



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

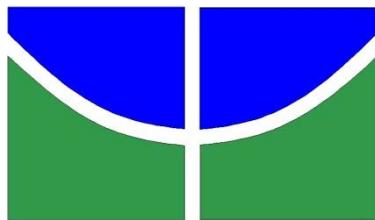
Avaliação do Estoque de Carbono na Bacia do Ribeirão Pípiripau

Alexandre de Alencar Silva Reis

Brasília, 19 de agosto de 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

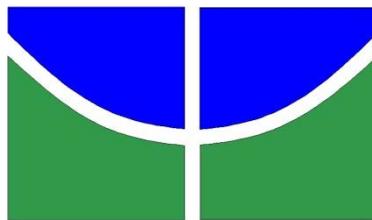
Avaliação do Estoque de Carbono na Bacia do Ribeirão Pipiripau

Alexandre de Alencar Silva Reis

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador(a): Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi

Brasília-DF, 19 de agosto de 2024



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Departamento de Engenharia Florestal – EFL

Avaliação do Estoque de Carbono na Bacia do Ribeirão Pípiripau

Estudante: Alexandre de Alencar Silva Reis

Matrícula: 15/0004397

Orientador(a): Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi

Menção: SS

Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Orientador (EFL)

Prof. Dr. Reginaldo Sérgio Pereira
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Membro da Banca

Engenheira Maria Eduarda Coelho
Universidade de Brasília – UnB
Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais
Membro da Banca

Brasília-DF, 19 de agosto de 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

CIP - Catalogação na Publicação

R375a Reis, Alexandre de Alencar Silva.
Avaliação do Estoque de Carbono na Bacia do Ribeirão Pípiripau / Alexandre de Alencar Silva Reis; orientador Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi. -- Brasília, 2024.
43 p.

Monografia (Graduação - Engenharia Florestal) --
Universidade de Brasília, 2024.

1. Estoque de Carbono. 2. Uso e cobertura da terra. 3. Recursos naturais. 4. Serviços ecossistêmicos. 5. Bacia hidrográfica. I. Matricardi, Eraldo Aparecido Trondoli, orient. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

REIS, A. A. S. (2024). **Avaliação do Estoque de Carbono na Bacia do Ribeirão Pípiripau**. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 43 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Alexandre de Alencar Silva Reis

TÍTULO: *Avaliação do Estoque de Carbono na Bacia do Ribeirão Pípiripau*

GRAU: Engenheiro Florestal ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Nome do Autor

E-mail do Autor: alexandrealencarr@gmail.com

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio incondicional e incentivo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todos que tornaram possível a realização deste trabalho e que me apoiaram ao longo da minha jornada acadêmica.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi, pela orientação incansável, pelo apoio e pelo vasto conhecimento compartilhado. Sua dedicação e compromisso foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus professores e coordenadores do Departamento de Engenharia Florestal, que foram essenciais na minha formação: Prof. Reuber Brandão, Prof. Anderson, Prof. Rosana, Prof. Alba Valéria, Prof. Zé Roberto, Prof. Mauro Eloi e muitos outros que contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

Aos meus colegas do departamento, que tornaram os dias mais leves e divertidos, e que estiveram ao meu lado em cada desafio e conquista.

Minha eterna gratidão à minha família, que sempre me apoiou incondicionalmente: minha mãe Ana Cristina, meu pai David Godoy, minhas irmãs Júlia, Luiza e Catharina, e minha querida avó Helga. Vocês foram minha fonte de força e inspiração.

Agradeço profundamente à minha esposa e companheira, Paola, pelo incentivo, confiança e afeto. Sua presença constante e amorosa foi crucial para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Agradeço à Universidade de Brasília, pela oportunidade de aprendizado e crescimento, e a todos os professores do Departamento de Engenharia Florestal, que proporcionaram um ambiente de ensino enriquecedor e desafiador. Por último, mas não menos importante, agradeço à iniciativa do Projeto Mapbiomas, um trabalho de alta qualidade que tem sido muito útil para atividades acadêmicas, técnicas e científicas que visam o monitoramento e o manejo sustentável dos recursos naturais em os biomas Brasileiros.

A todos vocês, meus sinceros e profundos agradecimentos.

"Preservar o Cerrado é garantir o futuro de nossas águas, de nossa biodiversidade e de nossa própria sobrevivência." – Altair Sales Barbosa.

