uma determinada sub-bacia, e posteriormente para toda uma grande bacia. Assim, a proposta em trabalhar a bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) servirá como direcionamento para expansão da proposta às demais áreas, podendo atingir toda a costa Leste de Mato Grosso do Sul, especialmente na questão do estoque e sequestro de carbonos em bacias hidrográficas.

Portanto, deve-se considerar as pesquisas em bacias hidrográficas de modo a aplicar as técnicas conservacionistas com a proteção florestal, dos recursos hídricos e com atividades antrópicas sustentáveis em bacias hidrográficas, e assim garantir a oferta de serviços ecossistêmicos.

### **2.1.2 Instrumentos para o Planejamento e Ordenamento Físico-Territorial**

A Política Nacional do Meio Ambiente - PNMA<sup>8</sup>, Lei no 6.938 de 1981, instituiu o Zoneamento Ambiental que passou a ser denominado Zoneamento Ecológico-Econômico, a fim de que este, articulado aos outros instrumentos por ela propostos, contribua na preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental, bem como no desenvolvimento socioeconômico, na segurança nacional e na proteção à dignidade da vida humana.

O Zoneamento Ambiental é um instrumento que deve incorporar a variável

---

<sup>7</sup> <https://www.imasul.ms.gov.br/instrumento-de-gestao/>

<sup>8</sup> [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/16938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16938.htm)

ambiental no âmbito do ordenamento territorial de modo que as atividades humanas a serem desenvolvidas em um determinado espaço sejam viáveis, considerando aspectos ambientais e não somente o ponto de vista econômico ou social (Santos; Ranieri, 2015).

O decreto Nº 4.297, de 10 de julho de 2002 regulamentou o art.9, inciso II, da Lei Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabelecendo critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil - ZEE, e deu outras providências.

O zoneamento ecológico-econômico é um instrumento para racionalização da ocupação dos espaços e de redirecionamento de atividades. Ele deve servir de subsídio a estratégias e ações para a elaboração e execução de planos regionais em busca do desenvolvimento sustentável. O Programa ZEE tem por objetivo executar o zoneamento em diversas escalas de tratamento das informações e integrá-lo aos sistemas de planejamento em todos os níveis da administração pública. Nesse sentido, o ZEE torna-se um importante instrumento para subsidiar a formulação de políticas territoriais (Brasil, 2022).

O ZEE para o Estado de Mato Grosso do Sul é um instrumento de gestão para o governo estadual na busca do desenvolvimento sustentável, nele consta as características ambientais, as potencialidades e as fragilidades (proposta por Ross, 1994 e Crepani, 2001), nos seus diferentes aspectos: físicos, biológicos e antrópicos.

Os estudos de zoneamento ecológico econômico, conhecido por zoneamento ambiental possibilitam a compreensão das relações existentes na bacia hidrográfica e a criação de unidades geográficas com características homólogas, nas quais a compreensão dos aspectos do meio natural permite o equacionamento entre as diferentes situações de desenvolvimento, conservação, preservação e recuperação ambientais, bem como a percepção da significância dos impactos gerados, no sentido de se obter, após um diagnóstico e um estudo evolutivo, uma tendência que possa ser prognosticada a partir dessa evolução (Ross *et al.*, 1995).

Outro instrumento fundamental é a Lei nº 12.651/2012 que tem destaque pela obrigatoriedade do Cadastro Ambiental Rural – CAR das propriedades rurais, além do seu enquadramento em módulos fiscais - MF que variam conforme cada município. De acordo com Sampaio (2015) a medida agrária medida pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária - INCRA mediante a divisão das propriedades por módulos fiscais proporciona tratamento diferenciado para as propriedades conforme a variável “tamanho” da propriedade, sem considerar a condição social do proprietário rural ou a possibilidade

de desmembramento dos imóveis.

Tem-se também a regularização da recomposição das margens dos cursos d'água e de nascentes, ou seja, das áreas restritivas nas quais variam conforme o módulo fiscal do imóvel rural.

Assim, as faixas mínimas para regularização as APPs hídricas são: 5 metros para propriedades rurais de até 1 MF; 8 metros para imóveis rurais maiores do que 1 até 2 MF; 15 metros para propriedades rurais de 2 a 4 MF; 20 metros de recuperação para imóveis rurais de 4 a 10 MF com rios da largura de até 10 metros e para rios que possui largura maior do que 10 metros a APP é de 30 a 100 metros para imóveis rurais superiores a 10 MF. Para nascentes a obrigação mínima de recomposição é de 15 metros independente do MF, para lagoas e lagos naturais a recomposição varia também, sendo: 5 metros para imóveis rurais de até 1 MF; 8 metros para imóveis rurais maior de 1 a 2 MF; 15 metros para imóveis rurais maior de 2 a 4 MF; 30 metros para imóveis rurais superiores a 4 MF. E a recomposição para veredas é de 30 metros para imóveis rurais de até 4 MF e 50 metros p para imóveis rurais superiores a 4 MF (Oliveira *et al.*, 2014; Sampaio, 2015).

## **2.2 SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS E VALORAÇÃO AMBIENTAL: POLÍTICAS E INCENTIVOS DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS**

O tema de serviços ecossistêmicos não é novo, constituindo-se conceitualmente de modo efetivo no início dos anos 2000 (MEA, 2005). Ao longo de sua evolução conceitual buscou-se entender como as necessidades e o bem-estar da humanidade interagem qualitativa e quantitativamente com os recursos naturais (Genaro, 2020).

Os ecossistemas exercem funções que influencia significativamente a sociedade, como por exemplo, a manutenção da disponibilidade e da qualidade da água, do clima regional e global e da biodiversidade, são chamadas de serviços ambientais/ecossistêmicos. Os serviços resultantes dessas funções variam ao longo do tempo e podem ser vulneráveis à ação humana (Dayly *et al.*, 2000).

Os serviços ecossistêmicos (SE) são todos os benefícios diretos e indiretos que a população humana obtém da natureza, ou seja, gerados a partir das complexas interações entre os componentes do capital natural (Daily, 1997; Constanza *et al.*, 1997; Mea, 2005). Dentre eles tem-se alguns exemplos de serviços prestados pelos ecossistemas: a formação

dos solos, controle contra a erosão, regulação do clima, armazenamento de carbono, a ciclagem de nutrientes, o provimento de recursos hídricos em qualidade e quantidade, a manutenção do ciclo de chuvas, a proteção da biodiversidade, a proteção contra desastres naturais, elementos culturais, a beleza paisagística, a manutenção de recursos genéticos, dentre outros. Inclui tanto os benefícios percebidos pelas pessoas (alimentos) como aqueles não percebidos (regulação do clima), a maioria dos serviços ecossistêmicos não é percebida por seus beneficiários (Costanza, 2008).

A publicação do *Millenium Ecosystem Assessment* - MEA consolidou o termo “serviços ambientais” e classificou-os em quatro categorias fundamentais, são elas: os serviços de provisão, serviços de regulação, serviços de suporte e serviços culturais. Os serviços de suporte compreendem os produtos obtidos dos ecossistemas e que são oferecidos diretamente à sociedade, como alimentos e fibras naturais, madeira para combustível, água, material genético, manutenção da biodiversidade, manutenção do ciclo de vida – como a ciclagem de nutrientes, água e fotossíntese, e formação de solo. Os serviços de provisão têm a função de fornecer alimentos, fibras/madeira, recursos genéticos, medicinais e ornamentais, e água potável. Os serviços de regulação englobam os benefícios obtidos pela sociedade a partir da regulação natural dos processos ecossistêmicos, como a manutenção da qualidade do ar e o controle da poluição, por meio da regulação da composição dos gases atmosféricos; a regulação do clima; a regulação dos fluxos de água (ciclo hidrológico) e o controle das enchentes, evitando inundações e contribuindo para a recarga dos aquíferos; o controle da erosão; a purificação da água; a redução de incidência de pragas e doenças pelo controle biológico, a regulação de danos naturais e a polinização de plantas agrícolas e silvestres. Os serviços culturais são os benefícios não materiais obtidos pelos ecossistemas, como o enriquecimento espiritual e cultural, desenvolvimento cognitivo, reflexão sobre os processos naturais, oportunidades de lazer, ecoturismo e recreação (MEA, 2003; Parron *et al.*, 2015).

Além da definição e classificação proposto pela Avaliação Ecossistêmica do Milênio (Millennium Ecosystem Assessment, 2003), vale ressaltar os trabalhos realizados pela Agência Ambiental Europeia (EEA), desde 2009, que vem buscando elaborar um sistema de classificação internacional para os SE, chamado de Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (*Common International Classification of Ecosystem Services* - CICES), que está atualmente em sua versão 5.2 que será lançada em outubro de 2023 (Haines-Young, 2023). A classificação CICES tomou como ponto de partida a

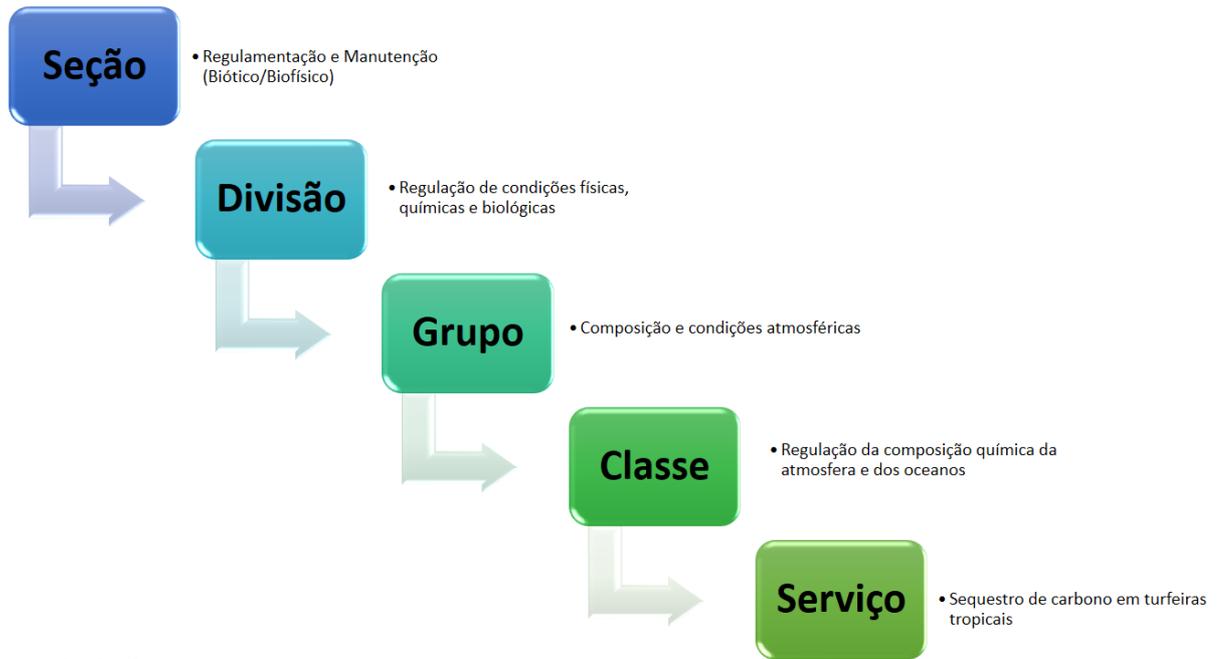
tipologia sugerida pela Avaliação Ecológica do Milênio (Mea, 2005) da qual, com a exceção da categoria serviços de suporte, considerou, em seus níveis mais elevados, as outras três categorias de serviços: provisão, regulação e cultural. Assim, o CICES (2023) tem como objetivo estabelecer um sistema de classificação de SE que fosse internacionalmente padronizado, de modo que essa padronização a nível internacional possibilite o estabelecimento de métodos para avaliação dos SE, valoração ambiental, e mapeamentos que possam ser reproduzíveis e comparáveis (Ferraz et al., 2019). Vale destacar que os serviços de suporte, definido pelo MEA (2005) são considerados desnecessários no CICES (2023), pois, são sinônimos de funções e processos ecológicos são sinônimos de funções e processos ecológicos (Haines-Young; Potschin, 2018).

O CICES<sup>9</sup> V5.2 mantém a estrutura hierárquica de quatro níveis da V5.1 e a facilidade para os usuários adicionarem tipos de classe abaixo do nível de classe é mantida. Os descritores ao nível do Grupo continuam a ser enquadrados de uma forma que o ecossistema é, em última análise, útil para as pessoas (por exemplo, nutrição), enquanto o nível Divisional captura os atributos funcionais, ou as propriedades do ecossistema em consideração, que facilitam a utilização humana (direta ou indiretamente). Ambas as dimensões estão agora refletidas na definição da classe, devido alguns serviços ecossistêmicos resultarem de uma combinação de fatores bióticos e abióticos, que são muitas vezes difíceis de separar, as classes “bióticas” de V5.1 são agora referidas como “classes biofísicas”. Uma vez que os ecossistemas são definidos como todas as plantas e animais que vivem numa área, o conceito de serviços ecossistêmicos aborda agora o fato de que pode haver alguns componentes de “todo o ecossistema”. As classes 'abióticas' de V5.1 são agora chamadas de 'classes geofísicas'. Estes devem ser utilizados para os resultados dos ecossistemas que são independentes ou em grande parte dissociados dos processos vivos.

O Figura 3 apresenta o sistema taxonômico dividido em níveis hierárquicos do CICES, inicia-se da descrição geral para a mais específica, enquadra os serviços nas seguintes classes: 1) Serviços de provisão (provisão comida e outros recursos, etc.); 2) Serviços de regulação e manutenção (regulação da qualidade da água, estocagem de carbono, minimização de desastres, etc.); e 3) Serviços culturais (benefícios de recreação, de saúde física e mental, turismo, apreciação estética da paisagem e outros benefícios não materiais) (Hainesyoung; Potschin, 2018).

**Figura 3.** Sistema taxonômico dividido em níveis hierárquicos do CICES V5.2

<sup>9</sup> <https://cices.eu/> - CICES\_V5.2\_29082023



Elaboração: Sampaio (2023). Fonte: Adaptado de Haines-Young e Potschin (2018).

Conforme a figura 3, observa-se a hierarquia após o nível Seção, tem-se a Divisão, Grupo, Classe e tipo de Serviço. Essa estrutura hierárquica do CICES foi proposta como uma maneira superar os desafios que possam surgir em relação às diferentes temáticas e escalas espaciais utilizadas em aplicações diversas. Assim, para comparação, as classes categóricas podem ser agregadas ou generalizadas, permitindo aos usuários descer para o nível mais adequado de detalhamento conforme sua aplicação, agrupar ou combinar resultados fazendo comparações mais amplas ou generalizadas. No sistema CICES, a sucessiva hierarquia (seção, divisão, grupo e classe) permite, progressivamente, uma descrição mais específica e detalhada de cada SE. Sendo assim, pode abrigar muitos tipos de serviços dentro das categorias mais amplas, devendo ser geograficamente e hierarquicamente consistentes para permitir comparações entre diferentes regiões e para permitir a integração de estudos locais mais detalhados em um contexto geográfico mais amplo (Haines-Young; Potschin, 2018; Ferraz *et al.*, 2019).

Ressalva-se que no CICES V5.1, a regulação da composição química da atmosfera não é simplesmente equivalente ao “sequestro de carbono”, porque existem outros gases com efeito de estufa para além do CO<sub>2</sub>. O ‘sequestro de carbono’ não é um serviço ecossistêmico, mas é considerado mais como uma função ecossistêmica. No entanto, reconhece-se que pode ser utilizado como uma medida substituta do efeito regulador que o ecossistema pode ter em relação a um importante constituinte da atmosfera (Haines-Young; Potschin, 2018).

De acordo com Andrade *et al.* (2012) os SE são importantes para as atividades econômicas porque proveem os recursos necessários à produção de bens e serviços econômicos e fornecem os serviços/bens básicos para a manutenção da espécie humana, tais como alimento, água pura, dentre outros. Assim, os bens e serviços ecossistêmicos ou serviços ambientais<sup>10</sup> são os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas, portanto, o bem-estar humano é profunda e indissociavelmente dependente dos serviços ecossistêmicos (Costanza *et al.*, 1997; MEA, 2003, 2005; Andrade *et al.*, 2012). Compõem toda gama de benefícios que um determinado ambiente é capaz de prover à população, este conceito é integrado ao estudo ambiental por meio da valoração ou avaliação individual ou coletiva dos diversos serviços prestados por um determinado ambiente (Oscar Jr.; Cavalcante; Ruhberg, 2021).

Atualmente, tem-se uma ampla bibliografia internacional sobre serviços ecossistêmicos, especialmente no que diz respeito ao sequestro de carbono e as iniciativas e programas internacionais com suas inúmeras metodologias para essa estimativa da valoração. Além disso, tem-se uma vasta discussão da questão de incorporação do conceito de SE nos planos de ordenamento territorial para avaliar os impactos da mudança do uso e cobertura da terra sob os serviços prestados por um determinado ecossistema.

De acordo com Mikša *et al.* (2022), em várias partes do mundo tem-se a relevância global do tema sobre a importância dos serviços ecossistêmicos no planejamento do uso da terra com destaque para “China (Liang *et al.*, 2017), Bangladesh (Mukul *et al.*, 2017), EUA (BenDor *et al.*, 2017), Canadá (Tam; Conway, 2018), Suécia (Kaczorowska *et al.*, 2016), Finlândia (Di Marino *et al.*, 2019), Hungria (Pinke *et al.*, 2018), Espanha (Martinez-Sastre *et al.*, 2017), Itália (Salata *et al.*, 2020), Holanda (Fürst *et al.*, 2014), França (Brunet *et al.*, 2018), Indonésia (Sumarga; Hein, 2014) e Austrália (Sandhu *et al.*, 2018)”.

Na última década o tema “serviços ambientais” passou a ser considerado na formulação de políticas públicas brasileiras e nas discussões de uso e cobertura das terras. Contudo, as paisagens produtivas poderão prover a produção de alimentos e fibras, e também proverão uma ampla variedade de serviços ambientais que em sua maioria não tem valor de mercado, como a conservação da biodiversidade, regulação da água e regulação climática. Assim, a ação humana pode afetar positivamente o provimento de serviços ambientais em ecossistemas ou áreas que tenham sido degradadas, por exemplo, quando os produtores

---

<sup>10</sup> O Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima Brasileiro define os conceitos de Serviços Ecossistêmicos e Serviços Ambientais (<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/conservacao-1/servicos-ecossistemicos>).

rurais promovem a recuperação da cobertura vegetal em suas propriedades, estes contribuem para a redução da erosão do solo, aumento da capacidade de captura e armazenamento de carbono (pelo solo e vegetação) e para a melhoria da qualidade dos corpos d'água (Parron; Garcia, 2015, p. 32).

O sistema econômico é fortemente dependente do fluxo de bens e serviços ecossistêmicos ou serviços ambientais resultantes da dinâmica dos ecossistemas. As mudanças no uso e cobertura da terra que ocorrem em função da urbanização e processos de conversão da vegetação nativa em área de produção agropecuária, intensificam a exploração dos recursos naturais (Costanza *et al.*, 1997; MEA, 2005) alterando o fluxo desses serviços, desse modo, a quantificação, mapeamento e avaliação de múltiplos serviços ambientais são de grande interesse para as políticas com foco conservacionista e de ordenamento territorial (Parron; Garcia, 2015).

Dentre os serviços ecossistêmicos prestados pelas bacias hidrográficas, tem-se especial atenção os serviços hidrológicos, constituídos pelos serviços de purificação e filtragem da água, regulação dos fluxos estacionais, controle da erosão e dos sedimentos e preservação de habitats naturais, além da questão da emissão e sequestro de carbono – questão muito debatida atualmente para mitigar os efeitos do aquecimento global. Assim, bacias hidrográficas com alta proporção de áreas florestadas possuem uma maior capacidade de moderação de escoamento superficial, bem como de purificação de recursos hídricos (Andrade, 2012; Hackbart, 2016).

A valoração se mostra como um importante instrumento para a preservação ambiental e para o reconhecimento e aceitação da dependência humana em relação aos fluxos de serviços ecossistêmicos e da necessidade de preservá-los. Deve-se elucidar os custos de oportunidade envolvidos sobre o valor dos serviços ecossistêmicos, em que são poucos os estudos que tentaram captar a relação entre a dinâmica do uso do solo em bacias hidrográficas e a trajetória dos serviços ecossistêmicos. Um exercício de estimativa de valoração bem conduzido cumpre o papel de informar aos agentes a magnitude da dependência das atividades econômicas com relação aos serviços ecossistêmicos, explicitando as interfaces existentes entre as decisões econômicas, a provisão de serviços e o bem-estar humano (Andrade *et al.*, 2012).

Em relação à avaliação dos serviços ecossistêmicos tem-se destaque a metodologia de Costanza *et al.* (1997), se tornou referência, uma vez que reúne os resultados encontrados por uma grande quantidade dispersa de estudos de valoração dos serviços

ecossistêmicos nos diversos biomas do planeta. O autor, atribuiu valores aos serviços ecossistêmicos por classes de uso das terras identificadas na bacia hidrográfica e posteriormente calcula-se suas estimativas. O método utilizado para estimar as mudanças nos valores dos serviços ecossistêmicos em função das mudanças dos tipos de uso da terra tem como base os coeficientes de valores dos serviços ecossistêmicos (Costanza *et al.*, 1997; Zhao *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2007 e Hu *et al.*, 2008).

O Quadro 2 apresenta as equivalências utilizadas e o valor dos serviços ecossistêmicos gerados para cada categoria de uso das terras.

**Quadro 2.** Biomas equivalentes para as classes de uso da terra e valores dos serviços ecossistêmicos.

<b>Categorias de uso da Terra</b>	<b>Bioma equivalente</b>	<b>Coefficiente dos SE em US\$ /ha/ano</b>
<b>Pastagem</b>	Grass/rangelands	244,00
<b>Silvicultura (Hu <i>et al.</i>, 2008)</b>	Raww material/tropical forest	315,00
<b>Áreas urbanas</b>	Urban	0,00
<b>Cana-de-açúcar</b>	Cropland	92,00
<b>Vegetação ripária</b>	Tropical forest	2.008,00
<b>Formação savânica-florestal</b>	Tropical forest	2.008,00
<b>Corpos d'água</b>	Lakes/rivers	8.498,00

Fonte: Andrade *et al.* (2012) adaptado de Costanza *et al.* (1997).

Para Andrade (2012, p.62) a categoria corpos d'água gera um maior valor agregado de serviços ecossistêmicos, seguida pela vegetação ripária e natural, silvicultura, pastagem e terras ocupadas com usos agrícolas (cana-de-açúcar, culturas anuais, fruticultura e cafeicultura). Por outro lado, os usos urbanos não apresentam valores, segundo Andrade *et al.* (2012), devido ao fato de que a maioria dos SE (17 no total) é negligenciável ou não existem informações disponíveis nessa categoria. Portanto, fica evidente a importância dos cursos d'água e da vegetação aluvial, bem como a formação savânica-florestal na oferta de serviços ecossistêmicos.

A equação (1) apresenta o valor total dos serviços ecossistêmicos de acordo com Andrade *et al.* (2012) adaptado de Costanza *et al.* (1997).

$$VSE_{\text{Total}} = \sum(Ak * Vck)$$

Equação (1)

Assim, o valor total dos serviços ecossistêmicos ( $VSE_{Total}$ ) é resultado da soma da área total (A) da categoria de uso do solo ( $k$ ) em hectare multiplicada pelo coeficiente de valor dos SE (VC) por categoria de uso ( $k$ ) em US\$.ha. a.

Andrade *et al.* (2012, p.62) salientam que os coeficientes de valores são estáticos, visto que as variações nos valores totais dos serviços ecossistêmicos foram resultantes de variações nos fluxos “físicos” de SE gerados por categoria de uso da terra. Embora tais variações sejam desconhecidas, certamente a relação entre as variações das áreas das diversas categorias de uso da terra e variações dos fluxos de SE não é linear. A falta de informação sobre a quantidade física de serviços gerados por cobertura do uso da terra configura-se como uma séria lacuna para os estudos de valoração/avaliação dos SE.

Tem-se o problema de transferência de valores que deve ser uma análise das semelhanças físicas dos locais de valoração, bem como nas especificidades dos ecossistemas em estudo. São algumas limitações desta metodologia (Andrade *et al.*, 2012), entretanto a aplicação desta metodologia é um exercício ilustrativo do impacto das mudanças de uso da terra sobre os fluxos de serviços ecossistêmicos e seus valores.

Diante disso, tem-se o estímulo a preservação dos ecossistemas por intermédio da adoção de esquemas ou programas de pagamentos por serviços ambientais (PSA) na qual tem-se a preservação de determinados componentes do ecossistema (matas ciliares, vegetação nativa em topo de morro, fertilidade do solo e capacidade de infiltração da água da chuva no solo) que implica em custo privado aos produtores rurais, embora o benefício seja público (Parron; Garcia, 2015, p.33).

Os ecossistemas e todo o capital natural<sup>11</sup> são ativos produtivos compartilhados por toda a sociedade humana o que pressupõe a necessidade de gestão eficiente, racional e sustentável deste portfólio natural (Andrade; Romeiro, 2009; Genaro, 2020). Assim, dentre os serviços ecossistêmicos oferecidos pela natureza tem-se destaque o armazenamento e o sequestro de carbono, assunto debatido na 27<sup>a</sup> Conferência das partes sobre Mudanças Climáticas das Nações Unidas (COP27) que traz como principais ameaças as dificuldades dos países em cumprir as suas metas de emissões de gases de efeito estufa (GEE), conforme elencado no Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

---

<sup>11</sup> Capital natural: estoque ou reserva provida pela natureza (biótica/abiótica) que produz um valioso fluxo futuro de recursos ou serviços ambientais.

Sabe-se que o bem-estar humano, ou melhor, a sociedade é profunda e indissociavelmente dependente dos serviços ecossistêmicos. Conhecer o valor dos serviços ecossistêmicos é importante para sua efetiva gestão. O Brasil tem avançado nessa questão com políticas públicas – em nível nacional, voltadas para regulamentar a valoração dos SE e incentivos para implantação de Programas de Pagamentos por Serviços Ambientais – PSA.

A valoração ambiental de acordo com Motta (1998) é a determinação do valor econômico de um recurso ambiental, estimando o valor monetário deste em relação aos outros bens e serviços disponíveis na economia. Por exemplo, o valor econômico total de um recurso natural é igual ao somatório dos seus valores de uso direto, indireto, de opção e de existência, pode ser classificado em: valor de uso (valor de uso direto ou indireto e valor potencial), e valor de não uso expressando o valor intrínseco do uso e o valor da sua existência.

Dentre os instrumentos de políticas para nortear as pesquisas em Serviços Ecossistêmicos, tem-se destaque a Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD), a Política Nacional sobre Mudança do Clima, o Código Florestal, a Política Nacional de Biodiversidade e a Política Nacional Pagamentos por Serviços Ambientais (PNPSA). Com esses instrumentos pode-se atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos para até 2030 pelas Nações Unidas e a Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES).

No Brasil, tem-se como destaque a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA), Lei Nº 14.119 (janeiro/2021), é a base norteadora (§1º) que integra-se às demais políticas setoriais e ambientais, especialmente à Política Nacional do Meio Ambiente, à Política Nacional da Biodiversidade, à Política Nacional de Recursos Hídricos, à Política Nacional sobre Mudança do Clima, à Política Nacional de Educação Ambiental, às normas sobre acesso ao patrimônio genético, sobre a proteção e o acesso ao conhecimento tradicional associado e sobre a repartição de benefícios para conservação e uso sustentável da biodiversidade e, ainda, ao Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e aos serviços de assistência técnica e extensão rural.

A Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA), Lei Nº 14.119/2021, tem como órgão gestor central o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA). Assim, esta lei (art. 1º) define conceitos, objetivos, diretrizes, ações e critérios de implantação da Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA), institui o Cadastro Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (CNPSA) e o Programa

Federal de Pagamento por Serviços Ambientais (PFPSA), dispõe sobre os contratos de pagamento por serviços ambientais e altera as Leis nº 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973.

De acordo com a PNPSA (2021, art. 2º) os serviços ecossistêmicos (Quadro 3) são benefícios relevantes para a sociedade gerados pelos ecossistemas, em termos de manutenção, recuperação ou melhoria das condições ambientais, nas modalidades: (1) serviços de provisão; (2) serviços de suporte; (3) serviços de regulação; (4) serviços culturais.

**Quadro 3.** Modalidades e funções dos serviços ecossistêmicos.

Modalidades de Serviços Ecossistêmicos	Funções
(1) Serviços de provisão	Fornecem bens ou produtos ambientais utilizados pelo ser humano para consumo ou comercialização, tais como água, alimentos, madeira, fibras e extratos, entre outros.
(2) Serviços de suporte	Mantêm a perenidade da vida na Terra, tais como a ciclagem de nutrientes, a decomposição de resíduos, a produção, a manutenção ou a renovação da fertilidade do solo, a polinização, a dispersão de sementes, o controle de populações de potenciais pragas e de vetores potenciais de doenças humanas, a proteção contra a radiação solar ultravioleta e a manutenção da biodiversidade e do patrimônio genético.
(3) Serviços de regulação	Concorrem para a manutenção da estabilidade dos processos ecossistêmicos, tais como o sequestro de carbono, a purificação do ar, a moderação de eventos climáticos extremos, a manutenção do equilíbrio do ciclo hidrológico, a minimização de enchentes e secas e o controle dos processos críticos de erosão e de deslizamento de encostas.
(4) Serviços culturais	Constituem benefícios não materiais providos pelos ecossistemas, por meio da recreação, do turismo, da identidade cultural, de experiências espirituais e estéticas e do desenvolvimento intelectual, entre outros.

Fonte: PNPSA (2021). Elaboração: Sampaio (2021).

No Estado de Mato Grosso do Sul, tem-se a Política Estadual de Preservação dos Serviços Ambientais (PEPSA), Lei nº 5.235 de 16 de julho de 2018, a referida lei define os conceitos, objetivos, diretrizes da Política Estadual de Preservação dos Serviços Ambientais e cria o Programa Estadual de Pagamentos por Serviços Ambientais (PESA), bem como estabelece um Sistema de Gestão do PESA. Tem como objetivo disciplinar e favorecer a atuação do Poder Público Estadual em relação aos serviços ambientais, a fim de promover o

desenvolvimento sustentável, a conservação ambiental e incentivar a provisão e manutenção desses serviços.

A legislação ambiental brasileira determina que as bacias hidrográficas devem ter três tipos de uso/cobertura da terra: áreas de preservação permanentes que deve manter intacta para proteger os serviços ecossistêmicos (IBAMA); reserva legal em que cada propriedade deve manter uma proporção de área para o uso sustentável; e outras áreas com diferentes tipos de uso, os quais devem usar sistemas de produção de conservação (ANDRADE *et al.*, 2012).

Com as políticas ambientais, por exemplo, com a Lei 12.651/2012 e a regulamentação das propriedades rurais com o Cadastro Ambiental Rural (CAR) é possível acompanhar, monitorar e rastrear a produção rural, e assim surgem novos mecanismos de interação entre produtores- consumidores no viés conservacionista, em que o produtor é o proprietário rural que preserva determinado recurso natural a fim de oferecer serviços ambientais à toda sociedade.

Existem várias iniciativas de incentivos econômicos para os serviços ecossistêmicos no Brasil, por exemplo, o projeto ServiAmbi coordenado pela Embrapa Florestas avalia serviços ambientais de sequestro de carbono no solo e biomassa vegetal, ciclagem de nutrientes, fertilidade do solo, conservação da água e solo, conservação de biodiversidade, produção de alimentos e madeiras. A partir desses indicadores, é feita a valoração dos serviços ambientais providos nos sistemas e a avaliação da capacidade que os ecossistemas têm de fornecer serviços ambientais conforme as categorias de uso e cobertura da terra à promoção de serviços ambientais (Parron *et al.*, 2015).

No Projeto ServiAmbi existem três vertentes, são elas: análise dos impactos dos diferentes usos e coberturas da terra nos serviços ecossistêmicos identificados; valoração econômica a partir de métodos previamente definidos; e modelagem e simulação dos dados. Parron *et al.* (2015) afirmam sobre a importância de analisar as funções correlatas e indicadores quantificáveis para cada serviço ambiental associado ao uso da terra, assim como os métodos de valoração mais adequados a cada função ecossistêmica.

No estado de São Paulo tem-se o programa estadual de Pagamentos por Serviços Ambientais - PSA, na qual o Projeto Mina d'água<sup>12</sup> constituiu-se em um exemplo pioneiro de instrumento de gestão, juntamente com os instrumentos de comando e controle de forma

---

<sup>12</sup> Na iniciativa Mina d'Água (MdA-SP), para a composição do método de valoração para pagamento, utilizou-se o valor de referência de R\$ 150,00, baseado no Custo de Oportunidade da terra.

a viabilizar a restauração e conservação da vegetação nativa e a conversão de sistemas produtivos convencionais para modelos mais sustentáveis em áreas de importância ambiental (Glehn et al., 2012; Gonçalves, 2013).

A Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA) utiliza uma metodologia única para todas as aplicações do cálculo das principais atividades agropecuárias no Estado, estabelece-se um valor constante entre R\$ 75 e R\$ 300 reais por nascente considerando a sua situação de importância na bacia (SAMPAIO, 2015).

Gonçalves (2013) realizou a simulação do Projeto Mina D'água na bacia hidrográfica do Palmitalzinho em Regente Feijó – SP e atualmente o município é exemplo de implementação do programa de PSA do Estado de São Paulo, na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Pontal do Paranapanema. Sampaio (2015) fez a simulação do programa de PSA do Projeto Mina D'Água - São Paulo na bacia hidrográfica do Ribeirão Vai e Vem, em Santo Anastácio – São Paulo, visando contribuir para o planejamento ambiental e instigar os proprietários rurais e a Prefeitura Municipal a aderir aos programas de PSA para conservar e preservar as matas ciliares e, conseqüentemente, melhorar a qualidade e quantidade de água nas nascentes e cursos d'água.

A valoração dos serviços ecossistêmicos hídricos realizada por Sampaio (2015) por meio da aplicação da simulação do Projeto Mina D'Água (São Paulo) em conformidade a Lei Federal 12.651/2012, foram valoradas as nascentes de propriedades rurais na bacia hidrográfica do Ribeirão Vai e Vem, em Santo Anastácio – São Paulo, além de explanar sobre alguns programas de PSA na América Latina e no Brasil.

Andrade *et al.* (2012) exemplificam a aplicação da valoração de serviços ecossistêmicos vis-à-vis a dinâmica de uso do solo da bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçu e Pardo – SP com o objetivo de mostrar a relevância dessa ferramenta metodológica para a orientação de políticas ambientais. Os autores verificaram um impacto negativo no valor total de serviços gerados devido à dinâmica do uso da terra na região (1988 e 2002), pois mediante a aplicação de estimativas do déficit de APP e RL, simularam-se dois cenários. Concluíram que o valor gerado em termos de serviços ecossistêmicos por unidade de área florestada é maior que o valor que seria gerado caso essa mesma unidade fosse utilizada com outros tipos de uso, como cana ou pastagem. Os autores comprovaram que a conversão de terras para florestas deve ser incentivada, via política de compensação, dado

seu maior valor social gerado em relação ao valor privado<sup>13</sup>.

Fernandes (2009) avaliou a relação entre cobertura da terra e qualidade e quantidade de água em microbacias hidrográficas de forma a valorar os serviços ecossistêmicos da Floresta Mata Atlântica na Área de Proteção Ambiental (APA) do Sana, em Macaé (RJ). O objetivo foi quantificar a relação entre a cobertura da terra e a qualidade da água. Teve como hipótese que as bacias hidrográficas com maior percentual de cobertura florestal apresentam melhor conservação do solo e da água, prestando serviços ambientais conservando o solo e a qualidade e quantidade da água para usos múltiplos que podem ser ou não valorados. Fernandes (2009), determinou as características fisiográficas das bacias, o uso e cobertura da terra e as incongruências de uso nas APP, quantificou a perda de solo pela Equação Universal de Perda de solo (EUPS), utilizando ferramentas de SIG. O autor realizou a valoração dos serviços ambientais em relação à qualidade da água com base no custo do tratamento da água em função da turbidez e dos teores de sólidos totais.

Oliveira *et al.* (2021) trabalharam a valoração econômica do serviço ecossistêmico de sequestro de carbono pela estimativa do estoque de carbono na parte aérea das plantas em Sistemas Agroflorestais Biodiversos - SAFs do bioma Cerrado, em Mato Grosso do Sul. O autor concluiu a viabilidade da valoração em SAFs no incremento da renda familiar, pois estimulam a continuidade do cultivo de agroflorestas, demonstrando a viabilidade econômica desses agroecossistemas.

O Bioma Cerrado proporciona serviços ecossistêmicos abrangentes como: fornecimento de água por meio do escoamento superficial, recarga de água subterrânea e fluxos atmosféricos de vapor de água; armazenamento de grande quantidade de carbono em suas florestas, especialmente nas raízes profundas das árvores; alta biodiversidade de modo a oferecer recursos para o sustento da vida de agricultores familiares (CEPF<sup>14</sup>, 2011).

A valoração monetária dos serviços ecossistêmicos tem se tornado uma maneira efetiva para a compreensão da importância dos benefícios gerados pelos ecossistemas. Mostra-se como um importante instrumento para a preservação ambiental e para o reconhecimento/aceitação da dependência humana em relação aos fluxos de serviços ecossistêmicos e da necessidade de preservá-los, com vistas ao uso sustentável. No entanto,

---

<sup>13</sup> Valor privado no sentido do proprietário ou produtor rural obter benefícios próprios, de acordo com Andrade et al. (2012, p.68): “Ao produtor esse resultado não tem interesse imediato, já que ele não se apropria de todo o valor gerado pelos serviços ecossistêmicos”. Para melhor entendimento sobre o conceito de Valor: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12138/tde-09032004-221702/publico/LL-2.pdf>

<sup>14</sup> Estudo realizado pela Conservação Internacional Brasil (CI-Brasil) e o Instituto Sociedade, População e Natureza (ISPAN) para o Conservação Internacional Brasil (CI-Brasil). Disponível em: <http://cepfcerrado.iieb.org.br/cerrado/>

deve-se definir indicadores ecológicos para interpretar a complexidade das atividades humanas nos ecossistemas (Andrade, 2012, p.57).

Em relação às compensações, Vezzani (2015) enfatiza que muitas vezes um serviço é prestado à custa da degradação de outro, na qual exemplifica sobre o aumento do serviço de provisão de alimentos, fibras e madeira, que é resultante do aumento da produtividade e intensificação das práticas agrícolas que comprometem a diversidade biológica e as funções ecossistêmicas.

As transformações e dinâmica do uso e cobertura da terra em bacias hidrográficas pode afetar os valores dos serviços ecossistêmicos, pois podem variar ao longo do tempo devido a cada tipo de uso e cobertura da terra. De acordo com Andrade (2012) deve-se aperfeiçoar a metodologia da valoração dos serviços ecossistêmicos, visto que a valoração pode ser considerada uma das principais ferramentas para auxiliar na proteção do capital natural, sendo de relativo consenso a necessidade da valoração dos serviços fornecidos pela natureza.

Várias formas e métodos de avaliação dos serviços ecossistêmicos e formas e métodos de pagamento dos serviços ecossistêmicos têm sido propostas (Vezzani, 2015). Existem algumas dificuldades envolvidas no processo de valoração de serviços ecossistêmicos, os desafios envolvidos, conforme Andrade (2012), diz respeito à necessidade de informações detalhadas sobre os processos ecológicos que suportam os serviços ecossistêmicos.

Assim, a valoração ambiental consiste em conferir valor monetário a bens e serviços ambientais não reconhecidos nos mercados (Fernandes, 2009). Deve-se “conhecer se o valor dos serviços do capital natural sacrificados como resultado da expansão humana é maior que aqueles obtidos com o capital produzido pelo homem, justificando, assim, a valoração dos serviços prestados pelo capital natural” (Andrade, 2012, p.57). Portanto, são necessários estudos em diferentes ecossistemas conforme os tipos de uso e cobertura da terra para sua possível valoração e inclusão de incentivos econômicos para preservação desses serviços.

### **2.2.1 O Armazenamento e Sequestro de Carbono**

Toda forma de vida é composta por combinações semelhantes entre moléculas contendo carbono e moléculas de água. A vida no planeta é baseada na química do carbono

– os compostos à base de carbono são referidos como “orgânicos” (Corfield, 2011, p.75).

O carbono tem papel fundamental para a vida na Terra, é como um motor que faz o sistema funcionar. Entretanto, quando se remete ao carbono tem-se a evidência dos problemas ambientais atuais, sendo considerado algo “desagradável” ou ruim.

Atualmente, tem-se destaque as discussões em nível mundial sobre a função dos ecossistemas terrestres na emissão e sequestro de carbono da atmosfera, a fim de minimizar os impactos do aquecimento global. As atividades antrópicas têm provocado uma série de alterações na paisagem terrestre e na atmosfera, e conseqüentemente, o aumento da emissão de gases do efeito estufa (GEE) contribuindo para o aquecimento global (Carvalho *et al.*, 2010).

No Brasil, tem-se destaque as emissões de GEE - a liberação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é o gás que mais contribui para o efeito estufa. Isso ocorre devido às mudanças de uso da terra, agricultura e pastagem. A decomposição de resíduos orgânicos e a respiração de organismos e sistema radicular das plantas são dois processos biológicos que emitem o CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera. Existem meios de mitigar esse impacto, pois na natureza tem-se reservatórios que sequestram o carbono da atmosfera, são eles: preservação da vegetação nativa remanescente, plantios de reflorestamento em larga escala e etc. (Carvalho *et al.*, 2010).

Em relação ao papel singular do Carbono, Corfield (2011) enfatiza que,

O Carbono tem papel singular para os seres vivos, pois podem formar compostos solúveis e insolúveis; combinar-se consigo mesmo e com outros elementos para formar mais compostos do que qualquer outro elemento; permite o armazenamento e a transmissão de informações; armazenar e liberar energia. Por exemplo, a queima do carvão é uma reação exotérmica em que o carbono do carvão é combinado com o oxigênio do ar, liberando energia na forma de calor e luz. Para a vida, a reação endotérmica do carbono mais importante é a fotossíntese, por meio da qual as plantas produzem compostos orgânicos e oxigênio (Corfield, 2011, p.76).

Atualmente, as Nações Unidas e o governo brasileiro assinaram em agosto de 2023, o Novo Marco de Cooperação Brasil-ONU 2023-2027. O Marco de Cooperação das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (UNSDCF) guiará a parceria Brasil-ONU até 2027, é o principal documento de planejamento, implementação e monitoramento das ações do Sistema ONU no país. Destaca-se o eixo (3) Meio Ambiente e Mudança do Clima para o Desenvolvimento Sustentável que abrange à questão de emissões de gases do efeito estufa, especialmente o carbono (GEE). O Marco teve como documentos de referência o Plano Plurianual e a Estratégia Federal de Desenvolvimento 2020-2031, possibilitando que a contribuição do sistema ONU ao Brasil se dê de forma complementar e objetiva aos

esforços nacionais para os grandes temas de desenvolvimento do país.

Após as discussões políticas, surgiu a necessidade de conhecer a capacidade dos diferentes ecossistemas captarem e fixarem carbono atmosférico – essa função é um importante serviço ambiental/ecossistêmico. Assim, “a capacidade de os ecossistemas emitirem ou sequestrarem carbono atmosférico é determinado por grande variedade de processos físico-químicos e bióticos que atuam em direções e intensidades diferentes”. Portanto, é necessário conhecer e quantificar esses processos (Aduan, 2003, p.10).

Os Gases De Efeito Estufa - GEEs se concentram naturalmente na atmosfera, sem esses gases, que atuam como um cobertor natural ao redor da terra, a radiação infravermelha térmica solar absorvida pela terra se dissiparia no espaço e a superfície do nosso planeta seria mais fria (Yu, 2004).

O sequestro de carbono pelos solos é o mecanismo responsável pelo maior potencial de mitigação de gases de efeito estufa (GEE), com uma estimativa de contribuição de 89% (IPCC, 2007). De acordo com Yu (2004) que trabalhou o sequestro florestal do carbono, enquanto instrumento de gestão ambiental global e analisou quatro projetos-piloto de sequestro de carbono no Brasil - os principais gases de efeito estufa (GEE) são o vapor d'água, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2007), existem cinco grandes reservatórios de carbono, são eles: os oceanos; a reserva geológica; a reserva pedológica ou de C no solo, composta por 1.550 Pg de carbono orgânico no solo (*Soil Organic Carbon - SOC*) e 950 Pg de carbono inorgânico no solo (*Soil Inorganic Carbon - SIC*); a atmosfera e a reserva biótica (Ipcc, 2007).

O principal gás causador do efeito estufa – o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), circula entre quatro principais estoques de carbono: a atmosfera, os oceanos, os depósitos de combustível fóssil, a biomassa terrestre e solo (Yu, 2004).

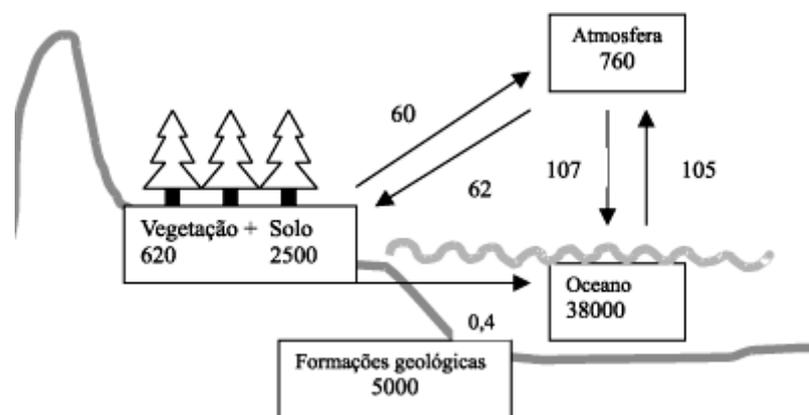
Conforme Carvalho *et al.* (2010), estima-se que a metade de carbono estocado no solo (787 Pg) é referente aos solos sob florestas, enquanto que as áreas sob pastagens contêm 500 Pg e as áreas sob cultivo agrícola possuem 170 Pg de carbono. Assim, os tipos de usos da terra como reflorestamentos, manejo das pastagens, a derrubada e queima da vegetação nativa, o cultivo do solo, o processo de conversão do Cerrado em pastagens e dentre outros, podem alterar consideravelmente na redução dos estoques de carbono e na emissão de GEE do solo para atmosfera.

De acordo com o IPCC (1997) as fontes potenciais de emissão de carbono são: (1)

mudanças líquidas no estoque de carbono orgânico de solos minerais, associadas às mudanças no uso da terra e manejo; (2) emissões por calagem de solos agrícolas; e (3) emissões provenientes de solos orgânicos cultivados.

Na Figura 4, observa-se uma representação esquemática dos diferentes compartimentos de carbono na terra com seus estoques (em Pg C =  $10^{15}$  g C) e respectivos fluxos.

**Figura 4.** Ciclo global do carbono e seus fluxos em diferentes compartimentos em Pg C =  $10^{15}$  g C<sup>15</sup>.



Fonte: Machado (2005).

Em relação ao compartimento de carbono na terra, Machado (2005) enfatiza que,

O maior compartimento de carbono na Terra é aquele presente no oceano (38000 Pg C), seguido do compartimento presente nas formações geológicas (5000 Pg C). O carbono das formações geológicas consiste de 4000 Pg C presentes no carvão, 500 Pg C no petróleo e 500 Pg C no gás natural. *O compartimento de carbono do solo (2500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres (aproximadamente 4 vezes o compartimento de C da vegetação e 3,3 vezes o carbono da atmosfera) e é constituído pelo carbono orgânico (1500 Pg C) e mineral (1000 Pg C).* O carbono orgânico representa o equilíbrio entre o carbono adicionado ao solo pela vegetação e o perdido para as águas profundas e, finalmente, para os oceanos via lixiviação como carbono orgânico dissolvido (0,4 Pg C) ou para a atmosfera via atividade microbiana como dióxido de carbono em solos aerados ou metano em solos saturados com água (Machado, 2005, *grifo nosso*).

Em 2006 o IPCC formulou diretrizes para os Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, de modo a fornecer metodologias para estimar as emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de gases de efeito estufa. O relatório de metodologia do IPCC teve um “refinamento” em 2019, de modo a fornecer metodologias complementares e valores padrão de fatores de emissão e parâmetros base atualizados.

Cerri e Cerri (2007) também afirmam que há de duas a três vezes mais carbono

<sup>15</sup> 1 Pg (petagrama) = 1 bilhão de toneladas.

nos solos, em relação ao estocado na vegetação, e cerca do dobro em comparação com a atmosfera. Corfield (2011) afirma que os solos armazenam cerca de três vezes mais carbono do que as plantas. Os manejos inadequados dos solos podem mineralizar a matéria orgânica e transferir grandes quantidades de gases do efeito estufa para a atmosfera.

Observa-se que os solos<sup>16</sup> têm importante função em relação à prestação de serviços ecossistêmicos, pois a biodiversidade de um ecossistema acontece a partir do solo. Por intermédio do solo que ocorre o desenvolvimento da estrutura vegetal e o fornecimento de energia e matéria para os demais seres vivos das teias alimentares terrestres (Venazzi, 2015).

Diante do exposto, os solos constituem-se em grandes reservatórios ou sumidouros de carbono. Os sumidouros são “qualquer processo, atividade ou mecanismo que retire gases de efeito estufa (ou seus precursores) da atmosfera, armazenando-os por um período de tempo. Os sumidouros realizam o sequestro de carbono, atuam como ralos, retirando da atmosfera mais carbono do que emitem.” (Ministério do Meio Ambiente<sup>17</sup> - MMA/ RED+ Brasil). Assim, os solos são fundamentais para auxiliar a mitigar as mudanças climáticas, entretanto, dependendo das condições climáticas e o tipo de manejo pode influenciar os processos que controlam as emissões ou o sequestro de carbono pelo solo.

Rosendo e Rosa (2012) avaliaram a dinâmica espaço-temporal do estoque de carbono dos diferentes usos da terra e cobertura vegetal natural presente na bacia do Rio Araguari, Minas Gerais, Brasil, utilizaram amostragem do solo e determinaram o estoque de carbono por meio de aquisição de produtos de sensoriamento remoto, revelaram que com exceção da pastagem degradada, todos os usos da terra apresentaram valores médios de estoque de C superiores ao Cerrado na profundidade 0-20 cm.

As transformações no uso e cobertura da terra alteram os ecossistemas naturais em ecossistemas agrícolas e leva à diminuição do estoque de C no solo e conseqüente aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, pois quando a vegetação natural é convertida para áreas cultivadas, ocorre um rápido declínio da matéria orgânica do solo (Rosendo; Rosa, 2012).

Assim, os processos responsáveis pelas perdas de carbono no solo são a erosão, a decomposição, a volatilização e lixiviação. Conforme Machado (2005), o sequestro de

---

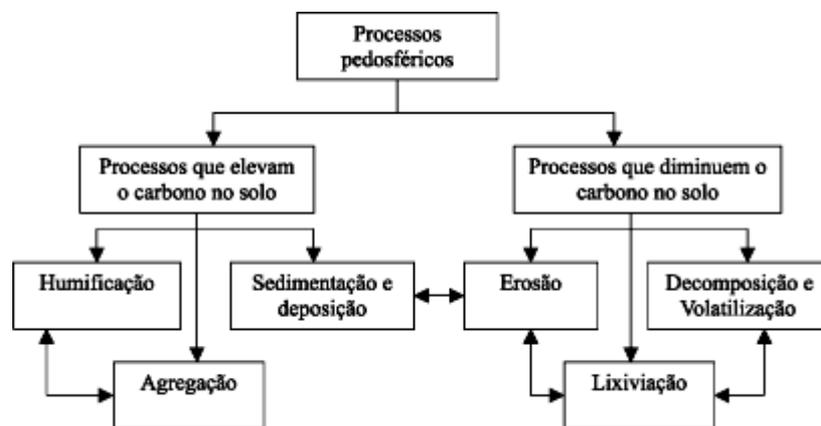
<sup>16</sup> Com os sistemas naturais preservados, conservados ou recuperados, os solos podem prover os serviços ambientais. Por meio da aplicação de sistemas conservacionistas, como a Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), podem ser eficientes provedores dessas funções. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/76870138/artigo-solo-saudavel-produz-mais-alimentos-e-traz-beneficios-ao-meio-ambiente>. <https://www.fao.org/world-soil-day/en/>.

<sup>17</sup> <http://redd.mma.gov.br/pt/pub-apresentacoes/itemlist/category/18-glossario>

carbono no solo significa transformar o carbono presente na atmosfera (na forma de CO<sub>2</sub>) em carbono estocado no solo, compondo a matéria orgânica do solo.

Com o manejo adequado, o C pode ser sequestrado da atmosfera para o solo, pela decomposição e humificação ou (humificação, agregação e sedimentação). A agregação do solo (união de partículas de areia, silte, argila e matéria orgânica para formar pequenos torrões estáveis ao impacto da gota da chuva) é um dos fatores mais importantes para o sequestro de carbono no solo. A Figura 5 demonstra os principais processos que influenciam o estoque de carbono no solo (Machado, 2005).

**Figura 5.** Principais processos que influenciam o estoque de carbono no solo.



Fonte: Machado (2005).

Na Figura 5, observa-se que dentre os processos que diminuem o carbono no solo tem-se destaque a erosão. A erosão massiva é um dos problemas mais frequentes, pois faz com que o solo vire “terra”, no sentido *stricto sensu* da palavra. Esse problema persiste ao longo da história da humanidade, os homens desenvolveram técnicas para revolver o solo e plantar sementes, iniciou-se com o arado, onde extensas áreas ao redor das cidades foram aradas para plantar grãos (*Idade do Bronze*), por consequência, o solo erodiu e os grandes impérios evaporaram. O Documentário “*Solo Fertil*” enfatiza os perigos da erosão destacando o maior desastre ambiental da história dos EUA (1930), *Dus Boll* – deixou o solo exposto e arado. Em 1934, cerca de 80 milhões de hectares de terras para a lavoura foram danificadas e o Presidente Franklin D. Roosevelt implementou o Serviço de Conservação do Solo, com a criação de um plano de cooperação com a natureza.

Observa-se que a prática de arar e preparar o solo continua até hoje, sendo necessário atuação do órgão governamental, da agricultura que incentive o Serviço de

Conservação dos Recursos Naturais (SCRN) com a criação de um plano de cooperação com a natureza, de modo que a água passe por uma planta viva, que reduza o preparo e a pulverização com produtos químicos, pois estes danificam o solo. É na esfera porosa do solo que se encontram os micróbios.

De acordo com Rumpell *et al.* (2022), os solos possuem várias conexões com as mudanças climáticas, a saúde humana e tem papel fundamental na sustentação das sociedades humanas em geral. A degradação do solo após a perda de matéria orgânica do solo está, em muitos casos, relacionada a atividades agrícolas. Entretanto, com a intensa produção agrícola tem-se a perda do carbono do solo. Assim, a produção agrícola e a alimentação saudável e nutritiva estão ligadas à saúde do solo e à diversidade de seu (micro) bioma, que depende de materiais de carbono orgânico como fonte de energia e nutrientes. Rumpell *et al.* (2022) evidenciou em suas pesquisas, que solos ricos em carbono melhoram a resiliência das sociedades humanas a pandemias e outras crises. De acordo com a autora, um dos caminhos é parar com a perda de carbono do solo devido à agricultura, pois reflete também nossos sistemas alimentares. O carbono do solo tem um forte papel a desempenhar na melhoria da saúde ambiental e humana, além de mitigar e se adaptar às mudanças climáticas. Conforme a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura,

Although low fertility is a natural feature of some soils, in others fertility is reduced or lost due to degradation processes, which affect up to 33 percent of global soils (FAO, 2015). These processes include erosion, reduction of organic carbon in the soil and effects on biodiversity, acidification, salinization, urbanization, sealing and nutrient imbalance mainly caused by unsustainable soil management practices (FAO, 2015). Agricultural systems lose nutrients with each harvest, and if soils are not managed sustainably, fertility is progressively lost. (FAO, 2022, p.18).

De acordo com a FAO (2015, 2022) os sistemas agrícolas perdem nutrientes a cada colheita e, se os solos não forem geridos de forma sustentável, a fertilidade perde-se progressivamente, esses processos incluem a erosão, a redução do carbono orgânico no solo e os efeitos na biodiversidade, a acidificação, a salinização, a urbanização, a impermeabilização e o desequilíbrio de nutrientes causado principalmente por práticas insustentáveis de gestão do solo.

Nesta ótica é possível observar os ecossistemas em bacias hidrográficas como sistemas integrados, em que todos devem estar em equilíbrio, principalmente o solo que é um dos maiores reservatórios para o armazenamento do carbono.

Segundo Cerri (2006), cerca de 75% do CO<sub>2</sub> que o Brasil emite para a atmosfera são derivados de práticas agrícolas e do desmatamento, ao passo que apenas 25% são derivados da queima de combustíveis fósseis. O sequestro de carbono captura o carbono da

atmosfera e previne a emissão de gases de efeito estufa - GEE.