RESUMO

No presente estudo foi avaliado o estoque de carbono na bacia do Ribeirão Pipiripau, localizada no Distrito Federal, frente às mudanças de uso e cobertura da terra ocorridos entre 2010 e 2020, utilizando dados do projeto MapBiomas (Coleção 8) e técnicas geoprocessamento. Inicialmente foram caracterizadas as mudanças no uso e cobertura da terra, considerando as fitofisionomias típicas do Cerrado. A quantificação dos estoques de carbono incluiu a biomassa acima e abaixo do solo, além do carbono orgânico no solo e a biomassa contida camada da liteira. Foram empregados dados do mapeamento *Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density* e o software InVEST para modelagem e análise da quantidade de carbono. Os resultados deste estudo indicam que, entre 2010 e 2020, houve um aumento significativo na área de formação florestal (130%) e de plantações florestais (307%) na bacia hidrográfica estudada e a redução das áreas de formação savânica (-12%) e de pastagens plantadas (-16,3%). A análise da estimativa de estoque de carbono mostrou que houve um aumento de 10.317 Toneladas de Carbono entre 2010 e 2020, uma ligeira melhora na capacidade de sequestro de carbono na bacia estudada. O Carbono sequestrado no período de análise corresponde a aproximadamente US\$ 91.813,00, destacando a importância de políticas de conservação e reflorestamento, não apenas do ponto de vista ambiental das mudanças climáticas, mas também do ponto de vista econômico. As áreas que apresentaram maior capacidade de sequestro de carbono estão associadas ao reflorestamento e plantações agrícolas permanentes. A adoção de práticas de manejo sustentável e políticas de conservação devem ser fortalecidas para promover a manutenção e o sequestro de carbono atmosférico, aliado a conservação da biodiversidade, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e a manutenção de vários serviços ecossistêmicos úteis para as comunidades locais.

Palavras-chave: Estoque de Carbono, Uso e cobertura da terra, Recursos naturais, Serviços ecossistêmicos, Bacia hidrográfica.

Reis, Alexandre Alencar (Reis, N. S.) **Avaliação do Estoque de Carbono na Bacia do Ribeirão Pipiripau.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ABSTRACT

In this study carbon stocks were assessed in the Ribeirão Pípiripau watershed, located in the Federal District, in response to land use and cover changes occurred between 2010 and 2020. Data from the MapBiomass project (Collection 8) and geoprocessing techniques were used. Changes in land use and cover were first characterized, considering the typical phytophysionomies of the Cerrado. Carbon stock quantification included aboveground and belowground biomass, soil organic carbon, and litter biomass. Data from Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density mapping and the InVEST software were utilized for carbon modeling and analysis. The results indicate a significant increase in forested areas (130%) and forest plantations (307%) in the analyzed watershed between 2010 and 2020, alongside a decrease in savanna areas (-12%) and planted pastures (-16.3%). The carbon stock analysis showed an increase of 10,317 tons of carbon during this period, reflecting a slight improvement in the watershed's carbon sequestration capacity. The sequestered carbon corresponds to approximately US\$ 91,813, underscoring the importance of conservation and reforestation policies from both environmental and economic perspectives. The areas with the highest carbon sequestration capacity were associated with reforestation and permanent agricultural plantations. Strengthening sustainable management practices and conservation policies is crucial to enhancing atmospheric carbon sequestration, preserving biodiversity, mitigating climate change, and maintaining ecosystem services that benefit local communities.

Keywords: Carbon Stock, Land Use and Land Cover, Natural Resources, Ecosystem Services, Watershed.