De acordo com Resende (2001), existem duas maneiras básicas de abordar a fixação de carbono em ecossistemas terrestres: (1) proteção dos ecossistemas que estocam carbono, e (2) manipulação dos ecossistemas para aumentar a fixação de carbono (plantio direto e reflorestamento) na qual a fixação do carbono se dará tanto na planta quanto no solo. Portanto, o total de carbono armazenado em um sistema reflete o balanço, a longo prazo, entre a absorção da planta, a fixação de carbono no solo e as perdas por respiração e decomposição.

Em relação ao balanço de carbono nos solos, Rosendo (2010, p.81) estudou diversos sistemas de manejo no Cerrado, concluindo que “o plantio direto, a pastagem cultivada não degradada e áreas reflorestadas com Pinus e Eucaliptos são sistemas conservadores de carbono no solo, se forem respeitadas algumas condições de implantação desses agroecossistemas” (EMBRAPA, 2005). Assim, o manejo adequado do solo é fundamental, entretanto até que ponto as áreas reflorestadas com monoculturas exógenas é benéfica para o ecossistema local?

De acordo com Aduan (2003) as estimativas existentes para compreender a ciclagem do carbono no bioma Cerrado, o tamanho dos seus estoques e a velocidade dos fluxos estão muito fragmentadas e de difícil compreensão da sua real magnitude, pois possuem lacunas de dados, especialmente, no que se refere à variação no tamanho dos estoques e na intensidade dos fluxos em relação à variação dos tipos fitofisionômicos da vegetação e a gradientes de solo e clima. Assim, muitas variáveis existentes na literatura para o bioma Cerrado são inexistentes ou insuficientes, visto que são necessários usar dados produzidos internacionalmente.

Fidalgo *et al.* (2007) trabalhou as estimativas de estoque de carbono nos solos do Brasil em nível nacional, considerando os diferentes tipos de solos sob diferentes sistemas de usos e distribuídos nos diversos biomas brasileiros. Os autores consideraram as médias de C por classe de solo; as médias de C por classe de solo em cada bioma brasileiro; as médias de C dos solos sob um mesmo tipo de uso em cada bioma; e as médias de C por classe de solo, separadas por tipo de uso e por bioma em que ocorrem. Assim, obtiveram a estimativa de 36,60 Pg de C na camada entre 0 e 30 centímetros nos solos.

Segundo Aduan (2003, p.16), o Bioma Cerrado tem os seguintes estoques:

➤ **Biomassa aérea:** a vegetação é fundamental para geração e regulação da maioria dos processos que compõem o ciclo do carbono, pois, nas folhas está a principal via

de entrada de carbono para o ecossistema. Entretanto, com os incêndios recorrentes – tanto por fenômenos naturais quanto pela atividade humana – resultam na mortalidade de árvores, alterando a relação de arbóreas e gramíneas e, conseqüentemente, o estoque de carbono nas biomassas aérea e subterrânea.

➤ **Biomassa subterrânea:** compreende todos órgãos vivos localizados abaixo da linha do solo, sua função é fixar a vegetação, captar e translocar recursos como água e nutrientes, além de estocar reservas.

➤ **Serrapilheira:** compreende a camada de material morto, proveniente da biomassa da vegetação, que permanece no solo até ser fragmentado e decomposto pelos processos físico-químicos e bióticos. Tem um papel importante na regulação do fluxo de carbono e nutrientes que se localizam entre a vegetação e o solo, constitui-se em um estoque importante de carbono, acumulando uma quantidade de duas a três vezes mais alta que a atmosfera.

➤ **Matéria orgânica do solo:** é o maior estoque de carbono da maioria dos ecossistemas terrestres. É constituído por grande número de moléculas orgânicas diferentes. O carbono estocado nos solos é o resultado de anos de produtividade líquida.

De acordo com Aduan (2003),

O carbono proveniente da vegetação entra no solo pela queda do folheto, do turnover das raízes e micorrizas e da exudação de carbono pelas raízes finas. Em condição de equilíbrio, o ganho de carbono é compensado pelas perdas sob a forma de respiração heterotrófica dos decompositores do folheto e da matéria orgânica do solo (MOS) (Aduan, 2003, p.17).

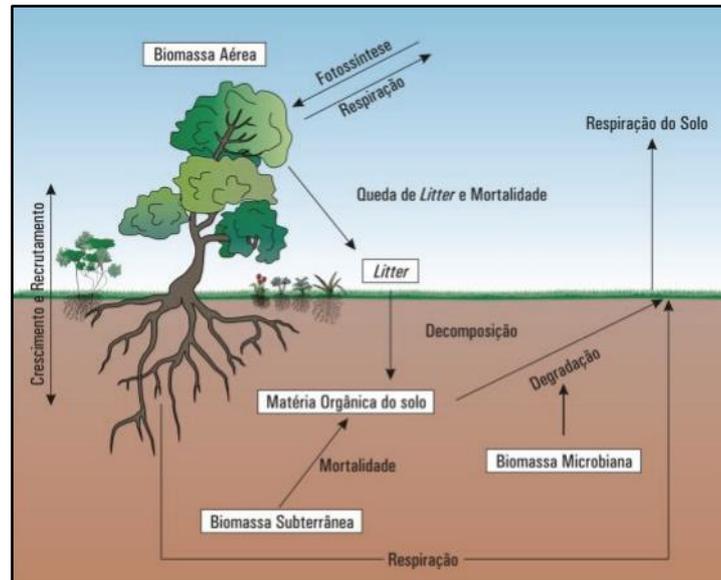
O fluxo da fotossíntese é a principal via de ingresso de carbono no ecossistema, além da importância da biomassa microbiana constituída por fungos, bactérias e actinomicetos que atuam em processos que vão desde a origem do solo, sua formação, manutenção e estrutura, além de decomposição de resíduos orgânicos, fixação de nitrogênio atmosférico e remineralização de nutrientes (Aduan, 2003).

A taxa de fotossíntese de uma área de Cerrado é determinada pela sua área foliar, pela sua proporção gramíneas/arbóreas e pelo *status* fisiológico da comunidade vegetal que pode ser influenciado por todos os fatores que interferem na fotossíntese na escala da planta individual (disponibilidade de água e nutrientes, radiação, dentre outros) (Aduan, 2003, p.19).

O ciclo do carbono é dominado pelos processos da fotossíntese e respiração, envolvendo três reservatórios principais: a atmosfera (760 a  $10^{12}$  kg C); a biomassa vegetal ( $560 \times 10^{12}$  kg C); a matéria orgânica do solo ( $1500 \times 10^{12}$  kg C). Conforme Aduan (2003),

os fluxos da fotossíntese, respiração, crescimento e recrutamento, queda e decomposição<sup>18</sup> da serrapilheira são muito importantes para determinar o fluxo de carbono e o fluxo de nutrientes para o solo. Observa-se na Figura 6 os processos do ciclo do carbono.

**Figura 6.** Fluxos do ciclo global do carbono.



Fonte: Embrapa (2005).

No processo de respiração do solo tem-se a liberação de carbono na forma de dióxido de carbono -  $\text{CO}_2$  para a atmosfera, representando um dos mais importantes fluxos do ciclo global do carbono. Segundo Aduan (2003, p.22), o  $\text{CO}_2$  liberado do solo é um produto resultante da respiração microbiana que participa do processo de decomposição da serrapilheira e da matéria orgânica do solo e da respiração das raízes vivas. De acordo com Vezzani (2015, p.674),

Os organismos fotossintetizadores captam energia luminosa do sol e a transformam em energia química pelo processo de fotossíntese. Na grande maioria dos ecossistemas terrestres, os organismos fotossintetizadores são as plantas (ainda se tem as algas e algumas bactérias) desenvolvem-se quando ocorre a interação com o solo. Assim, as plantas, pelo processo de fotossíntese, captam energia do sol,  $\text{CO}_2$  da atmosfera e água e nutrientes do solo. É nesse aspecto que o solo é o componente-chave do funcionamento dos ecossistemas. É através desse recurso natural que os fluxos de energia e matéria acontecem.

O ganho líquido de carbono é determinado pela pequena diferença entre a assimilação<sup>19</sup> e a respiração líquida, advindas dos fluxos da fotossíntese e da respiração. Em relação a vegetação e o clima no ciclo do carbono, Aduan (2003, p.23) afirma que “todos os fatores que influenciam o ganho ou a emissão de carbono desses ecossistemas podem, então,

<sup>18</sup> Importante fonte de nutrientes em ecossistemas tropicais.

<sup>19</sup> Assimilação líquida é resultante de todo processo de ciclagem interna de carbono.

influenciar o sinal e a intensidade dessa frágil resultante, determinando, assim, até possíveis mecanismos de retroalimentação entre vegetação e clima”.

Na estação chuvosa, Aduan (2003) afirmou que o Cerrado se comporta como um dreno de carbono fixando algo em torno de 15 kg C. ha<sup>-1</sup>. d<sup>-1</sup>, no entanto, durante a seca a vegetação se comportou como uma fonte de carbono para a atmosfera, voltando a atuar como dreno com o início das chuvas.

Ao observar os dados de estoques e fluxos de carbono gerados para o Bioma Cerrado, Aduan (2003) concluiu que nesse ecossistema possui estoques aéreos muito inferiores aos sistemas florestais, já os estoques subterrâneos, percebe-se que eles podem ser semelhantes ou até superiores aos sistemas florestais mais produtivos.

Assim, torna-se necessária a hierarquização desses processos, com a concentração da atividade de pesquisa sobre componentes e processos do ecossistema que se acredita sejam “chave” para a compreensão do ciclo do carbono dos ecossistemas terrestres.

Miranda *et al.* (1997) calculou por meio da integração dos fluxos diários, que a vegetação na área considerada acumularia, por ano, 2,0 tC. ha<sup>-1</sup>. Cerca de 2050 Pg de carbono (1 Pg = 10g, ou um bilhão de toneladas) estariam armazenados nos ecossistemas terrestres, aproximadamente 70% desse total estaria nos solos. Assim, tem-se a relevância dos solos na atuação de fonte ou sumidouro de carbono atmosférico.

De acordo com Rachwal *et al.* (2015, p.57), os solos geram vários serviços ambientais para o bem-estar humano, incluindo os serviços de provisão (ex. matérias-primas), regulação (ex. sequestro de carbono) e de suporte (ex. ciclagem de nutrientes). Com o uso inadequado da terra e manejo inadequado do solo podem-se degradar a qualidade química, física e biológica (qualidade da água ou estoque de carbono) e assim reduzir a quantidade e qualidade dos serviços ambientais prestados na bacia hidrográfica.

A queima de combustíveis fósseis, o desmatamento de florestas nativas - pela queima para uso agrícola, pastoril e para uso de madeiras são apontados pelo IPCC (2007) como os principais responsáveis pelo crescente aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera. As florestas contêm de 20 a 100 vezes mais carbono por unidade de área que as plantações ou pastos. Conseqüentemente, com o desmatamento o carbono originalmente contido na vegetação e nos solos é liberado para a atmosfera em forma de CO<sub>2</sub>. Somente uma quantidade relativamente pequena de carbono é redistribuída na terra ou levada pelos rios (IPCC, 2007).

Diante desse quadro de ocupação, marcado por intensa transformação paisagística questiona-se sobre os impactos da pressão antrópica sobre a vegetação nativa a esse ambiente

de tamanha importância ecológica, que se configura como área de transição entre a Mata Atlântica e o Cerrado (Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul, 2017). Para tal, é necessário o mapeamento das mudanças ocorridas no uso e cobertura da terra no passado (verificar resultados e discussões sobre a classificação de uso e cobertura da terra), relacionando-as com os serviços ecossistêmicos prestados, com enfoque em metodologias para estimativa e avaliação do estoque e sequestro de carbono na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro.

Portanto, é necessário compreender a importância desses processos e o funcionamento dos ecossistemas, além de identificar os serviços ambientais/ecossistêmicos oferecidos, e estimar a emissão e sequestro de carbono realizada a partir da biomassa no solo. Para posteriormente, aplicar incentivos de Programas por Serviços Ambientais (PSA) de modo a realizar sua valoração e incentivar técnicas conservacionistas aos proprietários rurais para manutenção dos serviços ecossistêmicos.

### **2.2.2 Modelo *InVEST*: Armazenamento e Sequestro de Carbono**

Para avaliação do sequestro de carbono, a utilização de modelos é uma das formas de identificar áreas potencialmente provedoras e beneficiadas por serviços ambientais. Nesta pesquisa será utilizado o modelo de Avaliação Integrada de Serviços e Compensações Ecossistêmicas - *InVEST* (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*<sup>20</sup>) que é um dos programas mais promissores para modelagem de serviços ambientais e um dos seus componentes trata de sequestro de carbono.

O *InVEST* é um conjunto de ferramentas de modelagem de serviços ambientais do Projeto Capital Natural, da Universidade de Stanford (Califórnia – EUA), desenvolvido com o apoio da *The Nature Conservancy* (TNC) e do *World Wildlife Fund* (WWF). Esse conjunto de ferramentas permite o mapeamento dos serviços ecossistêmicos e a quantificação do serviço ambiental. Com o modelo de sequestro de carbono – *InVEST* - é possível gerar estimativas de sequestro de carbono a partir de diferentes cenários de uso e cobertura da terra, identificar espacialmente quais porções da bacia são mais estratégias para provisão de serviços ecossistêmicos, além de gerar estimativas financeiras dos serviços ambientais.

As informações geradas pelo *InVEST* podem fornecer subsídios para uma gestão

---

<sup>20</sup> Esta análise usou o *InVEST*®: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest> ). (®) <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest-models/carbon?width=500&height=500&iframe=true>

mais adequada das bacias hidrográficas e contribuir para a implementação de esquemas de pagamentos por serviços ambientais (PSA), especialmente na questão do sequestro e armazenamento de carbono conforme os tipos de uso e cobertura da terra.

Chaplin-Kramer *et al.* (2015) utilizaram o programa *InVEST* para realização de modelagem para duas regiões dos Estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, no Brasil, as quais identificaram a variação espacial dos impactos da mudança do uso da terra sobre a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. Os autores deram enfoque ao sequestro de carbono (biomassa acima e abaixo do solo) para determinar o grau em que os impactos da expansão agrícola podem ser reduzidos simplesmente influenciando o padrão de conversão de terras.

A *Biomassa acima do solo* compreende todo material vegetal vivo acima do solo, como cascas, troncos, galhos e folhas. A *Biomassa abaixo do solo* engloba os sistemas radiculares vivos da biomassa acima do solo. O *Solo* compreende os componentes orgânicos do solo e representa o maior reservatório de carbono terrestre. Já a *Matéria orgânica morta* compreende a serrapilheira, madeira morta deitada e em pé. Serão utilizados como dados de entrada os preconizados no IPCC (2006, 2019), MCTIC (2016), bem como levantamentos de campo para estimar o teor de carbono orgânico no solo.

Assim, a busca na literatura sobre os trabalhos nessa questão de modelagem e utilização do *software InVEST* tornou-se imprescindíveis para o desenvolvimento da avaliação e valoração do sequestro de carbono.

Portanto, o modelo *InVEST* aplica as estimativas ao mapa de uso e cobertura da terra para produzir um mapa dos reservatórios de armazenamento de carbono. O modelo é aplicado à paisagem atual e a uma paisagem futura projetada e a diferença no armazenamento é calculada *pixel por pixel*.

As mudanças do uso e cobertura da terra afetam a quantidade de carbono armazenado e sequestrado ao longo do tempo. Para investigar essa dinâmica o Geoprocessamento se configura como um conjunto de ferramentas que possibilita a coleta, o armazenamento, a integração, a análise e apresentação dos dados espaciais.

### **2.3 CLASSIFICAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA**

As alterações na cobertura e uso da terra são fundamentais ao desenvolvimento econômico e social, porém acarretam efeitos tanto positivos quanto negativos. As mudanças

no uso e cobertura da terra, advindas da degradação das florestas naturais e as altas taxas de desmatamento - estão entre as principais causas da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) para atmosfera, particularmente o CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O (Pirani, 2016).

As emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) causam alterações climáticas e consequências negativas no meio ambiente, como o aumento da temperatura - tão discutido pelos pesquisadores atualmente, além das alterações nos regimes pluviométricos.

As pressões antropogênicas exercidas no solo ocasionam impactos no ambiente natural – o Bioma Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro - considerado como *Hotspot* mundial pela sua elevada riqueza da biodiversidade, considerado de muito alta a extremamente alta prioridade para conservação da biodiversidade (Brasil, 2007; Chaplin-Kramer *et al.*, 2015; IBGE, 2018; MMA, 2019). Com a constante intervenção no uso e cobertura da terra conseqüentemente tem-se a modificação da oferta de serviços ecossistêmicos/ambientais.

O Bioma Cerrado proporciona serviços ecossistêmicos abrangentes como: fornecimento de água por meio do escoamento superficial, recarga de água subterrânea e fluxos atmosféricos de vapor de água; armazenamento de grande quantidade de carbono em suas florestas, especialmente nas raízes profundas das árvores; alta biodiversidade de modo a oferecer recursos para o sustento da vida de agricultores familiares (Conselho de Doadores do Fundo de Parceria Para Ecossistemas Críticos - CEPF<sup>21</sup>, 2011). Para Terra et al (2023), o Cerrado tem cinco vezes mais carbono nos estoques subterrâneos (raízes e solo), pois o carbono acima e abaixo do solo respondem à diversidade das árvores e ao meio ambiente, respectivamente.

As florestas tropicais têm importante papel na estocagem e “sequestro” de carbono da atmosfera, porém com a mudança do uso e cobertura da terra – com destaque para o desmatamento de áreas e posteriormente plantações de monoculturas tem-se a conversão do carbono estocado na biomassa das florestas para emissões na atmosfera (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, 2019).

Os fragmentos de vegetação de Cerrado constituem sumidouros de carbono e possuem um papel importante para a mitigação das mudanças climáticas, pois o carbono se acumula nas plantas e solo de maneira a “sequestrar” da atmosfera. Porém, a conversão da formação savânica-florestal para outros tipos de uso e cobertura pode liberar grandes

---

<sup>21</sup> Estudo realizado pela Conservação Internacional Brasil (CI-Brasil) e o Instituto Sociedade, População e Natureza (ISPAN) para o Conservação Internacional Brasil (CI-Brasil). Disponível em: <http://cepfcerrado.iieb.org.br/cerrado/>

quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, assim como, outras mudanças no uso da terra - como a restauração florestal ou práticas agrícolas alternativas podem levar ao armazenamento de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> (Manual *InVEST*; Chaplin-Kramer *et al.*, 2015).

O levantamento do uso e cobertura da terra é de grande importância, na medida em que os efeitos do uso desordenado causam deterioração do ambiente. Existe uma alta correlação entre a distribuição espacial das atividades humanas, o estado de conservação da cobertura vegetal na bacia hidrográfica e o nível de degradação dos recursos naturais. Com o levantamento do uso da terra é possível avaliar os recursos dos solos quanto à sua capacidade produtiva, localização e quantificação e assim evitar o uso inadequado e desordenado dos recursos naturais (Fernandes, 2009).

As abordagens espaciais para mapear a infinidade de serviços ecossistêmicos, unem a teoria com a prática, de modo a promover ações mais eficazes de sustentabilidade e conservação ambiental. Araujo Barbosa, Atkinson e Dearing (2015) analisaram as pesquisas que integravam os dados de sensoriamento remoto em serviços ecossistêmicos. Segundo os autores, o sensoriamento remoto desempenha o papel crucial nas pesquisas de quantificação e mapeamento das funções e propriedades dos ecossistemas. As novas tecnologias de dados de observação terrestre contribuem para modelagem, mapeamento e valoração de serviços ecossistêmicos. O sensoriamento remoto mede a radiação refletida e com isso tem-se a interação da luz da superfície terrestre, a partir disso pode-se estimar as propriedades da superfície, como o tipo de cobertura da terra, a biomassa e índice de área foliar para cada pixel da imagem.

Araújo Barbosa et al. (2015) afirmam que as propriedades da superfície terrestre representam estados espacialmente variados em pontos específicos do tempo, por exemplo, o uso e cobertura da terra pode ser indiretamente inferido e mapeado por meio das relações contextuais do espaço. Alguns SE como a produção primária tem um papel mais direto com o sinal refletido ao satélite, enquanto outros, como a regulação climática estão indiretamente relacionadas com o sinal refletido (exemplo, temperatura da superfície terrestre). Além disso, a classificação de uso e cobertura da terra por meio da detecção remota, combinados com as variáveis biofísicas, como os índices de vegetação (NDVI) são frequentemente usados para quantificar e mapear os SE, como por exemplo, de culturas de eucaliptos. Assim, os serviços de regulação do clima, como o armazenamento e sequestro de carbono, podem ser estimados através da quantificação de troca ecossistêmica líquida do fluxo do CO<sub>2</sub>, sendo aplicada para

determinar a quantidade de carbono armazenado nos ecossistemas. Portanto, os índices de vegetação (NDVI), os índices de vegetação por detecção de emissividade (EDVI), o índice de bandas de água. Índice de área foliar (IAF) também podem ser usados como indicadores do fluxo líquido de CO<sub>2</sub>.

Por intermédio do levantamento do uso e cobertura da terra têm-se a distribuição geográfica da tipologia de usos e seus padrões homogêneos da cobertura terrestre. De acordo com o IBGE (2015), a cobertura da terra corresponde à descrição física da superfície terrestre, ou seja, o que está recobrando o solo (corpos d'águas, vegetação, agricultura, áreas urbanas), enquanto que o uso do solo é a função a que serve para as operações antrópicas com a intenção de obter produtos e benefícios fornecidos pelo meio ambiente. Assim, com o uso das geotecnologias pode-se realizar o monitoramento do uso e cobertura da terra.

### 2.3.1 Geotecnologias

O uso das geotecnologias são ferramentas essenciais para os mapeamentos das transformações do uso e cobertura (Cunha *et al.*, 2021), os Sistemas de Informação Geográfica - SIG tem apresentado perspectivas de aplicação prática em relação a análise de dados de Sensoriamento Remoto. A partir da utilização das novas tecnologias pode-se gerar mapas de uso e cobertura da terra como forma de auxiliar no planejamento ambiental de determinada área.

O SIG é um sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, o qual integra dados, equipamentos e pessoas com o objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados em um sistema de coordenadas conhecido. Destaca-se por possuir funções e aplicações bem mais complexas. Constitui-se em uma ferramenta vigorosa para os procedimentos de modelagem e confecção de mapas (Fitz, 2008; Lima *et al.*, 2015).

São várias as potencialidades das geotecnologias, cujos produtos gerados por um SIG vinculam-se ao espaço físico, possibilitando trabalhar com fenômenos climáticos, humanos, sociais e econômicos. Com esse espaço “representado por mapas” possibilita conhecer a região de modo a fornecer subsídios para as tomadas de decisões (Fitz, 2008).

Com o advento das geotecnologias, especialmente com a utilização de *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas SIGs (para aquisição de dados; gerenciamento de banco de dados; análise geográfica dos dados; e representação de dados), juntamente com

os avanços na área do sensoriamento remoto, houve facilitação na compreensão do espaço geográfico e de suas relações da sociedade com a natureza.

O sensoriamento remoto é a “técnica que utiliza sensores para a captação e registro à distância, sem contato direto, da energia refletida ou absorvida pela superfície terrestre” (Fitz, p.109, 2008). Essa tecnologia fornece grande parte dos dados para o estudo dos fenômenos espaciais, tem-se o emprego de métodos para interpretação e classificação de imagens dos sensores. Assim, tem-se o elo entre a geografia e geotecnologias com a aplicabilidade para entender fenômenos espaciais e aspectos relacionados à estrutura do espaço geográfico (Fitz, 2008).

A utilização da técnica do sensoriamento remoto é fundamental, pois de acordo com Crósta (1992), um dos principais objetivos do sensoriamento remoto é distinguir e identificar as diferentes composições dos materiais superficiais, sejam eles tipos de vegetação, padrões de cobertura do solo, solos, geologia, dentre outros. O reconhecimento dos diferentes tipos de cobertura da terra é o principal objetivo do sensoriamento remoto. Este procedimento de distinção e identificação é chamado de classificação de imagens e pode ser feito manualmente ou com o auxílio de sistemas de processamento digital de imagens.

Paranhos Filho (2021) afirma que o objetivo da classificação de uma imagem de satélite é a elaboração de uma carta temática - dividido em classificação multiespectral, que se baseia na resposta espectral dos alvos a serem identificados e em classificação orientada a objeto, que considera, também, o arranjo espacial dos *pixels*.

Os procedimentos de identificação e distinção dos tipos de feições de uso e cobertura – a classificação de imagens de sensores orbitais, o uso de algoritmos computacionais (*machine learning*), como o *Random Forest* auxiliam na classificação digital supervisionada, de maneira satisfatória, juntamente com as técnicas de processamento digital de imagens (PDI) que contribuem para representatividade espacial do fenômeno (Carvalho *et al.*, 2021).

As geotecnologias servem como instrumento de planejamento e gestão do território, são ferramentas essenciais para os mapeamentos das transformações do uso da terra e cobertura vegetal (Bacani, 2010). Conforme Lima *et al.* (2015), o Sistema de Informação Geográfica (SIG) e as aplicações das geotecnologias apresentam-se como modernos instrumentos para o planejamento, controle e supervisão, e para extração de informações da bacia hidrográfica e sua organização.

Para entender os fenômenos espaciais e compreender o espaço geográfico, a série

de sensores *Landsat* oferece um acervo histórico extenso e contínuo com dados de qualidade e fácil acesso e com inúmeras implicações de monitoramento, especialmente para detecção de alterações na cobertura vegetal, inclusive em áreas inacessíveis. De acordo com a Embrapa, a série *Land Remote Sensing Satellite (LANDSAT)* teve início na segunda metade da década de 60, a partir de um projeto desenvolvido pela Agência Espacial Americana e dedicado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres. Essa missão foi denominada *Earth Resources Technology Satellite (ERTS)* e em 1975 passou a se chamar *Landsat* e ao longo do tempo teve significativos avanços em termos de tecnologia. O sensor OLI possui bandas espectrais para coleta de dados na faixa do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, além de uma banda pancromática. Ainda de acordo com a EMBRAPA<sup>22</sup>, os avanços tecnológicos demonstrados por outros sensores experimentais da NASA foram introduzidos no sensor OLI, que passou a ter quantização de 12 bits. A entrada em operação do sensor a bordo do *Landsat 8*, permite a continuidade dos trabalhos em sensoriamento remoto iniciados na década de 1970, com a missão *Landsat*. E, portanto, as imagens geradas por satélites podem ser processadas em ambientes SIGs, inclusive na plataforma on-line de computação em nuvem- *Google Earth Engine* (Gorelick *et al.*, 2017).

### 2.3.2 Google Earth Engine

O monitoramento e o controle das atividades nas áreas do bioma Cerrado se fazem cada vez mais necessários e urgentes, para sua preservação e conservação. O *Google Earth Engine* (GEE), plataforma online gratuita, surge como uma ferramenta que possibilita o mapeamento e monitoramento de grandes áreas, como o Cerrado (Gorelick *et al.*, 2017; Estrabis; Marcato Junior; Pistori, 2019).

O *Google Earth Engine*<sup>23</sup> – GEE é uma plataforma baseada na nuvem/online que utiliza a linguagem *JavaScript* para o processamento computacional de dados geoespaciais em grande escala, na qual não precisa ter muito conhecimento de programação para manusear. Entretanto, para operá-lo adequadamente é necessário possuir conhecimentos básicos acerca da aplicação de algoritmos voltados para o geoprocessamento e

<sup>22</sup> <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat#:~:text=A%20s%C3%A9rie%20LANDSAT%20teve%20in%C3%ADcio,passo%20a%20se%20chamar%20Landsat.>

<sup>23</sup> <https://earthengine.google.com/>

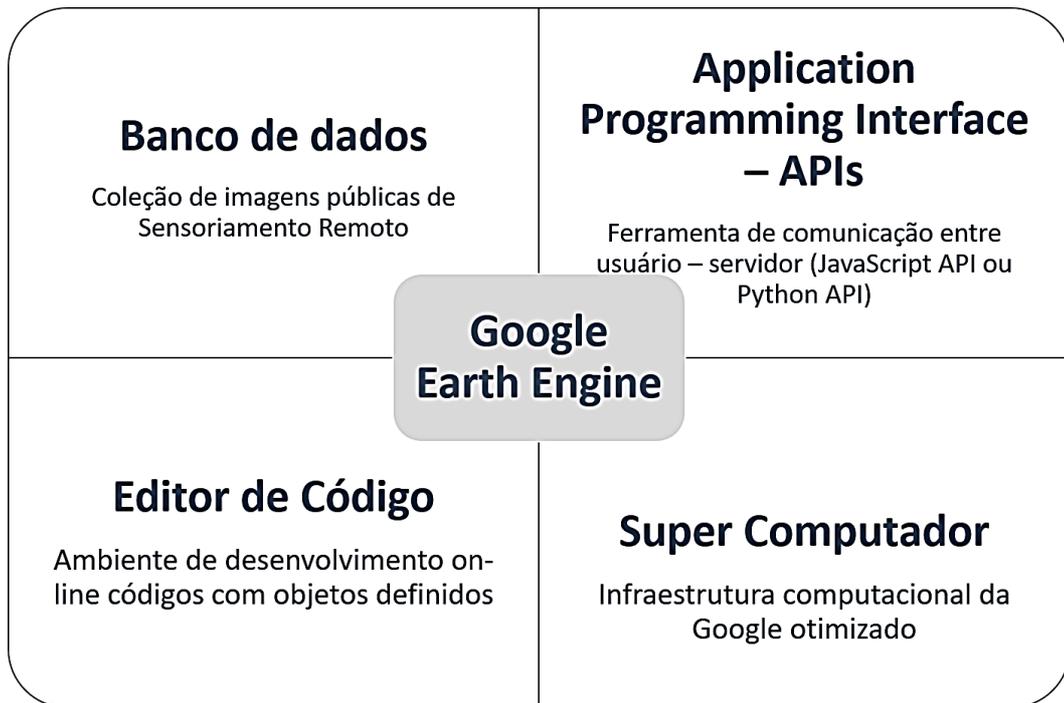
sensoriamento remoto (Gorelick *et al.*, 2017).

A plataforma GEE desenvolve os processos de forma interativa e rápida para análises de dados espaciais, além de permitir edições e criações de algoritmos. É considerado um dos maiores avanços no processo de monitoramento da observação da Terra. É cada vez mais utilizada para mapeamentos de uso e cobertura da terra de grandes extensões devido a sua rapidez de processamento e na geração de resultados (Gorelick, 2017).

Na plataforma *Google Earth Engine* (GEE) existem catálogos de várias imagens de satélites como catálogo *Landsat* (USGS/NASA), vários conjuntos de dados MODIS, dados das missões Sentinel 1 a 5, dados de precipitação, temperatura do ar e mar, dados climáticos e dados de elevação do terreno (GEE, 2020).

A Figura 7 apresenta os componentes da plataforma online do *Google Earth Engine* para processar as imagens, são eles: (i) banco de dados com a coleção de imagens públicas de sensoriamento remoto na escala de *petabytes*; (ii) *application programming* interface é a ferramenta que realiza a comunicação entre usuários e o servidor da *Google* em linguagem *JavaScript* API ou *Python* API; (iii) editor de código - *web code* editor é o ambiente de desenvolvimento online, são códigos com objetos definidos na plataforma; (iv) super computador compreende a estrutura computacional da *Google* otimizado.

**Figura 7.** Componentes da plataforma do *Google Earth Engine*.



Elaboração: Sampaio (2022). Fonte: GEE (2020).

A elaboração do diagnóstico físico é importante para interpretar a situação ambiental da área, a partir da interação e da dinâmica de seus componentes, quer relacionado aos elementos físicos e biológicos, quer aos fatores socioculturais. O diagnóstico ambiental ou físico tem como propósito subsidiar o planejamento e gerenciamento ambiental (Fernandes, 2009).

O mapeamento ambiental de uma bacia hidrográfica pode subsidiar estudos e planejamentos de atividades urbanas e rurais, com direcionamento e adequação do uso e ocupação do solo, com a indicação de áreas propícia à exploração agrícola, pecuária ou florestal, previsão de safras e planejamento urbano.

O *Google Earth Engine* (GEE) tem aplicabilidade em uma variedade de dados socioambientais de alto impacto, como desmatamentos, secas, desastres, doenças, segurança alimentar, gestão de água, monitoramento do clima e proteção ambiental (Carvalho *et. al.*, 2021). Entretanto, conforme Estrabis, Marcato Junior e Pistori (2019) apesar das vantagens e possibilidades que o GEE proporciona, existem poucos trabalhos utilizando-o para o mapeamento de regiões do Brasil, especialmente, no que tange ao levantamento para uso em bacias hidrográficas.

Os autores Carvalho, Magalhães Filho e Santos (2021), realizaram a classificação de uso e cobertura da terra na Área de Preservação Ambiental do Guariroba, em Campo

Grande (MS), analisaram a aplicação de cinco algoritmos de classificação supervisionada disponíveis no GEE e constataram que os métodos baseados em árvore de decisão *Classification and Regression Trees* (CART) e *Random Forest* (RF) apresentaram os melhores resultados visuais e estatísticos para a cobertura e uso do solo.

O Projeto de Mapeamento Anual de Cobertura e Uso do Solo do Brasil (*MapBiomias*) que surgiu em 2015, destaca-se pela utilização de imagens *Landsat* na plataforma GEE do classificador *Random Forest*, resultando em mapas com acurácia variando de 71 a 87%. O *MapBiomias* é uma iniciativa do SEEG/OC (Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima<sup>24</sup>) para produção de mapas anuais de cobertura e uso da terra para todo território brasileiro de forma econômica, rápida e atualizada. A Coleção 7 é a última atualização publicada, apresentam os 37 anos (1985 a 2021) dos mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil em escala de 30 m.

A plataforma em nuvem *Google Earth Engine* (GEE) possui várias utilidades. De acordo com Estrabis, Marcato Junior e Pistori (2019) o processamento rápido e o ambiente interativo da plataforma *Google Earth Engine* demonstraram-se vantajosos para a realização da classificação. Os algoritmos *Random Forest* (RF) e *Support Vector* (SVM) apresentaram boa performance na classificação e validação – com índice *Kappa* e Acurácia Global superiores a 94% em todos os índices, no mapeamento da vegetação nativa existente na região do bioma Cerrado, no município de Três Lagoas.

As técnicas para avaliar a exatidão (precisão) dos dados adquiridos nas imagens de satélite é a classificação, amostragem, o tamanho da amostra, a autocorrelação espacial e as técnicas de avaliação que consiste em analisar a matriz de erro. Assim, a forma mais comum de representar a precisão da classificação dos dados obtidos a partir do sensoriamento remoto é na forma de uma matriz de erro (Congalton, 1991).

De acordo com Bacani e Vick (2019), os métodos para avaliação de precisão mais promovidos são decorrentes da utilização da matriz de confusão, com a exatidão global e o índice kappa (Congalton, 1991). Vale ressaltar que a precisão da classificação se relaciona com a resolução espacial da imagem, no caso 30 x 30 metros, onde determinados objetos representativos das classes de uso e cobertura podem ficar mascarados nas imagens com *pixels* que consideram misturas significativas de elementos. Assim, deve-se supervisionar

---

<sup>24</sup> Compreende a produção de estimativas anuais das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil. MapBiomias - Metodologia disponível em: [https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Metodologia/ATBD\\_Collection\\_6\\_v1\\_January\\_2022.pdf](https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Metodologia/ATBD_Collection_6_v1_January_2022.pdf)

para obter o sucesso da classificação (Fitz, 2008).

### 2.3.3 Algoritmo de Classificação *Random Forest*

A classificação supervisionada é o método que faz uso da capacidade interpretativa do profissional. A imagem é classificada com base em determinados parâmetros definidos, assim é necessário que se tenha um conhecimento das características da área de estudo. Os polígonos ou pontos de treinamento na imagem, definem os elementos notáveis que serve como base para sua padronização. Assim, as áreas de treinamento contêm uma quantidade suficiente de *pixels*, cuja refletância representa uma feição previamente determinada (Fitz, 2008).

De acordo com Paranhos Filho, Lastoria e Torres (2008) a classificação supervisionada é um processo automático que redivide estatisticamente a imagem de entrada em classes baseadas em áreas de treinamento (*training samples*) fornecidas pelo usuário do sistema. Estas amostras de treinamento devem ser espacialmente homogêneas e representar feições da cobertura do solo bem distinguíveis, de modo que o sistema seja capaz de identificar padrões na imagem.

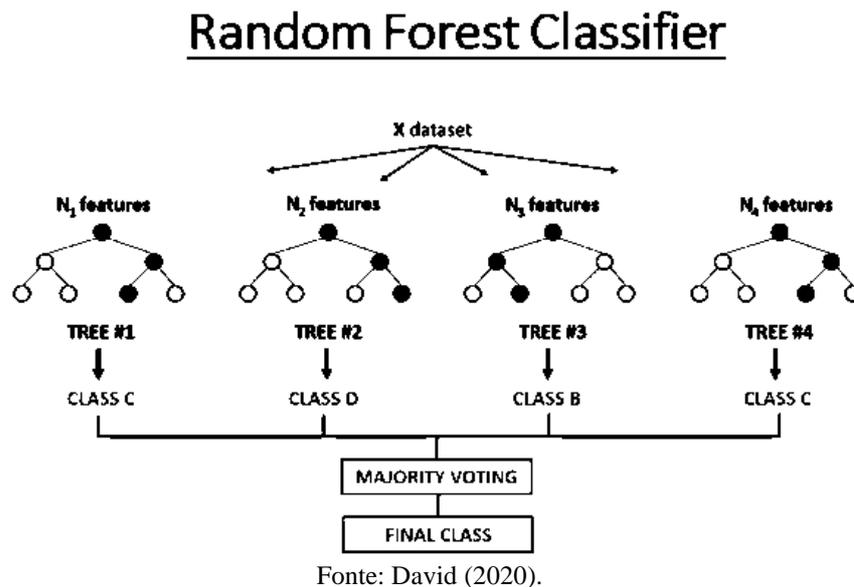
Na classificação supervisionada é fundamental fornecer ao classificador a maior quantidade de informações sobre cada *pixel* para que seja possível para que o algoritmo possa realizar uma boa diferenciação estatística entre os alvos. Por meio da técnica de fotointerpretação é possível identificar, interpretar e obter informações sobre fenômenos e objetos nelas contidos (Fitz, 2008).

Cho *et al.* (2021) ao realizarem a avaliação do algoritmo *Random Forest* - RF no mapeamento e classificação do uso e cobertura do solo no Cerrado Brasileiro, observaram o potencial do algoritmo *Random Forest* (com 500 árvores de decisão) na classificação de imagens do satélite *Landsat 8* (OLI). Concluíram que a metodologia com algoritmos de aprendizagem de máquina tem-se concretizado como uma abordagem promissora e inovadora para processamento de dados de sensoriamento remoto, sendo uma alternativa de menor custo e tempo e com enorme potencial.

A Floresta Aleatória (*Random Forest* – Figura 8) é um tipo de modelo de aprendizado de máquina (*machine learning*) que são métodos de classificação em que o modelo vai classificar os resultados. O RF é uma evolução da árvore de decisão, pois nele geram-se várias árvores de decisões e apresentam quais delas interpretam melhor os

resultados. Assim, a Floresta Aleatória é uma combinação de árvores de decisão, treinados com método *bagging*<sup>25</sup> (modelo simples de classificação). Esse método, proposto por Breiman (1996), constrói estimadores diferentes, pois usa o mesmo algoritmo, porém para cada estimador, criado separadamente, ele usa um conjunto diferente de amostras. Portanto, o *Random Forest* para construir a primeira árvore de decisão, ele escolhe aleatoriamente uma parte do conjunto de amostras, que costuma ser dois terços do conjunto total. O RF escolhe aleatoriamente algumas variáveis, dentre vários fenômenos randômicos para formar cada uma das árvores

**Figura 8.** Esquematisação do modelo da classificação do *Random Forest*.



De acordo com Breiman (2001), o algoritmo *Random Forest* (RF) é um conjunto de árvores preditoras, onde cada árvore possui um vetor aleatório independente e a seleção de informação ocorre pela escolha da classe mais popular para um determinado dado.

As árvores de decisão são regras de acordo com o fato e toma as decisões que indicará para algum caminho. No algoritmo de aprendizado supervisionada, o profissional passa as características e o algoritmo aprende com base na característica previsora que foi passada, por exemplo, tem-se as classes de uso e cobertura da terra e passa-se a base de dados nos parâmetros para o algoritmo aprender com base nesses parâmetros. (Observa-se na Tabela 1 que apresenta as amostras de verdades terrestres obtidas no *Google Earth Engine*).

<sup>25</sup> O algoritmo de *Random Forest* usa *Bagging* naturalmente, construindo apenas árvores de decisão. Disponível em: <https://didatica.tech/como-funciona-o-algoritmo-de-bagging/>

O algoritmo *Random Forest* (RF) ou floresta aleatória gera várias árvores por meio de testes nessas árvores para apresentar a árvore que melhor se aplicou a regra. Para tanto, uma fatia das coletas vai para o treinamento e outra parte para teste.

Dentre os vários métodos de aprendizado de máquinas utilizados para o mapeamento de vegetação nativa e de uso da terra, o *Random Forest* (RF) é amplamente utilizado por ter origem na forma mais básica da árvore de decisão, é um algoritmo de suporte a decisão que resolve problemas de regressão e de classificação. O RF tem apresentado bons resultados para diversos tipos de problemas, como verificados pelos pesquisadores, além de ter um bom desempenho e possuir implementação nas diversas bibliotecas de inteligência artificial (*apêndice B apresenta a seleção de amostras do RF*).

Assim como Estrabis, Marcatto Junior e Pistori (2019), Carvalho, Magalhães Filho e Santos (2021), Cho (2021), Souza *et al.* (2019) também realizaram a classificação supervisionada aplicando o algoritmo *Random Forest* (RF), de não florestas (NF) por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE) com imagens de satélite *Landsat 5, 7 e 8*. O mapeamento da área de cobertura vegetal com a tipologia de transição Floresta/Cerrado apresentaram melhores resultados da geração dos índices de vegetação com o NDVI. Para os autores, a classificação supervisionada na plataforma *Google Earth Engine* (GEE) por meio da aplicação do algoritmo *Random Forest* (RF) se mostrou uma ferramenta eficaz no mapeamento e classificação do uso da terra em áreas de não florestas.

Observa-se a variedade de pesquisas utilizando a plataforma *Google Earth Engine* (GEE) de forma prática e testando os diferentes algoritmos que melhor representa a realidade da área de estudo.

## **2.4 MODELAGEM PREDITIVA DE USO E COBERTURA DA TERRA**

As mudanças no uso e cobertura da terra conduzem a perda de funções e interações ecológicas. Assim, com o modelo preditivo é possível pressupor as consequências dessas mudanças em cenários futuros.

Vários pesquisadores têm utilizado a modelagem preditiva para diversos temas. Em relação à modelagem de cenários futuros, com vistas a identificar as alterações no uso e cobertura da terra tem-se destaque os estudos de Bacani *et al.* (2016), Silva (2017), Vick (2019), Cabrero (2021) e Cunha *et al.* (2021) onde diversos trabalhos empregam a técnica CA Markov.

A elaboração de modelos preditivos consiste em uma importante ferramenta para o planejamento, pois, por intervenção desta é possível entender onde e quando aconteceram as alterações e assim prever e reduzir os impactos na sociedade e na natureza (Gong *et al.*, 2015; Cabrero, 2021; Cunha *et al.*, 2021).

Com o aumento da aplicação das técnicas de uso e cobertura da terra, inclusive em plataformas online como trabalhada nesta pesquisa – o *Google Earth Engine*, tem permitido a compreensão temporal das alterações no uso e cobertura da terra, com baixo custo e possível disseminação via evolução dos Sistemas de Informação Geográfica. Por exemplo, a criação de códigos em linguagem *JavaScript* na plataforma online de mapeamento, podendo ser disseminado, reproduzido para outras áreas e até melhorados com outras bandas dos sensores, como o NDVI para melhor visualização do espectro da vegetação.

O modelo preditivo envolve a variável tempo, juntamente com alguns elementos básicos para análise. De acordo com Cabrero (2021), os modelos de simulação espacial podem ser classificados em empíricos e de sistemas. Os modelos empíricos analisam os relacionamentos entre as variáveis, tendo como exemplo os modelos de cadeias de Markov, logístico de difusão e a regressão.

Em relação ao processo de elaboração dos modelos empíricos, Pedrosa e Câmara (2003) afirmam que são necessárias três componentes chaves, sendo: configuração inicial, função de mudança e configuração de saída (Figura 9).

**Figura 9.** Fluxograma dos componentes básicos do processo de elaboração de modelos empíricos.



Elaboração: Sampaio (2022). Fonte: Pedrosa e Câmara (2003).

Estes modelos têm como características a utilização de modelos matemáticos simples e a utilização de poucas variáveis, mas possuem resultados satisfatórios na elaboração de cenários futuros, embora tenha limitações para analisar a evolução espacial e identificar as causas deste processo (Cabrero, 2021).

Os modelos espaciais precisam responder três questões essenciais: Onde, Quando e Por quê. A partir destas respostas é possível descrever um fenômeno espacial de forma quantitativa e elaborar previsões da sua evolução integrando as escalas temporal e espacial (Pedrosa; Câmara, 2003; Cabrero, 2021; Cunha *et al.*, 2021).

O modelo Cadeias de Markov não explica a razão de um fenômeno por ser processo estocástico e não suportar a inclusão de variáveis exógenas. Pode-se prever a evolução de processos estacionários, e também prever distribuições espaciais de elementos do modelo se for combinado com SIG.

Assim, a modelagem preditiva juntamente com a utilização de SIG permite demonstrar de maneira nítida a sua dimensão temporal, as alterações causadas pelo transcorrer do tempo nas entradas e saídas do modelo, e por fim, a dependência atual do estado dos modelos em relação aos estados pretéritos. Sendo de grande valia para o planejamento, especialmente, o físico-territorial de uma bacia hidrográfica.

### 3 METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta a metodologia utilizada na investigação científica com o intuito de alcançar os objetivos definidos nesta tese. Portanto, a descrição dos materiais e métodos utilizados para cada objetivo específico se apresentam em tópicos.

Os procedimentos iniciais consistiram em caracterizar o recorte espacial na unidade físico-territorial da bacia hidrográfica; seguido dos procedimentos metodológicos para classificar o uso e cobertura conforme a análise multitemporal. Também traz os procedimentos metodológicos para realizar a modelagem preditiva com a aplicação de cadeias de Markov e autômatos celulares.

Posteriormente, apresenta-se procedimentos para avaliar os serviços ecossistêmicos com a simulação de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) do Projeto Mina D'água e estimar o sequestro de carbono com a aplicação da metodologia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), considerando as áreas restritivas (reservas legais e áreas de preservação permanentes); e por fim, apresenta-se os procedimentos para modelar dois cenários futuros: cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA), onde as atividades prosseguem conforme o habitual, sem mudanças significativas ou intervenções específicas e cenário conservacionista de proteção florestal (PF), avaliando e valorando o estoque e sequestro de carbono em ambos cenários preditivos.

#### 3.1 PROCEDIMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A caracterização da área da pesquisa na escala de bacia hidrográfica se deu por meio de pesquisas bibliográficas, entretanto, considerando os poucos trabalhos de estudo de caso no recorte espacial encontrados, considerou-se a utilização do banco de dados do projeto GeoMS que monitora o espaço rural e facilita a regularização e o licenciamento ambiental. Por meio do Sistema de Informação Georreferenciada (SIG) do Estado de Mato Grosso do Sul, coordenado pela Embrapa Informática Agropecuária em parceria com o Imasul – Instituto de Meio Ambiente do Mato Grosso do Sul foi obtido os dados para a caracterização inicial (Embrapa, 2011).

Primeiramente, foi recortado no *software ArcGis*, o limite da área da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro e realizada a tabulação dos dados do GeoMS, mapeou-se às fisionomias da vegetação conforme o Manual Técnico da Vegetação Brasileira – IBGE (2012), inclusive

seguindo a normatização de cores RGB do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, os dados foram quantificados no Excel e apresentados conforme cada classe de uso e cobertura.

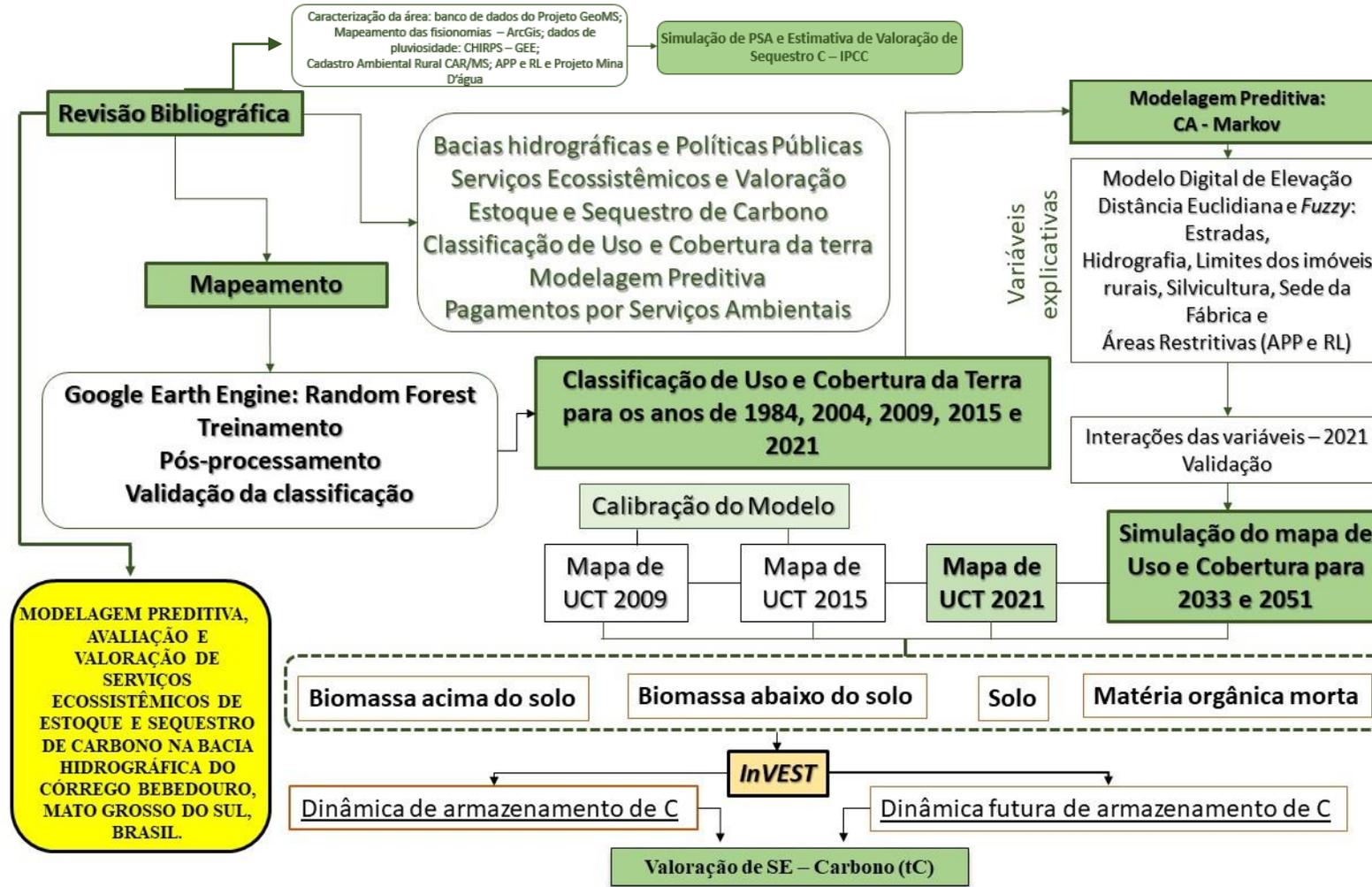
Para obter os dados de pluviosidade na área da bacia hidrográfica, utilizou-se dados acumulados anuais desde 1981 até o presente do *Climate Hazards group Infrared Precipitation with satations* (CHIRPS) na plataforma *online do Google Earth Engine* (GEE) (Apêndice A).

Os dados sobre geodiversidade, geologia, relevo e solos foram obtidos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2008) e trabalhados no *software ArcGis*, as informações foram discutidas nos resultados da caracterização da área.

### **3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA CLASSIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA**

O presente tópico foi estruturado para explicar os procedimentos metodológicos organizados, a partir dos objetivos traçados, que ajudaram na investigação do problema apresentado nesta tese. Essa etapa demandou certa cautela, pois a classificação do uso e cobertura da terra serviu como base para os demais procedimentos metodológicos e assim finalizar as análises, visto que todos objetivos estão interligados. Portanto, a primeira parte é a análise das alterações no uso e cobertura da terra e a preparação para a previsão. Depois tem-se a previsão das alterações nos cenários de Continuidade de Mudanças Atuais (CMA) e de Proteção Florestal (PF) para os anos de 2033 e 2051, e posteriormente, tem-se a estimativa de armazenamento e sequestro de carbono. A Figura 10 apresenta a metodologia geral da pesquisa.

Figura 10. Fluxograma da metodologia da pesquisa.



Elaboração: Sampaio (2023).

### 3.2.1 Mapeamento das Mudanças no uso e Cobertura da Terra na Plataforma *Google Earth Engine* - GEE

O *Google Earth Engine* (GEE) fornece um repositório de banco de imagens provenientes de diferentes satélites. Assim, por meio deste recurso, foram importadas as bandas multiespectrais do satélite *Landsat 5/TM (Thematic Mapper)*, realizado uma composição colorida falsa cor RGB 5-4-3, com data de 17 de julho de 1984, 19 de agosto de 2004 e 30 de junho de 2009; e as bandas multiespectrais do *Landsat 8 OLI (Operational Land Imager)*, aplicado uma composição colorida falsa cor RGB 6-5-4, com data de 02 de agosto de 2015 e 31 de agosto de 2021 com resolução espacial de 30 metros para compor a base de dados na plataforma *Google Earth Engine* (GEE).

Por meio de programação em linguagem *JavaScript*, utilizando os algoritmos de *Random Forest (RF)*, método conhecido como árvore aleatória que gera várias árvores de decisões, foi possível determinar a árvore mais adequada de acordo com as regras estabelecidas no *Tópico 3.2.2*. Isso permitiu a identificação das principais alterações no uso e cobertura do solo ao longo da análise temporal (1984 a 2021).

Para a classificação do uso e cobertura da terra adotou-se os seguintes procedimentos: primeiro, foram selecionadas imagens de satélite com base na cobertura de nuvens e no período de aquisição, priorizando os meses secos; em seguida, as classes de uso e cobertura do solo foram definidas; amostras de treinamento foram coletadas para a classificação supervisionada; o algoritmo de classificação *Random Forest* foi aplicado usando aprendizado de máquina; a classificação foi executada e, em seguida, foi conduzido um teste de treinamento do classificador para avaliar a qualidade da classificação; as imagens classificadas foram validadas no *software ENVI*, resultando na obtenção de uma matriz de erro; por fim, as imagens foram processadas no *software ArcGIS*.

A seleção das imagens de satélite se baseou na qualidade e no mínimo possível de cobertura de nuvens. Assim, as imagens foram filtradas conforme a cobertura de nuvem menor que 1% e de acordo com o mês seco. O Quadro 4 apresenta as informações das imagens de satélite escolhidas.

**Quadro 4.** Informação das imagens de satélite utilizada na pesquisa.

<i>Sensor</i>	<i>Data das imagens</i>
<b><i>Landsat 5/TM</i></b>	17/07/1984
	19/08/2004
	30/06/2009
<b><i>Landsat 8/OLI</i></b>	02/08/2015
	31/08/2021

Elaboração: Sampaio (2022).

As escolhas das datas das imagens de satélite se deram também pela detecção de mudanças no uso e cobertura da terra ao passar dos anos. Previamente, visualizou-se por meio do *Google Earth Engine*, os melhores anos para evidenciar as transformações ocorridas ao longo do tempo na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS). As imagens de satélite (*Landsat 5/TM*) tiveram os primeiros registros no ano de 1984, considerado ano base-inicial para a presente análise multitemporal.

No ano de 2004, verificou-se mudanças na paisagem, com a conversão de parte da formação savânica-florestal em áreas de pastagem. Posteriormente, em 2008, começou o plantio de algumas mudas de eucalipto para silvicultura. No entanto, devido à dificuldade em distinguir esses elementos, foi tomada a decisão de utilizar a imagem de satélite do ano de 2009.

Em 2010 teve início as obras de construção da fábrica de papel e celulose de Três Lagoas (MS), com um investimento de R\$ 4,5 bilhões<sup>26</sup>. A partir da inauguração da fábrica, em 2012, inicia-se a operação considerada como a celulose de eucalipto com 100% de qualidade requerida para o mercado internacional. No ano de 2013 realizou-se a primeira colheita, na qual a empresa teve um alto recorde de desempenho operacional, produzindo 1,568 milhão de toneladas de celulose (Eldorado Brasil, 2021).