Reis, Alexandre Alencar (Reis, N. S.) **Evaluation of Carbon Stock in the Pípiripau River Basin.** Monograph (Forest Engineering Degree) – University of Brasília, Brasília, DF.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1	Caracterização da área de Estudo.....	16
3.2	Base de Dados.....	17
3.2.1	MapBiomass – Coleção 8.0.....	17
3.2.2	Estoque de Carbono e LULC.....	18
3.2.3	Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density.....	19
3.2.4	Invest – Carbon Storage and Sequestration.....	21
3.3	Carbono Orgânico do Solo.....	23
3.4	Carbono da Matéria Orgânica Morta.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1	Análise do uso e cobertura do solo entre 2010 e 2020.....	26
4.2	Dinâmica do estoque de Carbono da biomassa acima e abaixo do solo.....	30
4.3	Análise da variação do estoque de carbono entre 2010 e 2020.....	33
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
5	REFERÊNCIAS.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Piriipau, situada no Distrito Federal. Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).	16
Figura 2. Gráfico da acurácia geral das classificações do MapBiomias para o Cerrado de 1985 até 2020. Fonte: MapBiomias (2024).	18
Figura 3. Distribuição espacial do Carbono orgânico no Solo (ton)_ na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Piriipau, situada no Distrito Federal – DF. Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).	24
Figura 4. Diagrama de Sankey mostrando a variação na conversão do uso do solo entre os anos de 2010 e 2020 em km ²	27
Figura 5. Estoque de Carbono Total nos anos 2010 e 2020 e respectivas classes de uso e cobertura da terra.	30
Figura 6. Distribuição espacial da variação no Estoque de Carbono da Bacia do Ribeirão Piriipau, no Distrito Federal, entre os anos de 2010 e 2020.	34
Figura 7. Valoração Econômica em Dólares por hectare (US\$/ha) para o estoque de carbono na Bacia do Ribeirão Piriipau, no Distrito Federal.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estoque de Carbono armazenado, por classe, acima e abaixo do solo.	22
Tabela 2. Valores de Carbono da matéria orgânica morta e suas respectivas referências.	25
Tabela 3. Mudanças na área de diferentes classes de uso do solo na Bacia do Ribeirão Piriipau.	28
Tabela 4. Estoque de Carbono Acima e Abaixo do Solo para os anos de 2010 e 2020.	31
Tabela 5. Valoração de cada classe de uso da terra em termos de Carbono.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LULC Land Use Land Cover (Uso e Cobertura da terra)

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global é um dos temas mais debatidos e relevantes no contexto da crise ambiental global (YU, 2004; NUKUSHEVA et al., 2020). Embora as mudanças climáticas sejam fenômenos naturais, a Revolução Industrial no século XVIII marcou uma transformação profunda na produção e no consumo de energia, acelerando drasticamente a intensidade e a velocidade dessas mudanças (SCHWAB; DAVIS, 2019). Esse período histórico levou a um aumento significativo nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono, na atmosfera (ASSAD, 2019). Em resposta a essa situação, diversas nações se reuniram em Kyoto, Japão, em 1997, para criar o tratado conhecido como Protocolo de Kyoto (GIBBS, 2005).

Os ecossistemas tropicais desempenham um papel crucial no ciclo global do carbono, atuando tanto como emissores quanto como absorvedores de CO₂ atmosférico (PAIVA; REZENDE; PEREIRA, 2011). Qualquer alteração nesses ecossistemas, seja por causas naturais ou atividades humanas, pode modificar os fluxos de carbono para a atmosfera, com variações que dependem da gravidade do distúrbio. Aproximadamente 25% das emissões globais de dióxido de carbono são resultado de mudanças no uso da terra, especialmente devido ao desmatamento (PIMM; JENKINS, 2005; SHUKLA et al., 2019). A conversão de florestas tropicais úmidas em áreas agropastoris é uma das principais atividades humanas que contribuem para o aumento de CO₂ na atmosfera (MENEZES et al., 2021).

O Cerrado brasileiro, a maior savana neotropical do mundo (FURLEY, 1999), é o segundo maior bioma do Brasil, cobrindo cerca de 24% do território nacional (IBGE, 2020). De acordo com Ribeiro e Walter (2008), é composto por onze fitofisionomias distribuídas entre formações florestais, savânicas e campestres, que formam um mosaico de elevada biodiversidade. Com altos níveis de endemismo e funções ambientais de importância global, é considerado um dos hotspots mundiais para a conservação (STRASSBURG et al., 2017; GOMES et al., 2018).

Segundo Sano et al. (2010) e Beuchle et al. (2015), mais de 50% da vegetação nativa do Cerrado já foi convertida em pastagens, culturas anuais e outros usos da terra nos últimos 50 anos, enquanto 19,8% permaneceram inalteradas. Além da pressão causada pela cultura agrícola, o bioma tem se tornado um ambiente alvo para a expansão urbana (DUARTE; LEITE, 2020). O Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2020 apontou 432 mil hectares desmatados apenas neste ano (MAPBIOMAS, 2024).

Conhecido popularmente como "o berço das águas", o bioma Cerrado abriga muitas das nascentes que dão origem às principais bacias hidrográficas do Brasil, como as dos rios Paraná,

São Francisco, Araguaia, Tocantins, entre outros (MARTINS; GALVANI, 2020). De acordo com Souza Silva et al. (2022), uma bacia hidrográfica é uma área geográfica que drena suas águas para um determinado recurso hídrico, sendo possível também estudar os diferentes elementos da paisagem e fenômenos antrópicos que operam em sua esculturação (BOTELHO, 2010).

A Bacia do Ribeirão Pípiripau é de grande importância para o Distrito Federal, não só pela produção agropecuária, mas também por ser um manancial que abastece parte da região. Além disso, a bacia integra o Programa Produtor de Água da Agência Nacional de Águas (ANA), que visa à revitalização ambiental de bacias hidrográficas por meio de ações de reflorestamento de áreas degradadas e conservação do solo, utilizando o pagamento por serviços ambientais (PSA) como incentivo (ANA, 2010).

Visando apoiar o processo de planejamento e gestão territorial e assegurar a conservação e o funcionamento ecológico dos diferentes ecossistemas que compõe uma Bacia Hidrográfica, é de extrema importância a geração de informações sobre a dinâmica de mudança de uso e cobertura da terra (PICOLI et al., 2018; SILVA; GALVANIN; MENEZES, 2022), fornecendo dados que possam subsidiar o desenvolvimento de planos de manejo e conservação e a tomada de decisões políticas e técnicas de caráter socioambiental por parte dos poderes públicos e também da sociedade civil.

O alto nível de erosão é o principal fator de poluição e degradação da qualidade dos recursos hídricos de Bacias Hidrográficas (ROCHA, 2007), agravado ainda mais pelas atividades desenvolvidas na paisagem e manejo do solo, que alteram as propriedades do solo, refletindo de forma negativa nas propriedades da água (Qualidade da Água) e na dinâmica hídrica de uma bacia hidrográfica (Escoamento Superficial, Recarga dos Aquíferos) (BALBINOT et al., 2008).

Portanto, a proteção e a restauração de bacias hidrográficas degradadas são componentes fundamentais das estratégias futuras para assegurar o fornecimento de água potável limpa e garantir a segurança hídrica da população (BARNES et al., 2009). Com o objetivo de incentivar práticas de manejo sustentável e conservação ambiental, promover a recuperação de áreas degradadas e a proteção dos recursos hídricos criou-se o Programa Produtor de Águas, que utiliza como estratégia o pagamento por serviços ambientais (PSA), incentivando os proprietários de terras a adotarem práticas de reflorestamento e conservação do solo e da água (ANA, 2016). Esse programa foi implementado na bacia do Pípiripau em Dezembro de 2011, envolvendo 187 proprietários e produtores de terra ao longo de sua história.

A conservação do Cerrado é de extrema importância devido à sua vasta extensão e diversidade biológica, sendo essencial a implementação de medidas conservacionistas para garantir a manutenção da qualidade ambiental global (BRASIL, 2011). Estudos indicam que o bioma desempenha um papel significativo no balanço global de carbono (POULTER et al., 2014), atuando como grande assimilador e acumulador de carbono (PAIVA; REZENDE; PEREIRA, 2011). Entretanto, a biomassa no bioma ainda é pouco conhecida, devido a diferentes fitofisionomias existentes e a elevada variabilidade ambiental e estrutural. Todavia, sabe-se que se trata de um assunto imprescindível e que vem crescendo junto com o interesse dos estudos de mudanças climáticas globais (ROQUETTE, 2018).

A quantificação da biomassa emerge como um elemento essencial para orientar iniciativas que englobam a restauração ambiental, a preservação da biodiversidade da fauna e da flora, a gestão dos desafios climáticos e hídricos, a formulação de estratégias de conservação, bem como a oferta de serviços ecossistêmicos visando aprimorar a qualidade de vida da comunidade (RIBEIRO et al., 2009).

Os métodos convencionais de coleta de dados biofísicos de árvores, que utilizam equipamentos como fitas métricas e paquímetros para medir tamanhos e alturas, muitas vezes enfrentam desafios em ambientes florestais devido a restrições de tempo, limitações financeiras e dificuldades de acesso às áreas (GONZÁLEZ-JARAMILLO; FRIES; BENDIX, 2019). Diante desses obstáculos, têm-se utilizado novas tecnologias com o intuito de superar essas barreiras, permitindo a obtenção de informações essenciais com níveis de precisão satisfatórios (IIZUKA et al., 2018).