A partir desse ano, a empresa obteve a Licença de Instalação para expandir sua produção a médio prazo para 4 milhões de toneladas por ano. Em 2015, centralizou suas operações florestais no Estado de Mato Grosso do Sul, destacando-se por adotar 85% de mecanização nas atividades florestais. A empresa concentrou esforços na ampliação da produção de celulose a médio prazo e na consolidação da fábrica de Três Lagoas como o maior complexo industrial de produção de celulose do mundo. A partir desse período, aumentou-se ainda mais a plantação de eucalipto com a aquisição de novas áreas - 170 hectares em Selvíria (MS). A empresa também alcançou certificações florestais e continuou

<sup>26</sup> <https://www.eldoradobrasil.com.br/pb/a-eldorado-brasil/nossa-historia/>

a aprimorar a eficiência operacional em suas áreas industriais, florestais, comerciais e logísticas (Fernandes, 2020, Eldorado Brasil, 2021). Por fim, o ano de 2021 foi escolhido como análise final do marco multitemporal.

Assim, foi necessário entender a dinâmica de ocupação das atividades na área da bacia hidrográfica para selecionar os anos adequados para realizar a classificação supervisionada das imagens de satélite.

Diante do exposto, as transformações ocorridas na paisagem durante o período de 2009 a 2015 foram base para calibração do nosso modelo de predição/simulação de cenários (*discutida no tópico de modelagem preditiva do uso e cobertura da terra*).

A classificação supervisionada do uso e cobertura da terra nos anos de (1984; 2004; 2009; 2015 e 2021) foi realizada por meio da plataforma online *Google Earth Engine (GEE)*, onde aplicou-se o algoritmo *Random Forest (RF)*.

Com base nas classes do Manual do Uso da Terra (IBGE) e adaptação nas discussões do Laboratório de Sensoriamento Remoto (LaSeR), optou-se pela utilização de seis classes na escala<sup>27</sup> de 1:100.000. Para a classificação supervisionada das imagens foram realizados diversos testes, considerando para análise o teste com melhor performance do algoritmo RF, com 400 árvores de decisão e a inclusão da banda NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) melhorou sensivelmente a identificação dos alvos, pois foi possível verificar por meio da refletância da vegetação as diferentes classes de vegetação aluvial, formação savânica-florestal e silvicultura, além de evidenciar áreas com ausência de cobertura vegetal. Dessa forma, a combinação do índice espectral NDVI com as bandas multiespectrais demonstrou maior eficácia nas análises de mudança no uso da terra.

### **3.2.2 Treinamento e Classes de Uso e Cobertura da Terra**

Para o processo de treinamento, primeiramente, foram estabelecidas a sequência das classes que caracterizaram a área. As classes foram definidas considerando o tipo de cobertura preponderante na BHCB (MS), conforme análise temporal das mudanças no uso e cobertura da terra. Foram atribuídas seis classes em sequência, como a Figura 11: (1) Água para os cursos d'água, lagos, represas e nascentes; (2) Vegetação aluvial, para as vegetações ao entorno dos cursos d'água, (3) Formação savânica-florestal que inclui as vegetações de

---

<sup>27</sup> Escala dos mapeamentos de base, GeoMS, bem como o alcançado com imagens Landsat 5 e 8 adotadas no trabalho.

Cerrado com diferentes estratos (florestal, arbórea, parque/campo e o enclave de savana-floresta estacional semidecidual submontana); (4) Pastagem, para as áreas de criação de gado, (5) Silvicultura, ocupadas localmente por eucaliptos; e (6) Área construída, para a rodovia e a fábrica de produção de papel e celulose.

**Figura 11.** Fotografias representativas para cada classe de uso e cobertura na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS).



(1) Água



(2) Vegetação Aluvial



(3) Formação Savânica-florestal



(4) Pastagem



(5) Silvicultura



(6) Área Construída

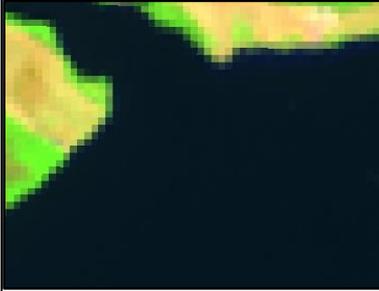
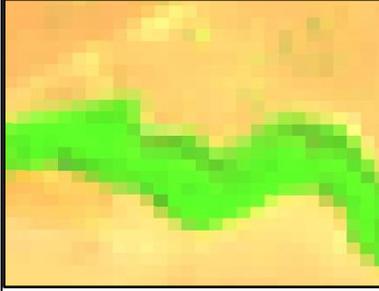
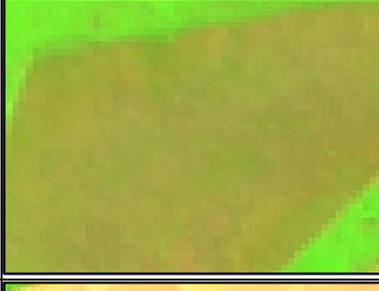
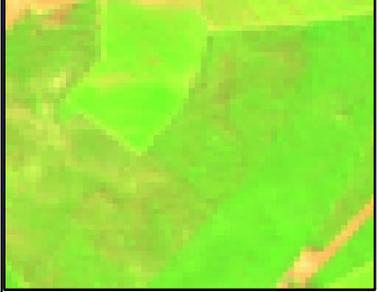


Elaboração: Sampaio (2022). Fotografias da autora obtidas no Trabalho de Campo (2019 - 2020).

A segunda etapa consistiu na construção de uma chave de interpretação fundamentada em levantamentos de campo e em fotointerpretação de imagem. Na Figura 12 é apresentada a chave de identificação e interpretação elaborada para subsidiar a classificação supervisionada, com base nos princípios de fotointerpretação. Para realizar a fotointerpretação, foi necessário caracterizar diferentes aspectos da área de pesquisa, como a forma dos elementos, o tamanho em relação à escala da imagem, a textura (suavidade,

aspereza, homogeneidade ou heterogeneidade), a disposição espacial, o padrão, a localização dos alvos para evitar confusões, a tonalidade, que está relacionada à radiação absorvida ou refletida pelo alvo, e a coloração, que depende da combinação das bandas em composições RGB de sensores multiespectrais.

**Figura 12.** Chave de interpretação dos alvos das classes de uso e cobertura das imagens *Landsat* e *Google Earth* na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro.

<b>Classe</b>	<i>Landsat</i>	<i>Google Earth</i>	<b>Descrição das classes de uso</b>
<b>Água</b>			<i>Cor azul ou preta; textura lisa; forma irregular; linear ou meandrante cursos d'águas.</i>
<b>Vegetação Aluvial</b>			<i>Cor verde-escuro; textura rugosa e meandrante ao entorno dos cursos d'águas.</i>
<b>Formação Savânica-florestal</b>			<i>Cor verde-escuro; textura rugosa.</i>
<b>Pastagem</b>			<i>Cor alaranjada, textura suave e lisa; forma irregular.</i>
<b>Silvicultura</b>			<i>Cor verde-claro; textura lisa; forma geométrica/regular.</i>

**Área  
Construída**



*Cores diversas;  
textura suavemente  
rugosa;  
características  
específicas; forma  
regular;  
localização  
próxima às  
estradas  
(rodovias).*

Elaboração: Sampaio (2023). Fonte: *Landsat 8* e *Google Earth*.

O Quadro 5 apresenta as amostras de treinamento coletadas no *Google Earth Engine* (GEE). Foram conduzidos vários testes com essas amostras, considerando a qualidade da imagem, até alcançar a classificação adequada por meio da aplicação do algoritmo *Random Forest (RF)*.

**Quadro 5.** Amostras de treinamento coletadas no *Google Earth Engine* (GEE).

Ano		2021	2015	2009	2004	1984
Classes	Água	68	36	42	42	20
	Veg. Aluvial	112	58	101	112	225
	Formação Savânica-Florestal	58	33	38	41	108
	Pastagem	106	27	39	49	57
	Silvicultura	72	63	49	0	0
	Área Construída	33	08	0	0	0
	<b>Total de amostras</b>	<b>449</b>	<b>225</b>	<b>269</b>	<b>244</b>	<b>410</b>

Elaboração: Sampaio (2022).

Na área que abrange a bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS), foram coletadas amostras de treinamento (por pontos e polígonos) para o ano de 2021: 68 amostras para classe água, 112 amostras para classe vegetação aluvial, 58 amostras para classe formação savânica-florestal, 106 amostras para classe pastagem, 72 amostras para classe de silvicultura e 33 amostras para classe área construída, totalizando 449 amostras para o treinamento.

No ano de 2015 foram coletadas: 36 amostras de treinamento para classe água, 58 amostras para classe vegetação aluvial, 33 amostras para classe formação savânica-florestal, 27 amostras para classe pastagem, 63 amostras para classe silvicultura e 08 amostras para classe área construída, totalizando 225 amostras para o treinamento.

Para o ano de 2009 foram coletadas: 42 amostras de treinamento para classe água,

101 amostras para classe vegetação aluvial, 38 amostras para classe formação savânica-florestal, 39 amostras para classe pastagem e 49 amostras para classe de silvicultura, totalizando 269 amostras para o treinamento.

Para o ano de 2004 foram coletadas: 42 amostras de treinamento para classe água, 112 amostras para classe vegetação aluvial, 41 amostras para classe formação savânica-florestal, 49 amostras para classe pastagem, totalizando 244 amostras para o treinamento. As classes silvicultura e área construída (sede da empresa) não constavam na imagem do ano de 2004.

E por fim, para o ano de 1984 foram coletadas: 20 amostras de treinamento para classe água, 225 amostras para classe vegetação aluvial, 108 amostras para classe formação savânica-florestal, 57 amostras para classe pastagem, totalizando 410 amostras para o treinamento. Vale ressaltar que as classes silvicultura e área construída não constavam na imagem do ano de 1984, portanto não teve coletas de amostras. Assim, as amostras foram delimitadas manualmente em diferentes tamanhos por pontos e polígonos, de acordo com tamanho e disposição dos objetos na imagem. (Quadro 5).

Após realizada a classificação supervisionada na plataforma do *Google Earth Engine* (GEE) com o algoritmo *Random Forest* (RF) (Apêndice C), o arquivo da classificação foi importado para o drive em formato *raster (.tif)* e posteriormente editado no software *ArcGis 10.2*. Foram realizadas as seguintes funções: a imagem classificada é recortada utilizando o software *ArcGis* por meio da ferramenta *Arctoolbox -> Spatial Analysis tool -> Extraction -> Extract by Mask*. Em seguida, a imagem recortada foi reclassificada conforme os valores de intervalos das classes de uso e cobertura, por via da ferramenta *Arctoolbox -> Spatial Analysis tool -> Reclass -> Reclassify*.

### 3.2.3 Pós-processamento

O pós-processamento consistiu na redução/suavização do efeito salpicado da classificação pixel a pixel, pois alguns pixels ficaram isolados ou mal classificados. Com a remoção dos ruídos tem-se a melhora da qualidade da classificação.

Assim, ativou-se a extensão *ArcGis Spatial Analyst* que possui um conjunto de ferramentas de generalização para o processamento da pós-classificação. Foram executadas as seguintes funções na ferramenta *Spatial Analyst: Filtering*, utilizada para remover *pixels*

isolados ou ruídos na classificação, e *Smoothing*, que suaviza os limites irregulares das classes e as agrupa. Embora tenha sido testada a terceira etapa da ferramenta *Spatial Analyst*, denominada *Generalizing*, que reclassifica pequenas regiões isoladas de *pixels* para as classes mais próximas, optou-se por não a aplicar devido ao alto grau de generalização.

### 3.2.4 Validação da Classificação Supervisionada: Matriz de Erro

A etapa de validação da classificação é extremamente importante para avaliar a assertividade do algoritmo na classificação supervisionada. A qualidade das classificações dos mapas obtidos foi avaliada por meio do índice *Kappa* e *Exatidão Global*, obtidos pela Matriz de Confusão (*Confusion Matrix*) no software *ENVI*<sup>28</sup>.

Nesta etapa, foi necessário coletar amostras de verdade terrestre utilizando dados de campo, os quais foram correlacionados com as observações das imagens de satélite, juntamente com o uso complementar do *Google Earth Pro* (Tabela 1).

A Figura 13 apresenta os tipos de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS).

---

<sup>28</sup> Recente tecnologia utilizada na análise e processamento de imagens geoespaciais e análise de imagem espectral.

**Figura 13.** Mapa dos Principais Tipos de Uso e Cobertura da Terra na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS).

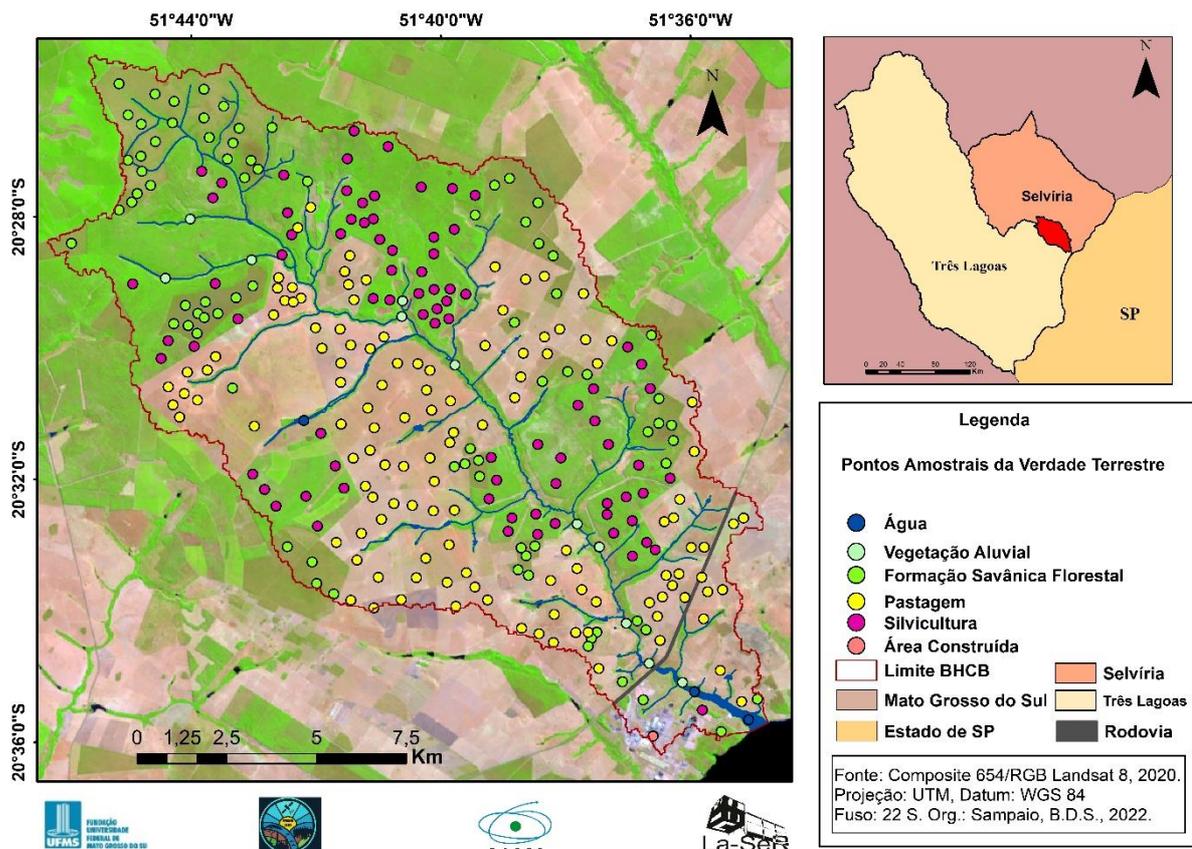


Elaboração: Sampaio (2022).

Foram coletadas 300 amostras de verdades terrestres, de modo aleatório e estratificadas, segundo as classes de uso e cobertura ao longo dos anos de 1984, 2004, 2009, 2015 e 2021 (Figura 16), conforme preconizado por Congalton (1991). Para identificação do número ideal de amostras coletadas por classe, calculou-se a área em km<sup>2</sup> de cada classe e, em seguida, distribuiu-se o total de amostras segundo o percentual de área ocupada para cada uma delas.

Os arquivos foram convertidos de raster para vetor, por intermédio da ferramenta *Arctoolbox -> Conversion tools -> From raster -> Raster to Polygon*. Após a conversão para vetor, as classes foram unidas na tabela de atributos por meio da ferramenta do *Editor -> Merge* ou *Geoprocessing -> Merge*. Em seguida, a área das seis classes foi calculada na tabela de atributos. A Figura 14 apresenta a distribuição dos pontos amostrais de verdade terrestre na área de estudo.

**Figura 14.** Imagem *Landsat* 8, composição RGB/654 e pontos amostrais de verdade terrestre utilizados no teste de validação.



Elaboração: Sampaio (2022).

Após obter a porcentagem da área estratificada conforme apresentado na Tabela 1 de verdade terrestre.

**Tabela 1.** Pontos amostrais de verdade terrestre conforme a classe de uso e cobertura.

Pontos de verdade Terrestre	1984	2004	2009	2015	2021
Água	2	2	5	2	3
Vegetação aluvial	12	10	20	13	11
Formação savânica-florestal	127	63	44	39	80
Pastagem	159	225	106	123	79
Silvicultura	0	0	125	122	126
Área Construída	0	0	0	1	1
<b>Total de pontos</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>300</b>

Elaboração: Sampaio (2023).

Os resultados estatísticos da validação para a Exatidão Global (Equação 2) foram avaliados em função da exigência mínima de 85%, conforme proposto por Anderson *et al.* (1976). O método da Exatidão Global é calculado dividindo a soma da diagonal principal da matriz de erros  $x_{ii}$ , pelo número total de amostras coletadas  $n$ . Sendo o  $G$  = Coeficiente de Exatidão Global;  $x_{ii}$  = Observações na linha  $i$  e coluna  $i$ ;  $n$  = Número de observações (pontos amostrais), ou seja:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii}}{n} \quad \text{Equação 2}$$

O método do índice *Kappa* é calculado com base em uma matriz de erros, e é utilizado como medida de concordância entre o mapa e a referência adotada para a estimativa da exatidão. A Equação 3 calcula o coeficiente do índice *Kappa* comparado aos parâmetros de avaliação definidos em Landis e Koch (1977).

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:  $K$  = Coeficiente *Kappa* de concordância;  $n$  = Número de observações (pontos amostrais);  $x_{ii}$  = Observações na linha  $i$  e coluna  $i$ ;  $x_{i+}$  = Total marginal da linha  $i$ ;  $x_{+i}$  = Total marginal da coluna  $i$ . O Quadro 6 apresenta a escala de avaliação do índice *Kappa*.

**Quadro 6.** Escala de avaliação do Índice *Kappa*.

<i>Kappa</i>	<i>Avaliação de Concordância</i>
<0.00	Péssima (pobre)
0.00-0.20	Ruim (pouco)
0.21-0.40	Razoável (justo)
0.41-0.60	Bom (moderado)
0.61-0.80	Muito Bom (substancial)
0.81-1.00	<b>Excelente</b>

Fonte: Lands e Koch (1977).

No *software* ENVI, as etapas de validação (*Apêndice C*) consistiram em abrir as imagens classificadas em formato raster (.tif) -> *raster colors* -> *new Collor slices* -> *export color slices* -> *class image* e salvar o arquivo em: *HDR*. Em seguida, abriu-se o arquivo dos pontos de verdade terrestre – coletados em campo e no *Google Earth Pro*. Com ambos arquivos no *ENVI* utilizou-se a opção -> *vector to ROI* -> *Unique records to ROI* e na opção -> *Confusion Matrix Using Ground to ROIs*, gerou-se a matriz de erro/confusão.

Na edição do *layout*, utilizou-se como base para definição de classes e interpretação as cores RGB do Manual Técnico de Uso da Terra do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013).

Na etapa de análise dos dados, foram gerados gráficos e tabelas no Excel para facilitar a visualização e interpretação. Na análise geral da classificação de uso e cobertura da terra, optou-se por comparar as variações nas classes, para tanto, foi necessário utilizar de técnicas estatísticas, como variação percentual.

### 3.3 PROCEDIMENTOS PARA MODELAGEM PREDITIVA - CADEIAS DE MARKOV E AUTÔMATOS CELULARES

A simulação das mudanças no uso e cobertura da terra, bem como sua distribuição espacial para cenário futuro para o ano de 2033 e 2051 foram considerados anos chave para avaliação do cumprimento das metas dos acordos internacionais sobre as mudanças climáticas (Política Estadual de Mudanças Climáticas – PEMC em Mato Grosso do Sul e o Plano Estadual MS Carbono Neutro – PROCLIMA). Este processo foi realizado no *software PLUS model*, aplicando o modelo CA-Markov que utiliza as teorias das cadeias de Markov e Autômatos Celulares combinado com aprendizado de máquina, por meio do algoritmo *Random Forest* (LIANG et al., 2022).

As Cadeias de Markov são um processo estocástico ao qual a saída desse modelo é baseada na probabilidade de mudanças,  $P_{ij}$ , entre as classes de cobertura da terra ( $i$  e  $j$ ). Portanto, na composição de uma paisagem com diferentes usos e coberturas, a probabilidade de transição  $P_{ij}$  seria a probabilidade de que uma classe de cobertura da terra  $i$  (*pixel*) no tempo  $t_0$  mude para o tipo de uso da terra  $j$  no tempo  $t_1$ .

As probabilidades de transição são estimadas por intermédio da análise de elementos de transição (*pixel*) durante um intervalo de tempo específico. A representação dessas probabilidades é expressa através da matriz  $P$  onde  $P_{ij}$  é a proporção de cobertura da terra para a segunda data (*no caso desse trabalho para o ano de 2015*);  $P_{ij}$  é a matriz de probabilidade de transição de cobertura da terra;  $V_i$  é a proporção de cobertura da terra da primeira data (*para este trabalho é o ano de 2009*);  $i$  representa o tipo de cobertura da terra na primeira data;  $j$  representa o tipo de cobertura da terra na segunda data;  $P_{11}$  é a probabilidade de que a cobertura da terra 1 na primeira data (2009) mudará para a cobertura da terra 1 para a segunda data (2015);  $P_{12}$  é a probabilidade de que a cobertura da terra 1 na primeira data (2009) mude para a cobertura da terra 2 para a segunda data (2015), sendo assim por diante;  $m$  é o número de coberturas da terra para a área de estudo (Bacani; Vick, 2019).

A aplicação desta técnica tem aumentado nos últimos anos, especialmente para modelar e simular tendências futuras de transformações no uso e cobertura da terra. Teve-se como base para esta etapa científica, as pesquisas realizadas por Bacani *et al.* (2016), Silva (2017), Vick (2019) e Cabrero (2021), que dividiram o procedimento da modelagem preditiva em cinco etapas.

A Figura 15 apresenta as 6 etapas adaptadas no procedimento de modelagem preditiva, aplicadas no *software Plus Model*.

**Figura 15.** Etapas dos procedimentos metodológicos para modelagem preditiva - Software Plus Model



Elaboração: Sampaio (2022). Fonte: Bacani e Vick (2019).

A **primeira etapa** consistiu na construção de uma matriz de probabilidade de transição Markoviana para cada uma das classes de uso e cobertura da terra para os anos de 2009 e 2015, ao qual serviu de entrada para o processo de modelagem de mudanças.

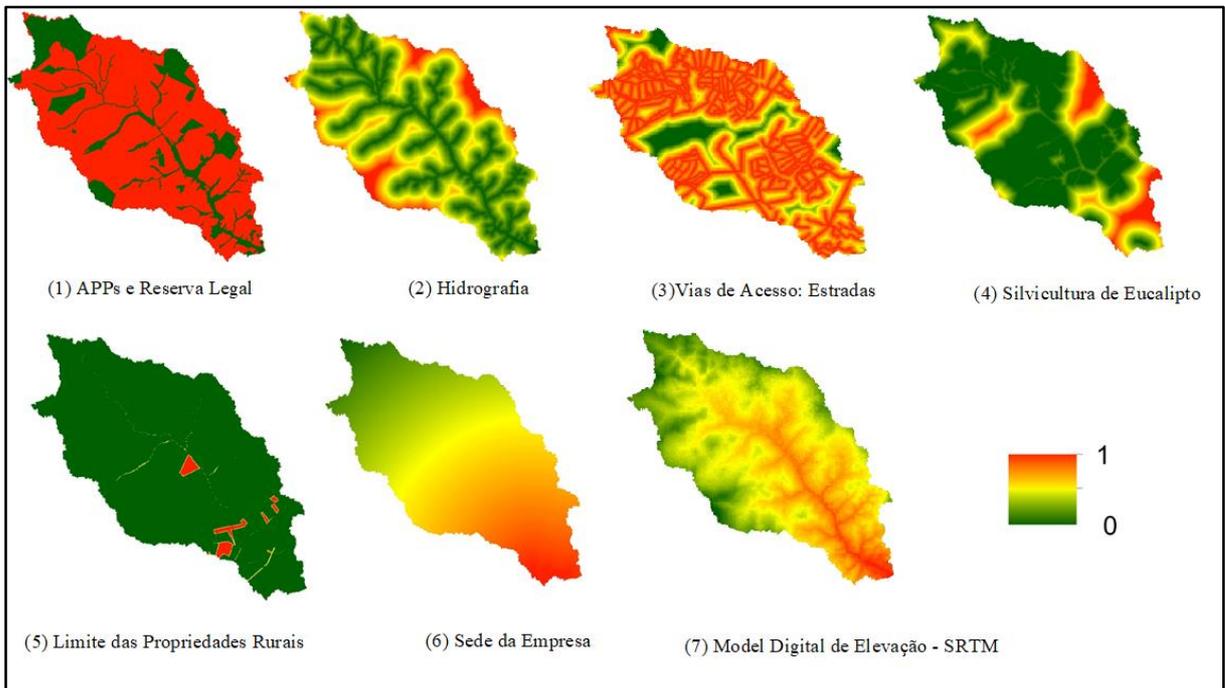
Entretanto, há uma limitação na utilização da cadeia de Markov. De acordo com Adhikari e Southworth (2012), Bacani e Vick (2019), Cunha *et al.* (2021), os resultados produzidos por meio da matriz de probabilidade de transição ou matriz Markoviana permitem prever o futuro da cobertura da terra para um tempo  $t_2$ , mas limitam-se na indicação da origem dessas mudanças. Na **segunda etapa** tem-se a confecção de mapas de adequação e localização de mudanças. Entretanto, como o processo de Markov não estabelece onde as transições de uso da terra ocorre. Foram necessárias para confecção dos mapas de adequação, aplicar a distância euclidiana de cada variável explicativa e funções de associação *fuzzy* (Bacani, Vick, 2019; He *et al.*, 2013; Moghdadam, Helbich, 2013), podendo ser denominados como agentes modificadores que auxiliam a explicar as áreas com tendências de expansão das classes.

Desta forma, na tentativa de delimitar áreas com maior probabilidade à expansão da silvicultura foram utilizadas as seguintes variáveis explicativas: Modelo Digital de Elevação – MDE; Distância das vias de acesso; Tamanho das propriedades rurais; Distância da rede de drenagem; áreas restritivas; áreas de transição entre as classes de Pastagem e Silvicultura entre os anos de 2009 e 2015.

A escolha dessas variáveis explicativas se deu por meio de análise sobre quais variáveis poderiam influenciar na expansão das áreas, por exemplo, a silvicultura atualmente mecanizada tende a se expandir para áreas de baixa declividade, em áreas próximas à sede da fábrica e com fácil acesso às estradas. O tamanho das propriedades rurais é uma variável importante devido ao arrendamento de terras por parte da empresa de produção de papel e celulose, além disso tendem a estar próximas à rede de drenagem para irrigação das mudas, devem ter um limite definido para não adentrar nas áreas restritivas (como as APPs e RLs) e podem expandir-se para áreas de pastagens.

A Figura 16 apresenta a distância euclidiana das vias de acessos, ou seja, estradas da bacia hidrográfica do córrego do Bebedouro, considerada como uma das variáveis explicativas, além da hidrografia, as áreas de APPs e Reserva Legal, áreas de silvicultura, sede da fábrica, elevação do relevo e limites das propriedades. Tem-se assim, os agentes modificadores do uso e cobertura da terra, que a partir dos mapas de distância euclidiana, as variáveis explicativas foram classificadas na lógica *Fuzzy* para determinar as áreas em que as influências foram maiores, a partir das ferramentas: *Overlay – Fuzzy Membership* no *ArcGis* (Esri, 2012).

**Figura 16.** Agentes modificadores classificados pela lógica *Fuzzy* como variáveis explicativas para modelagem preditiva.



Na **terceira etapa** realizou-se o acoplamento dos mapas de adequação juntamente com a matriz de transição Markoviana para determinar os filtros de autômatos celulares. Para tanto, adotou-se um número de interações conforme os testes que foram realizados nesta etapa da tese para a simulação do ano futuro (2015 a 2021), no *software Plus Model*.

Posteriormente, **na quarta etapa**, realizou-se o teste de calibração do modelo, na qual utilizou-se mapas coerentes e confiáveis, advindos da classificação supervisionada e validados estatisticamente. Esses mapas foram a base de dados para 2021. Portanto, o ano de 2021 foi simulado tendo como base o mapeamento realizado para 2009 e 2015. Na **quinta etapa** - após o modelo calibrado foi determinado o número de interações para projeção de tendências futuras (Bacani *et al.*, 2016). Na **sexta etapa**, foram simulados dois cenários futuros no *software Plus Model*: um de continuidade de mudanças atuais (CMA), e um de tendência conservacionista com a proteção florestal (PF).

### 3.3.1 Etapas para execução do software Plus Model

Neste tópico são apresentados em detalhes a execução dos procedimentos (tópico 3.3) no *software PLUS Model*, inicialmente teve-se que converter os mapas de uso e

cobertura da terra, utilizando a ferramenta *Data Processing – Convert LULCs to Unsigned Char Format*, na qual converteu-se os arquivos em .uc (*Unsigned Char Format*).

Na segunda etapa utilizou-se a ferramenta *PLUS – Extract Land Expansion*, na qual importou-se os arquivos convertidos (.uc) do ano de 2009 e 2021 para extrair a expansão das classes de uso e cobertura da terra.

A terceira etapa utilizou-se a ferramenta *PLUS – Land Expansion Analyst Strategy (LEAS)*, na qual foram importados o mapas de expansão (tempo 1 e tempo 2: 2009-2021\_exp\_landuse\_1to2) juntamente com as variáveis explicativas *Fuzzy*<sup>29</sup> (áreas restritivas; estradas; silvicultura 2021; propriedades rurais; sede da empresa; e SRTM), resultando nos mapas de potencial de desenvolvimento de cada classe (*Development Potencial*).

Na quarta etapa utilizou-se a ferramenta *PLUS – CA based on Multiple Random Seeds (CARS)*, importando o mapa de uso e cobertura de 2009 e os mapas de potenciais áreas de desenvolvimento apoiado em aprendizado de máquina, por meio do algoritmo *Random Forest*. Nesta etapa realizou-se cálculos do potencial de expansão de desenvolvimento de cada classe (t1-t2: 2009-2021\_exp\_landuse\_1to2) no software Qgis, ferramenta r.report. A Figura 17 apresenta os resultados dos valores da área de cada classe que foram introduzidos no *Neighborhood Weights*, conforme a imagem abaixo.

**Figura 17.** Pesos das vizinhanças aplicados no *Plus Model*.

Land Demands	Transition Matrix		Neighborhood Weights			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
Weight	0.011271935	0.094504931	0.110541821	0.234763674	0.500012809	0.048904829

Elaboração: Sampaio, 2023.

Com a ferramenta *Demand Prediction – Markov Chain* inseriu-se o ano inicial 2009 e o ano 2015 para obter os valores para simulação da modelagem preditiva para o ano de 2021. Após gerar a simulação do cenário de 2021 utilizou-se a ferramenta *Validation – Confusão Matrix and Fom* para comparar os mapas para fins de avaliação de precisão da simulação, sendo eles o mapeamento para o ano de 2021 (*Groud Truth*) e o simulado (*Simulation result*) para o mesmo ano.

Após a validação da modelagem preditiva, os mapas de cenários futuros foram trabalhados em ambiente GIS para análises das classes de uso e cobertura da terra na bacia

<sup>29</sup> A lógica *Fuzzy* ou difusa é a forma de lógica multivalorada, na qual os valores verdade das variáveis podem variar entre 0 e 1.

hidrográfica. Essas foram as etapas para elaborar a modelagem preditiva do uso e cobertura da terra para os anos de 2033 e 2051 em que foi aplicado o método de CA-Markov (*Cadeia de Markov e Autômatos Celulares*), combinado com o aprendizado de máquina *Random Forest* durante o processo de calibração do modelo.

### **3.4 PROCEDIMENTOS PARA A SIMULAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS E ESTIMATIVA DE VALORAÇÃO DE SEQUESTRO DE CARBONO – IPCC**

O presente tópico apresenta os procedimentos metodológicos realizados para a simulação de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA), seguindo a metodologia do Projeto Mina D'água, bem como os procedimentos para estimar o sequestro de carbono aplicando a metodologia do IPCC, considerando as áreas de reserva legal e áreas de preservação permanentes, enfatizadas como áreas restritivas<sup>30</sup>.

#### **3.4.1 Quantificação das classes de uso e cobertura em áreas restritivas**

Realizou-se a vetorização dos cursos d'água e reserva legal em polígonos, bem como a identificação das nascentes como pontos, utilizando o *software ArcGis*. Posteriormente, foram criados *buffers* com um raio de 50 metros ao redor das nascentes e de 30 metros ao longo das APPs, em conformidade com a Lei 12.651/2012, na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS).

Posteriormente, sobrepôs-se o *buffer* das APPs ao mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2021 (*obtido no tópico 3.2 de classificação de uso e cobertura da terra*). Realizou-se a quantificação das áreas das classes de uso e cobertura dentro do perímetro das áreas restritivas (RL e APPs).

Os dados foram quantificados em quilômetros quadrados e importados para tabulação no Excel. Gerou-se gráficos, tabelas e representações por meio de produtos cartográficos.

---

<sup>30</sup> Áreas de Uso Restrito ou “Áreas Restritivas” (termo usado na presente tese) são as áreas sensíveis cuja exploração requer a adoção de boas práticas agropecuárias e florestais. <https://www.embrapa.br/codigo-florestal/entenda-o-codigo-florestal/area-de-uso-restrito>.

### 3.4.2 Estimativa de Sequestro de Carbono em áreas restritivas conforme o IPCC

Para a estimativa do sequestro de carbono, inicialmente foi realizado uma pesquisa bibliográfica sobre os principais estudos, tantos brasileiros quanto internacionais, que utilizaram a metodologia, além de identificar os valores de carbono para cada classe de uso e cobertura da terra (IPCC, 2006; IPCC, 2019).

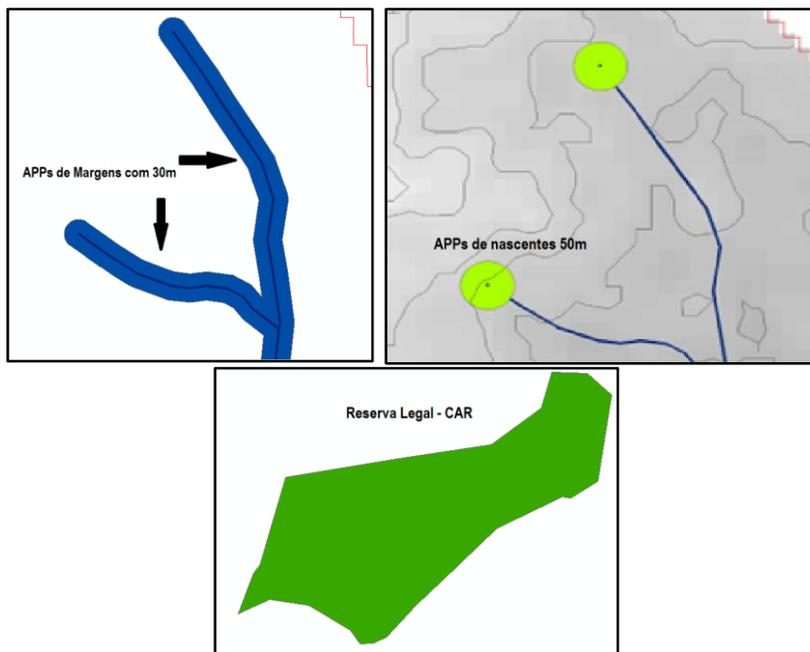
Para a estimativa de sequestro de carbono, utilizou-se as Áreas de Preservação Permanentes – APPs em cursos d’água e nascentes, bem como a Reserva Legal (RL). A combinação dessas áreas foi denominada como áreas restritivas.

Assim, utilizou-se a drenagem e o limite da RL (incluindo as três áreas de RL averbadas e as RLs propostas) do Cadastro Ambiental Rural – CAR, o mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2021 e os mapas das APPs para margens de rios e nascentes elaborados conforme a lei nº 12.651/2012, com margem de 30 metros de APP de curso d’água e 50 metros de APP de nascentes.

Vale ressaltar a importância da recomposição das margens dos cursos d’água em áreas rurais consolidadas em APP. Pois para os procedimentos de estimativa de sequestro de carbono conforme o IPCC, considera-se as declarações dos proprietários rurais no CAR/MS. Assim, a recomposição das margens varia conforme o módulo fiscal (MF) de cada propriedade rural: até 1 MF recompõe-se 5 metros; de 1 a 2 MF recompõe-se 8 metros; de 2 a 4 MF recompõe-se 15 metros; e acima 4 MF recompõe-se uma faixa que seja metade da largura do curso d’água (mínimo de 20 metros e máximo de 100 metros) (Oliveira et al., 2014; Sampaio, 2015).

Utilizou-se como referência o trabalho de Rodríguez (2015) que estimou o sequestro de carbono por reflorestamento em três categorias de APPs: rios, nascentes e topo de morros, usando o fator proposto pelo IPCC para um horizonte de tempo de 20 anos, resultando no lucro aproximado por tonelada de carbono. A Figura 18 apresenta as representações de mapeamento das APPs.

**Figura 18.** Representações usadas na detecção das APPs na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS).



Elaboração: Sampaio (2022). Fonte: CAR (2022).

Nesta etapa a estimativa de carbono foi realizada por categoria de áreas restritivas (considerando as APPs de nascentes e margens dos rios e da Reserva Legal) e o método do IPCC, começando pelos cursos d'águas, nascentes e RLs.

O método utilizado pelo IPCC<sup>31</sup> é oficial, pois considera a contabilização da parte aérea e raiz, ou seja, a captura de carbono na biomassa aérea e abaixo do solo, também porque considera um horizonte de tempo em anos e não assume como linear a velocidade de crescimento da árvore e, portanto, o fator de sequestro de carbono é mais próximo da realidade (Rodríguez, 2015, p.90). O Valor do fator de sequestro (tCO<sub>2</sub>/ha/ano), trata-se de um fator de sequestro generalista, com a tendência da equação (4) superestimar os valores, visto que utiliza apenas a variável idade da floresta para isolar as variações de incremento florestal e linearizar a velocidade de crescimento das árvores, ou seja, desconsidera a heterogeneidade das diferentes comunidades (Medeiros, 2019).

Vale destacar que conforme a metodologia aplicada por Rodríguez (2015) considerou-se para os resultados dessa etapa, a quantificação das áreas das classes de pastagem e silvicultura para potencial reflorestamento dentro das áreas restritivas – APPs e RL.

Para esta análise realizou-se o cálculo de sequestro de carbono (Equação 4)

<sup>31</sup> <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.20.21.31/doc/publicacao.pdf>

apresentado por Rodríguez (2015) e Marçal (2021), multiplicou-se o fator de sequestro de carbono pela área de APP mapeada para o ano de 2021 e multiplicou-se pelo horizonte de tempo, nessa pesquisa utilizou-se o horizonte de tempo de 12 e 30 anos para estimar o sequestro, respectivamente, para 2033 e 2051.

*Equação 4:*

$$S = FSC \times \text{Área APP} \times \text{número de anos}$$

Onde o Fator de sequestro de carbono – FSC é 7,3253 tCO<sub>2</sub>/ha/ano, segundo IPCC (2006). Uma tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO<sub>2</sub>, portanto, uma tonelada de CO<sub>2</sub> equivale a 0,27 toneladas de carbono (Rodríguez, 2015). As informações geradas foram representadas em forma de tabelas.

### **3.4.3 Simulação de Pagamentos por Serviços Ambientais: Projeto Mina d'água**

Para a simulação de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) utilizou-se a metodologia do Projeto Mina D'água, calculando os pontos de nascentes presentes nas propriedades rurais.

Para tanto, foi necessário buscar o banco de dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR) do estado de Mato Grosso do Sul, a fim de obter os limites das propriedades rurais, as áreas de reserva legal (avermada ou proposta) nos declarados no sistema do CAR/MS. Os dados foram trabalhados em ambiente SIG, utilizando o *software ArcGIS* para averiguar a veracidade das informações do CAR, visto que é auto declaração do proprietário rural.

Após corrigir algumas feições dos dados do Cadastro Ambiental Rural - CAR/MS, quantificou-se a área de cada propriedade rural, com enfoque aquelas que tinham nascentes dentro de seus limites territoriais.

Com a quantificação da área por hectares, recalculou-se o módulo fiscal de cada propriedade rural, considerando que o módulo fiscal nos municípios de Três Lagoas e Selvíria (MS), que tem como valor 35 hectares. Realizou-se os cálculos dos módulos fiscais e contabilização da quantidade de nascentes em cada propriedade rural.

Por fim, gerou-se tabelas no Excel aplicando a metodologia do Projeto Mina D'água<sup>32</sup>, onde cada nascente equivale a R\$ 150,00, baseado no custo de oportunidade da

---

32

terra (Pagiola *et al.*, 2013), o equivalente a R\$ 323,28 (em agosto de 2023<sup>33</sup>) a partir da correção pelo IGP-M (FGV). Esse valor atualizado foi multiplicado pelo número das nascentes nos imóveis rurais.

Além disso, realizou-se trabalho de campo (2019-2020) no intuito de averiguar os recursos hídricos na bacia hidrográfica com o monitoramento e coletas de amostras de água. Salienta-se que os resultados sobre a qualidade de água com enfoque nos serviços ecossistêmicos hídricos foram apresentados e publicados na revista do XXII Curso de Verão<sup>34</sup> “Novas Fronteiras, outros diálogos: cooperação e desenvolvimento”, evento internacional do Centro de Estudos Ibéricos (CEI) ocorrido em Portugal (PT) em parceria com a Espanha (ES). Portanto, a fim de obter uma visão sistêmica, sobre a modelagem preditiva de uso e cobertura da terra no cenário de tendência atual e no cenário conservacionista. O Quadro 7 apresenta as fotografias obtidas no trabalho de campo comparadas com as imagens do *Google Earth* para evidenciar o tipo de uso e a situação dos pontos verificados na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS). As informações foram discutidas e apresentadas por meio de tabelas no tópico de resultados e discussão da presente tese.

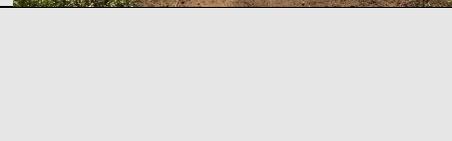
---

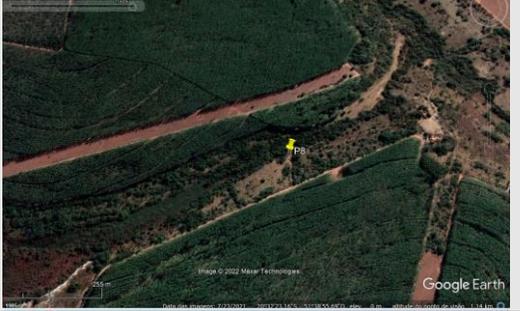
<sup>33</sup> Atualizado pela inflação.

<sup>34</sup> Centro de Estudos Ibéricos (CEI): 28 de junho a 02 de julho de 2022.

**Quadro 7.** Fotografias dos pontos amostrais com a localização geográfica comparados com as imagens do *Google Earth*.

Pontos	Imagens <i>Google Earth</i>	Fotografias
<p><b>P1</b></p>		
<p>20°29'41,45" 51°42'50,0</p>		
<p>Localiza-se no bebedouro para dessedentação animal da Fazenda Campo Limpo II, observou-se a presença de gado que mitigam a sede nesse ponto.</p>		
<p><b>P2</b></p>		
<p>20°29'26,3" 51°41'59,4"</p>		
<p>Encontra-se à margem esquerda do rio (ponte) sobre a BHCH na Fazenda Campo Limpo II</p>		
<p><b>P3</b></p>		
<p>20°30'35,1 51°41'22,7"</p>		
<p>Localizado em um bebedouro de gado – pequeno afluente do Córrego Bebedouro</p>		
<p><b>P4</b></p>		
<p>20°31'07,8" 51°38'45,9"</p>		

<p>É atingido após percorrer-se um trecho de cerca de 200m dentro da vegetação palustre (brejo), sendo este aos arredores da vizinhança da Fazenda Dois Irmãos.</p>		
<p><b>P5</b></p>		
<p>20°30'59,7" 51°39'08,3"</p>		
<p>A vegetação estava queimada, percorreu-se até o ponto no qual foi observado um afloramento de rochas do Grupo Santo Anastácio, trata-se do próprio fundo de canal da BHCB</p>		
<p><b>P6</b></p>		
<p>20°31'29,4" 51°40'46,5"</p>		
<p>Localiza-se na saída de um pequeno tubo na estrada, e dependendo da estação do ano encontra-se seco, sendo assim, um curso d'água intermitente.</p>		
<p><b>P7</b></p>		
<p>20°30'06,4" 51°39'00,4"</p>		

<p>Trata-se de um local para dessedentação animal, observou-se o pisoteio do gado.</p>		
<p><b>P8</b></p>		
<p>20°32'23,1" 51°38'51,8"</p>	<p>Localiza-se à margem esquerda da ponte (coletas realizadas antes do tubo) dentro da Fazenda Bebedouro, a transparência da água é exuberante.</p>	
<p><b>P9</b></p>		
<p>20°32'19,8" 51°37'49,4"</p>	<p>Localizado em um canal escavado pelo proprietário da Fazenda Bebedouro para criação de uma represa e ao entorno tem-se a plantação da silvicultura.</p>	
<p><b>P10</b></p>		
<p>20°31'30,3" 51°34'51,9"</p>		

**Localiza-se à margem direita da BR-158 sentido Selvíria - Três Lagoas (MS), a caminho da sede da fábrica de papel e celulose.**



Elaboração: Sampaio (2022). Fotografias da autora e Imagens do *Google Earth Pro*.

### 3.5 MODELO DE SEQUESTRO DE CARBONO – *InVEST*

A modelagem do estoque e sequestro de carbono, bem como a valoração dos respectivos serviços ecossistêmicos foi realizada no *software InVEST*<sup>35</sup> (Projeto Capital Natural, 2023). O modelo *InVEST* estima a quantidade líquida de carbono armazenada em um território ao longo do tempo e o valor de mercado de carbono sequestrado no estoque remanescente (Cardoso, 2012; Sharp, 2016, 2018; Manual *InVEST*, 2022; Projeto Capital Natural, 2023). O modelo mapeia as densidades de armazenamento de carbono para *rasters* de uso e cobertura da terra (em classes), para cada tipo de uso e cobertura, sendo que o modelo requer uma estimativa da quantidade de carbono em pelo menos um dos quatro reservatórios fundamentais.

O armazenamento de carbono em uma dada área depende muito do tamanho dos quatro reservatórios de carbono, sendo eles: a biomassa acima do solo, biomassa abaixo do solo, no solo e matéria orgânica morta.

Assim, antes da simulação do modelo é necessário realizar a modelagem preditiva, que apresentamos no tópico anterior sobre modelagem preditiva. Isso permitiu obter os dados necessários, que correspondem aos mapas de uso e cobertura da terra nos anos selecionados (Tabela 2).

Para a execução do modelo de estoque e sequestro de carbono no programa *InVEST*, foram gerados os dados de entrada. Esses dados de entrada foram produzidos em um ambiente SIG, utilizando como base os *rasters* correspondentes aos anos de 1984, 2004, 2009, 2015 e 2021. Em seguida, realizou-se uma modelagem de cenário preditivo para os anos de 2033 e 2051.

---

<sup>35</sup> <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/index.html>

**Tabela 2.** Dados de entrada do modelo de sequestro de carbono do *software InVEST* 3.12.1.

Dados de entrada	Descrição	Programa utilizado
Delimitação da BHCB (MS). 1:9.000	Mapa com a delimitação da bacia hidrográfica do córrego Bebedouro (MS) para análise do estoque e sequestro de carbono.	ArcGis 10.1
Mapa de uso e cobertura da terra (ano 2021)	Mapa na estrutura <i>raster</i> com as classes de usos e coberturas da área de estudo.	ArcGis 10.1 Google Earth Engine (GEE)
Tabela com valores de armazenamento de Carbono ( <i>pools</i> )	Contendo os dados sobre o carbono armazenado em cada um dos quatro reservatórios conforme cada classe de uso e cobertura da terra (em formato <i>csv</i> ). Dados de campo (Carbono orgânico do solo), inventário do IPCC (2006; 2019).	Excel
Mapa do cenário futuro do uso e cobertura da terra (ano de 2033 e 2051)	Mapa na estrutura <i>raster</i> com as classes de uso e cobertura, obtidos nesta tese.	ArcGis 10.2 <i>PLUS model</i>
Dados econômicos das estimativas de armazenamento de carbono	Obtidos através do inventário do IPCC <sup>36</sup> (2006; 2019) e dados primários obtidos por meio do trabalho de campo.	Excel

Elaboração: Sampaio (2022). Adaptado do Manual *InVEST* (2021).

É importante destacar que os dados relativos ao armazenamento de carbono no solo foram coletados durante um trabalho de campo realizado nos dias 14 e 15 de setembro de 2022. Para obter informações sobre o carbono orgânico do solo na camada de 0 a 30 cm, foram utilizadas em campo ferramentas como o trado, martelo e anel de coleta. A análise do carbono orgânico e a densidade aparente foram calculadas no laboratório de análises de solos da UNESP de Ilha Solteira - SP. Considerou-se 2 amostras por classe, garantindo ao menos uma amostra por classe coletada em campo. O estoque de carbono foi calculado segundo a Equação 5 no documento de comunicado técnico da EMBRAPA que estabelece a fórmula para calcular o estoque de carbono no solo com base no carbono orgânico, densidade aparente e profundidade (Fernandes e Fernandes, 2009). Onde o Est C = estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg. ha<sup>-1</sup>); o CO = teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g.kg<sup>-1</sup>); Ds = densidade do solo da profundidade (kg.dm<sup>-3</sup>); e = espessura da camada considerada (cm).

$$\text{Est C} = (\text{CO} \times \text{Ds} \times e) / 10$$

Equação 5:

<sup>36</sup> [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/documents/EFDB\\_User\\_Manual.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/documents/EFDB_User_Manual.pdf)

Na Figura 19, apresentam-se os equipamentos utilizados no trabalho de campo para obtenção do carbono orgânico do solo em diferentes classes de uso e cobertura da terra, bem como, a utilização do *drone* (VANT) para obtenção de imagens para validação dos mapeamentos.

**Figura 19.** Procedimentos para obtenção do carbono orgânico do solo: coleta de amostras em duplicata em cada classe de uso e cobertura da terra.



Legenda: a) Tradagem do solo; b) Aprofundamento do anel volumétrico; c) Anel volumétrico com a amostra de solo; d) Armazenamento em sacos plásticos etiquetados; e) Amostras de solo tradado em duplicata; f) Levantamento do VANT.

Fonte: Sampaio (2022). Trabalho de Campo (Setembro de 2022).

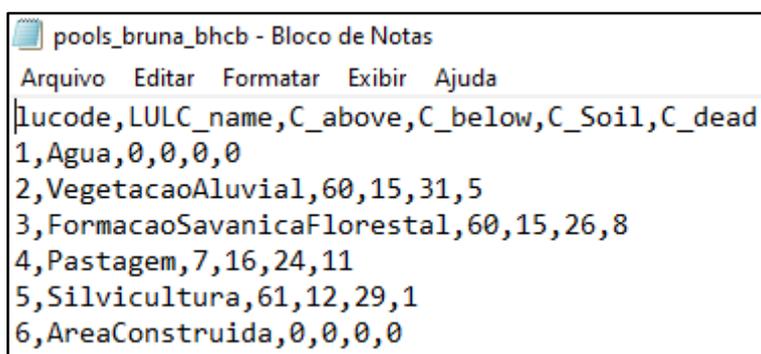
As amostras duplicadas de solos foram enviadas para o laboratório da UNESP, campus de Ilha Solteira (SP) para análises e obtivemos os resultados do carbono no solo e da densidade de carbono. Assim, calculou-se a média dos valores de carbono orgânico no solo obtidos por meio do trabalho de campo para cada classe.

Para obtenção dos demais valores de referência para o carbono (acima; abaixo; no solo; e matéria orgânica morta) conforme os tipos de uso e cobertura teve-se que realizar

pesquisa bibliográfica dos principais estudos no bioma Cerrado. Utilizou-se os valores obtidos pelas seguintes referências: acima do solo tiveram como referência Kerdan, Giarola, Jalil-Veja *et al.*, (2019); no geral tem-se destaque Kerdan *et al.* (2019); UK-AGB; Solo Embrapa; Morais *et al.* (2017); De Miranda *et al.* (2014); Oliveira *et al.* (2004); MCT; IPCC.

A Figura 20 apresenta os dados de entrada do armazenamento de carbono em cada reservatório.

**Figura 20.** Dados do armazenamento de carbono em cada reservatório.



lucode	LULC_name	C_above	C_below	C_Soil	C_dead
1	Agua	0	0	0	0
2	VegetacaoAluvial	60	15	31	5
3	FormacaoSavanicaFlorestal	60	15	26	8
4	Pastagem	7	16	24	11
5	Silvicultura	61	12	29	1
6	AreaConstruida	0	0	0	0

Fonte: Sampaio (2022).

No QGIS, utilizou-se a ferramenta *estatísticas zonais*, na qual colocou-se como camada de entrada o mapa de uso e cobertura da terra corrigido a geometria (em vetor) e como camada *raster* o mapa da somatória do carbono orgânico do solo de 0 a 30 cm. Após, obter a estatística zonal foi utilizada a *ferramenta vetor – geoprocessamento – dissolver o DN*, na qual obtive os valores de estimativas de carbono orgânico do solo, conforme as classes de uso e cobertura.

As saídas do modelo são em megagrama<sup>37</sup> (Mg) de carbono por *pixel* e o valor do sequestro de carbono por unidades monetárias por *pixel*. Portanto, o valor social de uma tonelada de carbono sequestrada é o dano social evitado por não liberar essa tonelada de carbono na atmosfera (Hipólito, 2017). Além disso, o sequestro do carbono é fundamental, visto que há grandes concentrações de gases do efeito estufa na atmosfera e com isso reduz-se as concentrações de gases que estão acumulados ao longo do tempo na camada da atmosfera. Evitando assim, os eventos climáticos extremos como as secas prolongadas, tempestades intensas e ondas de calor.

Portanto, a utilização da modelagem preditiva de estoque e sequestro de carbono é ferramenta essencial para o planejamento das atividades de uso da terra, pois assim pode-se

<sup>37</sup> 1 Mg = 1 megagrama ou 1 tonelada métrica.