Destaca-se o uso do sensoriamento remoto, que se mostra especialmente eficaz em estudos de cobertura vegetal, apresentando um alto potencial para investigações de diagnóstico e monitoramento, devido à sua capacidade de processamento rápido e eficiente de grandes volumes de dados (PATENAUDE; MILNE; DAWSON, 2005; AHAMED et al., 2011). Esta tecnologia, segundo Matos e Kirchner (2008), tem papel crucial na quantificação e na estimativa indireta de biomassa e estoque de carbono, aplicando o resultado de modelos matemáticos em equações desenvolvidas com os valores digitais dos sensores remotos. Além disso, a utilização de imagens de sensoriamento remoto permite a obtenção de dados sobre grandes áreas de formações vegetais nativas em um tempo reduzido e com menor custo quando comparado com as atividades em campo (DISPERATI et al., 2007; PINHEIRO; DURIGAN, 2009; ANGELOPOULOU, 2019).

É relevante ressaltar a existência da plataforma MapBiomass, que tem como objetivo contribuir na compreensão dinâmica do uso do solo nos Biomas brasileiros, fornecendo desde 2015 mapas do uso e cobertura da terra no Brasil (ROSA, 2018). Estes mapas são elaborados com dados a partir de 1985 e se estendem até os anos mais recentes, utilizando informações provenientes dos satélites da série Landsat para a coleção de uso e cobertura com 30m de resolução espacial (MAPBIOMASS, 2024) e outros satélites como Sentinel na coleção de 10m.

No presente estudo, buscou-se avaliar a variação do estoque de carbono na Bacia do Ribeirão Piriapau e quantificar o estoque de carbono sob diferentes tipos de uso e cobertura da terra, solos e práticas agrícolas entre 2010 e 2020. Os resultados desta pesquisa contribuem para o maior entendimento da evolução do uso e ocupação nesta bacia hidrográfica, onde vários programas e projetos de produção e conservação têm sido implementado, possibilitando ampliar e amplificar algumas ações de manejo do uso dos recursos naturais e de melhoria de serviços ecossistêmicos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar as mudanças dos usos e coberturas da terra e seus efeitos no estoque de carbono na Bacia do Ribeirão Piriapau entre 2010 e 2020.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as alterações nos usos e coberturas da terra na bacia do Ribeirão Piriapau entre 2010 e 2020;
- Quantificar os efeitos das mudanças dos usos e coberturas da terra sobre os estoques de carbono no solo contidos na biomassa vegetal na área e período de estudo;
- Estimar o valor do carbono sequestrado na bacia do Ribeirão Piriapau entre 2010 e 2020.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de Estudo

Esta análise envolveu a bacia hidrográfica do Ribeirão Pipiripau, localizada no extremo nordeste do Distrito Federal (**Figura 1**). Esta bacia abrange cerca de 235 km², predominantemente ocupada por solos do tipo Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho Amarelo e Cambissolos, caracterizados por uma boa drenagem (CHAVES & PIAU, 2008). De acordo com os mesmos autores, as terras cultiváveis e as pastagens ocupam, respectivamente, 43% e 28% da área da bacia. Essas atividades contribuem para o assoreamento do Ribeirão Pipiripau, uma vez que práticas de conservação ainda não têm sido adotadas de forma mais efetiva e generalizada.