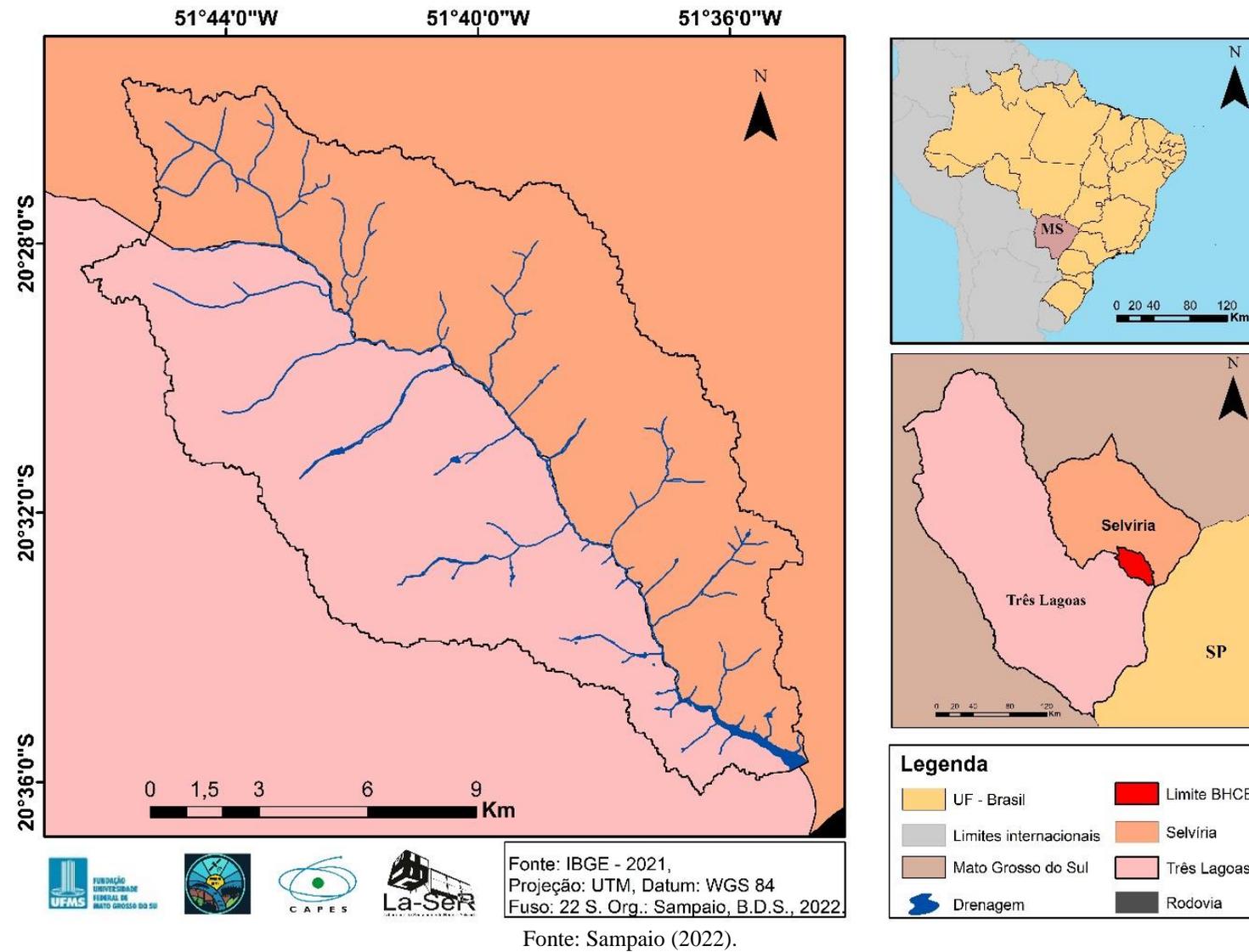
prever e mitigar os efeitos das mudanças climáticas, especialmente comparando os cenários de continuidade de mudanças atuais (CMA) com um cenário conservacionista que considere a proteção florestal (PF), bem como, ações de reflorestamentos nas propriedades rurais para que as plantas absorvam o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera durante o processo natural da fotossíntese e que o carbono fique armazenado na biomassa da vegetação.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO**

A bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro - BHCB está localizada entre as coordenadas geográficas - latitudes  $20^{\circ} 25' 30''$  S e  $20^{\circ} 36' 0''$  W e longitudes  $51^{\circ} 46' 0''$  W e  $51^{\circ} 34' 0''$  W, entre o limite dos municípios de Três Lagoas e Selvíria – no leste do Estado de Mato Grosso do Sul (MS). Trata-se de um córrego afluente da margem direita do Rio Paraná, com uma área de aproximadamente  $202,69 \text{ km}^2$  (Figura 21).

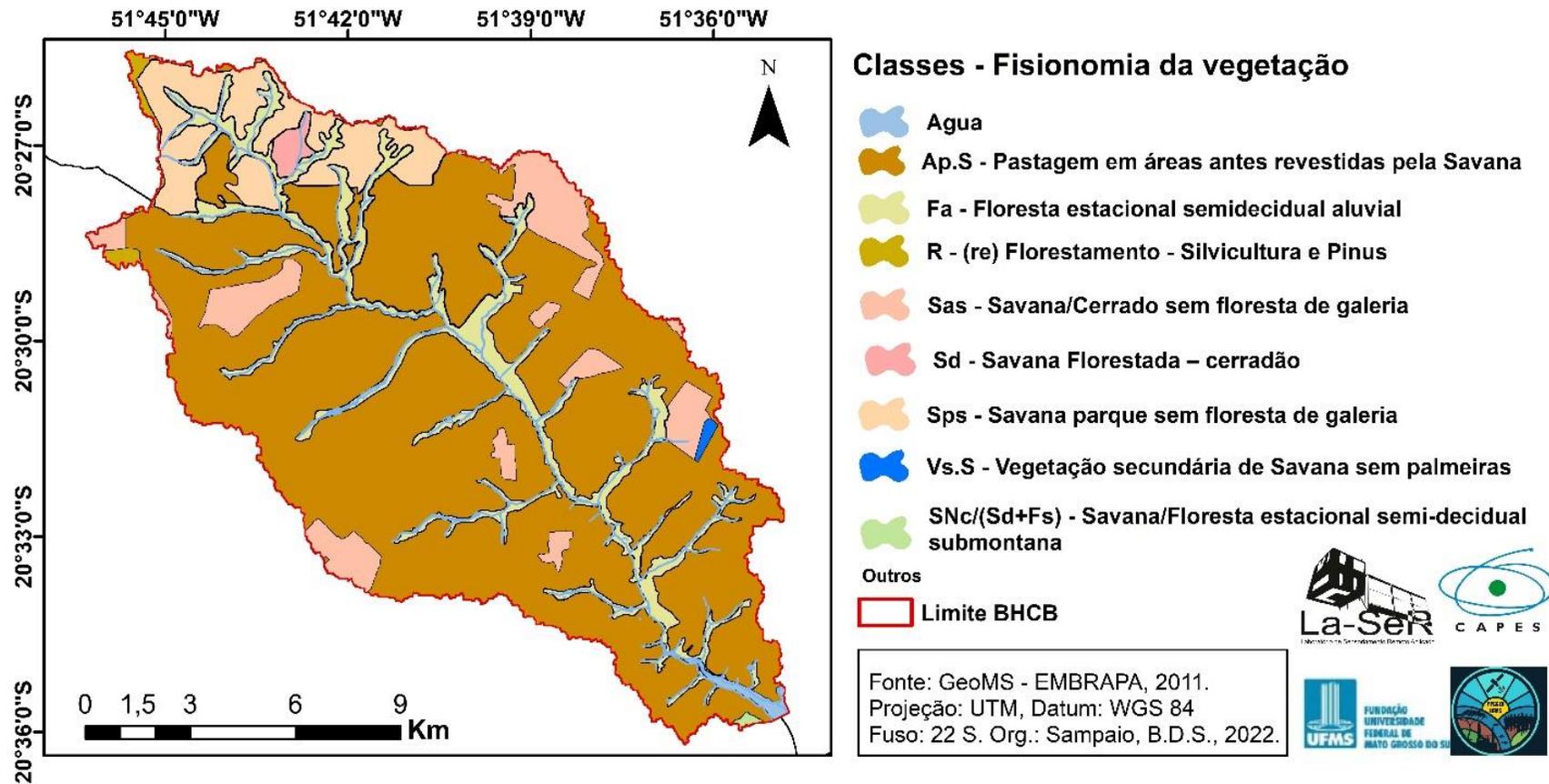
**Figura 21.** Localização geográfica da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro, Três Lagoas e Selvíria (MS).



Essa região tem forte destaque agrícola, com o uso e cobertura da terra dominado pela silvicultura do eucalipto da espécie *grandis* (*Eucalyptus grandis*). De acordo com o mapeamento realizado na presente tese, em 2021 a classe Silvicultura ocupou 57,38 km<sup>2</sup> da bacia hidrográfica (28,31%), com alto nível de produtividade e tecnificação para a produção de papel e celulose, além de áreas de pastagens plantadas.

De acordo com a análise realizada, por intermédio do mapeamento Projeto GeoMS, elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA para monitoramento do espaço rural e facilitar a regularização e o licenciamento ambiental, observou-se a predominância do bioma Cerrado/Savana (Silva *et al.*, 2011). A área da BHCB está situada na faixa de transição Cerrado/Mata Atlântica, possui encaves (transição) próximo ao Rio Paraná. Apresenta as seguintes vegetações, conforme as siglas utilizada no GeoMS (Embrapa, 2011): (Ap.s) Pastagem em área anteriormente revestida pela Savana; (Fa) Floresta estacional semidecidual aluvial – vegetação aluvial ao longo dos fluvios – podendo ser arbórea, arbustiva, herbácea; ® Florestamento/reflorestamento - Silvicultura e pinus; (SNc = Sd + Fs) Savana/Floresta estacional semidecidual submontana - mata; (Sas) Savana/Cerrado sem floresta de galeria; (Sd) Savana Florestada – cerradão; (Sps) Savana parque sem floresta de galeria; (Vs.S) Vegetação secundária de Savana sem palmeiras (Figura 22), (Silva *et al.*, 2011).

**Figura 22.** Fisionomia da vegetação na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS).



Fonte: GeoMS (2011). Org.: Sampaio (2022).

Segundo o Manual Técnico da Vegetação Brasileira – IBGE (2012, p.109), o termo Savana (Cerrado) é uma vegetação xeromorfa, que ocorre sob distintos tipos de clima. Reveste solos lixiviados aluminizados, apresentando sinúsias de hemicriptófitos, geófitos, caméfitos e fanerófitos oligotóficos de pequeno porte, com ocorrência em toda a Zona Neotropical e, prioritariamente, no Brasil Central – recebe nomes locais na Região Nordeste: “tabuleiro”, “agreste” e “chapada”; no norte dos Estados de Minas Gerais, Bahia e Tocantins: “campina” ou “gerais”; no Estado de Roraima: “lavrado”. O Cerrado (Savana) foi subdividida em quatro subgrupos de formação: florestada; arborizada; parque; e gramíneo-lenhosa.

A área da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (BHCB/MS) compreende aproximadamente 202,68 km<sup>2</sup>, possuem cerca de 1,25 km<sup>2</sup> (0,61%) de Savana Florestada – Cerradão (Sd) – no alto curso da BHCB, subgrupo de formação com fisionomia típica e característica restrita a áreas areníticas lixiviadas com solos profundos, ocorrendo em um clima tropical eminentemente estacional. Apresenta sinúsias lenhosas de micro e nanofanerófitos, tortuosos com ramificação irregular, providos de macrófitos esclerófitos perenes ou semidecíduos, ritidoma esfoliado corticoso rígido ou córtex maciamente suberoso, como órgãos de reserva subterrâneos ou xilopódios, cujas alturas variam de 6 a 8 metros. Em alguns locais, apresenta sinúsias lenhosas de meso e microfanerófitos com altura média superior aos 10 metros, muito semelhante à fisionomia da Floresta Estacional, diferindo apenas na sua composição florística (IBGE, 2012, p.109).

Como apresentado no Quadro 8, a BHCB tem aproximadamente 15,71 km<sup>2</sup> (7,75%) de Savana Parque sem floresta de galeria no alto curso da bacia. A Savana Parque (Campo-Sujo-de-Cerrado) é o subgrupo constituído por um estrato graminoide, integrado por hemicriptófitos e geófitos de florística natural ou antropizada, entremeado por nanofanerófitos isolados – típico de um “Parque Inglês”. A Savana Parque natural ocorre algumas vezes com feição de campos litossólicos e/ou rupestre, em áreas de depressões periodicamente inundadas – com a tipologia de Cerrado-de-Pantanal (IBGE, 2012, p.113).

**Quadro 8.** Fisionomias da vegetação na BHCB (MS).

Fisionomias	Área km <sup>2</sup>	Área %
Água	0,89	0,44
<b>Ap.S - Pastagem em área anteriormente revestida pela Savana</b>	143,74	<b>70,91</b>
<b>Fa - Floresta estacional semidecidual aluvial</b>	23,67	11,68
<b>R - Florestamento/ reflorestamento - Silvicultura e pinus</b>	1,27	0,62
<b>SNc (Sd + Fs) - Savana/Floresta estacional semidecidual submontana - mata</b>	0,20	0,09
<b>Sas - Savana/Cerrado sem floresta de galeria</b>	15,61	7,70
<b>Sd - Savana Florestada – cerradão</b>	1,25	0,61
<b>Sps - Savana parque sem floresta de galeria</b>	15,71	7,75
<b>Vs. S - Vegetação secundária de Savana sem palmeiras</b>	0,32	0,15
<b>Total</b>	202,69	100

Elaboração: Sampaio (2022). Fonte: GeoMS – EMBRAPA (2011).

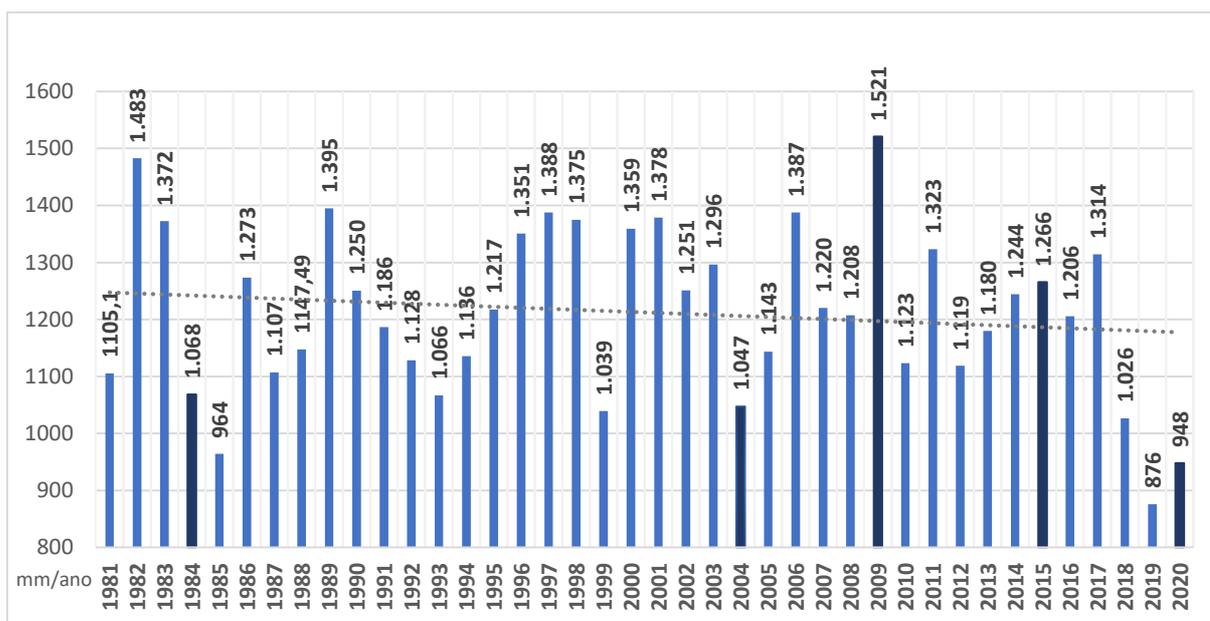
Em análise ao mapeamento do projeto GeoMS (Embrapa, 2011) sobre a fisionomia da vegetação, observa-se no Quadro 8 e na Figura 22, que a maior área está sob domínio da pastagem em área anteriormente revestida por Savana (Ap. s) com 143,74 km<sup>2</sup> que abrange aproximadamente 71% da área total da bacia, seguido da floresta estacional semidecidual aluvial (Fa), com aproximadamente 23,67 km<sup>2</sup>. Portanto, essa fisionomia abrange 11% da área da bacia, podendo presumir essa quantidade por representar Área de Preservação Permanente – APP, sendo necessária a preservação da vegetação aluvial ao longo dos canais fluviais. A Floresta estacional semidecidual aluvial é uma formação com maior frequência na grande depressão pantaneira sul-mato-grossense, margeando os rios da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguai (IBGE, 2012, p.94).

Em relação ao comportamento climático na BHCB, segundo *Alvares et al.* (2002) que trabalha a classificação de *Koppen*, a área da bacia hidrográfica é considerada como clima tropical úmido (Aw), é um clima tropical com estações secas, caracterizado por duas estações típicas – verão chuvoso e inverno seco. A região da área de estudo compreende ao clima Tropical Brasil Central, quente - média maior que 18° C em todos os meses, úmido 3 meses secos (IBGE, 2002).

O Clima tropical, com inverno seco (Aw) apresenta estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (julho é o mês mais seco). A temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C. As precipitações são superiores a 750 mm anuais, atingindo 1800 mm (EMBRAPA, 2016).

De acordo com os dados obtidos por meio da aplicação do algoritmo *Climate Hazards group Infrared Precipitation with satations* – CHIRPS (apêndice A) que utiliza técnicas de interpolação e estimativas de precipitação com base nas imagens de satélite (infravermelho) de alta resolução tem-se as estimativas de precipitação acumulados anuais desde 1981 até o presente. Conforme Funk *et al.* (2015), o CHIRPS foi projetado para preencher as lacunas de escassez de dados, de modo a fornecer longo período de registro de dados de precipitação. O Gráfico 1 apresenta a pluviosidade total anual na BHCB (MS).

**Gráfico 1.** Pluviosidade total anual na BHCB (MS).



Elaboração: Sampaio (2022). Fonte: Plataforma GEE – CHIRPS (2022).

Observa-se no Gráfico 1 que ao longo do período de 1981 a 2020 a precipitação média anual na área da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro variou com a máxima de 1.521 mm no ano de 2009 e mínima de 876 mm no ano de 2019.

O clima (temperatura e precipitação) está relacionado com a vegetação, e seu desenvolvimento, influenciando pela sua distribuição, bem como a produtividade de atividades agrícolas e florestais. Portanto, o clima influencia diretamente na produtividade e no crescimento das plantas (Ivasko Junior, 2020).

Em relação as sub-bacias no Estado de Mato Grosso do Sul, observa-se que a BHCB possui área que compreende a sub-bacia do Paraná, na parte leste (Selvíria) tem-se a área de drenagem do rio Paraná, compreendida entre a confluência do rio Grande, exclusive<sup>38</sup>, e a confluência do rio Tiete, inclusive. Na parte Oeste (Três Lagoas) também constitui a sub-bacia com área de drenagem do rio Paraná, compreendida entre a confluência do rio Tiete, exclusive, e a do rio Paranapanema, exclusive (CPRM, 2008).

O Quadro 9 apresenta a geodiversidade na área de estudo.

---

<sup>38</sup> Significa: somente, apenas, unicamente, estritamente.

**Quadro 9.** Geodiversidade na BHCB.

<b>UNIDADE</b>	<b>SANTO ANASTÁCIO</b>	<b>SERRA GERAL</b>
<b>LITOTIPO</b>	Arenito	Dacito
<b>ROCHA</b>	Sedimentar (ou Sedimentos)	Ígnea
<b>DOMÍNIO</b>	Domínio das coberturas Sedimentares e Vulcanossedimentares Mesozóicas e Paleozóicas pouco a moderadamente consolidadas, associadas a grandes e profundas bacias sedimentares do tipo sinéclise	Domínio do Vulcanismo fissural Mesozóico do tipo plateau
<b>UNIGEO<sup>39</sup></b>	Predomínio de espessos pacotes de arenitos de deposição mista (eólica e fluvial)	Predomínio de basaltos
<b>DEFORMAÇÃO TECTÔNICA</b>	Não dobrada	
<b>TECTÔNICA FRATURAMENTO</b>	Pouco a moderadamente fraturada	Intensamente fraturada
<b>RELEVO</b>	Domínio de Colinas Amplas e Suaves	
<b>TEXTURA</b>	Predominantemente arenoso	Predominantemente argiloso
<b>DECLIVIDADE</b>	3 a 10°	
<b>AMPLITUDE TOPOGRÁFICA</b>	20 a 50 metros	

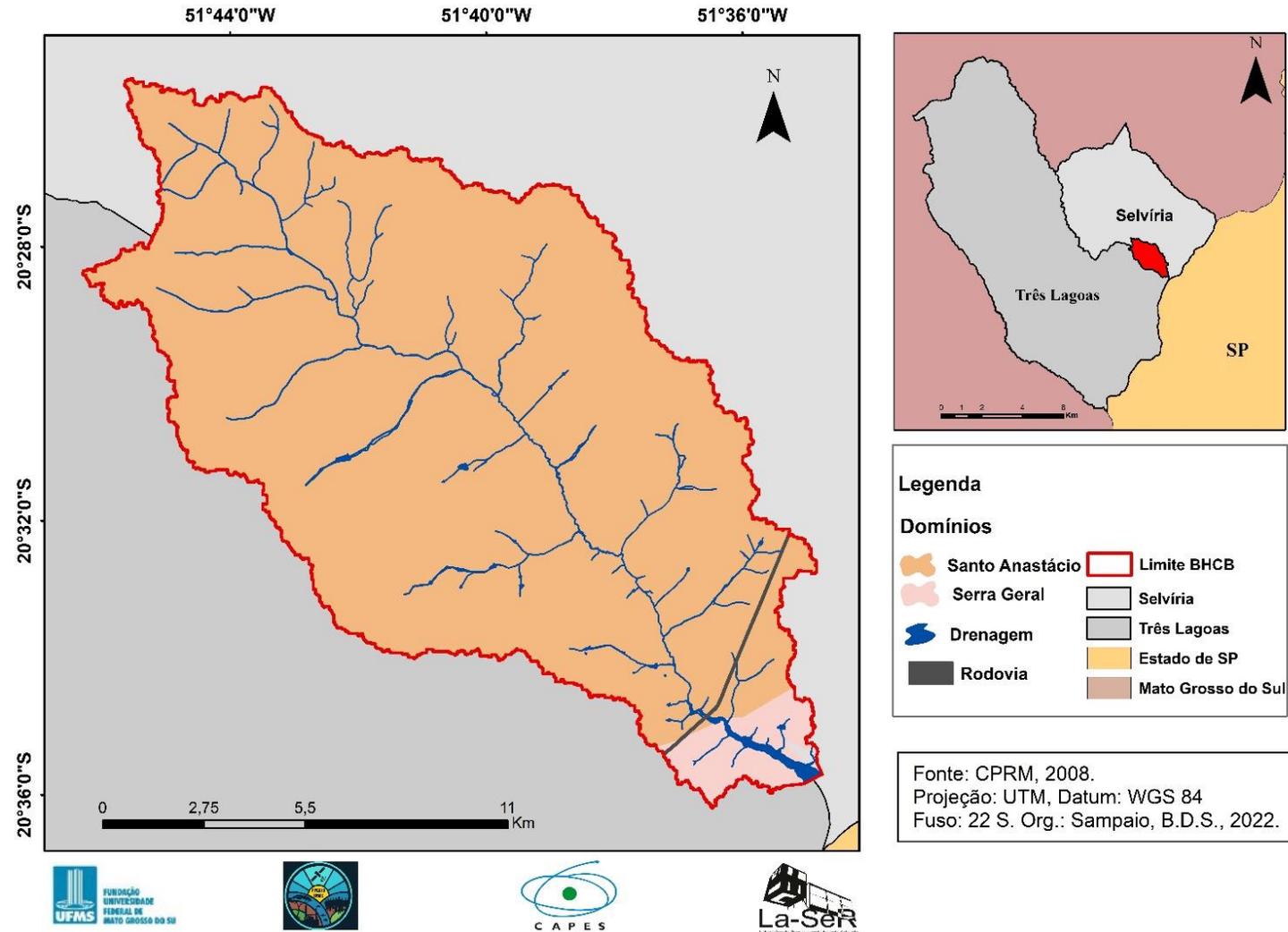
Fonte: CPRM (2008). Org.: Sampaio (2022).

<sup>39</sup> Descrição das unidades geológico-ambientais que foram agrupadas com características semelhantes do ponto de vista da resposta ambiental, a partir da subdivisão dos domínios geológico-ambientais. Siglas disponíveis em: [https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/14709/5/InformacoesUsuario\\_RN.pdf](https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/14709/5/InformacoesUsuario_RN.pdf).

Em relação à geologia tem-se destaque a formação Santo Anastácio, composta por arenitos da classe sedimentar, pertencente a Bacia do Paraná e compreende 96,24% (195,09 km<sup>2</sup>) da área total da BHCB, por conseguinte, na região da foz com o Rio Paraná tem-se a formação Serra Geral que compreende cerca de 3,54% (7,19 km<sup>2</sup>) da área da bacia – constituída em sua maioria por rochas de origem magmática (ígnea/vulcânica): basalto e dacito (CPRM, 2008). Conforme Silva (2020), a área de formação Santo Anastácio possui alto grau de fragilidade, por conseguinte, na região da formação Serra Geral possui um grau médio de fragilidade.

A Figura 23 apresenta a geologia na área de estudo.

**Figura 23.** Geologia na BHCB de acordo com o CPRM.



Fonte: CPRM (2008). Org.: Sampaio (2022).

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) elaborado pela EMBRAPA (2018) traz a definição dos tipos de solos. Na BHCB, Silva (2020) identificou dois tipos de solos na área da BHCB: os Latossolos Vermelho (62,56%) nas áreas de nascente no alto curso com fragilidade muito fraca e os Argissolos Vermelho-amarelo (37,4%) localizados no médio e baixo curso – na região da foz com fragilidade forte, conforme a avaliação dos autores (Sampaio e Pinto, 2019). Vale ressaltar a importância das informações sobre o tipo de solo na área, visto que ele é o principal reservatório para o armazenamento/estoque de carbono.

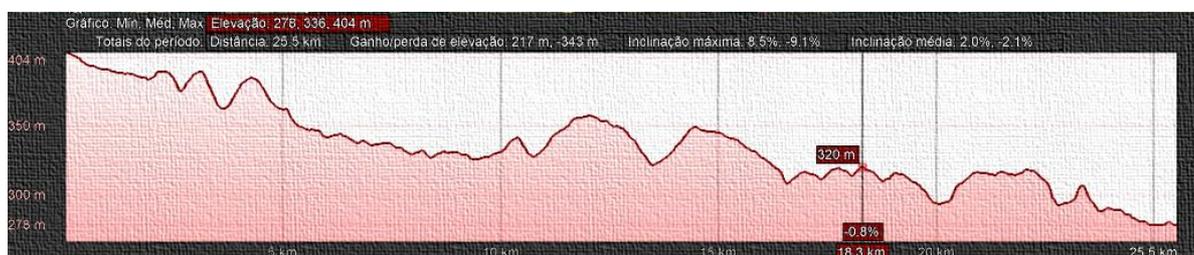
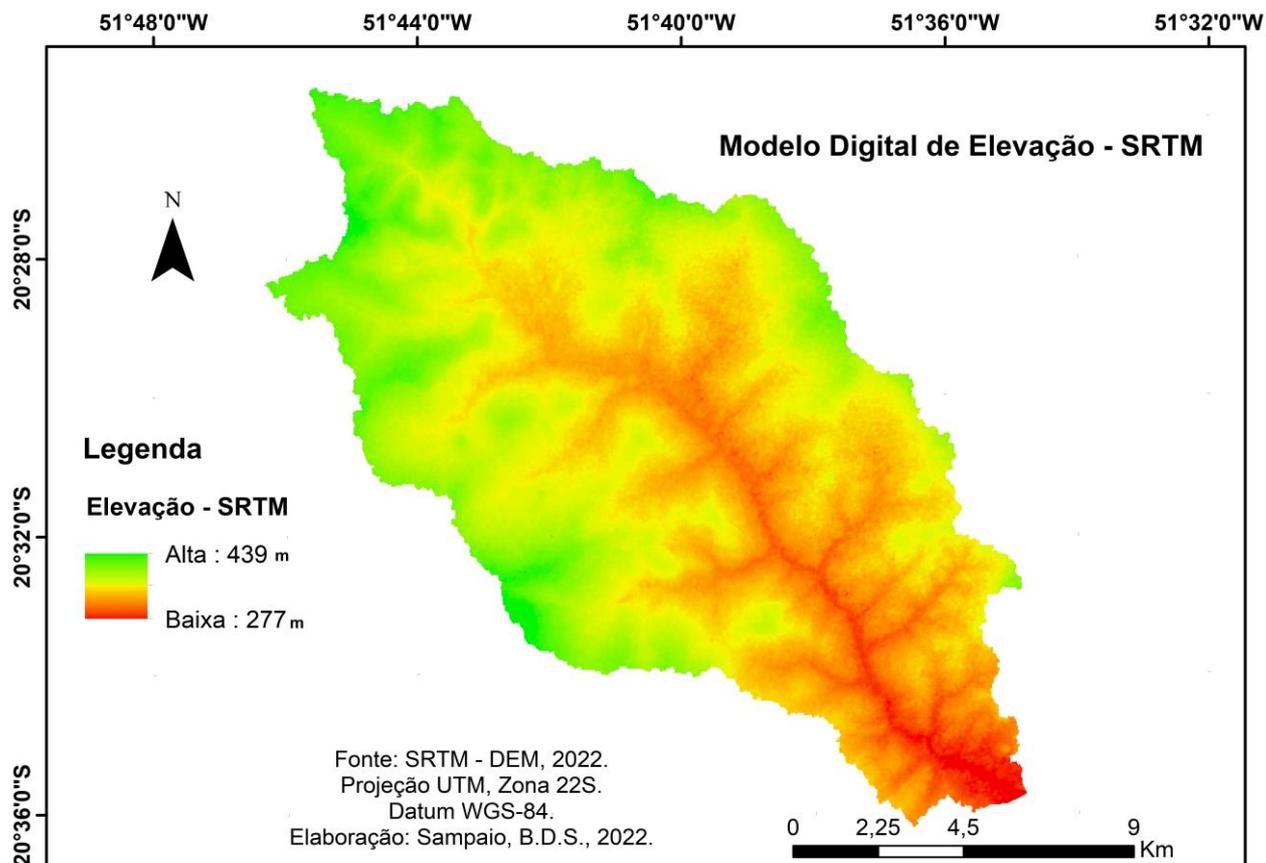
De acordo com o IBGE (2018), os Latossolos são solos muito intemperizados e bem profundos - constituídos por material mineral, como óxidos e hidróxidos de ferro - apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200 cm a partir da superfície ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura.

Os Argissolos têm profundidade variável desde forte a imperfeitamente drenados, “compreendem solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico”. Assim, os argissolos possuem uma evolução avançada com atuação incompleta de processo de ferralitização, são solos que apresentam um evidente incremento no teor de argila do horizonte superficial para o horizonte B, com ou sem decréscimo nos horizontes subjacentes (IBGE, 2018).

A BHCB tem formas de relevo de degradação em qualquer litologia, predominando rochas sedimentares e relevo de colinas pouco dissecadas, com vertentes convexas e topos amplos, de morfologia tabular ou alongada. Ambos domínios possuem um sistema de drenagem principal com deposição de planícies aluviais relativamente amplas (CPRM, 2008).

A Figura 24 apresenta o modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS).

**Figura 24.** Modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro.



Elaboração: Sampaio (2023). Fonte: Perfil de elevação no *Google Earth Pro* (2023).

Em relação à altimetria da bacia, na observa-se por meio do MDE – SRTM (2022) a cota máxima equivale a 439 metros na cabeceira da drenagem e a cota mínima equivale à 277 metros na foz do Córrego Bebedouro (MS) ao desaguar no Rio Paraná (Divisa entre os Estados de SP/MS). Assim, esse é o recorte espacial de análise da pesquisa, bacia hidrográfica de média extensão, entretanto, com muita complexidade advindas do uso e cobertura da terra.

## 4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA CLASSIFICAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA

No presente tópico são apresentados os resultados da classificação de uso e cobertura da terra. Para essa finalidade, antes de qualquer discussão deve-se apresentar a validação e veracidade do desempenho do classificador utilizado.

A Tabela 3 apresenta os resultados do coeficiente *Kappa* e exatidão global da BHCb.

**Tabela 3.** Resultados do cálculo de coeficiente *Kappa* e avaliação da acurácia global para o mapeamento de uso e cobertura da terra.

Ano	1984	2004	2009	2015	2021
<b>Acurácia Global</b>	94%	96%	96%	98%	95%
<b>Índice <i>Kappa</i></b>	0,8868	0,8981	0,9505	0,9691	0,9271
Total de pontos corretos (verdade terrestre)	282	289	290	294	285
<b>Qualidade</b>	excelente	excelente	excelente	excelente	excelente

Elaboração: Sampaio (2022).

Com base na Tabela 3 é possível verificar que o classificador RF apresentou excelente desempenho, especialmente após a aplicação de filtros para remoção dos ruídos na etapa de pós-processamento. Os valores obtidos para os índices de Exatidão Global (*Overall Accuracy*) e coeficientes *Kappa* (*Kappa Coefficient*) obtidos para a classificação das imagens dos quatro anos analisados mostraram que mais de 80% dos pontos foram classificados corretamente.

O valor do Índice *Kappa* para os quatro mapas gerados mediante a classificação supervisionada foi considerado como resultado satisfatório, porque alcançaram valores superiores a 0,81 de acordo com a metodologia de Congalton (1997) e avaliados na escala de Landis e Koch (1977). Da mesma maneira, a Exatidão Global foi superior a 94% superior ao limiar mínimo estabelecido por Anderson *et al.* (1976).

A Tabela 4 apresenta o coeficiente *Kappa* e a exatidão global da BHCb, para o ano de 1984.

**Tabela 4.** Matriz de erro com o percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 1984.

Verdade	Água		Veg. Aluvial		Formação Savânica-florestal		Pastagem		Total	
	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%
Água	<b>2</b>	100.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	2	0.67
Vegetação aluvial	0	0.00	<b>4</b>	100.00	8	5.67	0	0.00	12	4.00
Formação savânica-florestal	0	0.00	0	0.00	<b>125</b>	88.65	2	1.31	127	42.33
Pastagem	0	0.00	0	0.00	8	5.67	<b>151</b>	98.69	159	53.00
Total	2		4		141		153		300	100

Elaboração: Sampaio (2022).

Em relação a análise da matriz de confusão construída para a validação da classificação supervisionada da imagem *LANSAT 5* do ano de 1984 (Tabela 5), observou-se que houve uma correspondência maior com a classe Água (corpos d'águas) e Vegetação aluvial, porém a classe Formação savânica-florestal foi confundida com as classes vegetação aluvial e pastagem.

A Tabela 5 apresenta o coeficiente *Kappa* e a exatidão global da BHC B para o ano de 2004.

**Tabela 5.** Matriz de erro com o percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 2004.

Verdade	Água		Veg. Aluvial		Formação Savânica-florestal		Pastagem		Total	
	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%
Água	<b>2</b>	100.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	2	0.66
Vegetação aluvial	0	0.00	<b>4</b>	100.00	6	8.45	0	0.00	10	3.32
Formação savânica-florestal	0	0.00	0	0.00	<b>61</b>	85.92	2	0.89	63	20.93
Pastagem	0	0.00	0	0.00	4	5.63	<b>222</b>	99.11	225	75.08
Total	2		4		71		224		300	100

Elaboração: Sampaio (2022).

Ao analisar a matriz de confusão da classificação para o ano de 2004 (Tabela 6) obteve maior correspondência entre as classes água e vegetação aluvial. A classe formação savânica-florestal foi confundida com a classe vegetação aluvial, a classe pastagem foi confundida com a classe vegetação aluvial.

A Tabela 6 apresenta o coeficiente *Kappa* e a exatidão global da BHC B para o ano de 2009.

**Tabela 6.** Matriz de erro com o percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 2009.

Verdade	Água		Veg. Aluvial		Formação Savânica-florestal		Pastagem		Silvicultura		Total	
	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%
Água	<b>2</b>	100.00	3	13.64	0	0.00	0	0.00	0	0.00	5	1.67
Vegetação aluvial	0	0.00	<b>19</b>	86.36	0	0.00	1	0.99	0	0.00	20	6.67
Formação savânica-florestal	0	0.00	0	0.00	<b>44</b>	97.78	0	0.00	0	0.00	44	14.67
Pastagem	0	0.00	0	0.00	1	2.22	<b>100</b>	99.01	5	3.85	106	35.33
Silvicultura	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	<b>125</b>	96.15	125	41.67
Total	2		22		45		101		130		300	100

Elaboração: Sampaio (2022).

Ao analisar a matriz de confusão da classificação para o ano de 2009 (Tabela 7) obteve maior correspondência entre as classes água e pastagem, enquanto a classe vegetação aluvial foi confundida com água, as classes formação savânica-florestal e silvicultura foram confundidas com pastagem.

A Tabela 7 apresenta o coeficiente *Kappa* e a exatidão global da BHCB para o ano de 2015.

Ao analisar a matriz de confusão da classificação para o ano de 2015 (Tabela 8), as classes água, silvicultura e área construída tiveram maior concordância. Enquanto a classe pastagem obteve maior correspondência, a classe formação savânica-florestal confundiu-se com a vegetação aluvial.

A Tabela 8 apresenta o coeficiente *Kappa* e a exatidão global da BHCB para o ano de 2021.

**Tabela 7.** Matriz de erro com percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 2015.

Verdade	Água		Veg. Aluvial		Formação savânica-florestal		Pastagem		Silvicultura		Área Constr.		Total	
	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%
Água	<b>2</b>	100.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	2	0.67
Vegetação aluvial	0	0.00	<b>10</b>	90.91	3	7.32	0	0.00	0	0.00	0	0.00	13	4.33
Formação savânica-florestal	0	0.00	0	0.00	<b>38</b>	92.68	1	0.81	0	0.00	0	0.00	39	13.00
Pastagem	0	0.00	1	9.09	0	0.00	<b>122</b>	98.39	0	0.00	0	0.00	123	41.00
Silvicultura	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	0.81	<b>121</b>	100.00	0	0.00	122	40.67
Área Construída	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	<b>1</b>	100.00	1	0.33
Total	2		11		41		124		121		1		<b>300</b>	10.00

Elaboração: Sampaio (2022).

**Tabela 8.** Matriz de erro com o percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 2021.

Verdade	Água		Veg. Aluvial		Formação Savânica-florestal		Pastagem		Silvicultura		Área Constr.		Total	
	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%	Qtde	%
Água	<b>3</b>	100.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	3	1.00
Vegetação aluvial	0	0.00	<b>11</b>	100.00	7	8.75	0	0.00	0	0.00	0	0.00	18	6.00
Formação savânica-florestal	0	0.00	0	0.00	<b>68</b>	85.00	0	0.00	0	1.22	0	0.00	68	22.67
Pastagem	0	0.00	0	0.00	4	5.00	<b>77</b>	97.47	1	0.79	0	0.00	82	27.33
Silvicultura	0	0.00	0	0.00	1	1.25	2	2.53	<b>125</b>	99.21	0	0.00	128	42.67
Área Construída	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	<b>1</b>	100.00	1	0.33
Total	3		11		80		79		126		1		<b>300</b>	100.00

Elaboração: Sampaio (2022).

Ao analisar a matriz de confusão da classificação para o ano de 2021 (Tabela 8), obteve maior correspondência as classes Água, Vegetação aluvial e Área construída (100%), enquanto que a classe Formação savânica-florestal teve 92% de acurácia global e confundiu-se com a vegetação aluvial, a classe Pastagem teve uma acurácia global de 97% e teve confusão com a classe Silvicultura. A classe Silvicultura teve acurácia global de 98% e confundiu-se com formação savânica-florestal. Esse fato ocorreu devido à semelhança espectral dos alvos nos pixels em que a classificação confundiu as classes vegetação aluvial, formação savânica-florestal e silvicultura.

Assim, a aplicação do método de classificação supervisionada para a elaboração dos mapas temáticos na área na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) apresentou resultados estatísticos satisfatórios quando avaliados na escala de Landis e Koch (1977).

#### **4.2.1 Análise Multitemporal de Uso e Cobertura da terra, a partir do algoritmo *Random Forest***

Após a aplicação da classificação supervisionada do uso e cobertura da terra - utilizando o algoritmo *Random Forest* na plataforma *Google Earth Engine*, para os anos de 1984, 2004, 2009, 2015 e 2021 foi possível realizar uma análise multitemporal sobre as mudanças espaciais ocorridas durante o período analisado. De modo a compreender a complexidade que envolve os tipos de uso e cobertura da terra com os acontecimentos gerais na área, especialmente no que tange às questões de cunho econômico, com os investimentos na área.

Conforme o mapeamento do uso e cobertura da terra é possível visualizar a expansão da classe Silvicultura que predomina atualmente na área da bacia hidrográfica. Tem-se as principais mudanças ocorridas na área que era constituída pela Classe Cerrado (1984), no final da década de 1980 tem-se o processo gradativo de transformação, na qual observa-se em 2004 que a classe pastagem substitui a formação savânica-florestal.

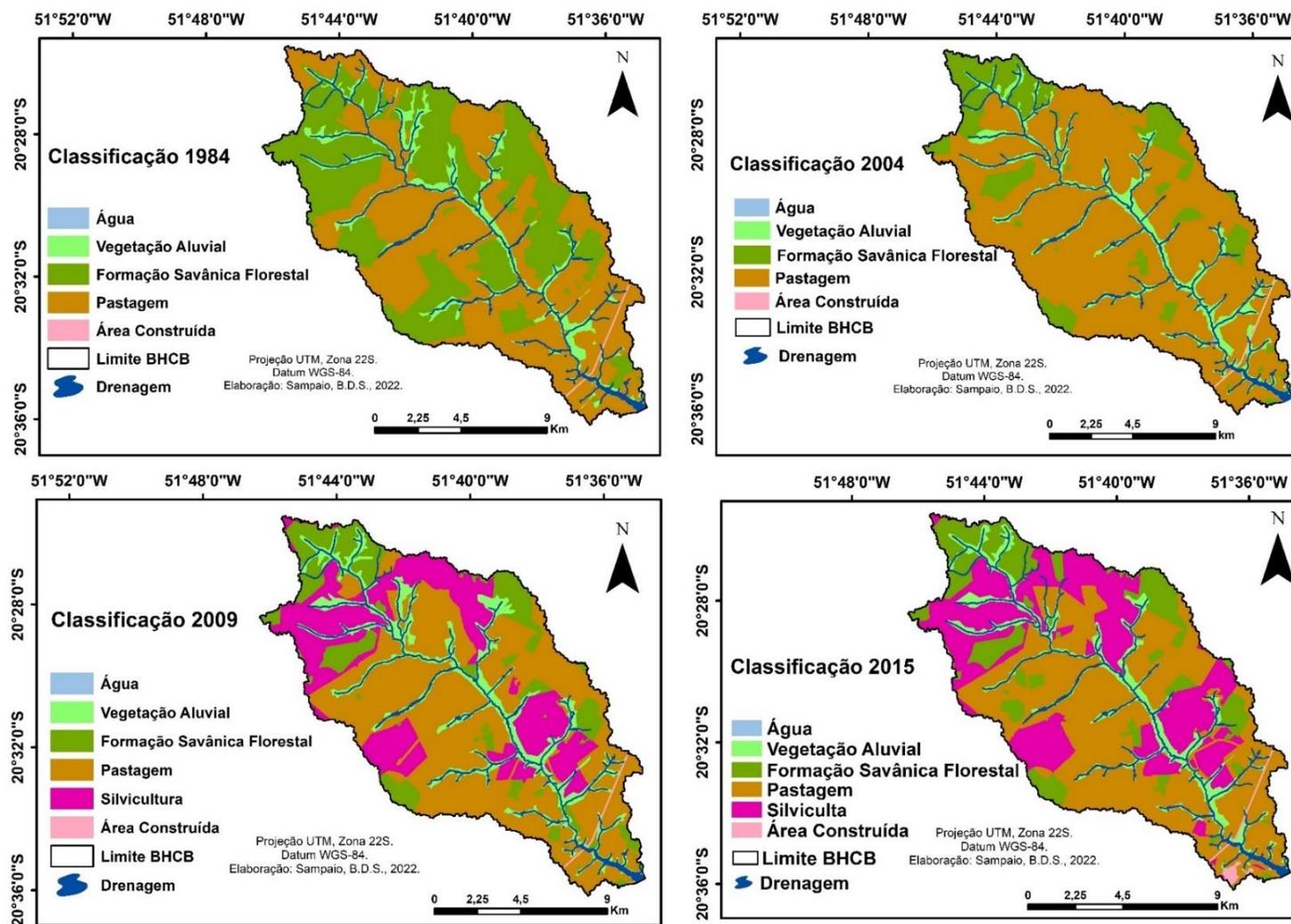
Em 2009 é possível visualizar a presença da classe Silvicultura e sua expansão em relação as outras classes, por consequência, também houve um aumento na classe Área Construída (composta pela rodovia e construção da Empresa de Papel e Celulose). Assim, tem-se no período de 37 anos (1984 a 2021) as mudanças ocorridas na área de Cerrado-Pastagem-Silvicultura.

A Figura 25 que apresenta a espacialização das classes de uso e cobertura da terra

para a área de estudo para os anos 1984, 2004, 2009 e 2015 e a Figura 26 para o ano de 2021.

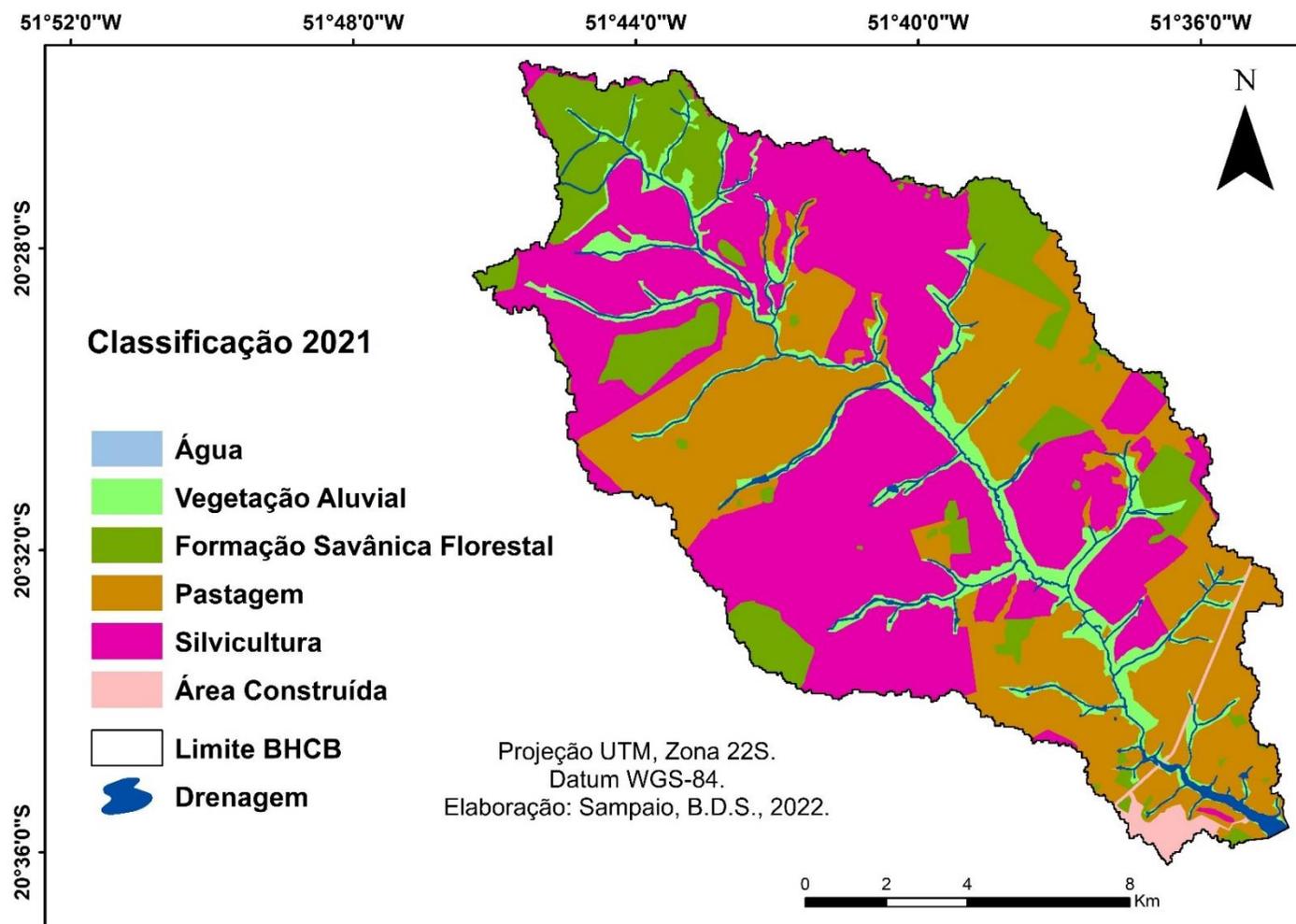
A Tabela 9 apresenta os valores da classificação do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS), entre os anos de 1984, 2004, 2009, 2015 e 2021, bem como a variação das classes na escala temporal de 1984 e 2021.

Figura 25. Classificação do Uso e Cobertura da terra para os anos de 1984, 2004, 2009 e 2015 - algoritmo Random Forest



Elaboração: Sampaio (2022).

Figura 26. Classificação do Uso e Cobertura da terra para o ano de 2021 - algoritmo *Random Forest*



Elaboração: Sampaio (2022).

**Tabela 9. Quantificação e percentagem das classes de uso e cobertura na BHCB, entre os anos de 1984, 2009, 2015 e 2021 - algoritmo Random Forest**

ANO	1984		2004		2009		2015		2021		Variação 1984-2021	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%								
Água	0,81	0,40	1,01	0,50	0,98	0,48	<b>1,09</b>	0,54	0,68	0,33	-0,13	-0,07
Vegetação aluvial	22,59	11,14	21,64	10,68	<b>25,67</b>	12,66	24,02	11,85	20,89	10,20	- 1,70	-0,94
Formação Savânica-florestal	<b>82,07</b>	40,49	28,97	14,29	28,60	14,11	31,25	15,42	27,61	13,84	-54,46	-27,01
Pastagem	96,81	47,76	<b>150,65</b>	74,32	<b>98,86</b>	48,77	<b>87,86</b>	43,35	67,22	32,82	-29,29	-14,94
Silvicultura	0,00	0,00	0,00	0,00	48,17	23,76	<b>57,37</b>	28,30	<b>86,29</b>	42,13	86,29	42,13
Área Construída	0,42	0,21	0,42	0,21	0,42	0,21	1,10	0,54	2,12	1,04	1,70	0,83
Área Total (km <sup>2</sup> )	<b>202,70</b>											

Elaboração: Sampaio (2022). Fonte: Mapa de classificação de uso e cobertura 1984-2021.

A Tabela 10 apresenta a variação percentual das classes de uso e cobertura da terra conforme cada período.

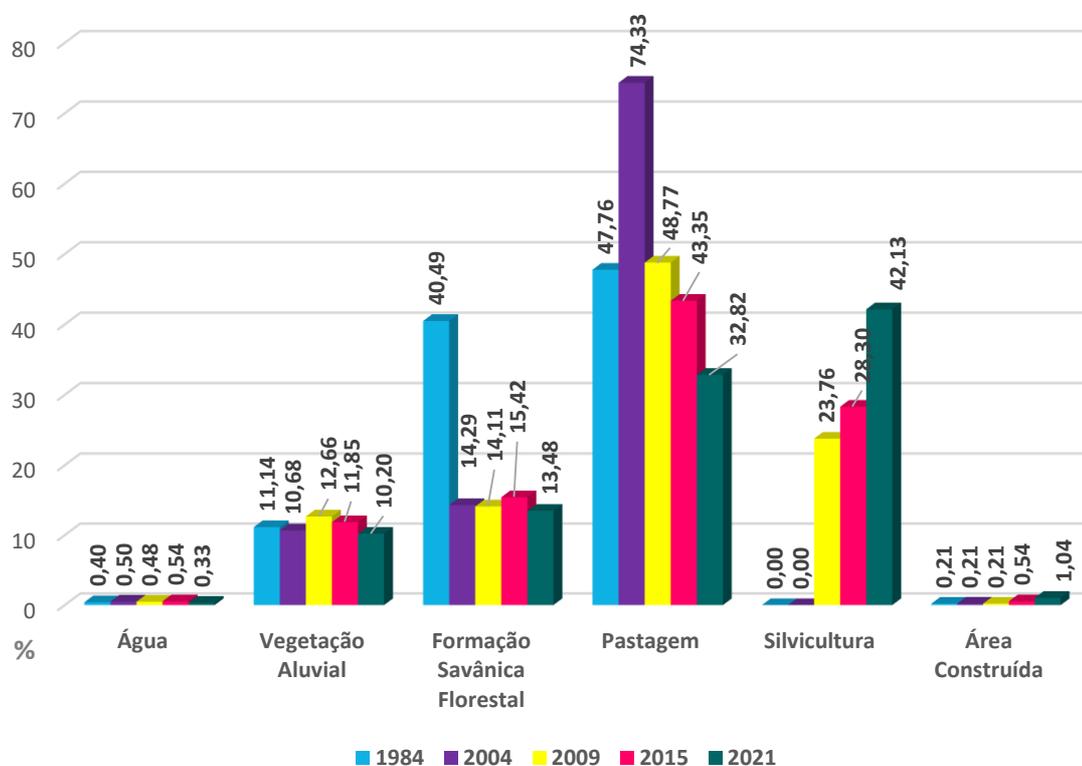
**Tabela 10.** Variação percentual das classes de uso e cobertura da terra.

CLASSES	PERÍODOS			
	1984-2004	2004-2009	2009-2015	2015-2021
ÁGUA	0,10	-0,01	0,05	-0,21
VEGETAÇÃO ALUVIAL	-0,47	1,99	-0,81	-1,65
FORMAÇÃO SAVÂNICA-FLORESTAL	<b>-26,19</b>	-0,18	1,31	-1,94
PASTAGEM	26,56	<b>-25,55</b>	<b>-5,43</b>	<b>-10,52</b>
SILVICULTURA	0,00	<b>23,76</b>	<b>4,54</b>	<b>13,83</b>
ÁREA CONSTRUÍDA	0,00	0,00	0,33	0,50

Elaboração: Sampaio (2022).

O Gráfico 2 apresenta a porcentagem das mudanças ocorridas no uso e cobertura da terra na escala temporal de 1984 a 2021.

**Gráfico 2.** Evolução do uso e cobertura da terra na BHCB nos anos de 1984 a 2021.



Fonte: Sampaio (2022).

De acordo com a classificação de uso e cobertura da terra realizada na bacia

hidrográfica, apresentado na Tabela 9 e no Gráfico 2, observa-se que a classe mais representativa, em 1984, foi a “Vegetação do Cerrado” – representada pelas fisionomias de Savana: Savana Florestada – Cerradão, Savana Parque e Floresta estacional semidecidual, ou seja, a classe de vegetação aluvial.

A Vegetação do Cerrado compreendia cerca de 52%, com 104,66 km<sup>2</sup> da área total da bacia, seguida da classe Pastagem com 96,81 km<sup>2</sup>, com cerca de 48% da área total da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro.

Na classificação de uso e cobertura da terra do ano de 2004 tem-se destaque para a expansão da classe Pastagem com 150,65 km<sup>2</sup>, abrangendo cerca de 74% da área total da bacia, seguida da classe Vegetação Cerrado com 50,61 km<sup>2</sup>, cerca de 25% da área total da bacia.

Na classificação de uso e cobertura do ano de 2009 observa-se que a classe mais representativa foi a Pastagem com cerca de 49% da área, possuindo 98,86 km<sup>2</sup>, seguida da “Vegetação do Cerrado” com 54,27 km<sup>2</sup>, compreendendo cerca de 27% da área total da bacia – vale destacar o decréscimo de área nesta classe quando comparada ao ano de 1984 além da escala temporal com a substituição gradativamente da vegetação do cerrado pela pastagem. Em 2009 inicia-se a plantação de eucalipto, a classe Silvicultura compreendia 48,17 km<sup>2</sup>, cerca de 24% da área da bacia.

Observa-se na classificação supervisionada do ano de 2015 que cerca de 43% da área pertencia à classe Pastagem com 87,86 km<sup>2</sup>. Teve-se um aumento na classe Silvicultura com 57,37 km<sup>2</sup> cerca de 28% da área da bacia. Cerca de 27% da área da bacia pertencia a classe de “Vegetação Cerrado”, com 55,27 km<sup>2</sup>. Teve-se também razoável ampliação nas classes de Área Construída com 1,10 km<sup>2</sup> (0,54%) e Água com 1,09 km<sup>2</sup> (0,54%) da área total da bacia.

Conforme análise da classificação na BHCB, no ano de 2021 observa-se que cerca de 42% da área total da bacia pertence à classe Silvicultura com 86,29 km<sup>2</sup>, seguido de 33% da área pertence à classe Pastagem com 67,22 km<sup>2</sup>, e de 24% da área pertencente à “Vegetação Cerrado” com 48,50 km<sup>2</sup>. A classe Área Construída com 2,12 km<sup>2</sup> (1%) teve um modesto aumento de área e a classe Água com 0,68 km<sup>2</sup> (0,33%) teve-se uma atenuação de área quando comparado com o ano de 2015.

#### 4.2.2 Variação da Classificação de Uso e Cobertura - algoritmo *Random Forest*

Em relação à variação das classes de uso e cobertura da terra na BHCB, analisou-se e comparou-se quatro períodos.

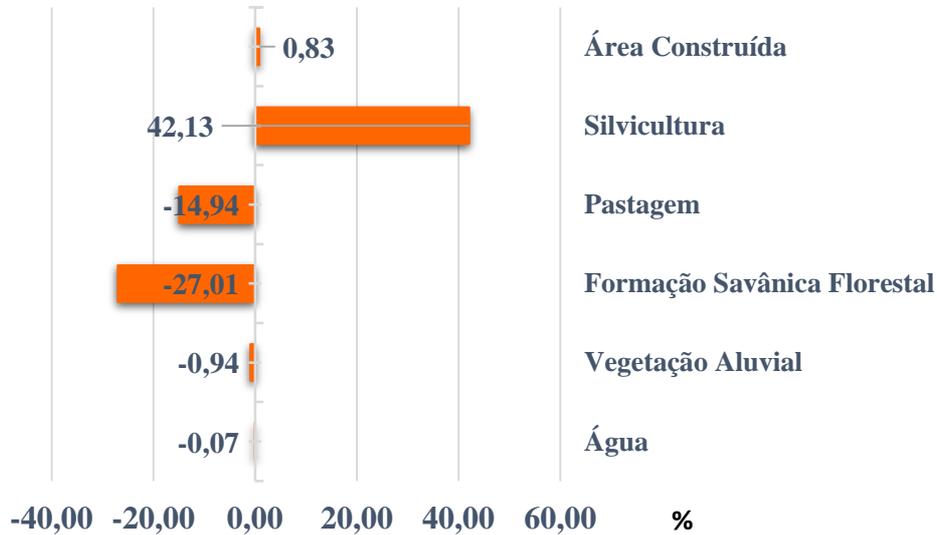
No primeiro período ao longo dos anos de 1984 a 2004 (escala temporal de 20 anos), tem-se destaque pela redução percentual na classe Formação savânica-florestal com decréscimo de -26,19% e na classe Vegetação Aluvial com decréscimo de -0,46, e consequentemente, ampliação da classe Pastagem com acréscimo de 26,56%.

No segundo período de 2004 a 2009 tem-se um moderado acréscimo de 1,98% na classe Vegetação aluvial e um decréscimo no percentual da classe Formação savânica-florestal com redução de -0,18% e -25,55% na classe Pastagem.

No terceiro período, entre os anos de 2009 a 2015 tem-se destaque para o aumento percentual da variação na classe Área Construída com acréscimo de 0,33% devido à construção - em 2010 - da empresa de produção de papel e celulose instalada na área da bacia hidrográfica. Teve uma atenuação na variação percentual da classe Vegetação aluvial com decréscimo de -0,81% e redução na classe Pastagem com -5,42%, consequentemente, teve-se o aumento da variação percentual na classe de Silvicultura com acréscimo de 4,54%.

No quarto período de 2015 a 2021 observa-se um aumento de 0,49% na variação percentual da classe Área Construída e decréscimo de -0,20% na Classe Água que representa os recursos hídricos da bacia hidrográfica. Com isso, surgem questionamentos sobre a problemática da quantidade e qualidade da água na área que pode estar atrelada ao tipo de uso e cobertura da terra. Entretanto, este fato pode estar mais relacionado às condições climáticas da data em que as imagens foram capturadas pelos sensores – mês de agosto (mês seco), pois quando comparado com o gráfico de pluviosidade observa-se que nesse período tem-se uma redução da média pluviométrica na bacia - do que com as atividades antrópicas na área. Observa-se um decréscimo de -10,52% na variação percentual da classe Pastagem e a classe Silvicultura com acréscimo de 13,82% de área. O Gráfico 3 apresenta a variação percentual do uso e cobertura dos anos de 1984 e 2021.

**Gráfico 3. Variação do Uso e Cobertura da terra na BHCB, dos anos 1984 e 2021 - algoritmo Random Forest**



Fonte: Sampaio (2022).

Em análise da variação de uso e cobertura da terra dos anos de 1984 e 2021 (Gráfico 3), na qual equivale uma escala temporal de 37 anos, observa-se nitidamente uma redução de área na classe Formação savânica-florestal com decréscimo de -27,01% na área total da BHCB, enquanto a classe de Silvicultura teve um aumento de 42% de variação percentual devido ao fato de que no ano inicial (1984) não constava essa classe na área da bacia. Portanto o padrão inicial de comparação foi nulo (zero).

### 4.3 MODELAGEM PREDITIVA DE CENÁRIOS FUTUROS DE USO E COBERTURA DA TERRA NA BHCB (MS)

#### 4.3.1 Validação estatística do modelo

A validação do modelo de uso e cobertura da terra para o ano de 2033 e 2051 foi realizada por meio da comparação entre o mapa real de 2021 e o mapa simulado para o mesmo ano (2021) e avaliado pelo conjunto de parâmetros estatísticos *Kappa*, a partir da comparação integral *pixel* a *pixel* dos mapas real e simulado (Silva e Bacani, 2018).

Os valores obtidos do modelo simulado para 2021 apresentaram valores acima de 0,80, classificados de acordo com limiares de concordância estabelecidos por Lands e Koch (1977) com excelente, o que atesta o grau de confiabilidade do modelo no *software PLUS model*. Os valores de validação do modelo segundo os parâmetros estatísticos *Kappa* são apresentados na Tabela 11.

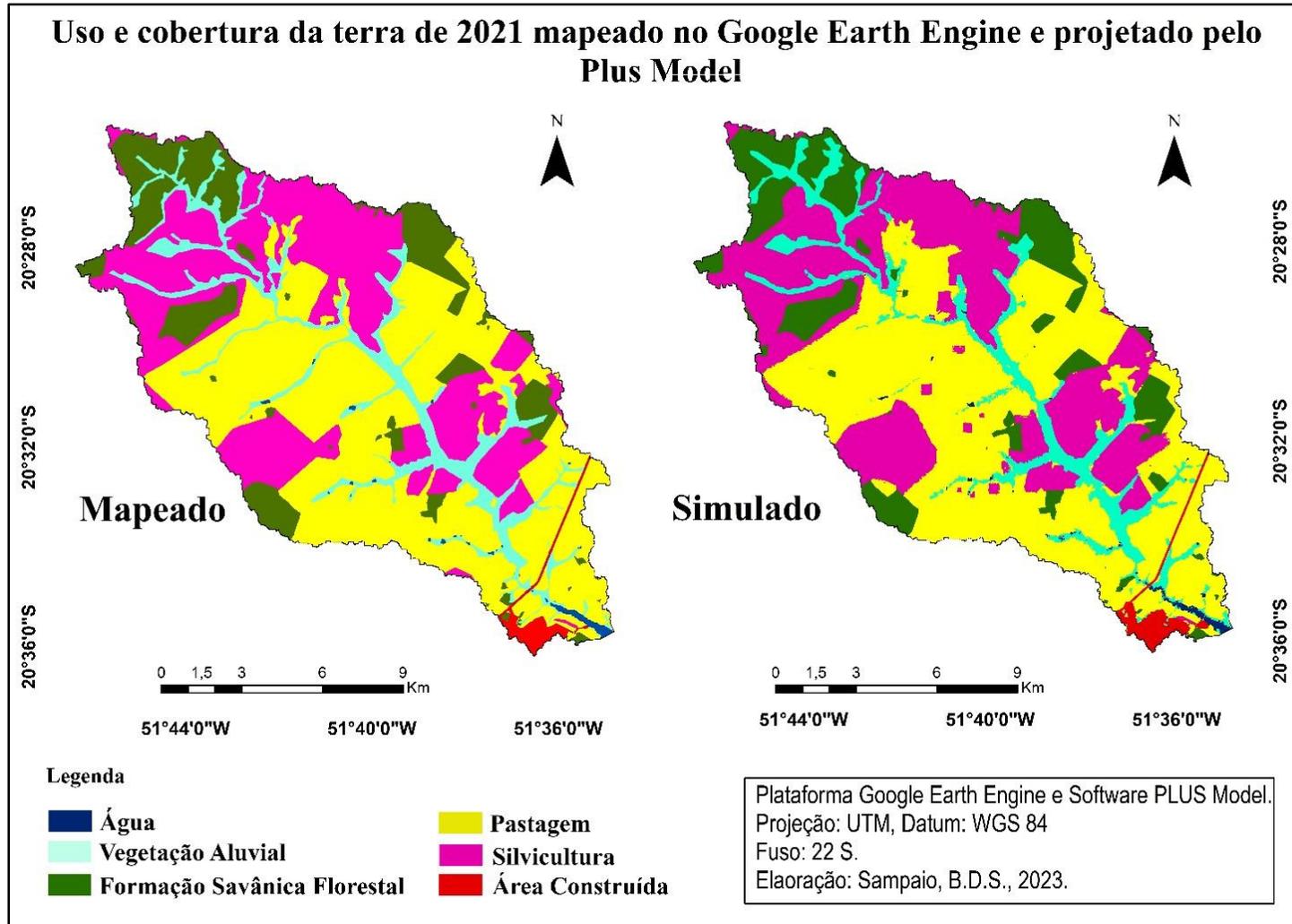
**Tabela 11.** Valores parâmetros estatísticos *Kappa* do modelo

<b><i>Kappa Coefficient</i></b>	<b>0.834067</b>
<b><i>Overall Accuracy</i></b>	0.886604
<b><i>Concordância</i></b>	excelente

Elaboração: Sampaio (2022).

A Figura 27 demonstra a comparação entre os mapas real e o simulado de uso e cobertura da terra.

**Figura 27.** Comparação entre os mapas de uso e cobertura da terra mapeado Google Earth e projetado Plus Model de 2021.



Elaboração: Sampaio (2023).

A Tabela 12 apresenta as áreas das classes de uso e cobertura da terra simulado para o ano de 2021. A mesma serviu para calibração do modelo no Plus Model, conforme a tendência do cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA).

**Tabela 12.** Áreas das classes de uso e cobertura conforme o modelo de tendência de cenário atual para 2021, a partir do Modelo Simulado

<b>Classes</b>	<b>Km<sup>2</sup></b>	<b>Hectare</b>	<b>%</b>
<b>Água</b>	0,67	66,32	0,33
<b>Vegetação Aluvial</b>	21,01	2101,08	10,36
<b>Formação Savânica-florestal</b>	27,38	2738,51	13,51
<b>Pastagem</b>	88,62	8861,91	43,72
<b>Silvicultura</b>	62,87	6287,15	31,02
<b>Área Construída</b>	2,13	213,04	1,05
<b>TOTAL</b>	<b>202,68</b>		<b>100</b>

Elaboração: Sampaio (2023).

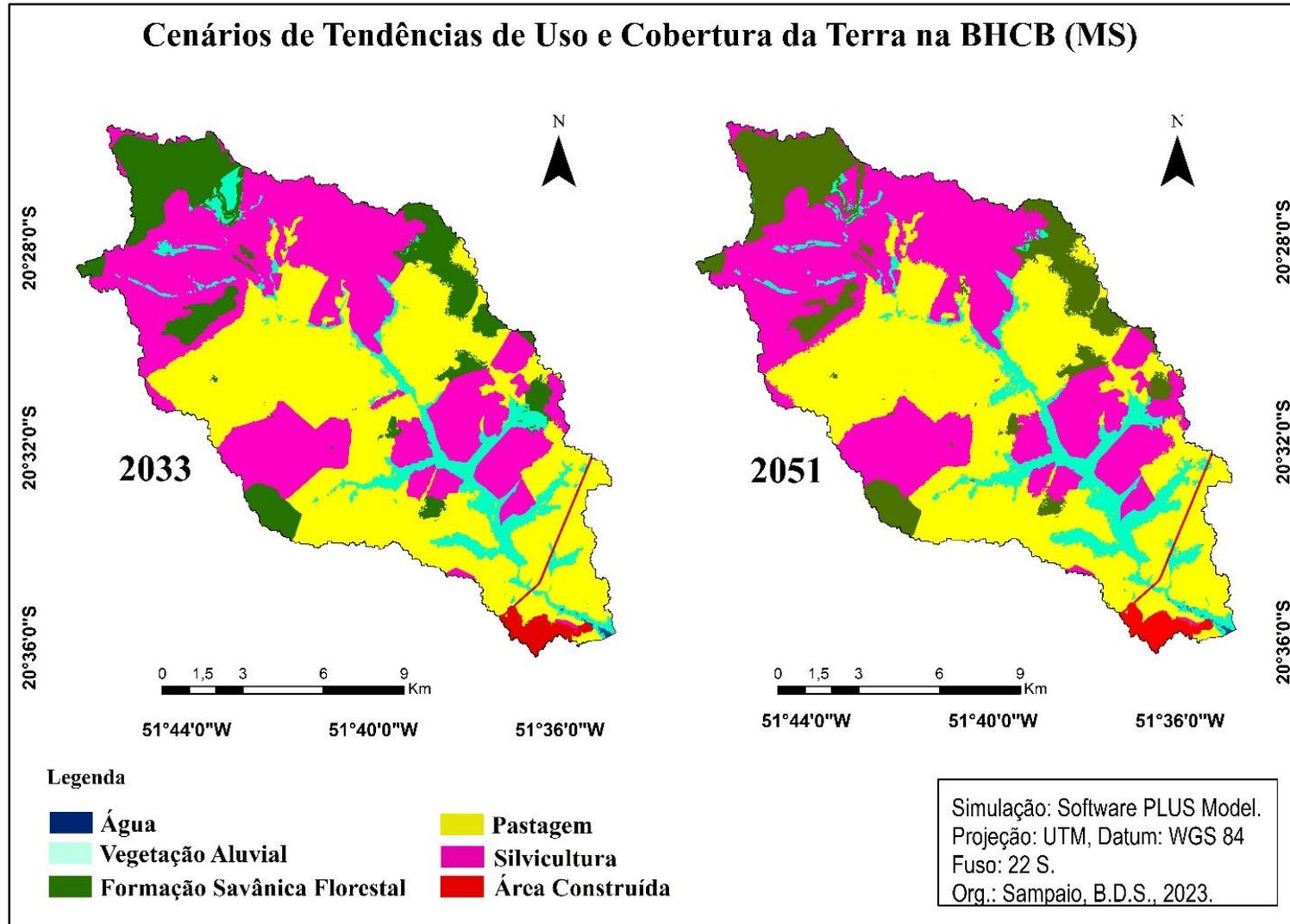
Conforme análises do mapa real de 2021 e do simulado para 2021 observa-se a confiabilidade da modelagem preditiva em que no mapa real de 2021 as classes água (0,33%) e área construída (1,05%) equivale à mesma área do simulado para 2021, já as áreas da classe vegetação aluvial no mapa de 2021 real possuía 10,20% e no simulado para 2021 com 10,36%; na classe formação savânica-florestal no mapa real de 2021 possuía 13,84% e no simulado para 2021 com 13,51%; a classe pastagem no mapa real de 2021 possuía 32,82% e no simulado para 2021 com 43,72%; por fim a classe silvicultura no mapa real de 2021 com 42,13% e no simulado para 2021 com 31,02%.

#### **4.3.2 Simulação de mudanças de cenários futuro para 2033 e 2051: continuidade de mudanças atuais (CMA) a partir do Modelo**

A modelagem preditiva do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do córrego Bebedouro (MS) é fundamental para entender a dinâmica que ocorre na área para possíveis ações de planejamento/ordenamento físico-territorial.

Diante disso, foi realizado a modelagem preditiva para os cenários do ano de 2033 e 2051, as análises foram elaboradas conforme os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS. De acordo com o ODS 2 “Fome Zero e Agricultura Sustentável”, observou-se que com o avanço da tecnologia e a modernização da agricultura, teve-se a mecanização da agricultura, principalmente em áreas consideradas mais planas, o aumento da produção por área cultivada, aumento da monocultura, implementos de adubos químicos, pesticidas e defensivos agrícolas – o famoso “agro” negócio. E como resultados tem-se os impactos ambientais como a poluição e secagem de nascentes e cursos d’águas, desmatamento, extinção de espécies animais e vegetais, degradação dos solos, desertificação, intoxicação dos aquíferos, dentre outros impactos. A Figura 28 apresenta o modelo de cenários de tendências de uso e cobertura da terra para 2033 e 2051.

**Figura 28.** Modelo de cenários de continuidade de mudanças atuais de uso e cobertura da terra para 2033 e 2051



Elaboração: Sampaio (2023).

Para o modelo de uso e cobertura da terra no ano de 2033 e 2051, foram quantificados os valores de cada classe temática em hectares (ha) e porcentagem (%) (Tabela 13).

**Tabela 13.** Valores quantificados das classes de uso e cobertura da terra para o cenário do ano de 2033

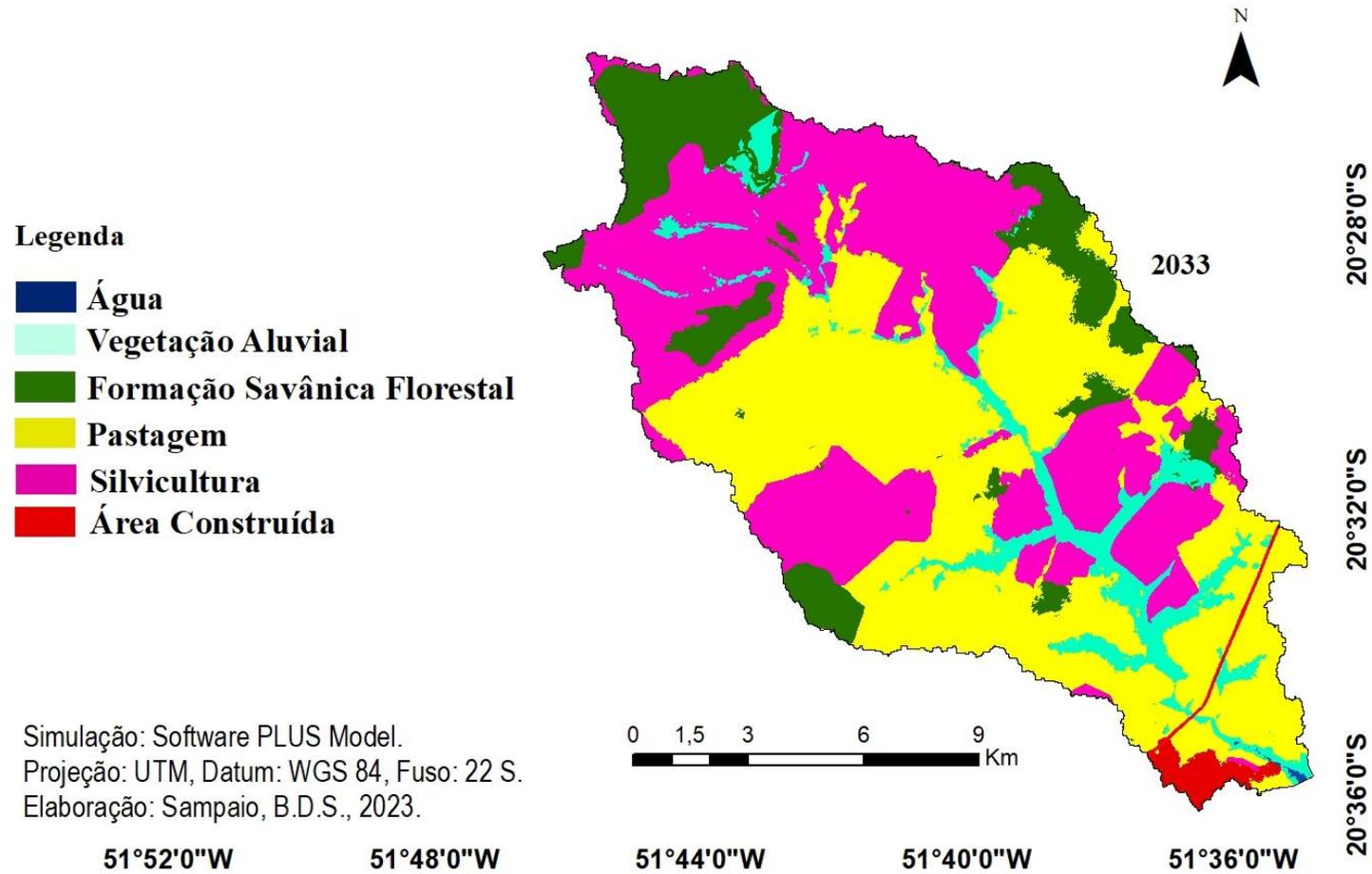
<b>Classe</b>	<b>Km<sup>2</sup></b>	<b>Hectare</b>	<b>%</b>
<b>Água</b>	0,257609	25,7608	0,13
<b>Vegetação Aluvial</b>	18,2244	1.822,44	8,99
<b>Formação Savânica-florestal</b>	26,735	2673,5	13,19
<b>Pastagem</b>	84,45	8.445,57	41,66
<b>Silvicultura</b>	70,63	7.063,62	34,85
<b>Área Construída</b>	2,37	237,33	1,17
<b>TOTAL</b>	202,68		100

Elaboração: Sampaio (2023).

Conforme análise dos dados obtidos para 2033, observa-se que a pastagem abrangerá 41,66% do total da área da bacia hidrográfica, seguida da silvicultura que abrangerá cerca de 35%, a Formação savânica-florestal será de 13%, a vegetação aluvial com 9%, a área construída com aproximadamente 2% e a água compreenderá 0,13%. A Figura 29 apresenta o modelo de tendência atual para o ano de 2033.

Figura 29. Modelo de tendência de continuidade de mudanças atuais para 2033.

### Modelagem Preditiva de Tendências de Uso e Cobertura da Terra na BHC B (MS) para o ano de 2033



Elaboração: Sampaio (2023).

A Tabela 14 apresenta os valores quantificados das classes de uso e cobertura da modelagem para 2051.

**Tabela 14.** Valores quantificados das classes de uso e cobertura da terra no cenário do ano de 2051.

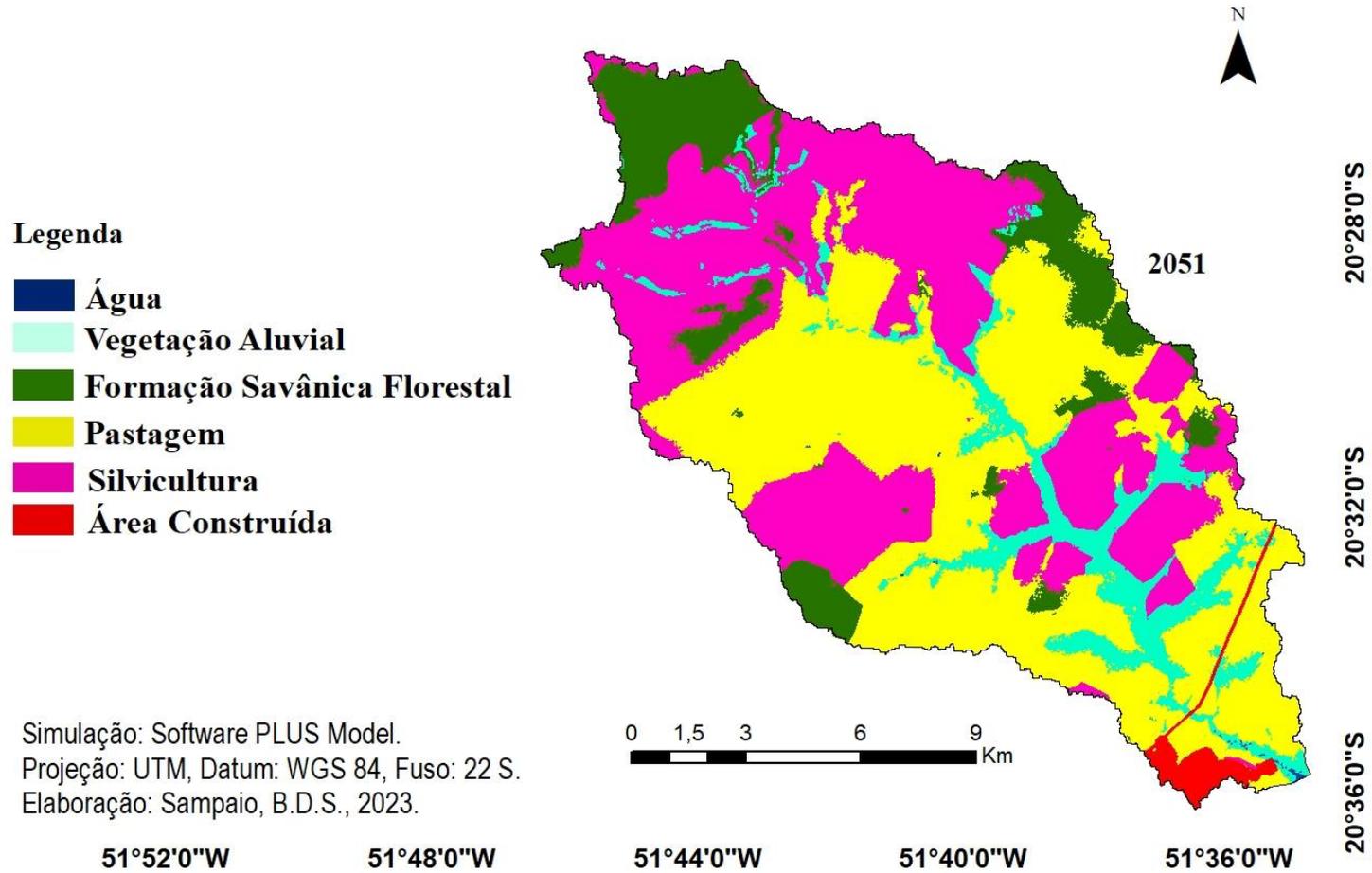
<b>Classe</b>	<b>Km<sup>2</sup></b>	<b>Hectare</b>	<b>%</b>
<b>Água</b>	0,07	7,25	0,035
<b>Vegetação Aluvial</b>	19,22	1.922,77	9,48
<b>Formação Savânica-florestal</b>	25,37	2.537,41	12,51
<b>Pastagem</b>	78,98	7.898,30	38,96
<b>Silvicultura</b>	76,57	7.657,45	37,77
<b>Área Construída</b>	2,45	245,84	1,21
<b>TOTAL</b>	202,68		100

Elaboração: Sampaio (2023).

Conforme análise dos dados do modelo para 2051, observa-se que predominará a pastagem com cerca de 39% da área total da bacia hidrográfica, seguida da silvicultura com 38%, a Formação savânica-florestal com cerca de 12,51%, a vegetação aluvial com 9,48%, a área construída com aproximadamente 1,21% e a água com 0,03%. A Figura 30 apresenta o modelo de tendência para 2051.

**Figura 30.** Modelo de continuidade de mudanças atuais (CMA) para o ano de 2051.

**Modelagem Preditiva de Tendências de Uso e Cobertura da  
Terra na BHC B (MS) para o ano de 2051**



Elaboração: Sampaio (2023).

### 4.3.3 Análise Multitemporal preditiva do uso e cobertura da terra na BHCB (MS)

A Tabela 15 apresenta os valores quantificados das classes de uso e cobertura da terra nos anos 1984, 2004, 2009, 2015, 2021, 2033 e 2051.

**Tabela 15.** Valores quantificados das classes de uso e cobertura da terra nos anos 1984, 2004, 2009, 2015, 2021, 2033 e 2051.

Classe/Ano	1984	2004	2009	2015	2020	2021	2033	2051
<b>Água</b>	0,40 %	0,50 %	0,48 %	0,54 %	0,44 %	0,33 %	0,12 %	0,03 %
<b>Vegetação Aluvial</b>	11,1 4%	10,6 8%	12,6 6%	11,8 5%	11,8 5%	10,2 0%	8,99 %	9,48 %
<b>Formação Savânica-florestal</b>	40,4 9%	14,2 9%	14,1 1%	15,4 2%	15,1 1%	13,4 8%	13,1 9%	12,5 1%
<b>Pastagem</b>	47,7 6%	74,3 3%	48,7 7%	43,3 5%	43,5 2%	32,8 2%	41,6 6%	38,9 6%
<b>Silvicultura</b>	0,00 %	0,00 %	23,7 6%	28,3 0%	28,3 1%	42,1 3%	34,8 5%	37,7 7%
<b>Área Construída</b>	0,21 %	0,21 %	0,21 %	0,54 %	0,77 %	1,04 %	1,17 %	1,21 %
<b>Total</b>	<b>100</b> %							

Elaboração: Sampaio (2023).

Ao analisar a evolução do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) levando em consideração o passado, o presente e o cenário de tendência futura, ao todo totalizando 73 anos, observou-se que a classe Formação Savânica-florestal entre o passado e presente sofreu uma drástica redução de 40,49% em 1984 para 13,48% em 2021 de suas áreas de cobertura na BHCB e para o futuro projetado conforme a tendência do cenário atual continuará tendo essa redução, podendo representar cerca de 12% na projeção de 2051.

Por outro lado, as áreas pertencentes à classe Silvicultura demonstra um comportamento inverso, pois em 2009 ocupavam 23,76% e em 2021 42,13% da área total da BHCB (MS). Assim, conforme análise da Tabela 16, observa-se a substituição da vegetação nativa (aluvial e formação savânica-florestal) por áreas de pastagem e, por conseguinte, a introdução da classe Silvicultura.

A projeção histórica para 2033 aponta que 35% e no ano de 2051 aproximadamente 38% da região da bacia hidrográfica será de silvicultura, o que confirma a tendência histórica de aumento dessa classe ao passar dos anos, na qual a classe oscila entre pastagem e silvicultura.

A classe Água que representa os corpos d'águas é uma classe que apresentou ao longo dos anos analisados grandes reduções em suas áreas de 0,40% em 1984 a 0,33% em 2021 e oscilações devido aos anos com alta pluviosidade como evidenciado em 2009. Para 2033 as áreas de corpos d'águas (classe Água) tendem a uma redução e representará 0,12% e em 2051 apenas, 0,03% da região total da bacia hidrográfica. Fato muito preocupante, especialmente com a questão de disponibilidade hídrica, visto que o município de Três Lagoas (MS) é considerado a “cidade das águas”, caso continue a tendência atual de uso e cobertura da terra o quadro será para “cidade das secas”.

#### 4.3.4 Simulação de mudanças de cenários futuros para 2033 e 2051: tendência conservacionista de proteção florestal (PF)

A simulação de mudanças de cenários futuros para a tendência conservacionista considera a proteção florestal como base para o planejamento físico-territorial na bacia hidrográfica. A Tabela 16 apresenta os valores quantificados das classes de uso e cobertura da terra para o cenário conservacionista de proteção florestal para os anos de 2033 e 2051.

**Tabela 16.** Valores quantificados das classes de uso e cobertura da terra para o cenário conservacionista de proteção florestal para os anos de 2033 e 2051.

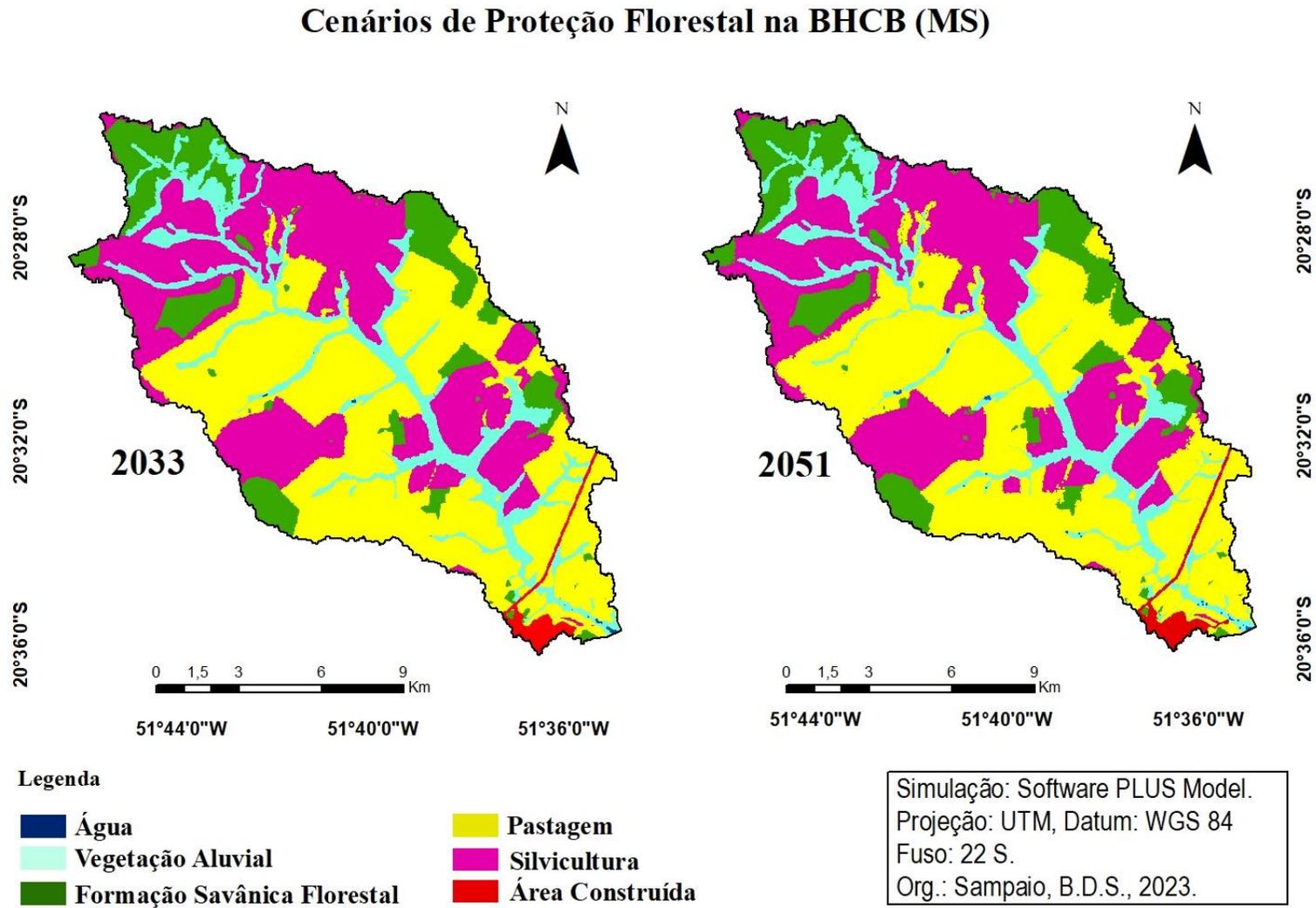
CLASSES	2033		2051	
	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
Água	0,27	0,13	0,08	0,04
Vegetação Aluvial	23,35	11,52	24,04	11,86
Formação Savânica-florestal	27,60	13,61	28,46	14,04
Pastagem	84,00	41,44	79,05	39,21
Silvicultura	65,34	32,23	68,94	34,01
Área Construída	2,12	1,04	2,12	1,04
<b>Total</b>	<b>202,68</b>	<b>100%</b>	<b>202,68</b>	<b>100%</b>

Elaboração: Sampaio (2023).

De acordo com os dados previstos para o cenário conservacionista (PF), observa-se o aumento percentual da classe vegetação aluvial em relação de 10,2% em 2021 para 11,52% para a previsão no ano de 2033 e 11,86% para 2051. A classe formação savânica-florestal teve um leve aumento percentual de 13,61% (2033) para 14,04% (2051), a classe silvicultura também teve um leve aumento de 32,23% (2033) para 34,01% (2051). A classe área construída continuou estável devido ao peso que foi dado a ela no simulador, pois a intenção é considerar as áreas de proteção florestal. A pastagem teve redução de 41,44% (2033) para 39,21% (2051). Por último, temos a redução na classe água de 0,33% (2021), 0,13% para o simulado de 2033 e 0,04 em 2051, fato esse que pode ser explicado pela dificuldade em identificar essa classe na classificação e, por conseguinte na modelagem, apesar de seguir a tendência das mudanças climáticas, com eventos extremamente secos.

A Figura 31 apresenta espacialmente o modelo de cenários de tendências conservacionista, com a proteção florestal no uso e cobertura da terra para 2033 e 2051.

**Figura 31.** Modelo de cenários de tendências conservacionista, com proteção florestal no uso e cobertura da terra para 2033 e 2051.



Elaboração: Sampaio (2023).

Conforme a espacialização das áreas das classes para o cenário de proteção florestal, observa-se a expansão da classe vegetação savânica-florestal sob áreas de pastagens, podendo formar corredores ecológicos, fundamentais para manter o fluxo da fauna e a biodiversidade. Assim, conforme a análise da série histórica de mapas do comportamento das classes de uso e cobertura da terra para a bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS), que leva em consideração o passado, o presente e o cenário futuro foram possíveis compreender as mudanças ocorridas ao longo do tempo e as futuras tendências de transformações diante do quadro atual.

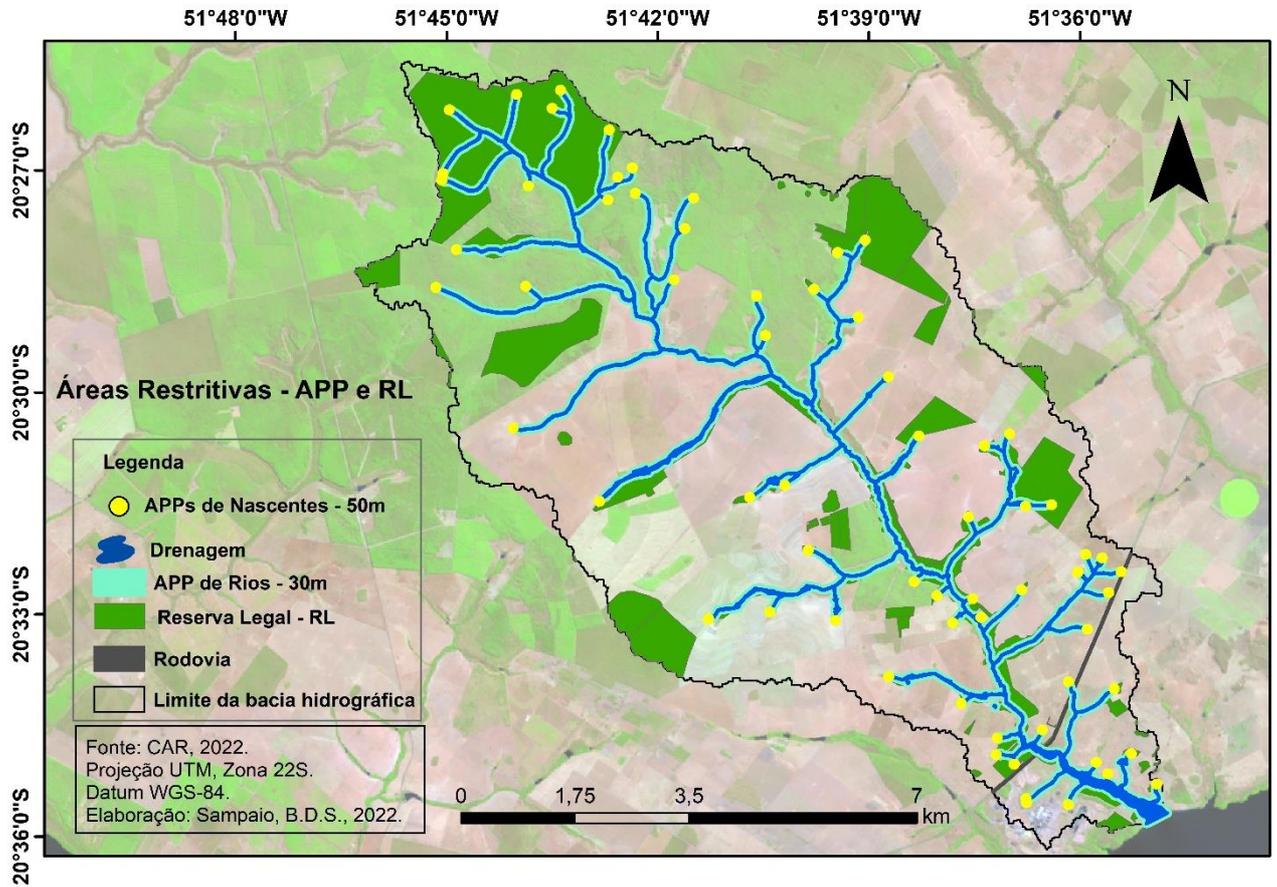
Por meio da aplicação da modelagem preditiva comparada com os dados históricos do mapeamento realizado por meio da classificação supervisionada, demonstrou-se a coerência dos resultados projetados. Os cenários futuros podem contribuir para o ordenamento físico-territorial da bacia hidrográfica e alertar para as possíveis classes de uso e cobertura que merecem atenção, como por exemplo, a redução da quantidade de água, a ampliação da vegetação nativa em áreas de pastagens e a ampliação de áreas de plantação da silvicultura de eucalipto também sobre a pastagem podem ser um indicativo para o estoque e sequestro de carbono.

#### **4.4 AVALIAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS E SIMULAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO**

##### **4.4.1 Quantificação das áreas das classes dentro das áreas restritivas – APP e RL**

A Figura 32 apresenta o resultado da aplicação da legislação florestal – lei nº 12.651/2012 com as áreas restritivas de APPs e RL na área da bacia hidrográfica.

**Figura 32.** Áreas Restritivas de Áreas de Preservação Permanentes e Reserva Legal na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS).



Elaboração: Sampaio (2022).

A Tabela 17 apresenta a quantificação das áreas restritivas mapeadas de acordo com a legislação ambiental.

**Tabela 17.** Áreas restritivas de Áreas de Preservação Permanente por categoria da Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro, 2022.

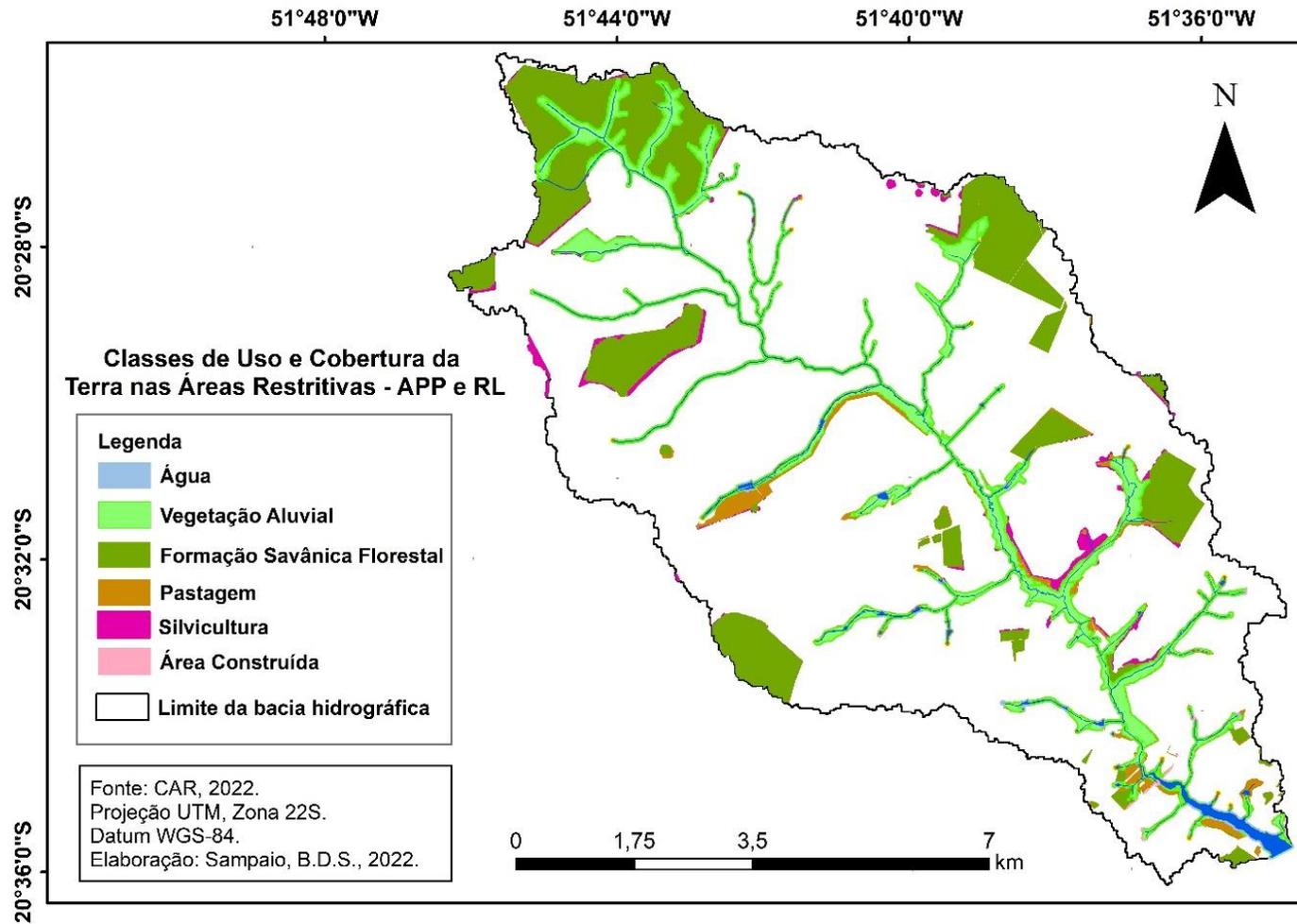
<b>Área restritivas - APPs</b>				
<b>Classes</b>	<b>Área Hectare</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>% da área</b>	<b>% da área na bacia hidrográfica</b>
<b>Nascentes</b>	51,84	0,5184	0,9792	0,2557
<b>Margens (30m)</b>	1.237,22	12,3722	23,3717	6,1037
<b>RL</b>	4.004,62	40,0462	75,6491	19,7564
<b>Total</b>	5.293,68	52,9368	100	26,1158

Fonte: Sampaio (2022).

Em análise à Tabela 17, observa-se que 20% da área total da bacia pertence a classe RL, e em relação ao percentual da área restritiva a RL abrange 76% da área. Vale ressaltar que dos 4.004,61 hectares, apenas 1.635,53 ha está com a RL averbada e 2.369 ha é constituída da RL proposta pelos proprietários rurais no CAR. As APPs de nascentes compreendem 0,98% das áreas restritivas, e em comparação com a área total na bacia compreende apenas 0,25%, seguida das APPs de margem de cursos d'água com cerca de 6% de área na bacia e 23% de área quando comparado as áreas restritivas. Portanto, a área total de áreas restritivas na bacia hidrográfica compreende 26%.

A Figura 33 apresenta as classes de uso e cobertura da terra nas áreas restritivas (APPs e RL) para potencial reflorestamento.

**Figura 33.** Classes de Uso e Cobertura da terra nas Áreas Restritivas – Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal.



Fonte: Sampaio (2022).

Observa-se nitidamente o predomínio da classe Pastagem (2,97 km<sup>2</sup>) e a classe Silvicultura (1,4 km<sup>2</sup>) em áreas restritivas, especialmente nas APPs e na RL proposta pelos proprietários rurais. A Tabela 18 apresenta a área em hectares (ha) das classes de UCT em áreas restritivas.

**Tabela 18.** Área das classes de Uso e Cobertura da terra nas áreas restritivas – Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal.

<b>Áreas restritivas – APPs e RL</b>	
<b>Classe</b>	<b>Área (hectares)</b>
Água	82,48
Vegetação aluvial	1.537,75
Formação savânica-florestal	2.468,17
<b>Pastagem</b>	296,70
<b>Silvicultura</b>	136,33
Área Construída	2,51
<b>Área Total (ha)</b>	<b>4.523,93</b>

Fonte: Sampaio (2022).

Observa-se que as áreas restritivas (APPs e RLs) possuem aproximadamente 4.006 hectares de “vegetação cerrado” enquanto que a classe Pastagem possui cerca de 297 hectares, seguido da classe Silvicultura com 136 hectares. Assim, com base em Rodríguez (2015), considera-se a classe pastagem mais propícia para o reflorestamento devido a facilidade para sua utilização e também tem o potencial de sequestro de carbono menor do que da vegetação nativa. A classe eucalipto foi considerada como própria para o reflorestamento embora, a silvicultura plantada na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) tem fins comerciais, sendo propriedades de empresas, arrendamento de propriedades rurais ou grandes fazendas, tendo cortes e plantios periódicos. Assim, o carbono que as plantações de eucalipto estocam/absorvem durante seu crescimento é devolvido para atmosfera quando são cortadas.

#### **4.4.2 Estimativa do potencial de Sequestro de Carbono nas Áreas Restritivas – APPs e RL**

Na Tabela 19, são mostrados os resultados da estimativa de sequestro potencial de CO<sub>2</sub> nas APPs de margem de cursos d’água.

**Tabela 19.** Quantidade de Sequestro Potencial de CO<sub>2</sub> nas APPs mapeadas nos cursos d'água.

Fonte	Tempo (anos)	Valor do fator de sequestro (tCO <sub>2</sub> /ha/ano)	Área Total de APP – margens (ha)	Valor (tCO <sub>2</sub> )	Valor (tC)
IPCC (2006)	12	7,3253	1.237,223	108.756,355	29.633,886
	30			271.890,889	74.084,711

Elaboração e organização: Sampaio (2022).

De acordo com o IPCC (2006), o potencial de sequestro de carbono por reflorestamento com vegetação nativa para a categoria de cursos d'água, no horizonte de 12 anos é de 108.756,36 tCO<sub>2</sub>, este por sua vez foi convertido em carbono, ou seja, equivale a 29.633,89 tC. Para o horizonte de 30 anos tem-se 271.890,89 tCO<sub>2</sub>, equivalente a 74.084,711 tC.

De acordo com Rodríguez (2015), as APPs de cursos d'água é uma categoria importante, especialmente no domínio hidrográfico onde se insere, pois, as atividades de uso e cobertura da terra é tipicamente conflitante com a necessidade de preservação. Entretanto, por meio da aplicação de atividades conservacionistas, que consideram a proteção florestal na bacia hidrográfica, é possível harmonizar as atividades produtivas com a preservação dessas áreas prioritárias.

A Tabela 20 apresenta os resultados da estimativa de sequestro potencial de CO<sub>2</sub> para APPs de nascentes.

**Tabela 20.** Quantidade de Sequestro Potencial de CO<sub>2</sub> nas APPs mapeadas nas nascentes.

Fonte	Tempo (anos)	Valor do fator de sequestro (tCO <sub>2</sub> /ha/ano)	Área Total de APP – nascentes (ha)	Valor (tCO <sub>2</sub> )	Valor (tC)
IPCC (2006)	12	7,3253	51,83628	4.556,596	1.241,579
	30			11.391,489	3.103,948

Elaboração e organização: Sampaio (2022).

A categoria APPs nascentes possui um importante potencial de sequestro de carbono por reflorestamento, para o horizonte de 12 anos, com um valor de 4.556,60 tCO<sub>2</sub>, ou seja, 1.241,58 tC. Para o horizonte de 30 anos tem-se 11.391,49 tCO<sub>2</sub>, equivalente a 3.103,95 tC.

A Tabela 21 apresenta os resultados da estimativa de sequestro potencial de CO<sub>2</sub> nas RL.

**Tabela 21.** Quantidade de Sequestro Potencial de CO<sub>2</sub> nas RL mapeadas conforme o CAR.

Fonte	Tempo	Valor do fator de sequestro (tCO <sub>2</sub> /ha/ano)	Área Total de RL (ha)	Valor (tCO <sub>2</sub> )	Valor (tC)
IPCC (2006)	12 anos	7,3253	4.004,619831	352.020,499	95.918,392
	30 anos			880.051,249	239.795,980

Elaboração e organização: Sampaio (2022).

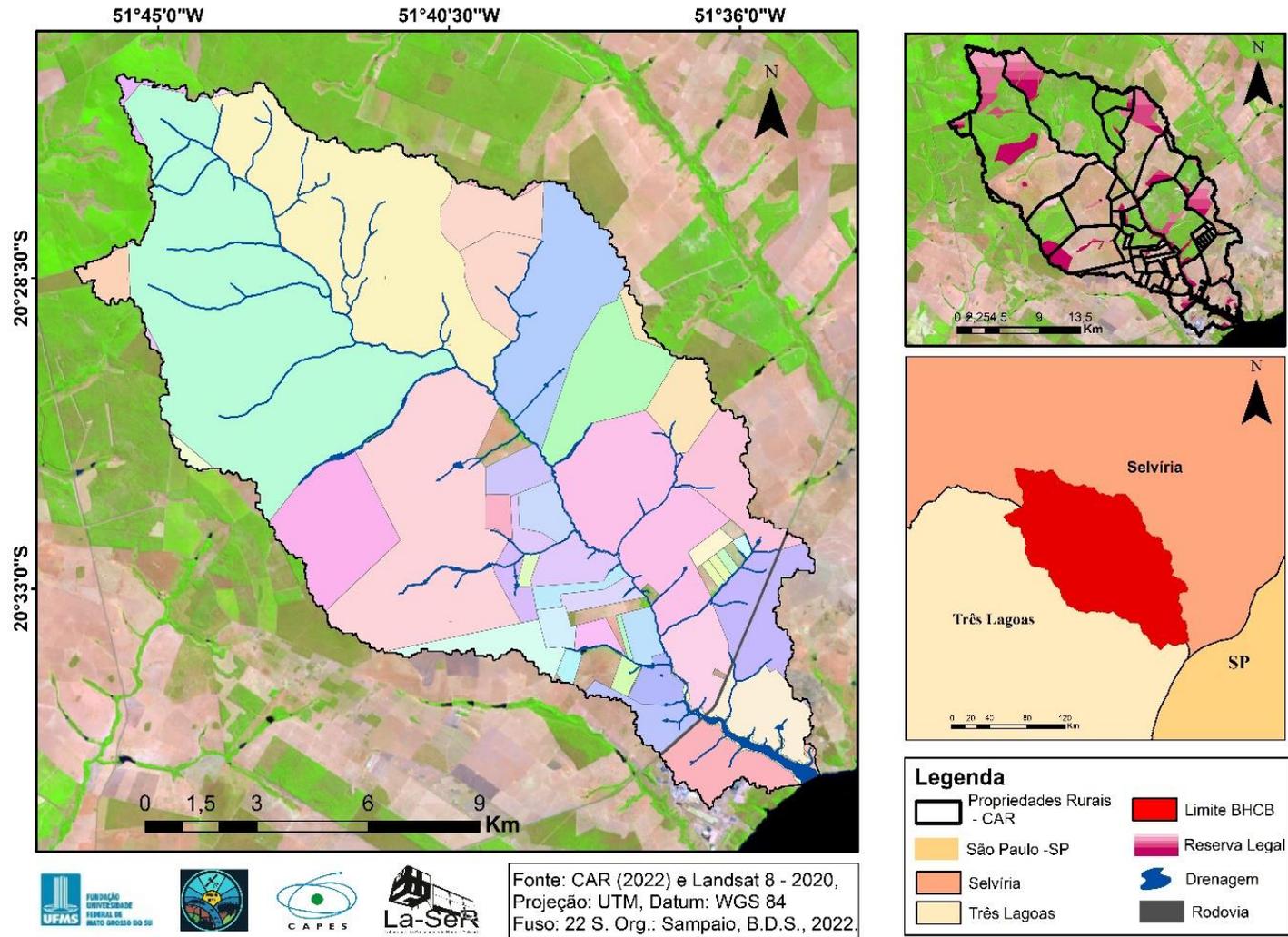
Tem-se como resultado para a estimativa do sequestro de carbono na área de RL, para o horizonte de 12 anos, o valor de 352.020,50 tCO<sub>2</sub>, ou seja, 95.918,40 tC. Para o horizonte de 30 anos tem-se o valor de 880.051,25 tCO<sub>2</sub>, equivalente a 239.795,980 tC. Essa categoria de área restritiva representa a maior estimativa de sequestro de carbono, evidenciando a importância de incentivar o reflorestamento nas áreas propostas de RL.

#### 4.4.3 Simulação de Pagamentos por Serviços Ambientais

A bacia hidrográfica do Córrego do Bebedouro possui 49 propriedades rurais, destas 24 propriedades rurais estão localizadas no limite municipal de Selvíria (MS) e 25 propriedades rurais no limite municipal de Três Lagoas (MS). Vale destacar que o valor do módulo fiscal nesses municípios é de 35 hectares (CAR, 2022).

A Figura 34 apresenta as informações dos limites e áreas das propriedades rurais conforme o Cadastro Ambiental Rural (CAR – MS).

**Figura 34. Limites das Propriedades rurais da bacia hidrográfica Córrego Bebedouro/MS**



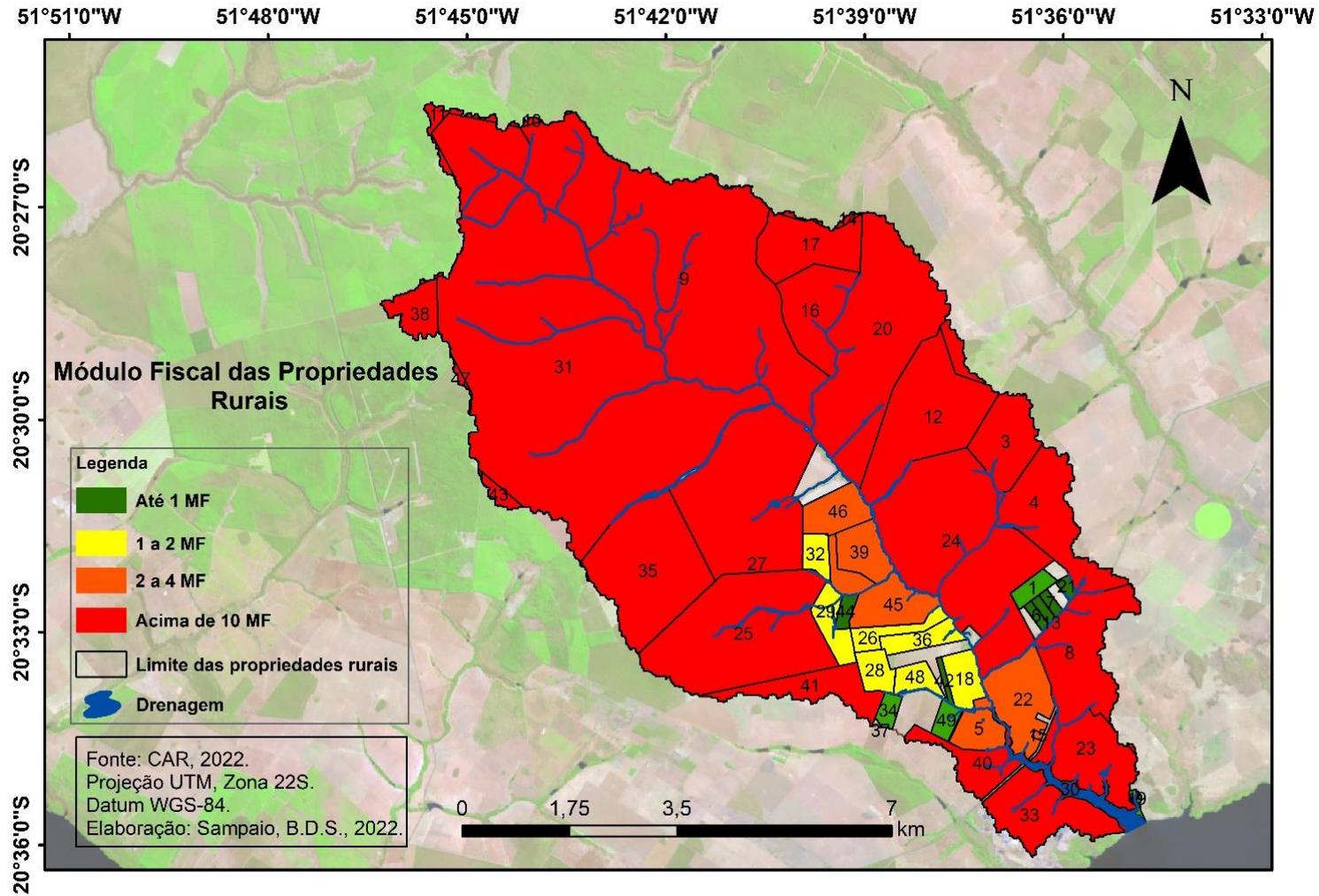
Elaboração: Sampaio (2022).

Entretanto, vale ressaltar sobre a recomposição da vegetação nas áreas de preservação permanentes, ou seja, ao entorno dos cursos d'água. A recomposição varia conforme o módulo fiscal de cada propriedade rural, assim, observa-se dentre as propriedades rurais com nascentes pontuais na bacia hidrográfica tem-se o predomínio de imóveis rurais acima de 10 MF.

Portanto, conforme a metodologia de regularização de Áreas de Preservação Permanente (APP) nos imóveis rurais consolidados, observa-se que a bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) possui 4 imóveis rurais acima de 4 MF; e 14 imóveis acima de 10 MF, totalizando 18 imóveis rurais, sendo necessário recompor no mínimo 20 metros e máximo de 100 metros das margens dos rios. Por outro lado, 6 imóveis rurais possuem de 2 a 4 MF, sendo necessário recompor 15 metros das margens, para o imóvel de 1 a 2 MF a recomposição das faixas compreendem a 8 metros, e os dois imóveis rurais com até 1 MF recompõe 5 metros das margens dos rios.

A Figura 35 apresenta as informações dos limites e os módulos fiscais das propriedades rurais da bacia hidrográfica.

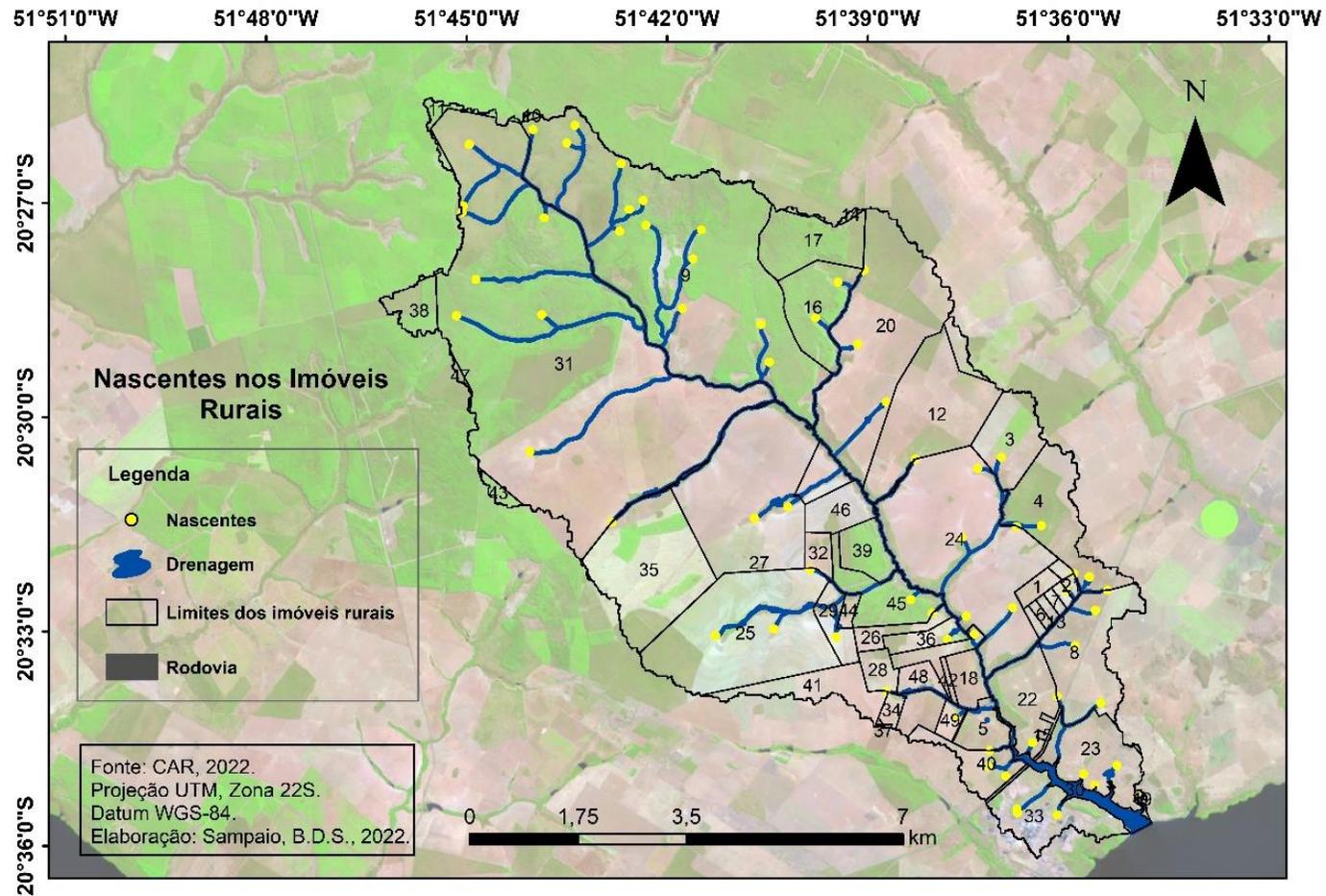
**Figura 35.** Módulo fiscal das propriedades rurais no limite da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro/MS



Observa-se a predominância de propriedades com módulo fiscal acima de 10 MF, considerada pela Embrapa (2022) como média propriedade rural, conforme a classificação dos imóveis rurais presente na lei nº 8.629/1993 (art. 4, II e III). Assim pequena propriedade é o imóvel rural de área compreendida entre 1 e 4 MF, média propriedade é o imóvel rural de área superior a 4 e até 15 MF, e grande propriedade é aquela de área superior a 15 MF.

A Figura 36 apresenta as nascentes no limite dos imóveis rurais da bacia hidrográfica.

**Figura 36.** Nascentes nos limites dos imóveis rurais da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro/MS



Fonte: Sampaio (2022).

A simulação do mecanismo de PSA do programa Mina D'Água na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro constitui-se como um incentivo à proteção das nascentes. A Tabela 22 apresenta a simulação do PSA do projeto Mina D'água nos imóveis rurais da bacia hidrográfica.

**Tabela 22.** Simulação do Pagamento Serviços Ambientais do Projeto Mina D'Água nos imóveis rurais da BHCB.

Identificação do Imóvel Rural	Hectares	MF recalculado	Faixa de Recomposição margens dos rios (m)	Faixa de Recomposição de nascentes (m)	Quantidade de Nascentes	PSA (R\$/ano) Atualizado
3	364,219	<b>10,41</b>	30	15	1	323,28
4	495,563	<b>14,16</b>	30	45	3	969,84
5	145,774	4,16	20	15	1	323,28
8	551,639	<b>15,76</b>	30	60	4	1.293,12
9	2829,52	<b>80,84</b>	30	195	13	4.202,64
12	734,817	<b>20,99</b>	30	15	1	323,28
16	360,309	<b>10,29</b>	30	30	2	646,56
19	12,4362	0,36	5	15	1	323,28
20	1242,71	<b>35,50</b>	30	45	3	969,84
21	19,1813	0,55	5	30	2	646,56
22	327,114	9,35	20	15	1	323,28
23	408,179	<b>11,66</b>	30	45	3	969,84
24	1460,78	<b>41,73</b>	30	90	6	1.939,68
25	1144,4	<b>32,70</b>	30	45	3	969,84
26	94,3591	2,69	15	15	1	323,28
27	1151,43	<b>32,89</b>	30	30	2	646,56
28	89,9933	2,57	15	15	1	323,28
29	125,594	3,59	15	15	1	323,28
30	138,076	3,94	15	0	Foz do córrego Bebedouro	
31	4559,65	<b>130,27</b>	30	120	8	2.586,24
33	401,75	<b>11,48</b>	30	45	3	969,84
35	826,929	<b>23,63</b>	30	15	1	323,28
36	104,065	2,97	8	15	1	323,28
40	190,491	5,44	20	30	2	646,56
45	290,125	8,29	20	15	1	323,28
49	50,2344	1,44	8	15	1	323,28
<b>Total da faixa de recomposição (metros)</b>			<b>586 m</b>	<b>990 m</b>		
<b>Total de PSA/ano</b>						<b>R\$21.336,48</b>

Elaboração e organização: Sampaio (2022).

Conforme o mapeamento, a bacia hidrográfica contém 66 nascentes distribuídas nos

imóveis rurais. Dos 49 imóveis rurais cadastrados no CAR, 25 imóveis rurais possuem nascentes.

Vale destacar sobre a publicação da Lei n. 14.653<sup>40</sup>, de 23 de agosto de 2023, que altera as Leis n.º 12.651, de 25 de maio de 2012, e 14.119, de 13 de janeiro de 2021, para disciplinar a intervenção e a implantação de instalações necessárias à recuperação e à proteção de nascentes. Assim, essa lei altera os artigos do Código Florestal e da Lei de PSA, possibilitando que a restauração em APP e Reserva Legal possa ser objeto de PSA público. Antes da lei, entendia-se que a restauração da vegetação era obrigação do proprietário do imóvel rural, não cabendo assim, o PSA público nesses casos.

Todavia, após a lei tem-se o entendimento de que a restauração deve ser priorizada, especialmente em nascentes localizadas em bacias hidrográficas importantes para o abastecimento ou áreas prioritárias. Tendo como pertinência a função do interesse público nessas áreas. Portanto, o parágrafo único do art. 9º da Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021, passa a vigorar com a seguinte redação:

*Parágrafo único. As Áreas de Preservação Permanente, Reserva Legal e outras sob limitação administrativa nos termos da legislação ambiental serão elegíveis para pagamento por serviços ambientais com uso de recursos públicos, conforme regulamento, com preferência para aquelas localizadas no entorno de nascentes, localizadas em bacias hidrográficas consideradas críticas para o abastecimento público de água, assim definidas pelo órgão competente, ou em áreas prioritárias para conservação da diversidade biológica em processo de desertificação ou de avançada fragmentação (Lei nº 14.653, Art. 2º, 2023, grifo nosso).*

Em relação às faixas de recomposição da vegetação ao entorno das margens dos rios, na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) têm-se aproximadamente 586 metros e ao entorno das nascentes têm-se aproximadamente 990 metros de faixa para recomposição. Portanto, a área total para as faixas de recomposição da vegetação compreende em 1.576 metros. E o valor total em reais da simulação de PSA do projeto Mina D'água é de R\$ 21.336,48 (reais) por ano. Vale ressaltar também que alguns imóveis rurais nas bordas da bacia hidrográfica tem a maior área pertencente às bacias hidrográficas próximas.

Diante da presente análise, fica de reflexão sobre como aplicar os mecanismos de PSA e a importância da criação de comitês de bacias hidrográficas (CBH), especialmente a nível de bacias hidrográficas, de modo que haja a recomposição das margens das APPs, conservação das 3 reservas legais averbadas e ações para implantar as RLs propostas na declaração dos

---

<sup>40</sup> <https://normas.leg.br/?urn=urn:lex:br:federal:lei:2023-08-23;14653>

proprietários rurais ao CAR. Com a recomposição da vegetação, aplicação de práticas agrícolas conservacionistas, será possível preservar o recurso hídrico (produzir água) e capturar o carbono da atmosfera, são serviços ecossistêmicos valiosos e que atrai as grandes empresas internacionais de produção e papel e celulose.

Outra questão identificada no trabalho de campo, foi o arrendamento de terras para o plantio de mudas de eucalipto, no qual alguns relatos de proprietários enfatizaram as secas nos açudes para dessedentação do gado. O que deixar para as futuras gerações? Qual será o nosso legado hoje para preservar a biodiversidade dos ecossistemas?

Com a massiva exploração dos recursos naturais da bacia hidrográfica, juntamente com as consequências das mudanças climáticas, o aquecimento da temperatura média do Planeta, a terra “*mãe*”, o solo saudável se torna árido, os eventos de seca estão cada vez mais frequentes e o município de Três Lagoas (MS) considerado como a “Cidades das Águas” poderá não ter o serviço ecossistêmico básico – o recurso hídrico em quantidade e qualidade, para atividades humanas essenciais e muito menos para satisfazer as empresas internacionais que transitam pelos territórios em busca de recursos naturais. Entretanto, os ideais conservacionistas devem ser aplicados, de forma a preservar o equilíbrio nas bacias hidrográficas e assim permanecer o fornecimento dos serviços ecossistêmicos. *Pensemos nisso!*

*Espera-se que essa tese seja uma inspiração para ações aplicadas em bacias hidrográficas, pode ser uma gota no imenso oceano, mas que seja uma gota saudável para a mudança de paradigma do mundo.*

#### **4.5 MODELAGEM DO ESTOQUE E O SEQUESTRO DE CARBONO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO (MS)**

O presente item apresenta os resultados e discussão da modelagem preditiva de estoque e sequestro de carbono. Inicialmente, tem-se a discussão no cenário de continuidade de mudanças atuais, posteriormente tem-se os resultados no cenário conservacionista de proteção ambiental, e por fim, tem-se a análise monetária do sequestro de carbono bem como a comparação em ambos cenários modelados.

#### 4.5.1 Estoque e Sequestro de Carbono no Cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA)

O estoque ou armazenamento de carbono no solo, conforme cada tipo de uso e cobertura da terra é o centro das discussões na temática do aquecimento global e das mudanças climáticas, visto que são mecanismos capazes de mitigar os efeitos desses fenômenos.

Com a mudança no uso e principalmente no manejo dos solos pelas atividades intensivas de plantação, tem-se alterações nos estoques de carbono orgânico do solo, pois, o carbono armazenado é emitido para atmosfera, agravando o quadro do aquecimento global.

Com o intuito de contribuir para minimizar essa tendência alarmante, que rompe as barreiras naturais do planeta, apresenta-se o estoque e sequestro de carbono no cenário de tendência atual na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS), que possui intensa mecanização, revolvimento e compactação do solo, advindas das atividades de plantio da monocultura extensiva.

A Tabela 23 apresenta os valores estimados do estoque e sequestro em megagrama<sup>41</sup> de carbono, conforme cada classe de uso e cobertura da terra.

---

<sup>41</sup> "Mg/C" geralmente se refere à razão ou proporção entre Magnésio (Mg) e Carbono (C) em um determinado contexto, como em estudos de solos, biologia, química ou ciências ambientais. A análise dessa razão pode ser crucial para entender diversas características ou processos, dependendo do contexto específico em que é utilizado.

**Tabela 23.** Estoque de Carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA) na BHCB (MS).

<b>Ano</b>	<b>1984</b>	<b>2009</b>	<b>2015</b>	<b>2021</b>	<b>2033</b>	<b>2051</b>
<b>Água</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Vegetação Aluvial</b>	250.848,89	288.141,56	272.297,42	233.616,14	202.757,03	213.496,30
<b>Formação Savânica-Florestal</b>	894.495,46	310.152,97	300.470,50	298.959,76	291.572,83	276.975,60
<b>Pastagem</b>	560.982,99	572.686,23	524.991,09	513.611,49	489.923,13	458.493,50
<b>Silvicultura</b>	4.273,47	496.009,86	596.441,04	647.611,44	726.999,71	787.681,10
<b>Área Construída</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Total de Estoque (Mg/C)</b>	<b>1.710.600,81</b>	<b>1.666.990,63</b>	<b>1.694.200,05</b>	<b>1.693.798,83</b>	<b>1.711.252,70</b>	<b>1.736.646,00</b>

\* Unidade de Medida: Mg/C. Elaboração: Sampaio (2023).

Observa-se a análise temporal do estoque de carbono, expresso em megagramas de carbono (Mg C), na Bacia Hidrográfica ao longo de diferentes períodos, desde 1984 até absorção para 2033 e 2051.

No período de 1984, a estimativa de estoque de carbono foi 1.710.600,81 Mg C, sendo este o ponto de partida da análise, onde o estoque de carbono está previsto. Entretanto, no período de 2009 observa-se uma redução no estoque de carbono em comparação com 1984, houve uma liberação líquida de carbono para a atmosfera durante esse período que passa respectivamente para 1.666.990,63 Mg C.

Em 2015 o estoque de carbono aumenta razoavelmente em comparação com 2009, passa a ter 1.694.200,05 Mg C, porém não ultrapassa o período de 1984. Em 2021 há um ligeiro decréscimo em comparação com 2015, mas os níveis ainda estão acima dos observados em 2009, tendo como estimativa de estoque de carbono de 1.693.798,83 Mg C.

Conforme o cenário preditivo de continuidade de mudanças atuais (CMA), do uso e cobertura da terra, a previsão indica um aumento no estoque de carbono de aproximadamente 1.711.252,70 Mg C estocado para 2033 e 1.736.646,00 Mg C para 2051, respectivamente. A previsão de aumento no estoque de carbono para o cenário CMA, possivelmente, indica o crescimento vegetativo da classe silvicultura que possui um estoque muito próximo ao da classe vegetação savânica-florestal. Assim, a previsão sugere um aumento contínuo no estoque de carbono, indicando uma tendência positiva em termos de sequestro de carbono ou manutenção de reservas de carbono.

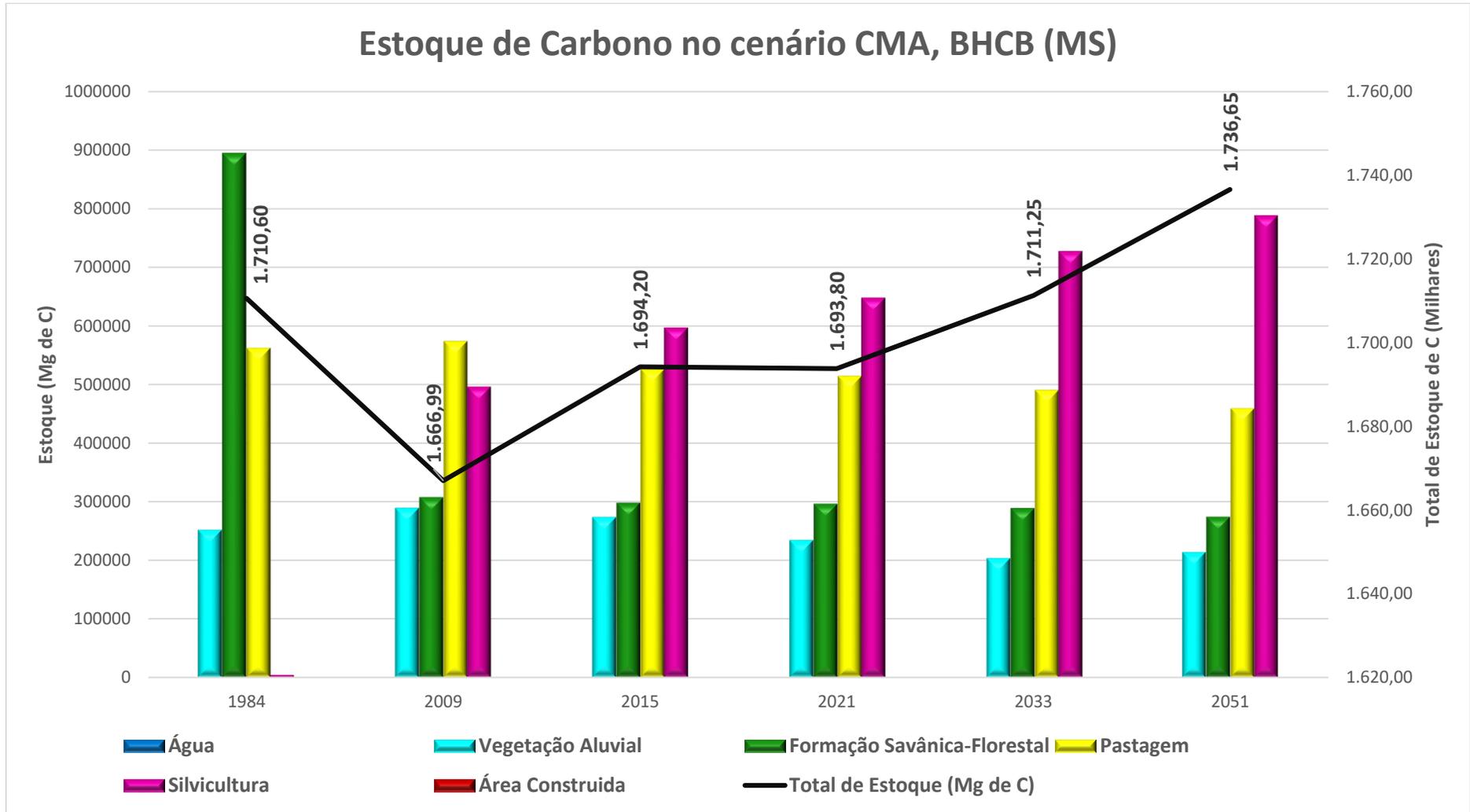
Em relação às variações observadas e previstas no estoque de carbono podem ser atribuídas a uma variedade de fatores, incluindo mudanças no uso da terra, práticas agrícolas, eventos climáticos, e políticas de gestão ambiental. Assim, o cenário CMA indica que as tendências atuais, possivelmente em termos de uso da terra ou práticas de gestão, continuarão no futuro. Isso sugere que as alterações para 2033 e 2051 são baseadas na trajetória atual e nas práticas observadas.

A gestão e o aumento dos estoques de carbono são destinados a mitigar as mudanças climáticas, pois o carbono estocado em ecossistemas terrestres (como florestas ou campos agrícolas) não é liberado na atmosfera, onde contribuía para o efeito estufa.

Portanto, a análise e previsão dos estoques de carbono são cruciais para entender a dinâmica do carbono em uma região e para informar políticas e práticas de gestão sustentável. As ações nos estoques de carbono ao longo do tempo e as projeções futuras oferecem *insights* valiosos sobre a eficácia das estratégias de gestão de carbono e as tendências futuras, que são

específicas para a mitigação das mudanças climáticas e a gestão sustentável dos ecossistemas. O Gráfico 4 apresenta as informações do cenário de tendência atual tabulados.

**Gráfico 4.** Total de estoque de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS).



Seguindo a tendência atual, em relação ao estoque observa-se no gráfico anterior uma tendência ao aumento de estoque de carbono. Fato esse que pode ser explicado pela expansão do plantio da silvicultura extensiva nas áreas da bacia hidrográfica. A silvicultura de eucalipto é considerada como “florestas plantadas” para fins comerciais da madeira ou como alternativas para reflorestamento. Entretanto, na área da bacia hidrográfica é utilizada para fins comercial da madeira para produção de papel e celulose, na qual, após a etapa do plantio tem-se os cortes e rebrota. Assim, não há muito revolvimento do solo e pode ser explicado pelo aumento exponencial do estoque de carbono na área (Lacerda, 2022; Silva, 2022).

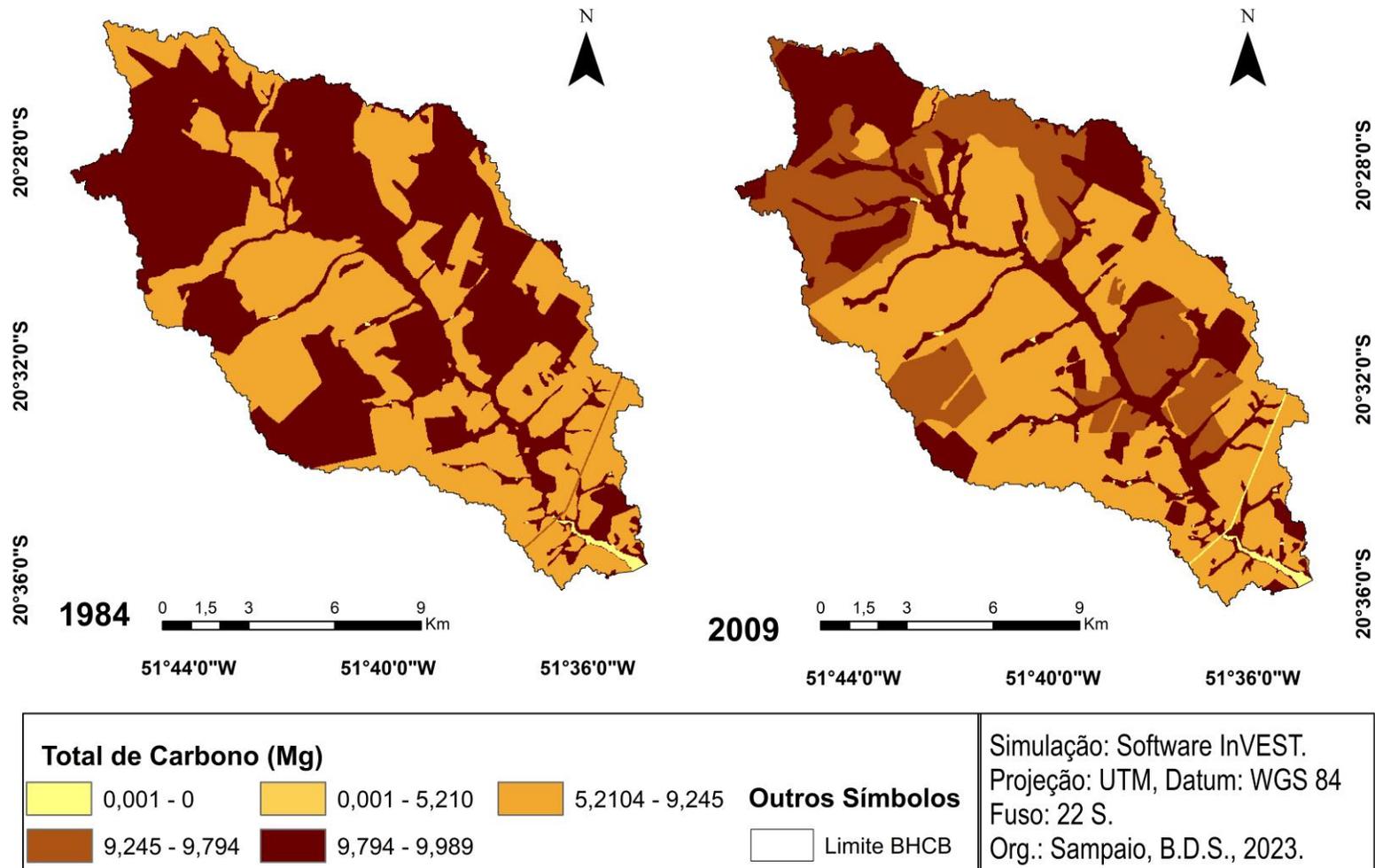
Porém, vale ressaltar que a silvicultura de eucalipto não substitui a vegetação natural, pois a silvicultura de eucalipto é uma floresta de monoculturas na qual não se encontra diversidade de espécies. Por outro lado, com o reflorestamento ou plantação de vegetação nativa é possível restaurar a resiliência do ecossistema e assim contribuir para o equilíbrio da biodiversidade na área (Brasil, 2007; Ogassavara, 2008; Carvalho *et al.*, 2010; Kuntschik, 2011; Chaplin-Kramer *et al.*, 2015; Rodriguez, 2015; Pereira 2020).

As Figuras 37 a 39 apresentam o estoque de carbono distribuído espacialmente de acordo com os anos analisados e conforme o tipo de uso e cobertura da terra em cada período.

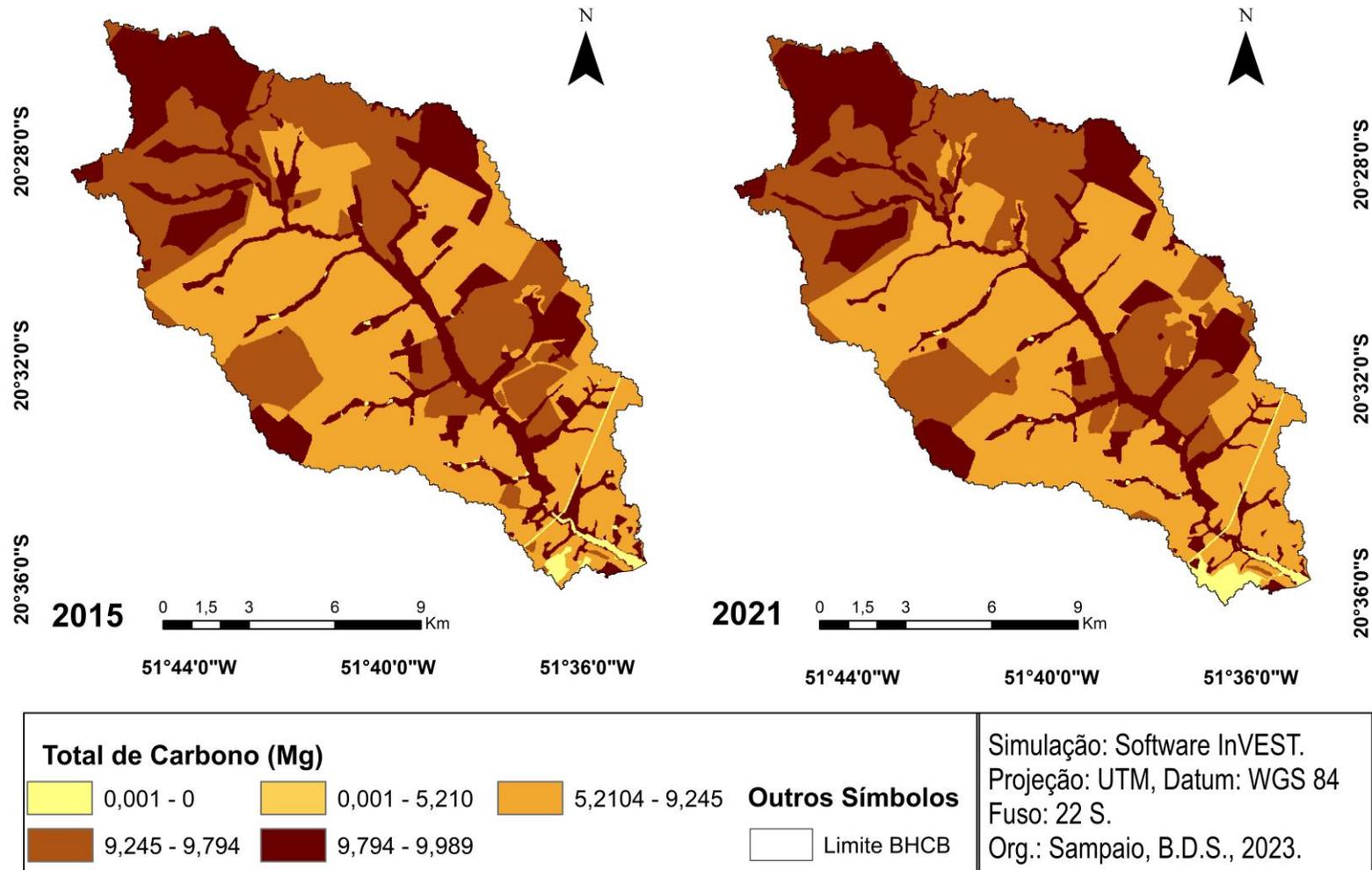
De acordo com a Figura 37, observa-se que em 1984 havia maior estoque de carbono, pois havia maior cobertura de vegetação nativa de cerrado (e na foz uma pequena área de enclave de formação mata-atlântica), com isso tinha maior estoque de carbono na área. Entretanto, após 25 anos de transformações no uso e cobertura da terra, pode-se identificar de modo espacialmente visível que em 2009, maior parte da área antes de vegetação nativa, ocupada por silvicultura, restando poucas áreas de vegetação natural. Isso explica a redução no estoque de carbono no período de 1984 a 2009, pois restou apenas alguns remanescentes de vegetação nativa e ao entorno tem-se a monocultura de eucalipto.

Na Figura 38, no período de 2015 e 2021 tem-se a expansão da silvicultura de eucalipto em algumas áreas de pastagem fazendo com o estoque de carbono se estenda moderadamente. E por fim, a Figura 39 apresenta espacialmente a previsão do estoque de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais, para os anos de 2033 e 2051, na qual as áreas de vegetação aluvial e os remanescentes de vegetação nativa encolha e as áreas de silvicultura se amplifique.

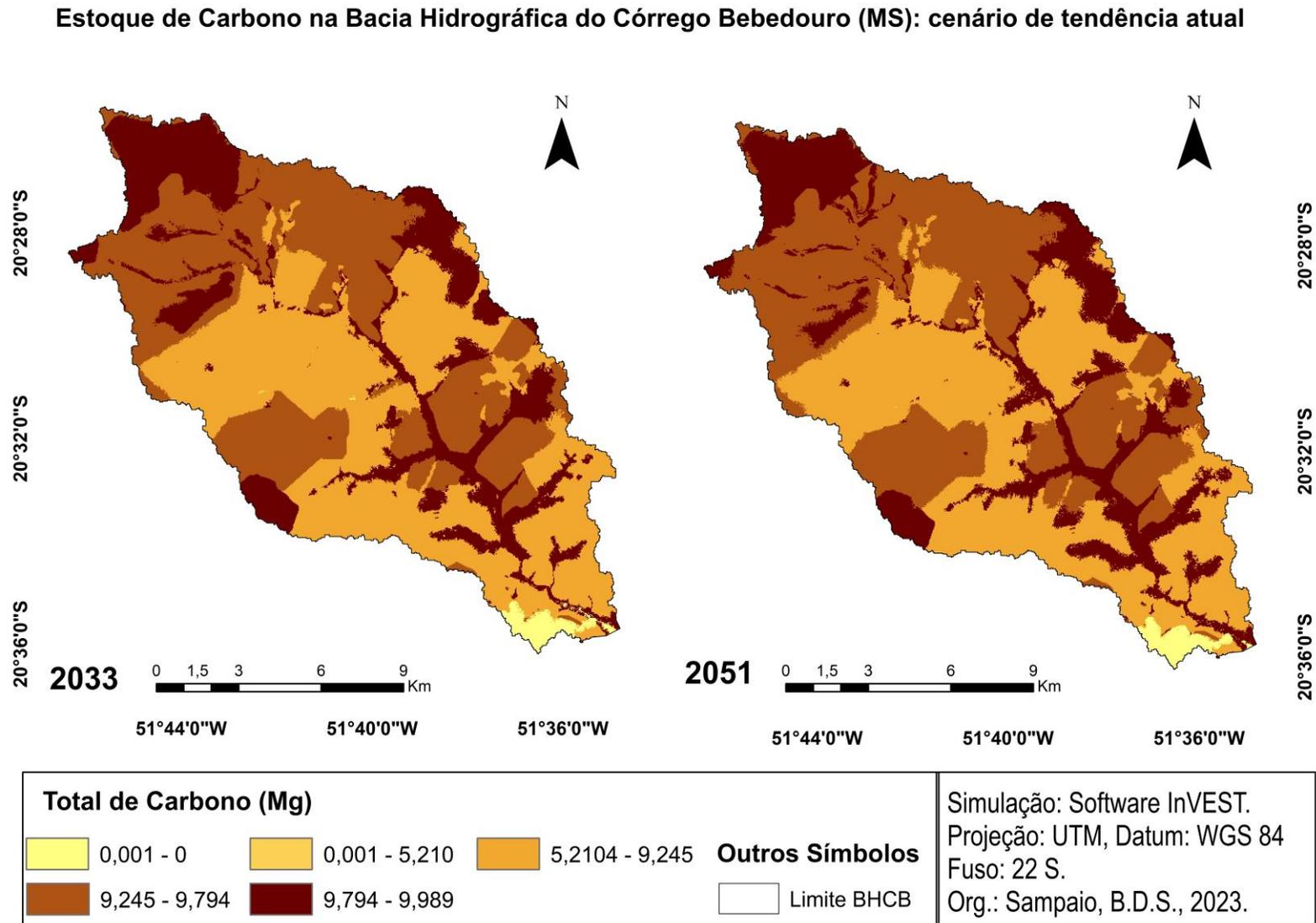
**Figura 37.** Total de estoque de carbono para os anos 1984 e 2009, na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro/MS.



**Figura 38.** Total de estoque de carbono para os anos 2015 e 2021, na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro/MS

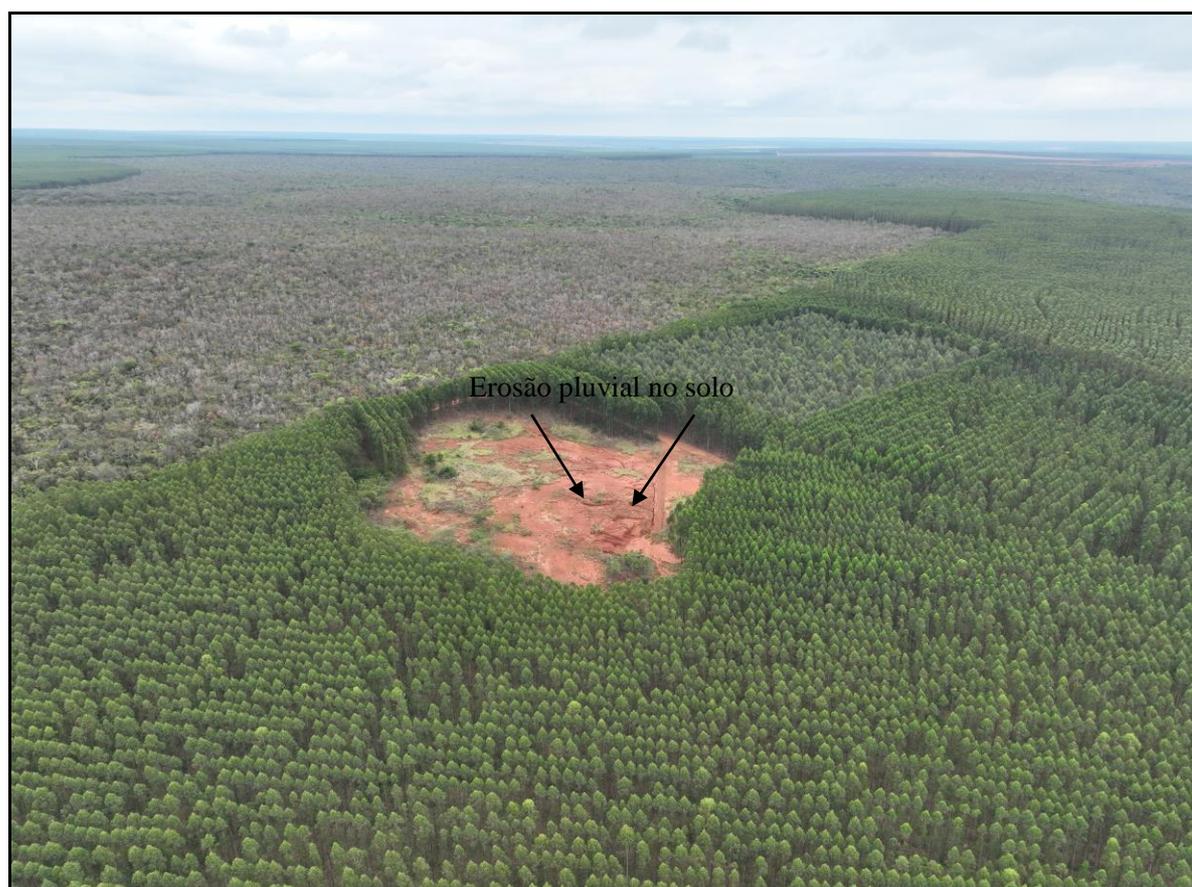


**Figura 39.** Estoque de Carbono na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS): cenário de continuidade de mudanças atuais para os anos de 2033 e 2051.



A Figura 40 é a fotografia obtida por meio de veículo aéreo não tripulado (VANT), em que se sobrevoou sob a paisagem da bacia hidrográfica para compreender essa área da cabeceira de drenagem.

**Figura 40.** Vegetação nativa, plantação de eucalipto e solo exposto com processos erosivos.



Fonte: Sampaio (2023). Trabalho de Campo (Set/2023).

Observa-se desde a cabeceira de drenagem da bacia hidrográfica a vegetação de formação savânica-florestal e ao entorno a silvicultura de eucalipto. Vale destacar, a área desmatada com o solo exposto e processos de erosão massiva do solo.

Em relação ao sequestro de carbono na BHCB (MS), a Tabela 24 apresenta os valores de sequestro de carbono.

**Tabela 24.** Total de Sequestro de Carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA) na BHCB (MS).

<b>Classes</b>	<b>1984</b>	<b>2009</b>	<b>2015</b>	<b>2021</b>	<b>2033</b>	<b>2051</b>
<b>Água</b>	1.199,25	-2.840,13	-2.590,29	-170,28	0	0
<b>Vegetação Aluvial</b>	-21.148,65	31.309,01	11.250,09	9.822,06	22.541,49	37.242,45
<b>Formação Savânica-Florestal</b>	-185.169,27	37.046,97	4.648,77	4.747,23	13.143,78	17.904,87
<b>Pastagem</b>	164.802,58	-188.405,46	-25.084,89	-38.204,37	-29.304,27	-26.226,18
<b>Silvicultura</b>	-4.112,99	82.630,58	43.322,30	29.679,11	15.383,42	18.755,80
<b>Área Construída</b>	0	-4.170,06	-4.091,13	-6.238,26	-4.310,55	-4.829,40
<b>Total de Sequestro - Mg de C</b>	-44.429,09	-44.429,09	27.454,85	-364,50	17.453,87	42.847,64

Elaboração: Sampaio (2023).

Observa-se que os valores de sequestro negativo significa liberação de carbono na atmosfera, pois no período de 1984 a 2009, teve-se a conversão da vegetação nativa para pastagem, emitindo cerca de - 44.429,09 Mg de C total na atmosfera. Nesse período tem-se destaque de emissões as classes de formação savânica-florestal com aproximadamente - 185.169,27 Mg de C, seguida da vegetação aluvial com -21.148,65 Mg de C e a classe silvicultura com -4.112,99 Mg de C na atmosfera. Essas emissões são explicadas devido ao desmatamento das áreas e ao revolvimento do solo para plantio mecanizado de mudas de eucalipto.

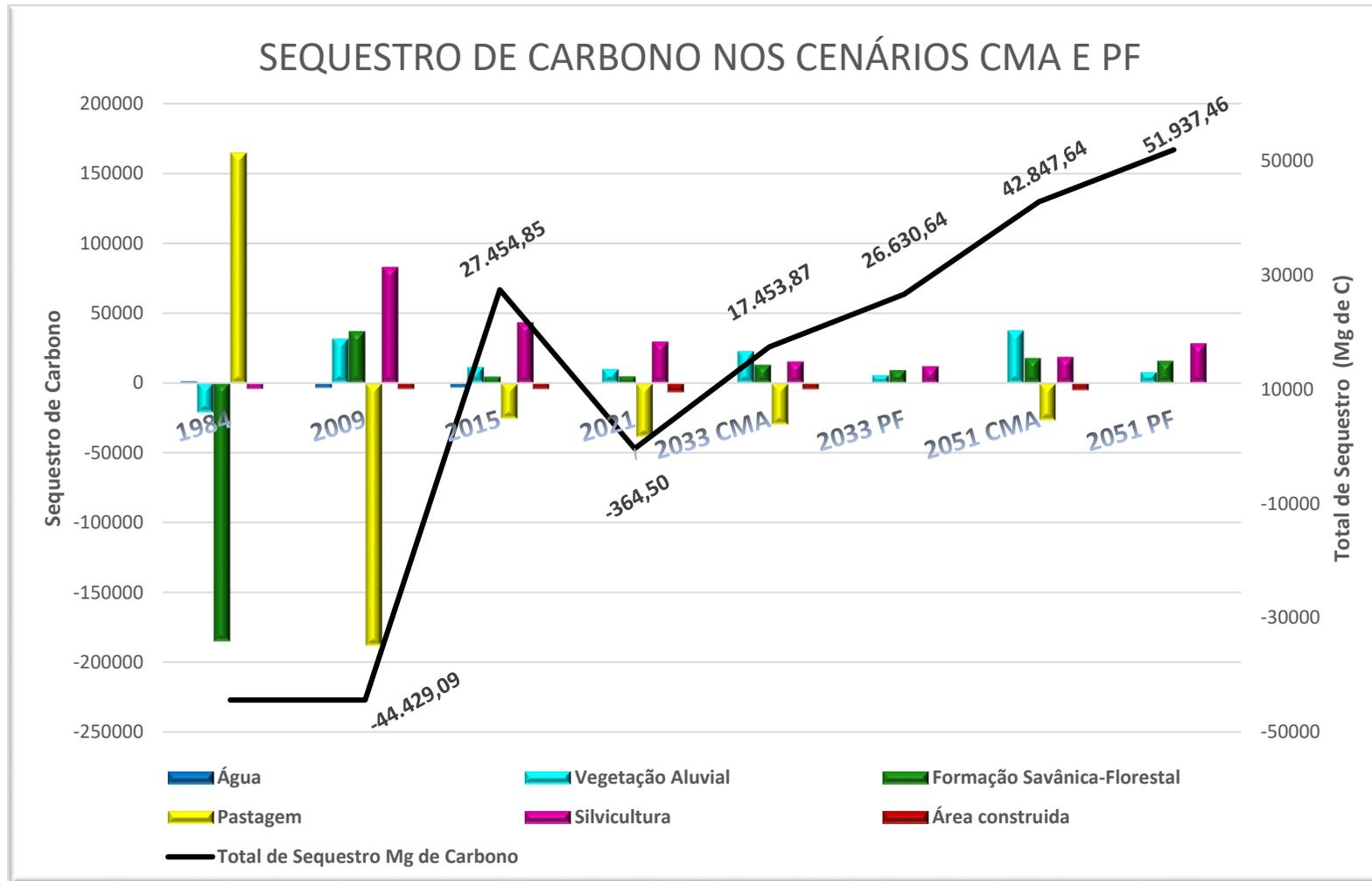
Por outro lado, no período de 2009 a 2015 houve um crescimento significativo do sequestro de carbono, pois ao invés de emitir o carbono, passou a sequestrar aproximadamente um total de 27.454,85 Mg de C da atmosfera. Tendo destaque no sequestro de carbono as classes de silvicultura com 43.322,30 Mg de C, seguida da vegetação aluvial com 11.250,09 Mg de C e, respectivamente, a classe de formação savânica-florestal com 4.648,77 Mg de C.

No período de 2015 a 2021 tem-se um sequestro negativo, ou seja, teve maior emissão de carbono na atmosfera com um total de -364,50 Mg de C. As classes que tiveram destaque foi a pastagem com -38.204,37 Mg de C, ou seja, o revolvimento do solo de pastagem para plantio de eucalipto.

De acordo com a modelagem preditiva no cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA), no período de 2021 a 2033 tem um total de sequestro de 17.453,87 Mg de C, com destaque nas classes de vegetação aluvial que sequestrará aproximadamente 22.541,49 Mg de C, seguida da silvicultura com 15.383,42 Mg de C, e a formação savânica-florestal com cerca de 13.143,78 Mg de C. Para o cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA), no período de 2021 a 2051 terá um sequestro de aproximadamente 37.242,45 Mg de C para a classe de vegetação aluvial, 18.755,80 Mg de C para a silvicultura e 17.904,87 Mg de C para a formação savânica-florestal, totalizando nesse período aproximadamente 42.847,64 Mg de C sequestrado da atmosfera.

O Gráfico 5 apresenta o total de sequestro de carbono ao longo dos períodos analisados.

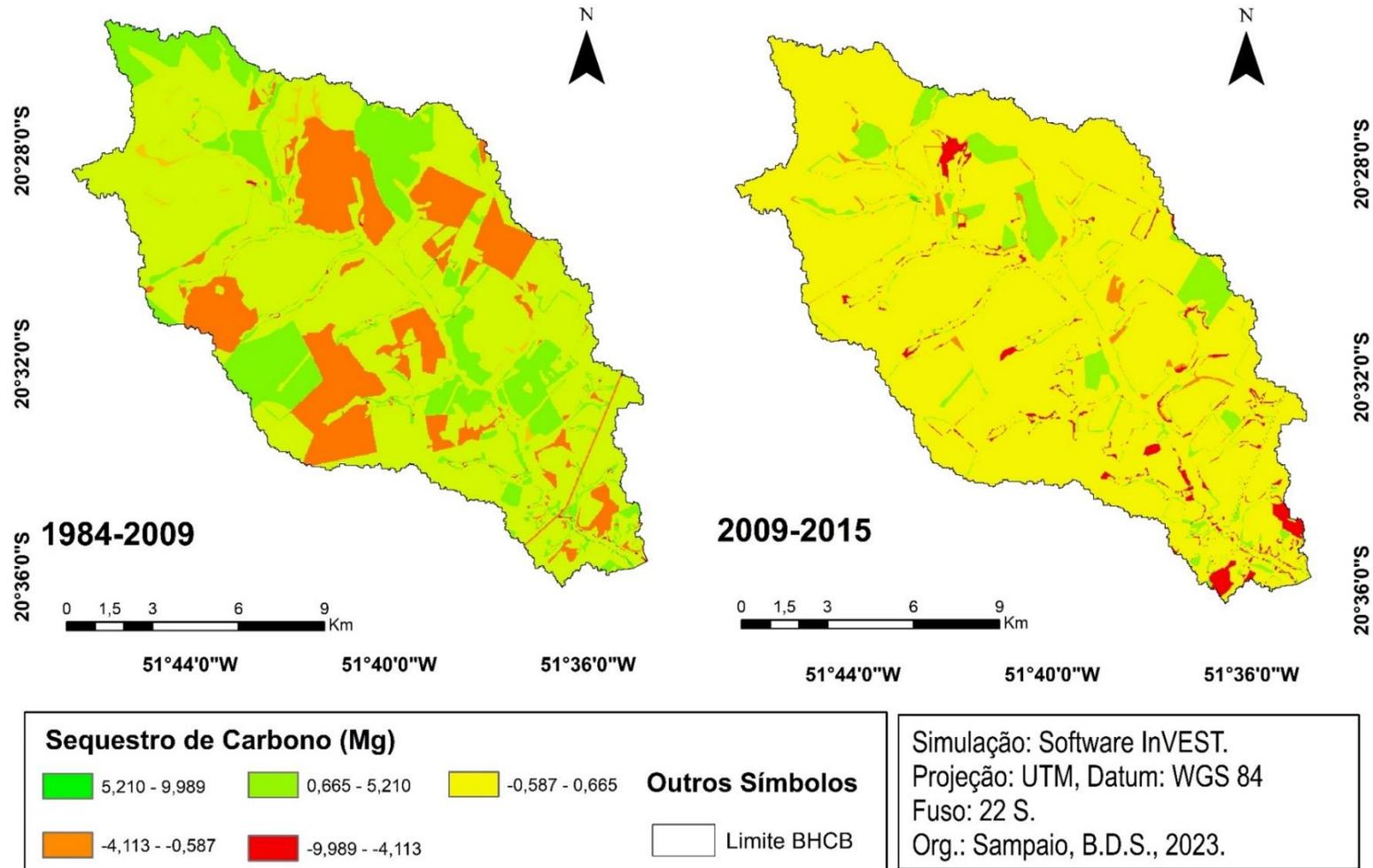
**Gráfico 5.** Total de sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS).



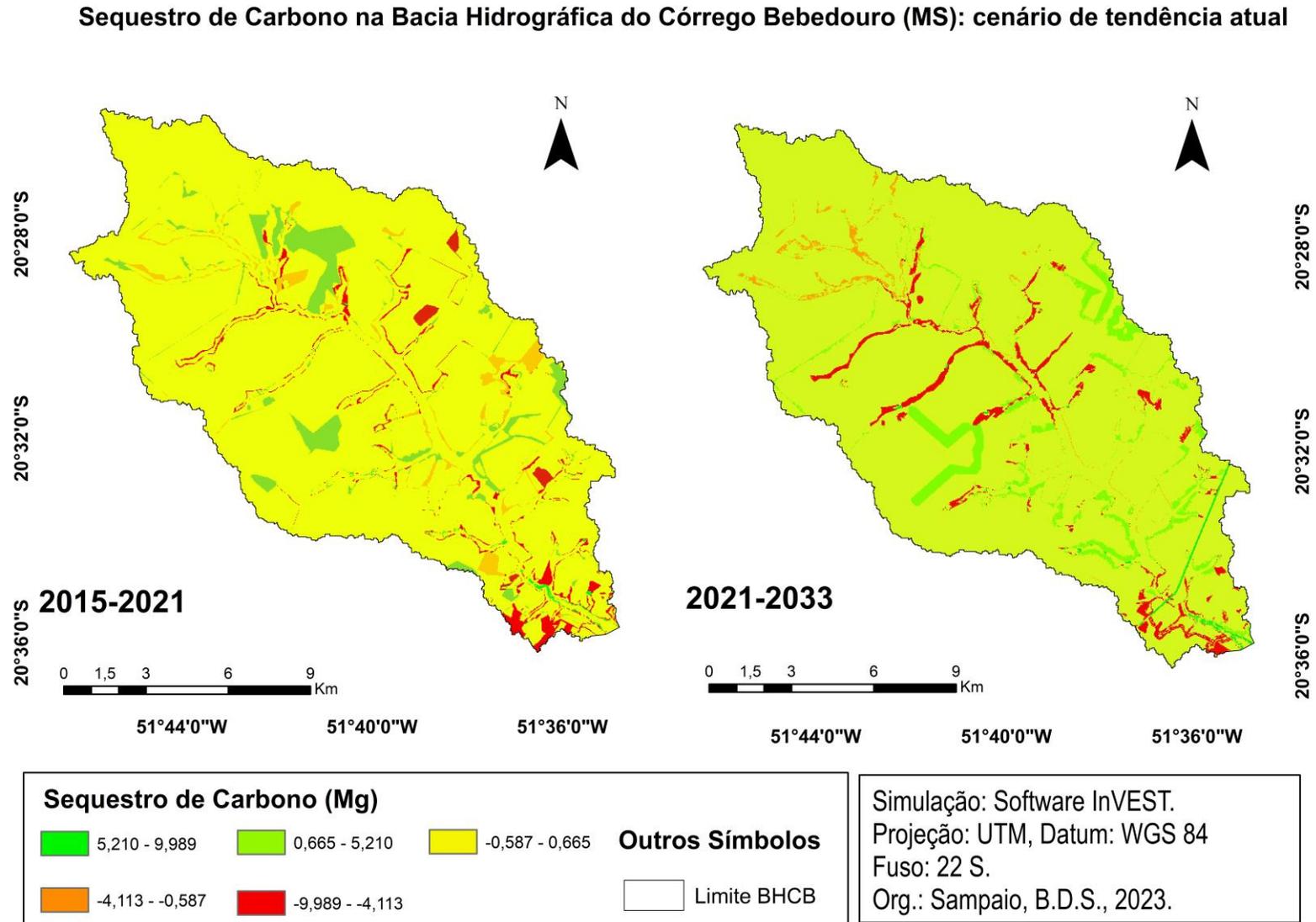
Elaboração: Sampaio (2023).

As Figuras 41 a 44 apresentam os intervalos dos períodos analisados, evidenciam espacialmente as classes com sequestro (cor verde) e emissões (cor vermelha) de carbono na área delimitada. É importante destacar sobre as previsões futuras do cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA), a preocupação em preservar as áreas de vegetação aluvial, ou áreas úmidas, pois são essenciais para preservação dos cursos d'água na bacia hidrográfica, protegendo-os de sedimentos advindos das áreas sem cobertura vegetal.

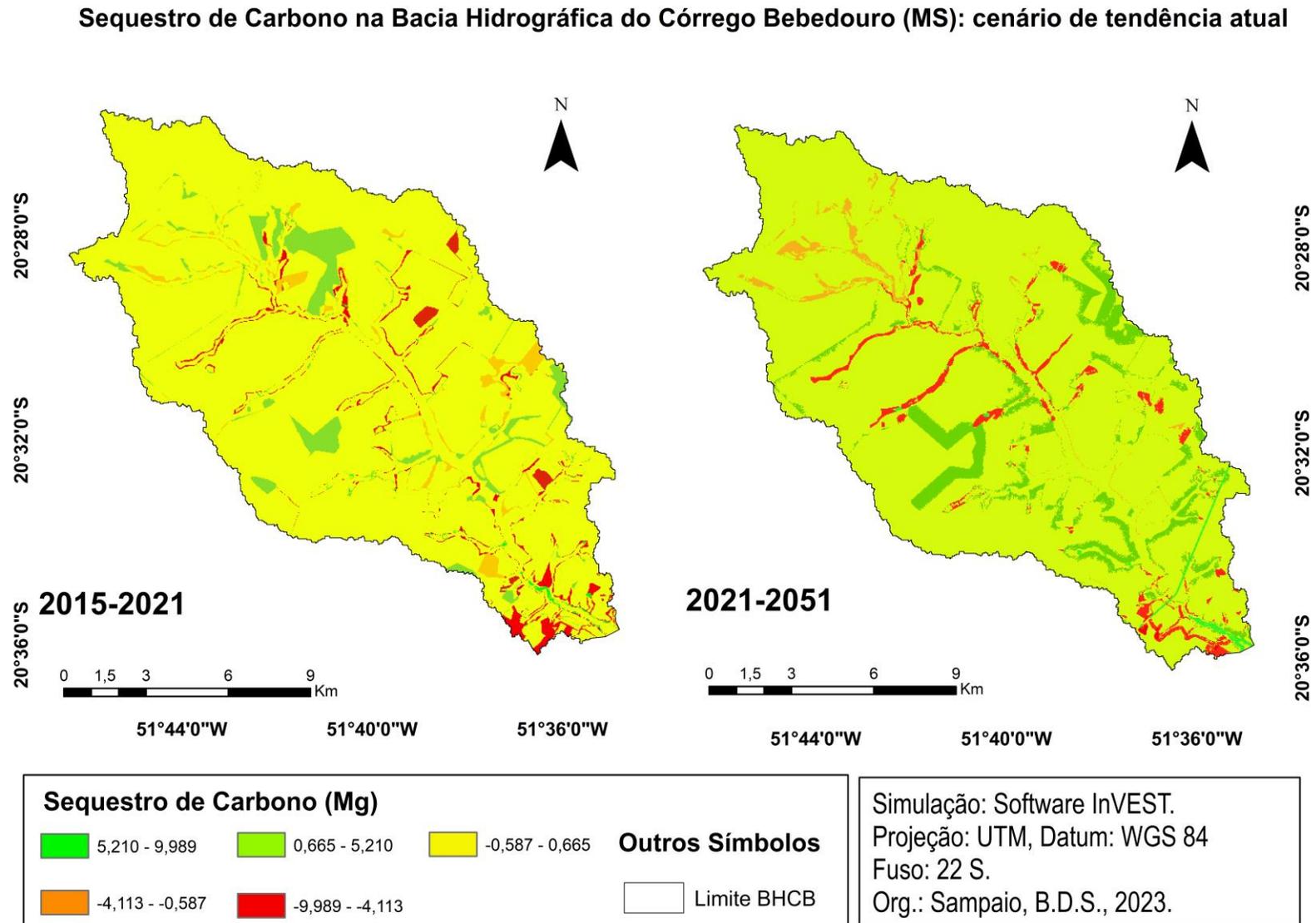
**Figura 41.** Total de sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS) – períodos de 1984-2009 e 2009-2015.



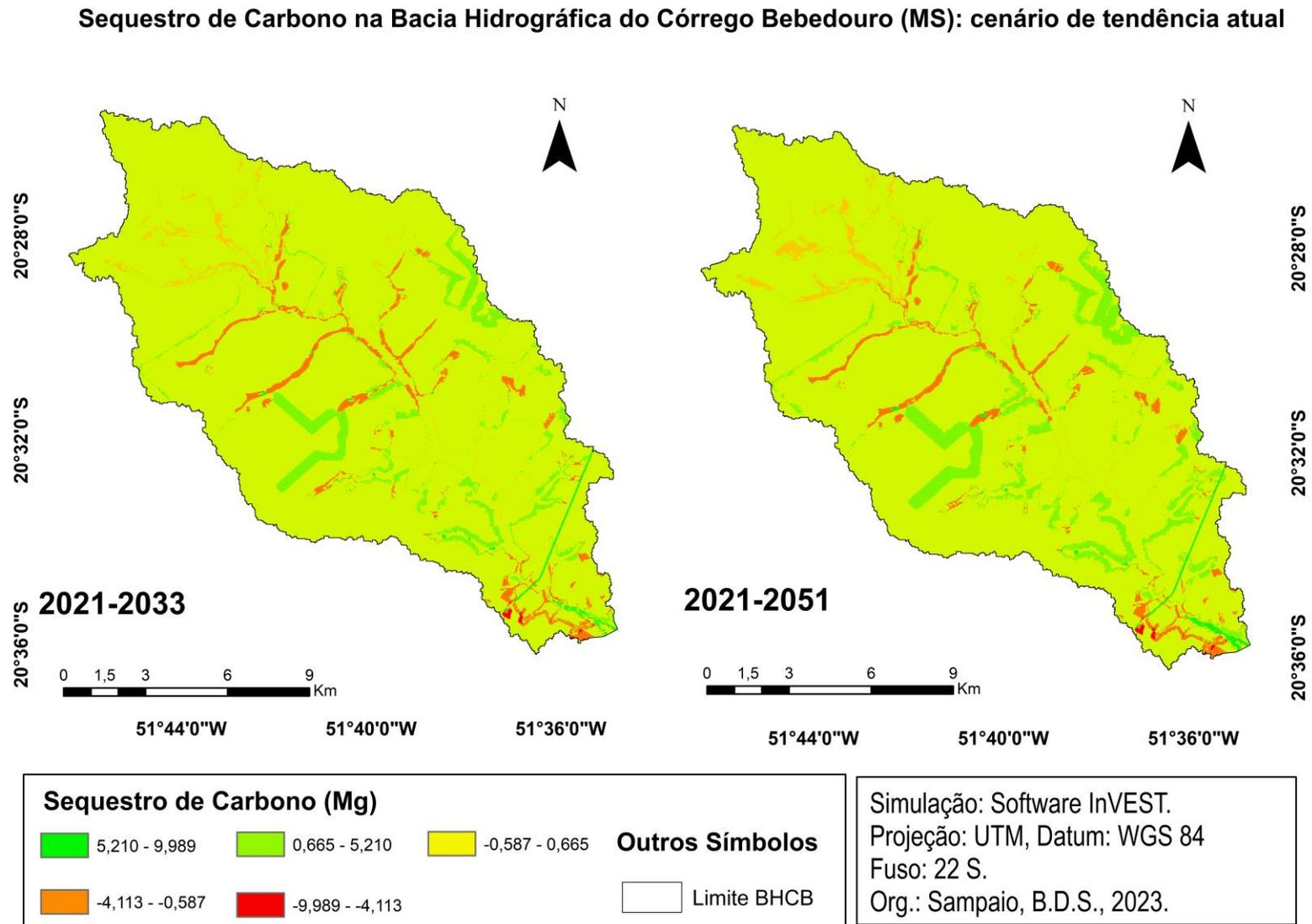
**Figura 42.** Total de sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS) – períodos de 2015-2021 e 2021-2033.



**Figura 43.** Total de sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS) – períodos de 2015-2021 e 2021-2051.



**Figura 44.** Total de sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais na BHCB (MS) – períodos de 2021-2033 e 2021-2051.



#### 4.5.2 Estoque e Sequestro de Carbono no cenário Conservacionista

No cenário conservacionista, considera-se a proteção florestal das APPs e RL na bacia hidrográfica. A Tabela 25 apresenta os valores de estoque de carbono no cenário conservacionista.

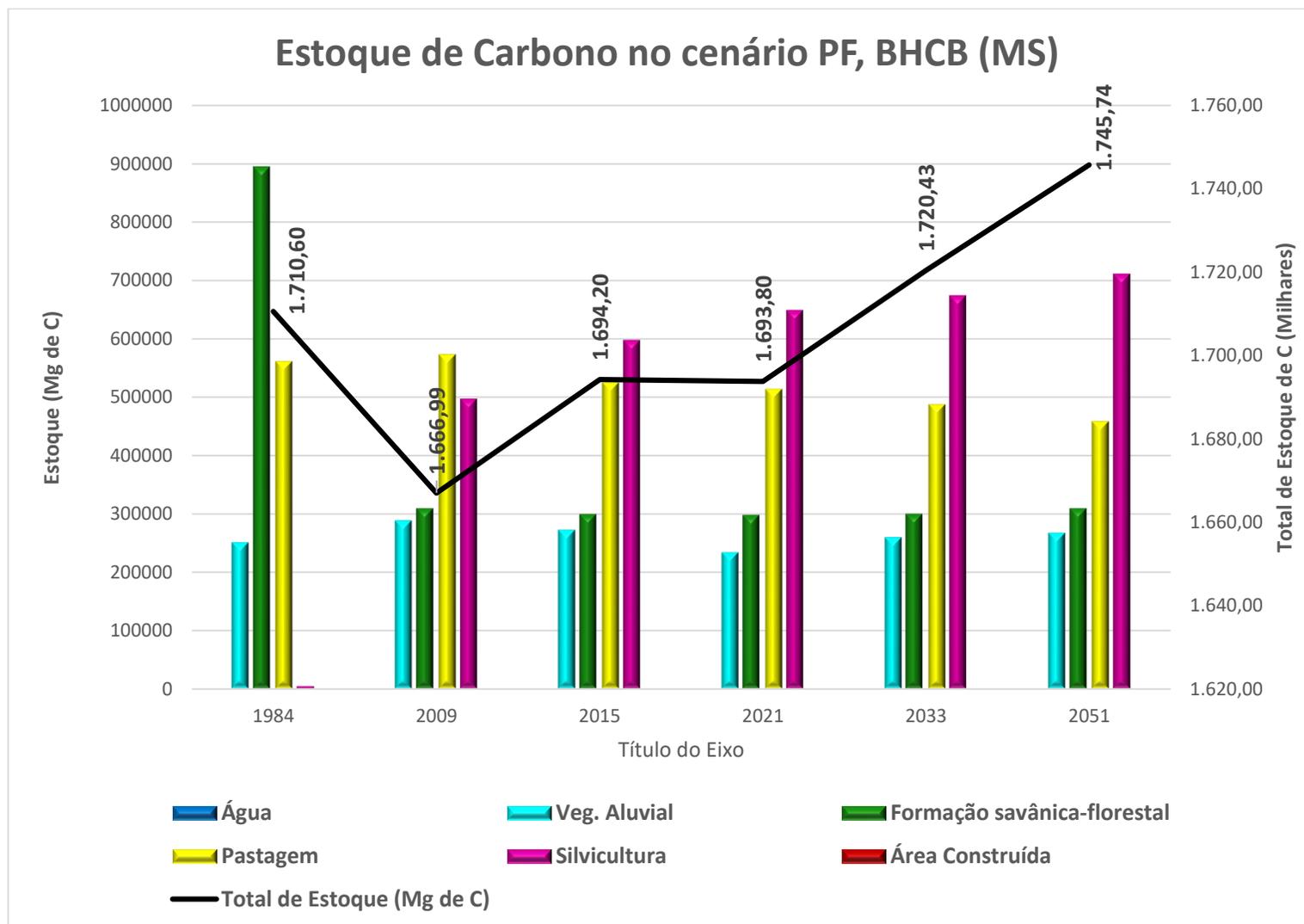
**Tabela 25.** Estoque de Carbono no cenário conservacionista (PF) na BHCB (MS).

Classe	2033 PF	2051 PF
Água	0	0
Vegetação Aluvial	259.290,44	266.862,86
Formação Savânica-Florestal	300.872,71	310.260,88
Pastagem	487.208,72	458.493,50
Silvicultura	673.057,58	710.119,04
Área Construída	0	0
<b>Total de Estoque - Mg de C</b>	<b>1.720.429,46</b>	<b>1.745.736,29</b>

Elaboração: Sampaio (2023).

Observa-se que no ano de 2033, haverá um total de 1.720.429,46 Mg de C estocado, com destaque para as classes de silvicultura (673.057,58 Mg de C), seguida da vegetação natural (vegetação aluvial juntamente com a formação savânica-florestal) totalizando aproximadamente 560.763,15 Mg de C, e a pastagem com 487.208,72 Mg de C. Para o ano de 2051 haverá um aumento no estoque total com aproximadamente 1.745.736,29 Mg de C, tem-se destaque as classes com maior estoque: silvicultura (710.119,04 Mg de C), seguida da vegetação natural 577.123,74 Mg de C, e uma redução do estoque na classe pastagem com 458.493,50 Mg de C, quando comparado com a previsão para o ano de 2033 no cenário conservacionista. O Gráfico 6 apresenta os valores totais e por classes do estoque de carbono no cenário conservacionista e a Figura 45 apresenta espacialmente o total de carbono que será estocado em Mg de C (megagrama de Carbono) no cenário conservacionista.

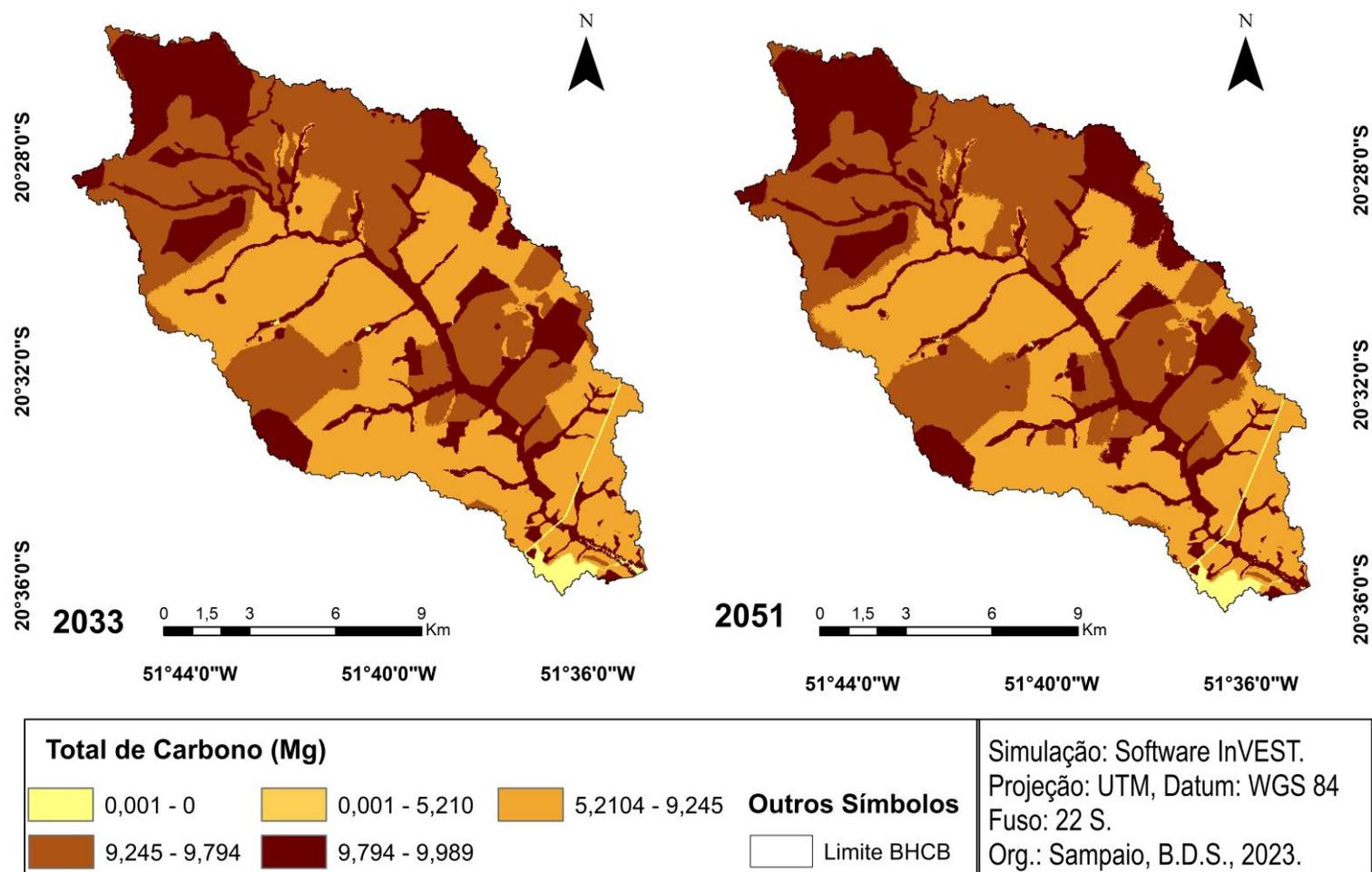
**Gráfico 6.** Total de estoque de carbono no cenário conservacionista na BHCB (MS).



Elaboração: Sampaio (2023).

**Figura 45.** Estoque de Carbono na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS): cenário conservacionista.

**Estoque de Carbono na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS): cenário conservacionista**



A Tabela 26 apresenta os valores estimados de sequestro de carbono para o ano de 2033 e 2051 no cenário conservacionista.

**Tabela 26.** Sequestro de Carbono no cenário conservacionista (PF) na BHCB (MS).

CLASSES	2033 PF	2051 PF
Água	0	0
Vegetação Aluvial	5.309,28	7.655,58
Formação Savânica-Florestal	9.272,61	15.907,59
Pastagem	0	0
Silvicultura	12.048,75	28.374,29
Área Construída	0	0
<b>Total de Sequestro (Mg de C)</b>	<b>26.630,64</b>	<b>51.937,46</b>

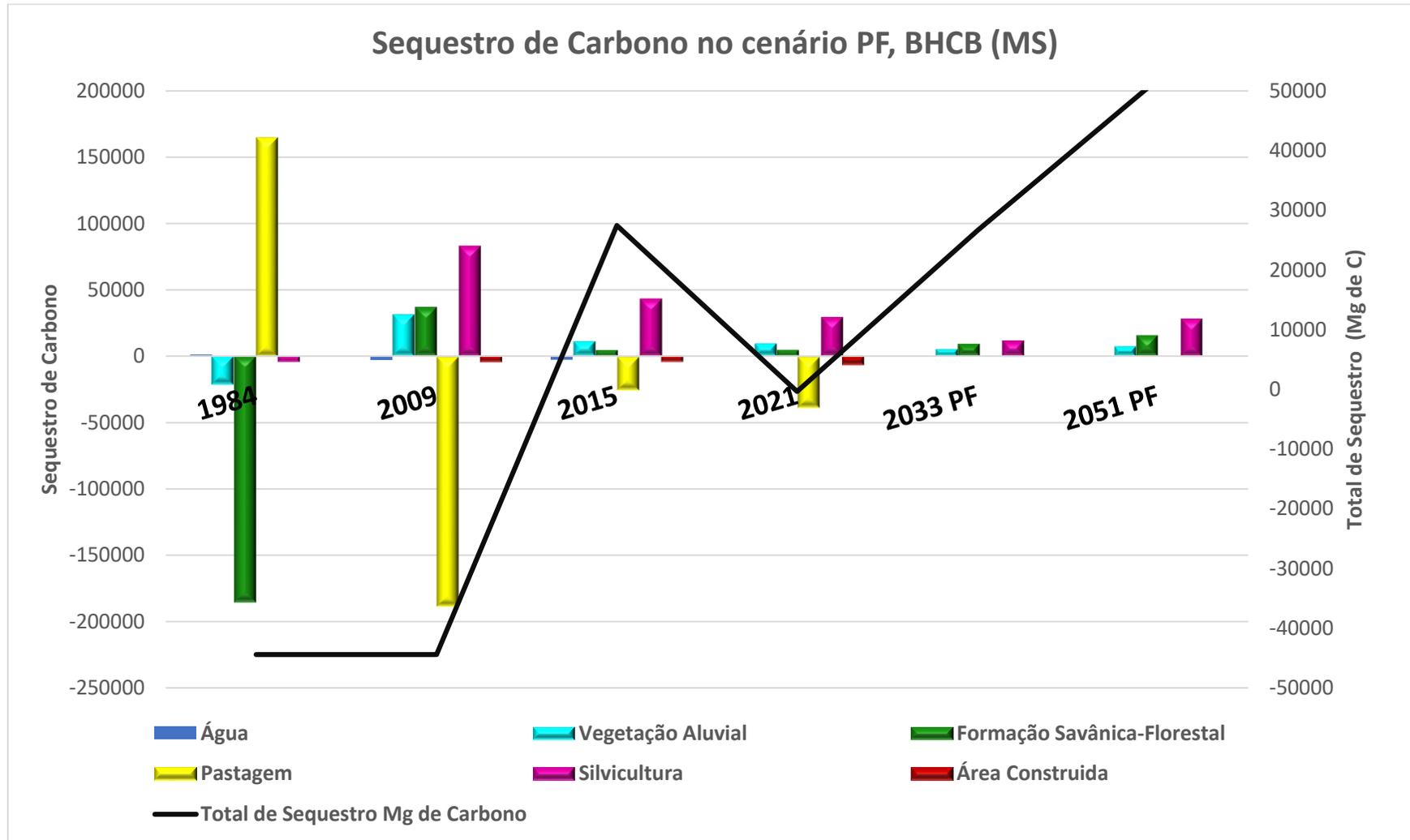
Fonte: Software InVEST, 2023.

Elaboração: Sampaio (2023).

Observa-se na previsão do cenário conservacionista, um aumento exponencial no sequestro de carbono, para o ano de 2033 estimado com o total de 26.630,64 Mg de C e no ano de 2051 terá um total de 51.937,46 Mg de C. De acordo com a modelagem preditiva, observa-se que predominará o aumento do sequestro de carbono. Assim, no período de 2021 a 2033, quando comparado entre as classes de uso e cobertura tem-se o maior sequestro na classe vegetação natural (vegetação aluvial juntamente com a formação savânica-florestal) totalizando aproximadamente 14.581,89 Mg de C, seguida da classe silvicultura com 12.048,75 Mg de C. Quanto ao cenário preditivo conservacionista no período de 2021 a 2051, haverá o maior sequestro na classe silvicultura com 28.374,29, seguida da vegetação natural com 23.563,17 Mg de C.

O Gráfico 7 apresenta o valor total de sequestro de carbono, bem como os valores de sequestro por classe de uso e cobertura da terra.

**Gráfico 7.** Total de sequestro de carbono no cenário conservacionista na BHCB (MS).



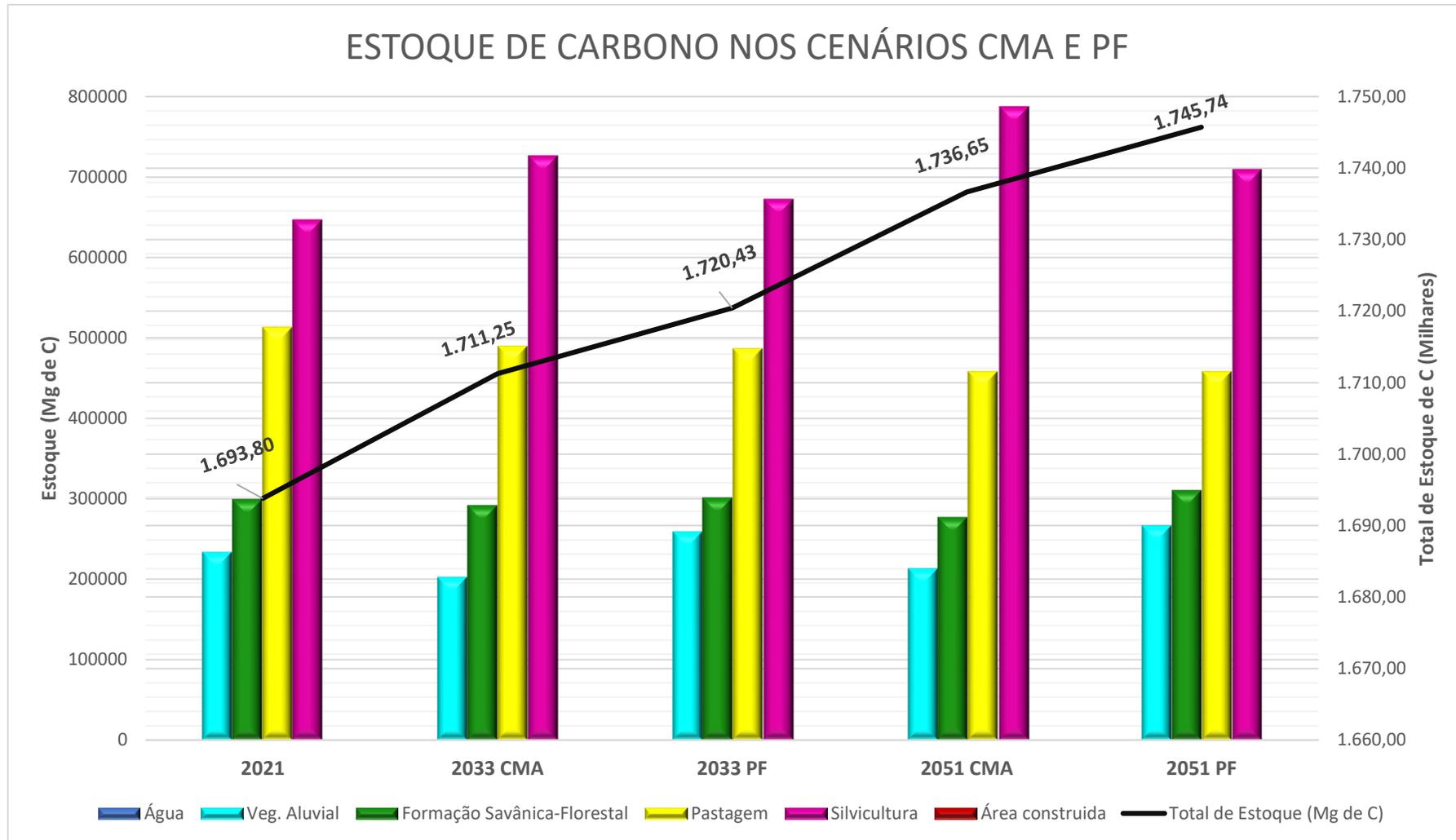
Elaboração: Sampaio (2023).

#### **4.5.3 Análise Monetária do Sequestro de Carbono na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro - MS**

No presente tópico apresenta-se a análise comparativa do estoque e sequestro de carbono em ambos cenários preditivos (cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA) e cenário PF), bem como sua valoração em termos monetários. O Gráfico 8 apresenta a curva de tendência total do estoque de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais e no cenário conservacionista.

De acordo com o Gráfico 8, observa-se que do ano base de 2021 para o cenário de continuidade de mudanças atuais (2033 e 2051) haverá um aumento no estoque de carbono. Entretanto, se seguir o cenário conservacionista com a proteção florestal das áreas de APP e RL (áreas restritivas), poderá ter um maior estoque de carbono na bacia hidrográfica.

**Gráfico 8.** Total de estoque de carbono no cenário continuidade de mudanças atuais (CMA) e PF na BHCB (MS).

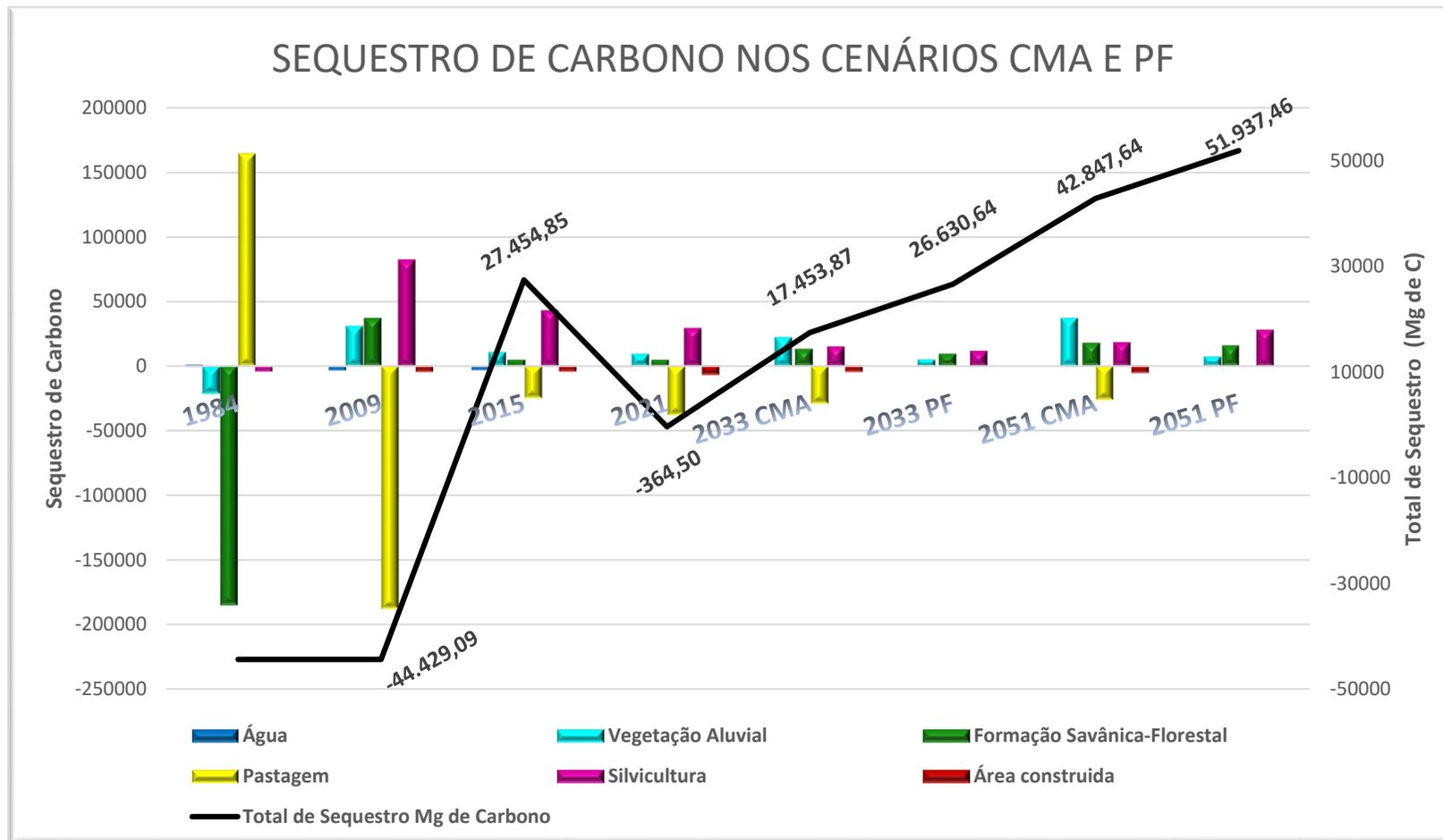


Elaboração: Sampaio (2023).

Em relação à comparação do sequestro total de ambos cenários (de continuidade de mudanças atuais - CMA e conservacionista - PF), o Gráfico 9 apresenta os valores totais de sequestro de carbono (Mg de C).

Conforme a análise é possível evidenciar que no cenário conservacionista há praticamente o dobro de sequestro de carbono quando comparado com o cenário de continuidade de mudanças atuais. De acordo com a modelagem preditiva, aumentará de 17.453,47 Mg de C em 2033 (CMA) para 42.847,64 Mg de C (CMA) e, respectivamente, de 26.630,64 Mg de C em 2033 (PF) para 51.937,46 Mg de C em 2051 (PF).

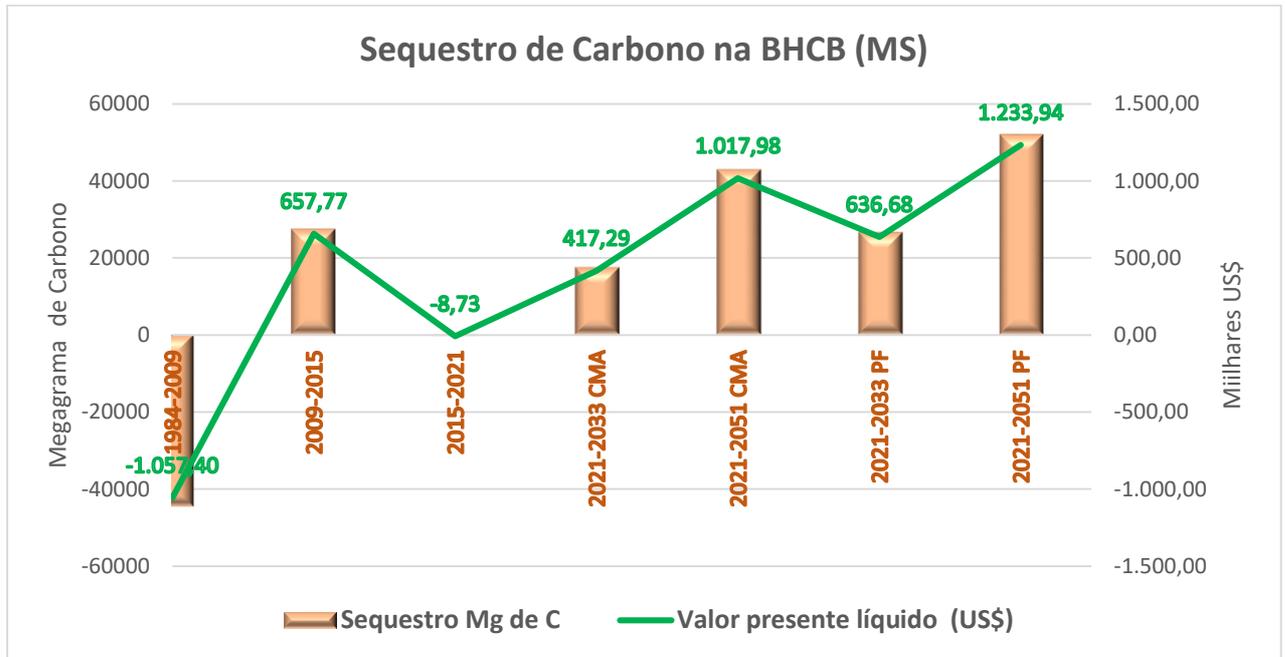
**Gráfico 9.** Total de sequestro de carbono no cenário CMA e PF na BHCB (MS).



Elaboração: Sampaio (2023).

Em relação aos termos monetários do sequestro de carbono na BHCB (MS), o Gráfico 10 apresenta o valor presente líquido do sequestro de carbono em dólares (US\$).

**Gráfico 10.** Valoração do sequestro de carbono na BHCB (MS).



Elaboração: Sampaio (2023).

Conforme análise do Gráfico 10, observa-se uma perda monetária do valor presente líquido do carbono no período de 1984 a 2009, totalizando uma perda de -1.057.395,38 US\$. No período de 2009 a 2015 há um aumento no valor presente líquido para 657.765,22 US\$. Entretanto, no período de 2015 a 2021, há uma redução no valor presente líquido equivalente a -8.732,78 US\$.

No cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA), no período de 2021 a 2033, há um acréscimo de 417.285,12 US\$, e no período de 2021 a 2051, tem-se o valor presente líquido de 1.017.980,71 US\$. Por outro lado, no cenário conservacionista, no período de 2021 a 2033, os ganhos monetários para o sequestro de carbono na BHCB (MS) equivalem a 636.682,03 US\$, e no período de 2021 a 2051, o valor presente líquido atinge o ápice de 1.233.938,14 US\$.

A partir dessa análise, é possível afirmar que até 2051, se seguir o cenário conservacionista, a bacia hidrográfica terá suprido seu déficit do período de 1984 a 2009 em relação ao valor líquido do sequestro de carbono. As evidências indicam que para atingir a meta

do “Carbono Neutro” no Estado de Mato Grosso do Sul, os proprietários de imóveis rurais juntamente com as empresas e as políticas públicas com ações efetivas de planejamento e gestão na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro/MS poderão atingir essa meta de zero emissões de carbono. Entretanto, não basta apenas zerar a redução, mas sim efetivar nas ações para que haja o sequestro do Carbono acumulado na atmosfera ao longo do tempo, ou seja, da época da revolução industrial (passado) temos o aumento das emissões de gases de efeito estufa. Uma das alternativas viáveis consiste em ações de plantar árvores, plantar em equilíbrio com a natureza, com aplicação de Sistemas Agroflorestais (SAF) e assim garantir que o carbono continue armazenado no solo.

Trazemos aqui o exemplo na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) que poderá se estender para outras bacias hidrográficas de modo a abranger todo o Estado de Mato Grosso do Sul, ou melhor ainda, todas as bacias hidrográficas do país. Assim, até 2050 considerando o cenário conservacionista (PF) estaremos sem emissões de carbono e com o sequestro ativo de carbono.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do cenário atual de mudanças climáticas em nível mundial, a importância da manutenção dos serviços ecossistêmicos, especialmente na questão do armazenamento e sequestro de carbono, tem se tornado uma alternativa recomendada para compensar a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) que interferem no clima.

Em âmbito nacional têm-se as políticas de incentivos para criação de programas de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) em esfera nacional e estadual. Diante disso, essa pesquisa buscou-se realizar uma análise multitemporal das mudanças do uso e cobertura da terra na bacia do Córrego Bebedouro (MS), essa por vez considerada “modelo” para empresa do setor de papel e celulose. Além disso, realizou-se a avaliação dos serviços ecossistêmicos com ênfase no estoque e sequestro de carbono na bacia hidrográfica, a fim de propor cenários futuros com o auxílio da modelagem preditiva baseada em aprendizado de máquina. Portanto, por meio da aplicação do modelo de avaliação *InVEST* integrados nos modelos CA-Markov, pode-se oferecer um novo cenário para valoração dos serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas no contexto do Pagamento por Serviços Ambientais.

A utilização da classificação supervisionada em plataforma online – *Google Earth Engine* juntamente com o algoritmo de alta performance *Random Forest* possibilitou avanços, por intermédio da criação e disseminação dos códigos *scripts*, permitindo que as classificações possam ser utilizadas em diversas áreas de estudo. Entretanto, para esta pesquisa utilizou-se o filtro de limpeza de ruídos da classificação supervisionada e assim possibilitou melhor veracidade com a realidade representada.

Em síntese, referente à classificação de uso e cobertura da terra utilizando o algoritmo *Random Forest* no *Google Earth Engine*, conclui-se que em 1984, a Vegetação Cerrado compreendia cerca de 52% da área total da bacia, com 104,66 km<sup>2</sup>, seguida da classe Pastagem que compreendia cerca de 48% da área. Contudo, na escala temporal de análise, 1984 a 2004, a classe Pastagem teve um crescimento exponencial com 150,65 km<sup>2</sup> abrangendo 74% da área da bacia, enquanto que a classe Vegetação Cerrado teve um decréscimo e compreendia cerca de 25% (em 2004 e agora em 2021) da área da bacia. Em 2021, a classe Pastagem compreendia cerca de 43% da área total da bacia, seguida da classe Silvicultura com cerca de 30% da área total da bacia. Vale ressaltar, o destaque para essas duas classes Pastagem e Silvicultura pela sua rotatividade no uso e cobertura da terra.

Em análise do classificador *Random Forest* conclui-se que o algoritmo se mostrou um

classificador satisfatório com índice *Kappa* variando de 0.88 (1984) à 0.96 (2021). Portanto, na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) houve mudanças no uso e cobertura da terra, primeiramente com a substituição da formação savânica-florestal (vegetação de Cerrado) para pastagem e fragmentações de áreas de Cerrado e, posteriormente, ocorreu a substituição de áreas de pastagens pelo cultivo de eucalipto, sendo estas áreas destinadas em sua grande maioria a produção de celulose. Assim, a silvicultura tem destaque atual com a instalação da indústria de papel e celulose que arrenda as terras na bacia hidrográfica e ao entorno voltada a silvicultura, com destaque em âmbito internacional.

Conforme as transformações no uso e cobertura da terra e a realização da modelagem preditiva foi possível avaliar diferentes cenários de uso e cobertura da terra e identificar a diferença de estoque e sequestro de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA), e no cenário conservacionista de proteção florestal (PF), especialmente no que se refere à classe de uso e cobertura da terra, pela pastagem, formação savânica-florestal, vegetação aluvial e silvicultura.

Os resultados apontaram um índice *Kappa* de 0.83 quando realizado a validação do mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2021 para o mapeamento projetado de 2021. Atestando assim, o grau de confiabilidade da modelagem preditiva realizada no *software PLUS model*.

Portanto, as análises da evolução das transformações do passado, do presente e a previsão do cenário de tendência futura do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS), tiveram como resultados, no cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA), a classe Formação Savânica-Florestal entre o passado (1984) e presente (2021) sofreu uma drástica redução de suas áreas de cobertura na BHCB, passando de 40,49% em 1984 para 13,48% em 2021, e conforme a tendência do cenário de continuidade de mudanças atuais, continuará tendo essa redução, podendo representar cerca de 12% na projeção de 2051. Por outro lado, as áreas pertencentes à classe Silvicultura demonstram um comportamento inverso, apresentando um crescimento significativo, pois em 2009 ocupavam 23,76% e em 2021 42,13% da área total da BHCB. Assim, a projeção histórica para o ano de 2033 aponta que 35% da área e no ano de 2051 aproximadamente 38% da área da bacia hidrográfica será de silvicultura, o que confirma a tendência histórica de aumento dessa classe ao passar dos anos, na qual a classe oscila entre pastagem e silvicultura.

Os resultados das análises da simulação de mudanças de cenários futuros para a tendência conservacionista (PF) considerando a proteção florestal apontaram um crescimento

percentual de área na classe vegetação aluvial de 10,2% em 2021 para 11,52% para a previsão no ano de 2033 e 11,86% para 2051. A classe formação savânica-florestal teve um leve acréscimo percentual de 13,61% (2033) para 14,04% (2051), e a classe silvicultura também teve um leve aumento de 32,23% (2033) para 34,01% (2051). De modo a manter o equilíbrio entre a natureza e as atividades econômicas na bacia hidrográfica.

Em relação à simulação de PSA - Projeto Mina D'água, o valor total da simulação foi de R\$ 21.336,48 (reais) por ano. Observou-se que a BHCB (MS) possui 66 nascentes distribuídas nos imóveis rurais, a área para recomposição da vegetação compreende cerca de 1.576 metros. Os resultados da aplicação da metodologia do IPCC em áreas restritivas, apontaram um potencial de sequestro de carbono por reflorestamento com vegetação nativa para a categoria de margem dos cursos d'água, no horizonte de 12 anos de aproximadamente 29.633,89 tC. E para o horizonte de 30 anos, tem-se o valor de 74.084,711 tC. A categoria APP nascentes possui um potencial de sequestro de carbono por reflorestamento, para o horizonte de 12 anos, com um valor 1.241,58 tC, e o valor de 3.103,95 tC. para o horizonte de 30 anos. A categoria RL teve um potencial de sequestro de carbono, respectivamente, com o valor de 95.918,40 tC e 239.795,980 tC. Essa categoria representa a maior estimativa de C no viés da recomposição da vegetação ou reflorestamento em áreas de propostas de RL.

Observa-se os esforços por parte do poder estatal, com a Lei 14.653/2023 que disciplina a intervenção e a implantação de instalações necessárias à recuperação e à proteção de nascentes. Promovendo as melhorias nas funções ambientais das áreas de preservação permanente com a atividade de proteção e recuperação de nascentes que, classificada como eventual ou de baixo impacto ambiental, garante maior segurança jurídica tanto para as agências e entidades promotoras dos programas de recuperação de nascentes, como para os proprietários executores dos mesmos. Portanto, permite que as áreas de preservação permanente e de reserva legal - consideradas críticas para o abastecimento público de água ou prioritárias para conservação da diversidade biológica, em processo de desertificação ou de avançada fragmentação, possam receber recursos públicos pelos serviços ambientais (Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, Lei 14.119, 2021) e incluir nas atividades de interesse social e de baixo impacto ambiental as ações de recomposição da vegetação nativa no entorno de nascentes ou outras áreas degradadas, conforme norma do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama), alterando também a Lei 12.651, de 2012.

Os resultados da modelagem de avaliação e valoração de serviços ecossistêmicos no cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA), apontaram que em 1984 havia

aproximadamente 1.710.600,81 Mg de C estocado no solo. Porém, em 2009 tem-se aproximadamente 1.666.990,63 Mg C, destacando-se uma redução no estoque de carbono. Para o cenário preditivo (CMA) a tendência consiste em aproximadamente 1.711.252,70 Mg C estocado para o ano de 2033 e 1.736.646,00 Mg C para o ano de 2051, seguindo uma tendência de crescimento no estoque de carbono, explicado pela expansão da classe silvicultura. Porém, quando comparado com os resultados do cenário preditivo conservacionista (PF) haverá um aumento significativo no estoque de carbono no solo de aproximadamente 1.720.429,46 Mg de C estocado para o ano de 2033 e, aproximadamente, 1.745.736,29 Mg de C estocado para o ano de 2051.

Por outro lado, quando comparadas as metodologias empregadas na tese para estimar o sequestro de carbono, observa-se que a metodologia do IPCC (2006) para o horizonte de 12 anos tem o valor total de sequestro de 30.875,46 tC e para o horizonte de 30 anos tem o valor total de sequestro potencial de 77.188,66 tC, desconsiderando o valor de sequestro potencial para as áreas de RL, visto que são áreas propostas e não averbadas (95.918,39 tC e 239.795,98 tC, respectivamente). Enquanto que na metodologia do *InVEST*, os resultados de sequestro no cenário de CMA apontaram para 17.453,87 Mg C e 42.847,64 Mg C; e no cenário de PF os resultados apontaram o valor estimado de sequestro de 26.630,64 Mg C e 51.937,46 Mg C, respectivamente. Assim, na aplicação da metodologia do IPCC (2006) tem-se quase o dobro de valor de sequestro de carbono do que na aplicação da metodologia do *InVEST*. Porém, vale destacar as particularidades da metodologia do *INVEST* que considera os valores de carbono conforme o tipo de uso e cobertura da terra, além disso, os resultados da aplicação dessa metodologia foram obtidos por meio de dados primários do carbono orgânico no solo.

Em relação ao sequestro de carbono, os resultados (*InVEST*) apontaram que para o cenário preditivo (CMA), no período de 1984 a 2009, os valores de sequestro de carbono deram negativos, esse fato significa que houve perda do sequestro, ou seja, houve maior liberação de carbono do solo para atmosfera. Analisando os dados gerais da presente tese, justifica-se pelo fato desse longo período ter ocorrido uma drástica transformação na paisagem da bacia hidrográfica, as áreas de vegetação nativa foram convertidas em pastagem, com o desmatamento da vegetação natural há enorme liberação de carbono para a atmosfera. Essas emissões também podem ser explicadas pela intensa mecanização agrícola na área para o plantio das mudas de eucalipto. Já no período de 2009 a 2015 evidenciou-se o aumento significativo do sequestro de carbono totalizando um sequestro de 27.454,85 Mg de C da atmosfera. No período de 2015 a 2021 houve um valor de sequestro negativo com um total de -364,50 Mg de C, ou seja, esse

período emitiu carbono na atmosfera, tendo como destaque a classe pastagem com - 38.204,37 Mg de C. Seguindo a tendência da modelagem preditiva para o cenário CMA, no período de 2021 a 2033 haverá um total de sequestro de aproximadamente 17.453,87 Mg de C, e no período de 2021 a 2051 haverá 42.847,64 Mg de C sequestrado. Os resultados estimados para a modelagem preditiva no cenário conservacionista (PF) apontaram que no período de 2021 a 2033 haverá cerca de 26.630,64 Mg de C sequestrado, e para o período de 2021 a 2051 haverá aproximadamente 51.937,46 Mg de C sequestrado, totalizando um aumento representativo no sequestro de carbono caso as ações conservacionistas sejam implementadas.

Em termos monetários da valoração de serviços ecossistêmicos conclui-se que no cenário conservacionista há praticamente o dobro de sequestro de carbono e, conseqüentemente, de ganhos em relação ao valor presente líquido de C quando comparado com o cenário de continuidade de mudanças atuais. De acordo com a modelagem preditiva, aumentará de 17.453,47 Mg de C em 2033 (CMA) para 42.847,64 Mg de C (PF) e, respectivamente, de 26.630,64 Mg de C em 2051 (CMA) para 51.937,46 Mg de C em 2051 (PF). Ou seja, o valor presente líquido no período de 2021 a 2033 será de 417.285,12 US\$ (cenário CMA) e 1.017.980,71 US\$, no período de 2021 a 2051. Já para o cenário conservacionista, o valor presente líquido no período de 2021 a 2033 será equivalente a 636.682,03 US\$, e no período de 2021 a 2051, o valor presente líquido atinge o ápice de 1.233.938,14 US\$.

De acordo com os resultados aqui apresentados, surgem algumas indagações em relação à expansão da silvicultura de eucalipto mais conhecida como “floresta plantada” que são evidenciadas como importantes quando analisado o serviço ecossistêmico de estoque e o sequestro de carbono.

Porém, devemos considerar a visão sistêmica, por isso trabalhou-se o conceito de serviços ecossistêmicos e por mais que a silvicultura sequestre o carbono da atmosfera, devemos considerar as relações dentro do ecossistema. A monocultura de eucalipto não favorece essas trocas e relações ecossistêmicas, visto que é uma “floresta plantada” por uma espécie exótica. Assim, defendemos a importância do reflorestamento com vegetação nativa do cerrado com sua diversidade de fisionomias, pois nela sim, é possível equilibrar o ecossistema considerando a fauna, flora, microclima e os recursos hídricos.

Essa tese sanou os questionamentos abrangidos na hipótese, porém a pesquisa é contínua e algumas reflexões são necessárias.

Apesar das mudanças climáticas estarem afetando os ecossistemas em escala mundial, o que podemos fazer na escala local, na escala de bacia hidrográfica para reverter esse quadro

catastrófico? As florestas plantadas não são alternativas viáveis considerando a visão sistêmica! Qual o futuro do Planeta Terra se continuarmos nessa tendência atual de exploração de recursos naturais? Qual a solução para mitigar os impactos advindas das atividades humanas sob os ecossistemas?

Alguns pesquisadores do paradigma sustentável de proteção florestal, afirmam que a solução é simples, é aplicar as técnicas conservacionistas! É seguir a predição da modelagem de um cenário conservacionista que considere a proteção florestal. Entretanto, essa questão é uma reflexão sobre o modo de produção! Para onde vamos com esse modo de produção capitalista? Como enfatizado na epígrafe dessa tese: *“Só quando a última árvore for derrubada, o último peixe for morto e o último rio for poluído é que o homem perceberá que não pode comer dinheiro”* (Provérbios Indígena). Assim, devemos repensar o sistema de produção, consumo e acumulação capitalista!

A solução está no solo que tem a capacidade de apreender imensas quantidades de gases do efeito estufa e assim equilibrar o clima e reabastecer o sistema de suprimento de água e alimentar. Portanto, salvar e proteger o solo é salvar a espécie humana! É na microescala, na escala da bacia hidrográfica que poderá ser possível implementar as técnicas conservacionistas e equilibrar as atividades nos ecossistemas. Com o solo saudável tem-se planta saudável, animal saudável, humano saudável, água saudável e, por conseguinte, um clima saudável!

Para tanto, a união dos atores da sociedade é fundamental, especialmente, com incentivos aos proprietários rurais para entender o funcionamento do solo e de como cultivar com a natureza. Deve-se cuidar do solo e plantar sementes, reduzindo a utilização de insumos, e assim teremos um ecossistema equilibrado dentro da bacia hidrográfica. Por meio dessas técnicas, juntamente com os mecanismos de programas de pagamentos por serviços ambientais, os proprietários/produtores rurais ganharão mais em termos financeiros.

Os esforços na presente tese consistiram em elaborar a modelagem preditiva para o ano de 2033 e 2051 no cenário CMA e de PF, e estimar a valoração do sequestro de carbono conforme o tipo de uso e cobertura, a fim de criar incentivos para um equilíbrio dinâmico na bacia hidrográfica. Certamente, o conceito de serviços ecossistêmicos é uma das maneiras de compreender essa relação de como as necessidades humanas interagem com a quantidade e qualidade de recursos naturais disponíveis em determinada bacia hidrográfica.

Espera-se com essa pesquisa contribuir para a geografia brasileira, especialmente na questão de metodologias aplicáveis na temática de SE, de forma a facilitar um cenário futuro de sustentabilidade, visando equilíbrio entre as atividades econômicas e a manutenção dos recursos

naturais e, conseqüentemente, a oferta de serviços ecossistêmicos, para que o Estado de Mato Grosso do Sul, e principalmente, o Brasil atinja as metas para um desenvolvimento sustentável com o carbono neutro e preservando os recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

ACORDO DE PARIS. **Ministério do Meio Ambiente**. Brasília, 2015. Disponível em: [www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/Acordo\\_Paris.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/Acordo_Paris.pdf). Acesso em 21. abr. 2017.

ADHIKARI S, SOUTHWORTH J. **Simulating Forest Cover Changes of Bannerghatta National Park Based on a CA-Markov Model: A Remote Sensing Approach**. *Remote Sensing*. 2012; 4(10):3215-3243. <https://doi.org/10.3390/rs4103215>

ADUAN, R.E. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres – o caso do cerrado brasileiro**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. 30p.

ALMEIDA, L.F. R. de; BROCH, S. A. O.; SOBRINHO, T.A. **A Gestão De Recursos Hídricos De Mato Grosso Do Sul**. XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços.

ALTMANN, A.; STANTON, M. S. **The densification normative of the ecosystem services concept in Brazil: Analyses from legislation and jurisprudence**. *Ecosystem Services*, V. 29, Part B, 2018, 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.10.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041617306903>. Acesso em: 13 jun. 2022.

ALVARES, C.A. *et al.*: **Koppen’s climate classification map for Brazil**. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 22, No. 6, 711–728 (published online January 2014). Disponível em: [https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen\\_s\\_climate\\_classification\\_map\\_for\\_Brazil?af=crossref](https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref) >. Acesso em: 13 jun. 2022.

ANDERSON, J. R. *et al.* **A land use and land cover classification system for use with remote sensor data**. Geological Survey Professional Paper 964. Washington: USGS, 1976. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp964>. Acesso em: 27 jun. 2022.

ANDRADE, D. C. *et al.* **Dinâmica do uso do solo e valoração de serviços ecossistêmicos: notas de orientação para políticas ambientais**. *Desenvolvimento e Meio ambiente*, n. 25, p. 53-71, jan. /jun. 2012. Editora UFPR.

AZEVEDO, Laízy de Santana *Et. al.* **Análise de mudanças na cobertura vegetal do Pará utilizando o Google Earth Engine**. *The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC*, Vol. 07 N. 01 (2021) journal homepage: <https://periodicos.ufv.br/ojs/jcec>

BACANI, V. M. **Sensoriamento Remoto aplicado à Análise evolutiva do Uso e ocupação do Solo no Pantanal da Nheconandia (MS): o exemplo da fazenda firme**. Aquidauana, 2007. Dissertação.

BACANI, V. M. **Geotecnologias aplicadas ao ordenamento físico-territorial da bacia do alto rio Coxim, MS**. 2010. Tese (Doutorado em Geografia Física). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BACANI, V. M.; VICK, E. P. **Future Scenario Prediction using Cellular Automata and Markov chains in expansion area of forestry over Brazilian Cerrado**. Mercator, Fortaleza, V. 18, oct. 2019. ISSN 1984-2201. Disponível em: [HTTP://WWW.MERCATOR.UFC.BR/MERCATOR/ARTICLE/VIEW/E18026](http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/E18026). Acesso em: 13 june 2021. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.4215/RM2019.E18026](https://doi.org/10.4215/RM2019.E18026).

BRASIL. **Decreto Federal n. ° 24.643, de 10 de julho de 1934**. Decreta o Código de Águas. Rio de Janeiro: Casa Civil da Presidência da República, 1934. Disponível em: <http://www.semharh.df.gov.br/sites/100/162/00000055.pdf>

BRASIL. **Lei Federal n. ° 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da Constituição Federal e altera o artigo 1.º da Lei Federal n. ° 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei Federal n. ° 7.990, 28 de dezembro de 1989. Brasília: MMA, 1997. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/srh/politica/legislacao/lei9433.html>.

BRASIL. **Áreas Prioritárias para Conservação, Uso Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira: Atualização - Portaria MMA nº9, de 23 de janeiro de 2007**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Brasília, 2007.

BRASIL. **Lei N. ° 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Disponível em: <http://www2.camara.gov.br/legin/fed/lei/2012/lei-12651-25-maio-2012-613076-publicacaooriginal-136199-pl.html>. > Acesso em 05 jan. 2015.

BRASIL. **LEI Nº 14.119, DE 13 DE JANEIRO DE 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nos 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.119-de-13-de-janeiro-de-2021-298899394>>. Acesso em: 05 abr. 2021.

BRASIL. **LEI Nº 14.653, DE 23 DE AGOSTO DE 2023**. Altera as Leis n. ° 12.651, de 25 de maio de 2012, e 14.119, de 13 de janeiro de 2021, para disciplinar a intervenção e a implantação de instalações necessárias à recuperação e à proteção de nascentes. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2023-2026/2023/Lei/L14653.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Lei/L14653.htm). Acesso em: 28 ago. 2023.

Altera as Leis n. ° 12.651, de 25 de maio de 2012, e 14.119, de 13 de janeiro de 2021, para disciplinar a intervenção e a implantação de instalações necessárias à recuperação e à proteção de nascentes.

BRASIL. **Zoneamento Ecológico-Econômico: diretrizes metodológicas**. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/portalezee/2016/12/BRASILDiretrizes-Metodologicas-ZEE-Brasil.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2022.

BREIMAN, L. **Bagging predictors**. Mach Learn 24, 123–140 (1996). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00058655>. Acesso em: 13 jun. 2022.

BREIMAN, L. **Random forests**. Machine Learning, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. Disponível

em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324>. Acesso em: 13 jun. 2022.

BOLSON, S. H.; ARAÚJO, S. F. de. As Metas Brasileiras ao Acordo de Paris sobre as Mudanças Climáticas e o Desmatamento Ilegal no Bioma Cerrado: a Omissão do Estado Brasileiro. **RELPE: Revista Leituras em Pedagogia e Educação**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 144–158, 2022. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/relpe/article/view/14502>. Acesso em: 9 set. 2023.

CALHEIROS, R. de O. *et al.* **Preservação e Recuperação das nascentes**. Piracicaba: Comitê de Bacias Hidrográficas dos Rios PCJ-CTRN, 2004.

CARDOSO, J.C. *et al.* **Avaliação das variáveis e disponibilidade de informações do modelo de estoque de carbono do aplicativo INVEST**. Embrapa Florestas, 2012.

CARVALHO, João L. Nunes. **Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil**. Revista brasileira Ci. Solo, 34:277-289, 2010.

CARVALHO, W. d. S.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; SANTOS T. L. **Uso e cobertura do solo utilizando a Plataforma Google Earth Engine (GEE): Estudo de caso em uma Unidade de Conservação**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.2, p.15280-15300, 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/24622/19673>. Acesso em: 29 jun. 2022.

CEPF. **Critical Ecosystem Partnership Fund**. Disponível em: <https://www.cepf.net/sites/default/files/cepf-cerrado-ecosystemprofilessummary-pr.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2022.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. **Agricultura e aquecimento global**. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 1, p. 40-44, 2007. Tradução. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001651528>. Acesso em: 30 jun. 2022.

CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; CERRI, C. E. P.; LAL, R. Challenges and Opportunities of Soil Carbon Sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, E. **Carbon Sequestration in Soils of Latin America**. Haworth Press, 2006, p. 41-48.

CHAPLIN-KRAMER, R. *et al.* **Spatial patterns of agricultural expansion determine impacts on biodiversity and carbon storage**. Proceedings of the National Academy of Sciences Jun 2015, 112 (24) 7402-7407; DOI: 10.1073/pnas.1406485112. Acesso em: 13 jun. 2022.

CHO, D. F.; SCHWAIDA, S. F.; CICERELLI, R. E.; ALMEIDA, T.; RAMOS, A. P. M.; SANO, E. E. **Desempenho do Algoritmo de Classificação de Imagens Random Forest para Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo no Cerrado Brasileiro**. Anuário do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. v. 44, 37979, 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2021\\_44\\_37979](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_37979). Acesso em: 29 jun. 2022.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª Edição. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. 150p.

CHRISTOFOLETTI, A. Impactos no meio ambiente ocasionados pela urbanização no mundo tropical. In: SOUZA, M. A. A. (Org.). **Natureza e Sociedade Hoje: uma leitura geográfica**. 3ª Edição. São Paulo: HUCITEC-ANPUR, 1997.

CHRISTOFOLETTI, A. Aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos projetos de planejamento. In: GUERRA, A.J.T. *et al.* (Org.) **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 9ª ed. 2009, p. 415-437.

CICES. **CICES Version 5.1 now available**. Disponível em: <https://cices.eu/> Acesso em: 01 set. 2023.

CONGALTON, Russel G. **A review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data**. Remote Sensing Environment. V.37, N.1, p.35-46, 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003442579190048B>. Acesso em: 20 mai. 2021.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **RESOLUÇÃO Nº 357**, de 17 de março de 2005. Alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/2011. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 13 jun. 2022.

CORFIELD, R. O ciclo do Carbono. In: COCKELL, C. [org.]. **A introduction to the Earth-Life system**. Tradução Silva Helena Gonçalves. Sistema Terra-Vida, uma introdução. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

COSTANZA, R.; FOLKE, C. Valuing ecosystem services with efficiency, fairness and sustainability as goals. **Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems**, p. 49-70, 1997. Disponível em: [http://www.robertcostanza.com/wp-content/uploads/2017/02/1997CCostanza\\_Folke\\_C4inDaily.pdf](http://www.robertcostanza.com/wp-content/uploads/2017/02/1997CCostanza_Folke_C4inDaily.pdf). Acesso em: 13 jun. 2022.

COSTANZA, R., d'Arge, R., de GROOT, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature** 387, 253–260 (1997). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/387253a0>. Acesso em: 13 jun. 2022.

COSTANZA, R. *et al.* **Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?** Ecosystem Services, Volume 28, Part A, 2017, pg. 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041617304060>. Acesso em: 25 jul. 2022.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa de domínios e subdomínios hidrogeológicos do Brasil**, Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Disponível em: <http://cprm.gov.br/publique/Acesso-a-Informacao/Relatorio-Anual---2008-1258.html>. Acesso em: 27 mai. 2022.

CPRM (2012) **Relatório Diagnóstico Sistema Aquífero Bauru-Caiuá nos Estado de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná - Bacia Sedimentar do Paraná**. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, CPRM. Belo Horizonte, Vol. 14, 40p.

CREMON, Édipo H.; BETTIOL, G. M.; JUNIOR, J. P. M.; MACEDO, F. C.; RABELO, M. W. de O. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 74, n. 3, p. 536–546, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n3-60846. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/60846>. Acesso em: 05 out. 2023.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas, SP: IG/Unicamp, 1992. 170 p.

CUNHA, Elias Rodrigues da *et al.* Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic forest ecotone of Brazil. **Land Use Policy**, v. 101, p. 105141, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837720303288>. Acesso em: 01 out. 2023.

DAVID, D. **Random Forest Classifier Tutorial: How to Use Tree-Based Algorithms for Machine Learning**. August 6, 2020. Disponível em: <https://www.freecodecamp.org/news/how-to-use-the-tree-based-algorithm-for-machine-learning/>. Acesso em: 28 jun. 2022.

DE ARAUJO BARBOSA, Caio C.; ATKINSON, Peter M.; DEARING, John A. Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. **Ecological Indicators**, v. 52, p. 430-443, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.01.007>.

DE OLIVEIRA, O. C. *et al.* Chemical and biological indicators of decline/degradation of Brachiaria pastures in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 103, n. 2, p. 289-300, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.004>

MIRANDA, S. do C. *et al.* Regional variations in biomass distribution in Brazilian savanna woodland. **Biotropica**, v. 46, n. 2, p. 125-138, 2014. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/983456>

DIBIESO, Eduardo Pizzolim. **Planejamento ambiental e gestão dos recursos hídricos: estudo aplicado à bacia hidrográfica do manancial do alto curso do Rio Santo Anastácio/SP**. Presidente Prudente: [s.n.], 2013. Xviii, 283 f.: il.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Espécies Arbóreas Brasileiras: Clima**. 2016. Disponível em: <http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>. Acesso em: 13 jun. 2022.

EMBRAPA. Humberto Gonçalves dos SANTOS [*et al.*]. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)**. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 356 p.: il. Color.

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS** Professional GIS for the desktop, version 10.6. Software. 2020.

ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL. **DECRETO Nº 15.798, DE 3 DE NOVEMBRO DE 2021**. Regulamenta o Registro Público Voluntário de Emissões Anuais de Gases de Efeito Estufa e a Comunicação Estadual, previstos na Política Estadual de Mudanças Climáticas, previstos na **Lei Estadual nº 4.555, de 15 de julho de 2014**, e dá outras providências. Diário Oficial nº 10.671, de 4 de novembro de 2021.

ESTRABIS, Nayara Vasconcelos; MARCATO JUNIOR, José; PISTORI, Hemerson. **Mapeamento da Vegetação Nativa do Cerrado na Região de Três Lagoas-MS com o Google Earth Engine**. Rev. Bras. Cartogr., vol. 71, n. 3, julho/setembro, 2019.

FAGUNDES, M. B. B.; GIANETTI, G. W.; OLIVEIRA, D. V. de; DIAS, D. T.; SILVA, L. C. da. Desenvolvimento econômico do estado de Mato Grosso do Sul: Uma análise da composição da balança comercial. **Desenvolvimento em Questão**, [S. l.], v. 15, n. 39, p. 112–140, 2017. DOI: 10.21527/2237-6453.2017.39.112-140. Disponível em: <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/5508>. Acesso em: 9 ago. 2023.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Soils for nutrition: state of the art**. Rome, 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0900en>

FARLEY, J.; COSTANZA, R. Payments for ecosystem services: From local to global. **Ecological Economics**, v. 69, n. 11, p. 2060–2068, 2010.

FAUSTINO, J. **Planificación y gestión de manejo de cuencas**. Turrialba: CATIE, 1996. 90p. Disponível em: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2239>. Acesso em: 10 ago. 2023.

SILVA L. F. DA; BACANI, V.M. **Deteção de mudanças e modelagem preditiva do uso da terra e da cobertura vegetal do Pantanal de Aquidauana-MS**. Geosp – Espaço e Tempo (Online), v.22, n.2, p.437-456. 2018.

FERNANDES; M. M. **Valoração dos serviços ambientais da floresta de Mata Atlântica na qualidade e quantidade de água na Apa do Sana**. 2009. 115 f.: il. Tese. UFRJ.

FERNANDES, A. L.V. **As transformações da paisagem nas bacias hidrográficas influenciadas pelo complexo celulósico: Três Lagoas e Selvíria, MS**. 2013. Dissertação de Mestrado.

FERNANDES, André Luís Valverde. **A expansão da silvicultura de eucalipto e a consolidação do complexo celulósico-papeleiro no nordeste sul-mato-grossense (1988-2018)**. 2020. Tese. UNESP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/ab8389a7-78eb-4abc-a5b6-9d16954f7a13>. Acesso em: 10 ago. 2023.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2009. 4 p. (Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico, 69). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/792567/1/COT69.pdf>. Acesso em: 1

Jul. 2022.

FERRARO, P. J. The Future of Payments for Environmental Services. **Conservation Biology**, v. 25, n. 6, p. 1134–1138, 2011.

FERRAZ, R. P. D. *et al.* Marco referencial em serviços ecossistêmicos. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 160 p.: il. Color.  
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/200590/1/Servicos-ecossistemicos-uma-abordagem-conceitual-cap-1-2019.pdf>

FIDALGO, E.C.C. *et al.* **Estoque de carbono nos solos do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. Disponível em: [Acesso em: 4 nov. 2022.](#)

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

FUNK, C., PETERSON, P., LANDSFELD, M. *et al.* **The climate hazards infrared precipitation with stations** - a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/sdata201566>. Acesso em: 27 ago. 2022.

FU, Jie *et al.* Spatio-Temporal changes in ecosystem service value and its coordinated development with economy: A case study in Hainan province, China. **Remote Sensing**, v. 14, n. 4, p. 970, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/4/970>

FÜRST, C.; OPDAM, P.; INOSTROZA, L.; LUQUE, S. **Evaluating the role of ecosystem services in participatory land use planning**: proposing a balanced score card. *Landscape Ecology*, v.29, n.1, p.1435–1446, 2014.

GENARO; V. **Fragilidade Ambiental dos Serviços Ecossistêmicos de Suporte e Provisão no Município de Teodoro Sampaio – SP**: no Pontal do Paranapanema: mapeamento e diagnóstico das prioridades de conservação. 145 f. Tese – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

GLEHN; H. C. von *et al.* **O Projeto Mina D'água em São Paulo, Brasil**. Latin America and Caribbean Sustainable Development Department World Bank Washington DC, USA, 2012. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/276974344\\_O\\_Projeto\\_Mina\\_d'Agua\\_em\\_Sao\\_Paulo\\_Brasil](https://www.researchgate.net/publication/276974344_O_Projeto_Mina_d'Agua_em_Sao_Paulo_Brasil). Acesso em: 25 jun. 2022.

GONÇALVES, Aline Kuramoto. **Pagamento por serviços ambientais como instrumento de gestão ambiental dos recursos hídricos**: o projeto Mina D'Água na bacia do córrego do Palmitalzinho - São Paulo – Brasil. Presidente Prudente, 2013. 144 f.: il.

GONG, W.; YUAN, L.; FAN, W.; STOTT, P. Analysis and simulation of land use spatial pattern in Harbin prefecture based on trajectories and cellular automata – Markov modelling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243414001640>. Acesso em: 25

jun. 2022.

GORELICK, Noel *et al.* **Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone.** ScienceDirect, [S. l.], v. 202, 1 dez. 2017. Sensoriamento Remoto do Ambiente, p. 18-27. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900?via%3Dihub>. Acesso em: 29 jun. 2022.

GU, C.; Zhang, Y.; LIU, L.; LI, L.; LI, S.; ZHANG, B.; Cui, B.; Rai, M.K. **Qualifying Land Use and Land Cover Dynamics and Their Impacts on Ecosystem Service in Central Himalaya Transboundary Landscape Based on Google Earth Engine.** Land 2021, 10, 173. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land10020173>>. Acesso em: 9 mar. 21.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente.** 3ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. 375p. *Capítulo 7 – Degradação Ambiental.*

GUGLIELMELI, Aline Claro de Oliveira. **Modelagem do controle da erosão como suporte à identificação de áreas provedoras de serviços ambientais:** estudo de caso na área de proteção ambiental municipal do rio Uberaba - Uberaba, MG, 2017. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2017.

GUIJARRO, F.; TSINASLANIDIS, P. Analysis of the Academic Literature on Environmental Valuation. **Int J Environ Res Public Health.** 2020 Mar 31;17(7):2386. Doi: 10.3390/ijerph17072386.

HACKBART, V.C.S. **Serviços ecossistêmicos hídricos em paisagens florestais fragmentadas: um caminho para a conservação da Mata Atlântica.** 2016. 130f. Tese (Doutorado) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN, M. B. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1: guidance on the application of the revised structure. Nottingham: Fabis Consulting, 2017. Disponível em: <[https://seea.un.org/sites/seea.un.org/files/lg23\\_cices\\_v5.1\\_final\\_revised\\_guidance\\_03-10-2017.pdf](https://seea.un.org/sites/seea.un.org/files/lg23_cices_v5.1_final_revised_guidance_03-10-2017.pdf)>. Acesso em: 01 set.2023.

HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN, M. B. Revision of the Common International Classification for Ecosystem Services (CICES V5.1): a policy brief. *One Ecosystem* 3, article e27108, 2018. DOI: 10.3897/oneeco.3.e27108.

HIPÓLITO, J. *et al.* **Uso do Programa InVEST para a avaliação e valoração de serviços Ecossistêmicos em áreas protegidas pela Vale / Juliana Hipólito; Bruna dos Santos Bandeira Sousa; Tereza Cristina Gianinni – Belém: ITV, 2017. 48 p.: il.**

HOMMA, A. K. O. Amazônia: venda de serviços ambientais ou de atividades produtivas? **Revista Terceira Margem Amazônia.** v. 6, n. especial 16, p. 23-34, 2021. Disponível em: < DOI:<http://dx.doi.org/10.36882/2525-4812.2021v6i16.ed.esp.p23-34>>. Acesso em: 5 jan. 21.

IBGE, **Dados Demográficos dos Municípios Brasileiros**, 2000 e 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.com.br>>. Acesso em 15 set 2014.

IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos ambientais. **Manual Técnico de Pedologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 323p.: il.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Uso Da Terra**. Rio de Janeiro, 2013.

IMASUL. **Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul**. SISLA. Sistema Interativo de Suporte ao Licenciamento Ambiental. Disponível em <[http://sisla.imasul.ms.gov.br/sisla/pagina\\_inicial2.php](http://sisla.imasul.ms.gov.br/sisla/pagina_inicial2.php)>. Acesso em: 10 jun. 2021.

INCRA. **INCRA nos Estados**: informações gerais sobre os assentamentos da Reforma Agrária. Disponível em: <<http://painel.incra.gov.br/sistemas/index.php>>. Acesso em: 10 jun. 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)** Clim Chang 2014 Mitig Clim Chang. 2015; 811–922. 10.1017/cbo9781107415416.017.

INVEST. MANUAL. **Carbon Storage and Sequestration**. Disponível em: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/carbonstorage.html#the-model>. Acesso em: 13 jun. 2022.

IPCC (2006) **Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa**, elaboradas pelo Programa Nacional de Inventários de Gases de Efeito Estufa. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds) IGES, Japão. Disponível em: Return to ref 2006 in article. Acesso em: 5 ago. 2022.

IPCC (2019). Intergovernmental Panel on Climate Change. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Publicações - IPCC-TFI Calvo Buendia E, Tanabe K, Kranjc A, Baasansuren J, Fukuda M, Ngarize S, Osako A, Pyrozhenko Y, Shermanau P, Federici S (eds), IPCC, Suíça ([iges.or.jp](http://iges.or.jp)). Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>. Acesso em: 10 jun. 2022.

IVASKO JÚNIOR, S. **Classificação Do Estado De Mato Grosso Do Sul Segundo Sistema De Zonas De Vida De Holdridge**. Revista Brasileira de Climatologia. Revista Brasileira de Climatologia. Ano 16 –Vol. 26–JAN/JUN 2020. Disponível em: <<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14234/7460>>. Acesso em: 13 jun. 2022.

IVERSON, L., ECHEVERRIA, C., NAHUELHUAL, L. et al. Ecosystem services in changing landscapes: An introduction. **Landscape Ecol** 29, 181–186 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10980-014-9993-2>

JIANG, Wei *et al.* Assessing Temporal Trade-Offs of Ecosystem Services by Production Possibility Frontiers. *Remote Sensing*, v. 15, n. 3, p. 749, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15030749>

KERDAN, I.G., GIAROLA, S., JALIL-VEGA, F. *et al.* Carbon Sequestration Potential from Large-Scale Reforestation and Sugarcane Expansion on Abandoned Agricultural Lands in Brazil. *Polytechnica* 2, 9–25 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41050-019-00012-3>

KUNTSCHIK, D. P.; EDUARTE, M.; UEHARA, T. H. K. **Matas ciliares**. Secretaria do meio ambiente (SMA). São Paulo. 1ª Ed. Atualizada em 2011. (7 Caderno de Educação ambiental). Coordenadoria de biodiversidade e recursos naturais.

LACERDA, M. S. **Plantio de eucalipto e o serviço ecossistêmico de captura e armazenamento de carbono**. 2022. 59 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. **The measurement of observer agreement for categorical data**. International Biometric Society, Washington, v.33, p. 159-174, 1977. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2529310>. Acesso em: 05 jul. 2022. Doi: <https://doi.org/10.2307/2529310>

LEAL, A. C. **Meio ambiente e urbanização na microbacia do Areia Branca**. Campinas, São Paulo. 1995. 154 p. Dissertação de Mestrado em Geociências e Meio ambiente. Rio Claro: IGCE – Campus de Rio Claro.

LEAL, A. C. **Gestão das águas no Pontal do Paranapanema**. São Paulo. Campinas, 2000. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências – UNICAMP, 2000.

LIANG, X. *et al.* **Patch-generating Land Use Simulation model V1.25 (PLUS) Use's Manual**. School of Geography and Information Engineering, Chuna University of Geosciences, Wuhan, China, 2022.

LIMA, S.F.; ÁGUAS, T.A.; COSTA, K.C.P. **Uso De Geotecnologias Para Análise Ambiental Da Bacia Hidrográfica Do Córrego Santa Fé**. Revista XI Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 11, n. 5, 2015, pp. 64-78.

LIMA, W. de P., ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de Matas Ciliares, *in* **Matas Ciliares Conservação e Recuperação** / (org.) RODRIGUES, R. R. & LEITÃO FILHO, H. de F. – 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, FAPESP, p. 91 – 99, 2009.

MACHADO, P. L. O. de A. **Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global**. Revista: Quím. Nova 28 (2), 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/CB6Dn3MwxgLYNcdmwjYmvZF/?lang=pt#>. Acesso em: 13 jun. 2022.

MARÇAL, D. *et al.* **Urban and peri-urban agriculture in Goiania: The search for solutions to adapt cities in the context of global climate change**. Urban Climate, v. 35, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020>. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/bitstream/ri/20757/7/Artigo%20-%20D%C3%A9bora%20Ra%C3%ADssa%20Mar%C3%A7al%20-%202021.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2022.

MATEO RODRIGUEZ, J. M. **Planejamento Ambiental como campo de ação da**

**Geografia.** In: CONGRESSO DE GEÓGRAFOS, 5, 1994, Curitiba/PR. Anais. Curitiba: AGB, 1994. v.1, p.582-94.

MATEO RODRIGUEZ, J.M. **Planificación Ambiental.** La Habana, Editorial Félix Varela, 2008.

MATO GROSSO DO SUL **Plano estadual de recursos hídricos de Mato Grosso do Sul.** Campo Grande, MS: Editora UEMS, 2010.194p.

MEDEIROS, A. dos S. Influência do Uso da Terra sobre a Matéria Orgânica do Solo e o Estoque de Carbono, Parque Nacional do Itatiaia – RJ / Pinheiral, 2019. 243 f.: il. <https://tede.ufrj.br/jspui/bitstream/jspui/5656/2/2019%20-%20Alexandre%20dos%20Santos%20Medeiros.pdf>

MENDONÇA, F. **Geografia física: ciência humana?** 3. ed. Contexto, 1992.  
MOREIRA, M. A. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. UFV, 2007.

MIKŠA, K.; KALINAUSKAS, M., INÁCIO, M.; GOMES, E.; PEREIRA, P.  
**Ecosystem services and legal protection of private property. Problem or solution?** Geography and Sustainability, Volume 1, Issue 3, pg.173-180, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666683920300390>. Acesso em: 28 jun. 2022.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MEA. 2005. **Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis.** Washington, Island Press, 137p.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI) **3ª Comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima. Disponível em:** [https://repositorio.mctic.gov.br/bitstream/mctic/4312/4/2016\\_terceira\\_comunicacao\\_nacional\\_brasil\\_convencao\\_quadro\\_nacoes\\_unidas\\_sobre\\_mudanca\\_clima\\_v3.pdf](https://repositorio.mctic.gov.br/bitstream/mctic/4312/4/2016_terceira_comunicacao_nacional_brasil_convencao_quadro_nacoes_unidas_sobre_mudanca_clima_v3.pdf) (2016), Acessado em 5 ago. 2022.

MONTGOMERY, DR.; BIKLÉ, A; ARCHULETA, R.; BROWN, P.; JORDAN, J. 2022. **Soil health and nutrient density: preliminary comparison of regenerative and conventional farming.** PeerJ 10:e12848 <https://doi.org/10.7717/peerj.12848>

MOTA, S. **Preservação e Conservação de Recursos Hídricos.** 2ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 200p.

MOTA, S. **Urbanização e meio ambiente.** Rio de Janeiro: ABES, 2003. 3ª Edição. 356 p.

MORAIS *et al.* (2017) **Spatial distribution of the litter carbon stock in the Cerrado biome in Minas Gerais state, Brazil** <https://doi.org/10.1590/1413-70542017415006917>

OGASSAVARA, Renata Cristine. **Valoração Econômica Ambiental.** Boletim de Responsabilidade Social e Ambiental do Sistema Financeiro. Banco Central do Brasil. Ano, v. 3, 2008.

OLIVEIRA, G. A. de; SILVA, L. F. da; AGOSTINHO P. R.; [et al.]. **Valoração econômica de sequestro de carbono em sistemas agroflorestais biodiversos no bioma cerrado**. In: Agroecologia: métodos e técnicas para uma agricultura sustentável. V. 5, p. 356 – 366, 2021. Disponível em: <https://www.editoracientifica.org/articles/code/210504459>. Acesso em: 30 jun. 2022.

OSCAR JÚNIOR, A.C.; CAVALCANTE, R.T.; RUHBERG, K.I. **Quanto a geografia brasileira fala sobre serviços ecossistêmicos?** Humboldt - Revista de Geografia Física e Meio Ambiente, Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, e57363, 2021.

PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C.; TAFARELLO, D. Pagamentos por serviços ambientais. In: (Organização) PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C.; TAFARELLO, D. **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil**. São Paulo: SMA/CBRN, 2012.

PAGIOLA, Stefano; VON GLEHN, H. Carrascosa; TAFARELLO, Denise. **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil**. São Paulo: SMA/CBRN, v. 86494, p. 1-338, 2013.

PARANHOS FILHO, Antônio C. *et al.* **Geotecnologias para Aplicações Ambientais**. Maringá (PR): Uniedusul, 2021. <https://www.uniedusul.com.br/wp-content/uploads/2021/01/GEOTECNOLOGIAS-PARA-APLICACOES-AMBIENTAIS.pdf>

PARRON; Lucilia Maria *et al.* **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

PARRON; Lucilia Maria *et al.* **Avaliação de serviços ambientais no âmbito do projeto ServiAmbi**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap.2

PARRON; Lucilia Maria, GARCIA; Junior Ruiz. Serviços Ambientais: conceitos, classificação, indicadores e aspectos correlatos. Cap.1 In: PARRON; Lucilia Maria *et al.* **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

PEDROSA, B. M.; CÂMARA, G. Modelagem dinâmica: Conceitos básicos e exemplos de Sistemas. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Modelagem Ambiental e Modelos Dinâmicos de Uso e Cobertura do Solo**. Tutorial, XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap1\\_conceitos.pdf](http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap1_conceitos.pdf). Acesso em: 19 jun. 2022.

PEREIRA, A. O. **Caraterização do uso e ocupação do solo na área de influência do reservatório de Ilha Solteira**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira, 2006.

PEREIRA, P. **Ecosystem services in a changing environment**, Science of The Total Environment, Volume 702, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719350004>>. Acesso em:

28 jun. 2022.

PIROLI, E. L. **Introdução ao geoprocessamento**. Ourinhos: UNESP/Campus experimental de Ourinhos, 2010. 46p.

PIROLI, E. L. **Geoprocessamento Aplicado Ao Estudo Do Uso Da Terra Das Áreas De Preservação Permanente Dos Corpos D'Água Da Bacia Hidrográfica Do Rio Pardo**. Ourinhos – SP, 2013.

PIROLI, E. L. **Água e bacias hidrográficas: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas** [online]. São Paulo: Editora UNESP, 2022, 141 p. ISBN: 978-65-5714-298-1. <https://doi.org/10.7476/9786557142981>.

Projeto Capital Natural, 2023. **InVEST 3.12.1**. Universidade de Stanford, Universidade de Minnesota, Academia Chinesa de Ciências, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Centro de Resiliência de Estocolmo e Real Academia Sueca de Ciências. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

PROJETO DE MAPEAMENTO ANUAL DE COBERTURA E USO DO SOLO DO BRASIL - MAPBIOMAS (org.). **O projeto**: Origem. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://mapbiomas.org/o-projeto>. Acesso em: 28 jun. 2022

PROJETO MAPBIOMAS – **Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/>. Acesso em: 28 jun. 2022.

RACHWALL, Marcos Fernando *et al.* **Uso e manejo da terra e aspectos pedológicos na avaliação de serviços ambientais**. Cap.4. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

RODRÍGUEZ, C. R. M. **Estimativa do Potencial Sequestro de Carbono em Áreas de Preservação Permanente de Cursos d'água e Topos de Morros Mediante Reflorestamento com Espécies Nativas no Município de São Luiz do Paratinga**. São José dos Campos: INPE, 2015. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.20.21.31/doc/publicacao.pdf?metadatarpository=&mirror=iconet.com.br/banon/2006/11.26.21.31>. Acesso em: 27 jun. 2022.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 81-90, 2005.

ROSENDO, J. dos S.; ROSA, R. **Dinâmica Espaço-Temporal Do Estoque De Carbono Na Bacia Do Rio Araguari-Mg (1973 e 2009)**. Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, n.34, v.1, p.24-49, jan. /jul.2012

ROSS, J. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. São Paulo, Contexto, 2008, 8.ed., 84 p.

ROSS, J. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental**. São Paulo, Oficina de Textos, 2009, 207 p.

RUMPEL, Cornelia; *et al.* The role of soil carbon sequestration in enhancing human resilience in tackling global crises including pandemics, **Soil Security**, Volume 8, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100069>.

SAMBERGER, C. **The role of water circularity in the food-water-energy nexus and climate change mitigation**. *Energy Nexus*, Volume 6, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100061>>. Acesso em: 13 jun. 2022.

SAMPAIO, B. D. S. **Pagamento por Serviços Ambientais nas propriedades rurais do alto curso da bacia do Ribeirão Vai e Vem, município de Santo Anastácio (SP)**. Monografia de Bacharelado em Geografia. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente (SP): [s.n.], 2015. 144 f.:il. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/136164>>.

SAMPAIO, B. D. S. **Uso e cobertura da Terra e Qualidade da água na bacia hidrográfica do ribeirão Vai-e-Vem, município de Santo Anastácio, São Paulo, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente (SP): 118pg., 2018. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/191107>>. Acesso em: 13 jun. 2022.

SAMPAIO, B. D. S.; PINTO, A. L. Análise da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Córrego do Bebedouro, Mato Grosso do Sul. **Geografia em Atos (Online)**, [S. l.], v. 8, n. 15, p. 55–78, 2019. DOI: 10.35416/geoatos.v8i15.7007. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/geografiaematos/article/view/7007>. Acesso em: 5 nov. 2022.

SANDHU, H. *et al.* Scenario planning including ecosystem services for a coastal region in South Austrália. **Ecosystem Services** 31 (2018) 194–207. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041617304552?via%3Dihub>. Acesso em: 06 de jul. de 2023.

SANTOS, M. R. R.; RANIERI, V. E. L. **Crítérios Para Análise Do Zoneamento Ambiental Como Instrumento De Planejamento E Ordenamento Territorial**. *Revista Ambiente & Sociedade*. São Paulo v. XVI, n. 4 n p. 43-62 n out.-dez. 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v16n4/04.pdf>>. Acesso em: <21/06/19>.

SANTOS, R. F. dos. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia e Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. **Plano estadual de recursos hídricos de Mato Grosso do Sul**. Campo Grande, MS: Editora UEMS, 2010. 194p.

SHARP, R., *et al.* **Manual InVEST +VERSION+ User's Guide**. The Natural Capital Project, Stanford. 2016.

SHARP, R. *et al.* **InVEST Version 3.7.0 User's Guide: The Natural Capital Project**. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World

Wildlife Fund. 2018. Disponível em: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/>. Acesso em 30 de ago. de 2023.

SILVA, Cassio Roberto da (Ed.). **Geodiversidade do Brasil**: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 264 p.

SILVA, E. **Minimizando a Desinformação**: impactos ambientais dos empreendimentos florestais brasileiros. Relatório Técnico (Technical Report), 2022.

SILVA, I. M. B. **Fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do córrego Bebedouro (BHCB), Três Lagoas e Selvíria/MS, em 2019**. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas, 2020. 148 p. Disponível em: <<https://ppggeografiactl.ufms.br/files/2021/03/DISSERTA%C3%87%C3%83O-ISABELA.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

SILVA, J. S. V.; POTT, A.; ABDON, M. M.; POTT, V. J.; SANTOS, K. R. **Projeto GeoMS: cobertura vegetal e uso da terra do Estado de Mato Grosso do Sul**. Campinas: EMBRAPA Informática Agropecuária, 2011. 64 p.

SOUZA, Larisse Fernanda Pereira de *et al.* **Classificação de Uso e Cobertura da Terra em Áreas de Não Florestas do Sudeste Paraense através da Plataforma Google Earth Engine (GEE)**. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE, Santos – SP. 2019.

TANG, J. *et al.* Linking land-use change, landscape patterns, and ecosystem services in a coastal watershed of southeastern China. **Global Ecology and Conservation** 23 (2020). Disponível em: <<https://www.journals.elsevier.com/global-ecology-and-conservation>>. Acesso em: 5 abr. 21.

TERRA, M. C.N.S. *et al.* The inverted forest: Aboveground and notably large belowground carbon stocks and their drivers in Brazilian savannas, **Science of The Total Environment**, Volume 867, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722084248>>. Acesso em: 2 fev. 23.

TIAN, Lei *et al.* Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China. **Remote Sensing**, v. 14, n. 10, p. 2330, 2022.

TURNER, B.L. **Nature and Society in Geography**. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition), Elsevier, 2015, Pages 334-339. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.72036-8>>. Acesso em: 13 jun. 2022.

TURNER, R. K.; PAAVOLA, J.; COOPER, P.; FARBER, S.; JESSAMY, V., GEORGIU, S. Valuing nature: lessons learned and future research directions, **Ecological Economics**, Volume 46, Issue 3, 2003, Pages 493-510, ISSN 0921-8009, [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00189-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00189-7).

VARGAS, L., WILLEMEN, L. & HEIN, L. Assessing the Capacity of Ecosystems to Supply Ecosystem Services Using Remote Sensing and An Ecosystem Accounting Approach. **Environmental Management** 63, 1–15 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1110-x>

VASQUES, G.M. *et al.* **Soil Organic Carbon Stock Maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm Depth Intervals with 90 m Spatial Resolution**. Version 2021. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brazil.

VEZZANI, Fabiane Machado. Solos e os serviços ecossistêmicos (Soils and the Ecosystem Services). **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 8, p. 673-684, dez. 2015. ISSN 1984-2295. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233637/27226>>. Acesso em: 03 jul. 2022. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.0.p673-684>.

VICK, E. P. **Análise Multitemporal e Modelagem preditiva das mudanças no uso e cobertura vegetal na bacia hidrográfica do rio Pântano – MS**. Dissertação. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Três Lagoas – MS. 2019.

WANG, J.; ZHANG, J.; XIONG, N.; LIANG, B.; WANG, Z.; CRESSEY, E.L. Spatial and Temporal Variation, Simulation and Prediction of Land Use in Ecological Conservation Area of Western Beijing. **Remote Sens.** 2022, 14, 1452. <https://doi.org/10.3390/rs14061452>

YU, C. M. **Sequestro florestal de carbono no Brasil – Dimensões políticas socioeconômicas e ecológicas**. 2004. 279 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2004. Disponível em: [https://iieb.org.br/wp-content/uploads/2019/01/trab\\_tese\\_chang\\_sequestro\\_florestal.pdf](https://iieb.org.br/wp-content/uploads/2019/01/trab_tese_chang_sequestro_florestal.pdf). Acesso em: 30 jun. 2022.

## APÊNDICES

### A - APLICAÇÃO DO ALGORITMO *CLIMATE HAZARDS GOUP INFRARED PRECIPITATION WITCH SATATIONS – CHIRPS*

```

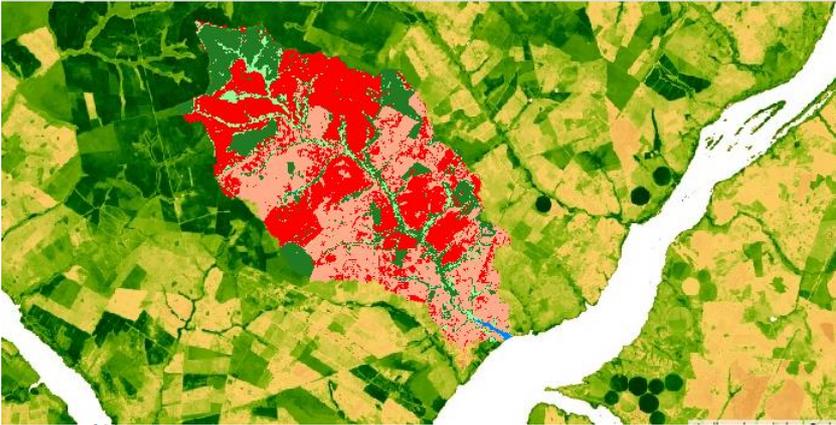
Pluviosidade_Chirps Get Link Save Run
Imports (1 entry)
  var Limite: Table users/bdssampaio/limite_bebedouro
1 var Limite = ee.FeatureCollection ('users/bdssampaio/limite_bebedouro');
2 Map.centerObject (Limite)
3 Map.setOptions ("hybrid")
4 Map.addLayer (Limite);
5
6 var ROI = ee.FeatureCollection ('users/bdssampaio/limite_bebedouro')
7
8 var ROIA = ee.FeatureCollection ('users/bdssampaio/limite_bebedouro')
9   .filter (ee.Filter.or(ee.Filter.eq('Feature Index', '0'),
10     ee.Filter.eq('Feature Index', '1'),
11     ee.Filter.eq('Feature Index', '2')))
12
13 //Desenhando o contorno
14 var empty = ee.Image().byte();
15 var contorno = empty.paint({
16   featureCollection: Limite,
17   color: 1,
18   width: 2
19 });
20
21 //Definição de intervalos de tempo e variáveis
22
23 var ano_inicial = 1983
24 var ano_final = 2021
25 var mes = ee.List.sequence(1, 12)
26 var intervalo = ee.List.sequence(ano_inicial,ano_final)
27 var inicio = ee.Date.fromYMD(ano_inicial, 1,1);
28 var fim = ee.Date.fromYMD(ano_final, 12, 31);
29
30 // Importar coleções
31
32 //Coleção CHIRPS
33 var CHIRPS = ee.ImageCollection("UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY")
34   .select('precipitation')
35   .filterDate(inicio,fim)
36   .filterBounds(Limite)
37
38 var CHIRPS_Anual = ee.ImageCollection.fromImages (
39   intervalo.map(function (ano) {
40     var annual = CHIRPS.filter(ee.Filter.calendarRange (ano, ano, 'year'))
41     .sum()
42     .clip(Limite)
43     .rename('Precipitação CHIRPS');
44     return annual
45     .set('year', ano)
46     .set('system:time_start', ee.Date.fromYMD(ano, 1, 1))
47   }));

```

```

class_2021_teste *
143
144
145 * Export.image.toDrive({
146   image: classe.toFloat(),
147   description: 'Classificacao_RF_2021_teste2fim',
148   folder:"GEE_engine",
149   scale: 30,
150   maxPixels: 1e9,
151   region:ROI
152
153
48
49   Map.addLayer(contorno, {palette: 'red'}, 'BHCB')
50 //Map.addLayer(contorno_2, {palette: 'black'}, 'Limites');
51
52 Map.centerObject (Limite);

```



## B - APLICAÇÃO DO ALGORITMO *RANDOM FOREST* NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO (MS)

```

class_2021_teste
Get Link Save Run Reset Apps
Imports (10 entries)
  var imageCollection: ImageCollection "USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 Raw Scenes" (1...
  var agua: FeatureCollection (61 elements)
  var vegetacao_ciliar: FeatureCollection (280 elements)
  var vegetacao_natural: FeatureCollection (142 elements)
  var pastagem: FeatureCollection (170 elements)
  var silvicultura: FeatureCollection (323 elements)
  var ROI: Table users/bdssampaio/limite_bebedouro
  var imageVisParam: B6, B5 and B4 from 88 to 4720
  var imageVisParam2: B6, B5 and B4 from 189.06 to 5039.94
  var imageVisParam3: B6, B5 and B4 from 189.06 to 5039.94
1 // preciso colocar a imagem landsat data 18/08/2021
2 //ID: LC08_L2SP_223074_20210818_20210827_02_T1
3 //Date Acquired: 2021/08/18
4 //Path: 223
5 //Row: 074
6
7

```



```

class_2021_teste
Get Link Save Run Reset Apps
8 //Load The Image
9 var image = ee.Image('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR/LC08_223074_20210818');
10 var ROI = ee.FeatureCollection("users/bdssampaio/limite_bebedouro");
11 // Define the visualization parameters.
12 var vizParams = {
13   bands: ['B6', 'B5', 'B4'],
14   min: 0,
15   max: 0.3,
16   gamma: [0.95, 1.1, 1]
17 };
18 Map.addLayer(image, vizParams);
19 Map.centerObject(ROI,9);
20
21
22
23 //Compute Normalized Difference Vegetation Index
24 // NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), where
25 // RED is sur_refl_b03, 620-670nm // NIR is sur_refl_b04, 841-876nm
26 //Load The Image
27 var image = ee.Image('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR/LC08_223074_20210818');
28 // Use the normalizedDifference(A, B) to compute (A - B) / (A + B)
29 var ndvi = image.normalizedDifference(['B5', 'B4']).rename('ndvi');
30 image = image.addBands(ndvi,['ndvi']);
31 // Make a palette: a list of hex strings.
32 var palette = ['FFFFFF', 'CE7E45', 'DF923D', 'F1B555', 'FCD163', '998718',
33   '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401', '056201',
34   '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301'];
35 // Center the map
36 Map.centerObject(ROI,10);
37 // Display the input image and the NDVI derived from it.
38 //Map.addLayer(image.select(['B3', 'B4']),
39 // {gain: [0.1, 0.1]});
40 Map.addLayer(image.select('ndvi'), {min: 0, max: 1, palette: palette}, 'NDVI');
41

```

```

class_2021_teste
Get Link Save Run Reset Apps
43
44 var img = ee.Image('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR/LC08_223074_20210818').clip(ROI);
45 var bandas = ['B4', 'B5', 'B6'];
46 Map.addLayer(img, {bands: 'B6,B5,B4'});
47
48
49
50 // Color palette for classes - RGB Hexadecimal:
51
52 //Cores corretas*
53 var pal_class = [
54   '007FFF', // 0 - Agua - Azul
55   '98FB98', // 1 - Vegetação Ciliar - Verde claro
56   '227B22', // 2 - Vegetação Natural - Verde
57   'FFAA88', // 3 - Pastagem - Salmão
58   'FF0000', // 4 - Silvicultura - Vermelho
59   //'000000', // 5 - Area Construida - Preto
60   ];
61
62
63 var amostra = vegetacao_natural.merge(agua).merge(pastagem).merge(silvicultura).merge(veg
64 Map.addLayer(img, {bands: 'B6,B5,B4'} );
65 Map.addLayer(amostra);
66 var bandas = ['B4', 'B5', 'B6'];
--

```

```

class_2021_teste
Get Link Save Run Reset Apps
70
71 // We define here the bands that contain spectral responses
72 var bandas = ['B1','B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'ndvi'];
73 // We extract the pixel values from the image to train the algorithms
74 var treinamento = image.sampleRegions({
75   collection: amostra,
76   properties: ['ID_Classe'],
77   scale: 30
78 });
79 // creates a column of random values between 0 and 1
80 var aleatorio = treinamento.randomColumn('random');
81 // defines the cutoff point: 70% for training and 30% for testing
82 var split = 0.7;
83 // Separates who is above or below the cutoff point
84 var treino = aleatorio.filter(ee.Filter.lt('random', split));
85 var teste = aleatorio.filter(ee.Filter.gte('random', split));
86 var classificador = ee.Classifier.smileRandomForest ({numberOfTrees: 350}).train({
87   features: treino,
88   classProperty: 'ID_Classe',
89   inputProperties:bandas
90 });
91
92 // We apply the classifier to the test data
93 var class_teste = teste.classify(classificador);
94 // We calculate the error and accuracy matrix
95 var confmat = class_teste.errorMatrix('ID_Classe','classification');
96 print('Matriz de Erro - RF1', confmat);
97 print('Acuracia - RF1', confmat.accuracy());
98 // We apply the classifier to the entire image
99
100
101 //Cortar - limite bacia
102 var classe = image.classify(classificador).clip(ROI);
103

```

```

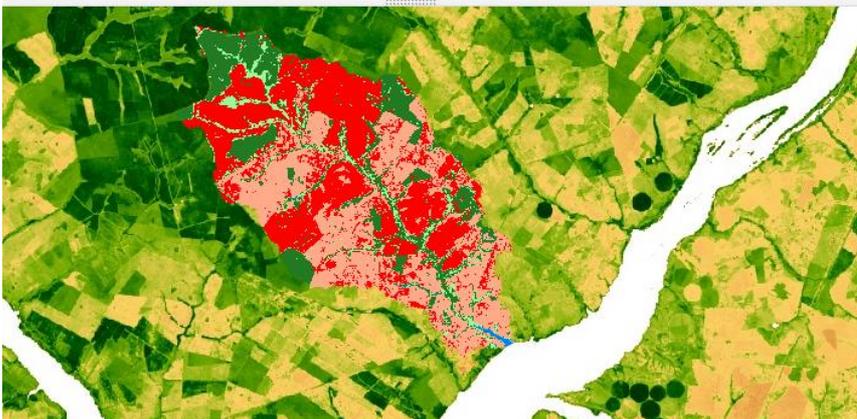
class_2021_teste
  Get Link Save Run Reset Apps
107 // Classification Result
108 Map.addLayer(classe, {palette: pal_class, min: 0, max: 4}, 'Classificacao_RF');
109
110
111 // Como Validar com o KAPPA*
112
113
114 //VALIDAÇÃO
115
116 var classificador = ee.Classifier.smileRandomForest(350).train(treino,'ID_Classe',bandas
117
118 var confMatrix = classificador.confusionMatrix()
119 var OA = confMatrix.accuracy();
120 var CA = confMatrix.consumersAccuracy();
121 var Kappa = confMatrix.kappa();
122 var Order = confMatrix.order();
123 var PA = confMatrix.producersAccuracy();
124
125 print(confMatrix,'Confusion Matrix');
126 print(OA,'Overall Accuracy');
127 print(CA,'Consumers Accuracy');
128 print(Kappa,'Kappa');
129 print(Order,'Order');
130 print(PA,'Producers Accuracy');
131
132
133
134 //Filter the Classification Results
135 //var geet = require('users/elacerda/geet:geet');
136 //var majority = geet.majority(classe, 1);
137 //Map.addLayer(majority, {palette: pal_class, min: 0, max: 4}, 'Classificacao_RF_2020');
138
139
140
141
142
143
144
145 Export.image.toDrive({
146   image: classe.toFloat(),
147   description: 'Classificacao_RF_2021_teste2fim',
148   folder: "GEE_engine",
149   scale: 30,
150   maxPixels: 1e9,
151   region:ROI
152
153 });
154

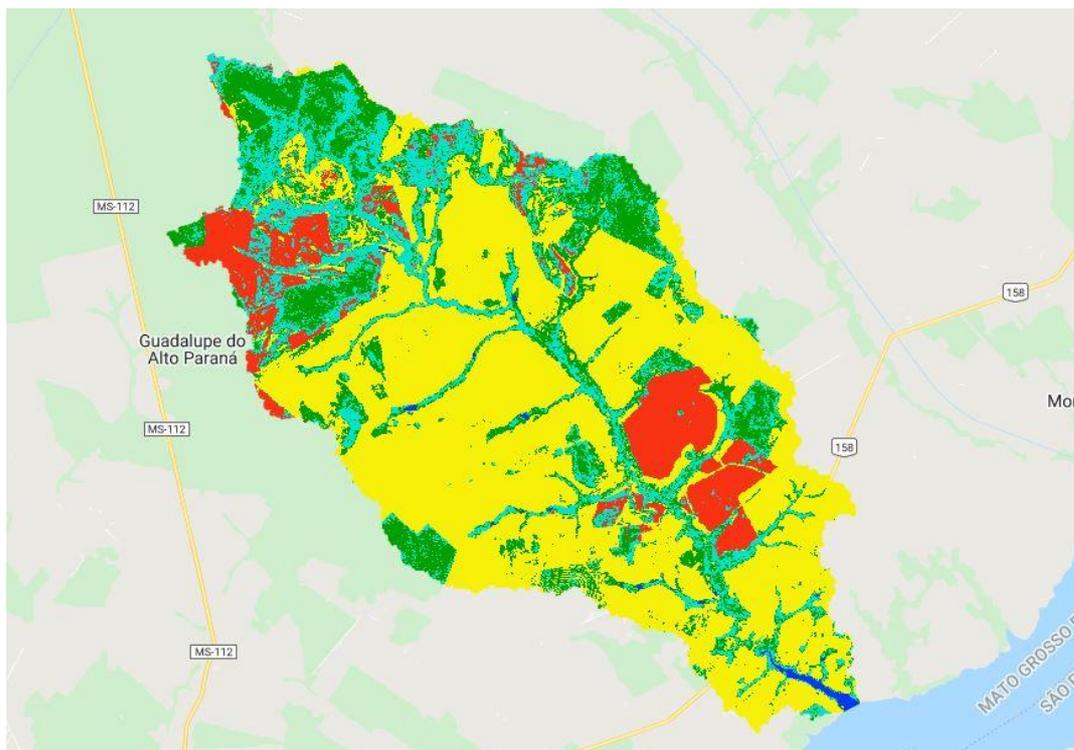
```

```

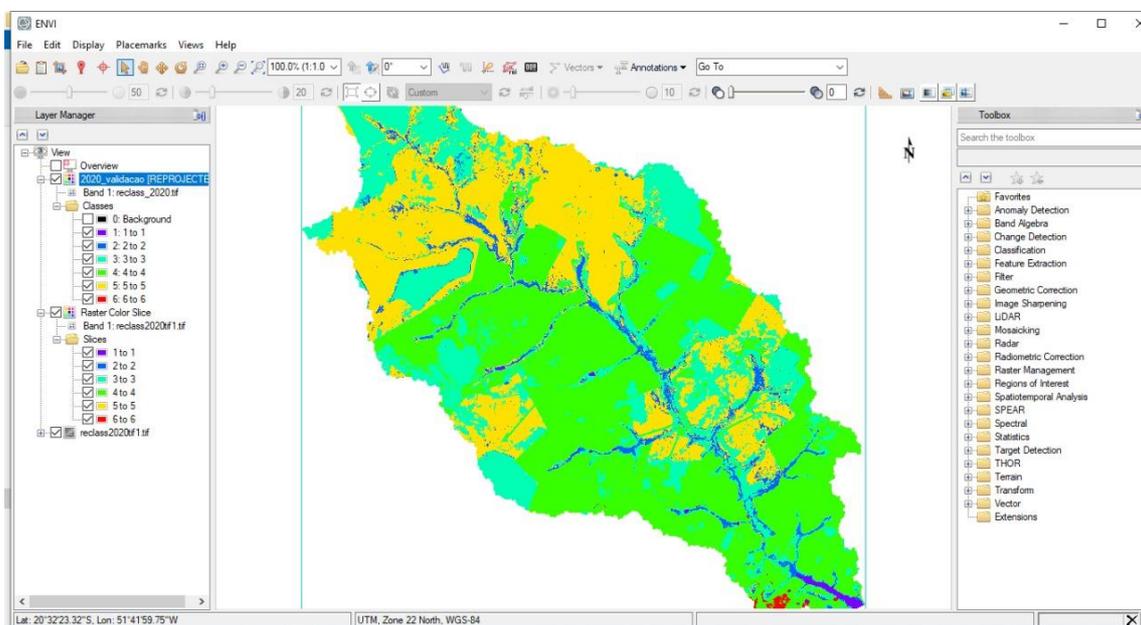
class_2021_teste *
  Get Link Save Run Reset Apps
143
144
145 Export.image.toDrive({
146   image: classe.toFloat(),
147   description: 'Classificacao_RF_2021_teste2fim',
148   folder: "GEE_engine",
149   scale: 30,
150   maxPixels: 1e9,
151   region:ROI
152
153

```





### C - VALIDAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA: KAPPA OBTIDO NO SOFTWARE ENVI



\*kappa0-82 - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

Confusion Matrix: D:\Tese\_2021\_dados\Banco\_de\_Dados\_MAPEAMENTO\_TESE2021\_SA\_Sequestro\_carbono\CLASSIFICACAO-FINAL-CORRETA-KAPPA\reprojetada\2020\Env1\_filter2020\COLOR

Overall Accuracy = (263/300) 87.6667%  
 Gamma Coefficient = 0.8231

Class	Ground Truth (Pixels)				
	2020	[KML_FOL2020	[KML_FOL2020	[KML_FOL2020	[KML_FOL
Background	0	0	0	0	0
6 to 6	3	0	0	0	0
4 to 4	0	3	2	2	0
5 to 5	0	3	69	2	5
3 to 3	0	0	0	118	0
2 to 2	0	3	3	1	70
1 to 1	0	2	6	0	7
Total	3	11	80	123	82

Class	Ground Truth (Pixels)	
	2020 [KML_FOL	Total
Background	0	0
6 to 6	1	4
4 to 4	0	7
5 to 5	0	79
3 to 3	0	118
2 to 2	0	77
1 to 1	0	15
Total	1	300

\*kappa0-82 - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

Class	Ground Truth (Percent)				
	2020	[KML_FOL2020	[KML_FOL2020	[KML_FOL2020	[KML_FOL
Background	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6 to 6	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 to 4	0.00	27.27	2.50	1.63	0.00
5 to 5	0.00	27.27	86.25	1.63	6.10
3 to 3	0.00	0.00	0.00	95.93	0.00
2 to 2	0.00	27.27	3.75	0.81	85.37
1 to 1	0.00	18.18	7.50	0.00	8.54
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)	
	2020 [KML_FOL	Total
Background	0.00	0.00
6 to 6	100.00	1.33
4 to 4	0.00	2.33
5 to 5	0.00	26.33
3 to 3	0.00	39.33
2 to 2	0.00	25.67
1 to 1	0.00	5.00
Total	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
6 to 6	25.00	0.00	1/4	0/3
4 to 4	57.14	72.73	4/7	8/11
5 to 5	12.66	13.75	10/79	11/80
3 to 3	0.00	4.07	0/118	5/123
2 to 2	9.09	14.63	7/77	12/82
1 to 1	100.00	100.00	15/15	1/1

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
6 to 6	100.00	75.00	3/3	3/4
4 to 4	27.27	42.86	3/11	3/7
5 to 5	86.25	87.34	69/80	69/79
3 to 3	95.93	100.00	118/123	118/118
2 to 2	85.37	90.91	70/82	70/77
1 to 1	0.00	0.00	0/1	0/15

## D - RESULTADOS DO *Invest*: CENÁRIO DE CONTINUIDADE DE MUDANÇAS ATUAIS (CMA)

Aggregate Results			
results_suffix	1984-2009		
Description	Value	Units	Raw File
Total cur	1710600.81	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2004-2009\tot_c_cur_1984-2009.tif
Total fut	1666990.63	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2004-2009\tot_c_fut_1984-2009.tif
Change in C for fut	-44429.09	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2004-2009\delta_cur_fut_1984-2009.tif
Net present value from cur to fut	-1057395.38	currency units	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2004-2009\npv_fut_1984-2009.tif

Aggregate Results			
results_suffix	2009-2015		
Description	Value	Units	Raw File
Total cur	1666990.63	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2009 - 2015\tot_c_cur_2009-2015.tif
Total fut	1694200.05	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2009 - 2015\tot_c_fut_2009-2015.tif
Change in C for fut	27454.85	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2009 - 2015\delta_cur_fut_2009-2015.tif
Net present value from cur to fut	657765.22	currency units	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2009 - 2015\npv_fut_2009-2015.tif

Aggregate Results			
results_suffix	2015-2021		
Description	Value	Units	Raw File
Total cur	1694200.05	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2015 - 2021\tot_c_cur_2015-2021.tif
Total fut	1693798.83	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2015 - 2021\tot_c_fut_2015-2021.tif
Change in C for fut	-364.50	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2015 - 2021\delta_cur_fut_2015-2021.tif
Net present value from cur to fut	-8732.78	currency units	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2015 - 2021\npv_fut_2015-2021.tif

Aggregate Results			
	results_suffix	2021-2033	
Description	Value	Units	Raw File
Total cur	1693798.83	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2021 - 2033\tot_c_cur_2021-2033.tif
Total fut	1711252.70	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2021 - 2033\tot_c_fut_2021-2033.tif
Change in C for fut	17453.87	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2021 - 2033\delta_cur_fut_2021-2033.tif
Net present value from cur to fut	417285.12	currency units	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\Resultados_Invest_24\$BAU - passado\2021 - 2033\npv_fut_2021-2033.tif

Aggregate Results			
	results_suffix	2051BAU	
Description	Value	Units	Raw File
Total cur	1693798.83	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2051 BAU - INVEST\tot_c_cur_2051BAU.tif
Total fut	1736646.47	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2051 BAU - INVEST\tot_c_fut_2051BAU.tif
Change in C for fut	42847.64	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2051 BAU - INVEST\delta_cur_fut_2051BAU.tif
Net present value from cur to fut	1017980.71	currency units	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2051 BAU - INVEST\npv_fut_2051BAU.tif

## E - RESULTADOS DO *Invest*: CENÁRIO PF

Aggregate Results			
	results_suffix	2033PF	
Description	Value	Units	Raw File
Total cur	1693798.83	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2033 PF - INVEST\tot_c_cur_2033PF.tif
Total fut	1746465.47	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2033 PF - INVEST\tot_c_fut_2033PF.tif
Change in C for fut	52666.64	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2033 PF - INVEST\delta_cur_fut_2033PF.tif
Net present value from cur to fut	1259147.73	currency units	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2033 PF - INVEST\npv_fut_2033PF.tif

Aggregate Results			
	results_suffix	2051PF	
Description	Value	Units	Raw File
Total cur	1693798.83	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2051 PF\tot_c_cur_2051PF.tif
Total fut	1745736.29	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2051 PF\tot_c_fut_2051PF.tif
Change in C for fut	51937.46	Mg of C	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2051 PF\delta_cur_fut_2051PF.tif
Net present value from cur to fut	1233938.14	currency units	C:\Users\Luciano\Downloads\Resultados_Organizados_Bruna-20230708T212032Z-001-20230710T202816Z-001\PLUS_TESTEFINALLL\2051 PF\npv_fut_2051PF.tif