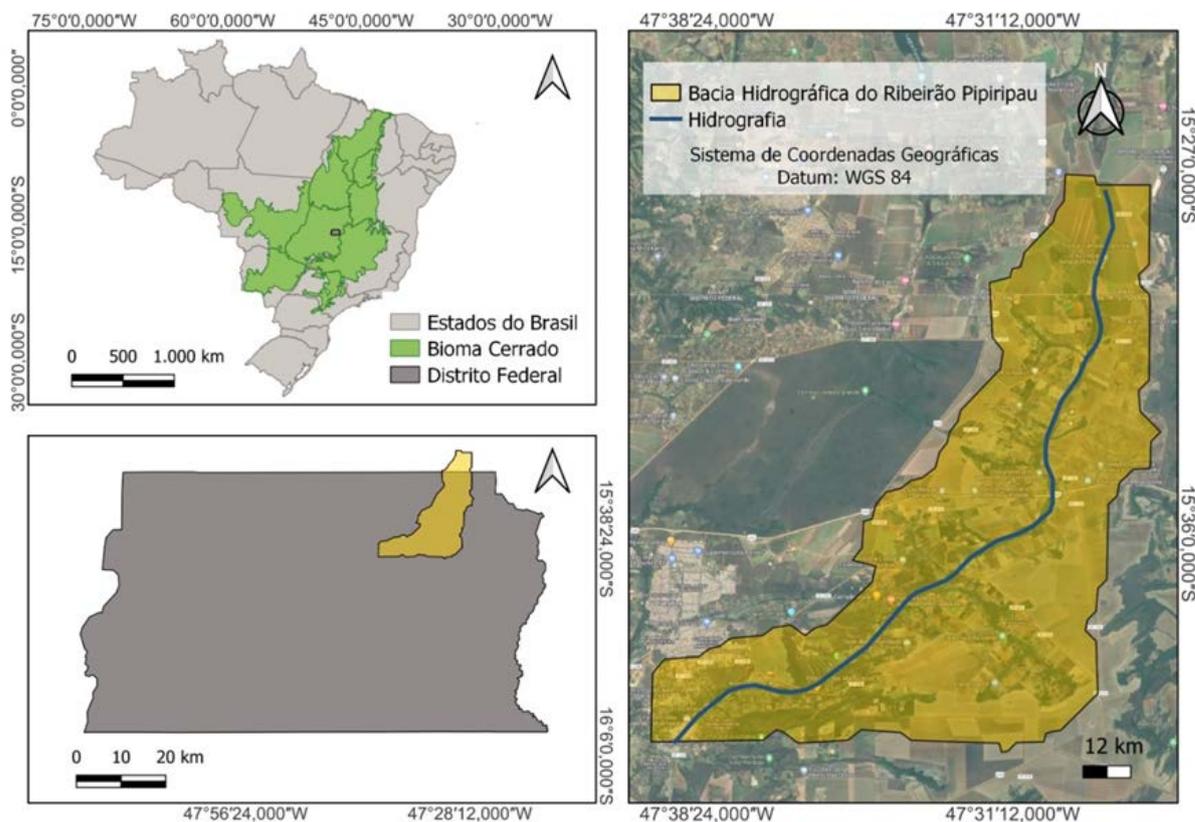


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pipiripau, situada no Distrito Federal. Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região é identificada como do tipo climático Aw, com precipitação média anual de 1.306 mm. O relevo desta bacia é predominantemente plano a levemente ondulado, o que reduz a ocorrência de enchentes na área, com altitudes variando entre 905 e 1.225 metros. Adicionalmente, o Ribeirão Pipiripau apresenta uma vazão média de longo prazo de 2,89 m³/s (CHAVES & PIAU, 2008).

Nos últimos 50 anos, devido à ocupação territorial e ao intenso crescimento populacional, a bacia do Ribeirão Pipiripau sofreu uma significativa conversão de sua vegetação natural, composta por fisionomias típicas do Cerrado, para áreas destinadas à agricultura e pecuária (CHAVES & PIAU, 2008).

3.2 Base de Dados

3.2.1 MapBiomias – Coleção 8.0

A Coleção MapBiomias 8 inclui dados e mapas anuais de cobertura e uso da terra de 1985 a 2022. Essa coleção é resultado de oito anos de atuação do Projeto MapBiomias e está em constante desenvolvimento. Inclui dados sobre cobertura e uso do solo, transições entre diferentes classes, qualidade do mosaico entre outros.

A avaliação da precisão e da acurácia é o principal método utilizado pelo MapBiomias para avaliar a qualidade dos mapeamentos de uso e cobertura da terra. Essa análise fornece uma visão geral da taxa de precisão e oferece estimativas das taxas de acerto e erro para cada categoria mapeada. A lógica fuzzy pode ser aplicada nesse contexto para lidar com incertezas e transições suaves entre classes, como floresta, savana e campo, permitindo que um pixel tenha pertencimento parcial a várias classes. Isso é especialmente útil em áreas de transição do Cerrado, onde a vegetação apresenta características mistas.

O MapBiomias conduziu a avaliação da precisão global e para cada categoria entre 1985 e 2022 (Figura 2), utilizando uma base de dados de referência com aproximadamente 75.000 amostras, selecionadas por técnicas de amostragem estatística. Cada pixel foi avaliado por especialistas em interpretação visual de imagens Landsat. A avaliação da precisão confronta a categoria mapeada com a categoria avaliada pelos técnicos, proporcionando insights sobre a permanência dos pixels na mesma classe ao longo do tempo, especialmente em áreas de transição, onde a lógica *fuzzy* pode melhorar a classificação.

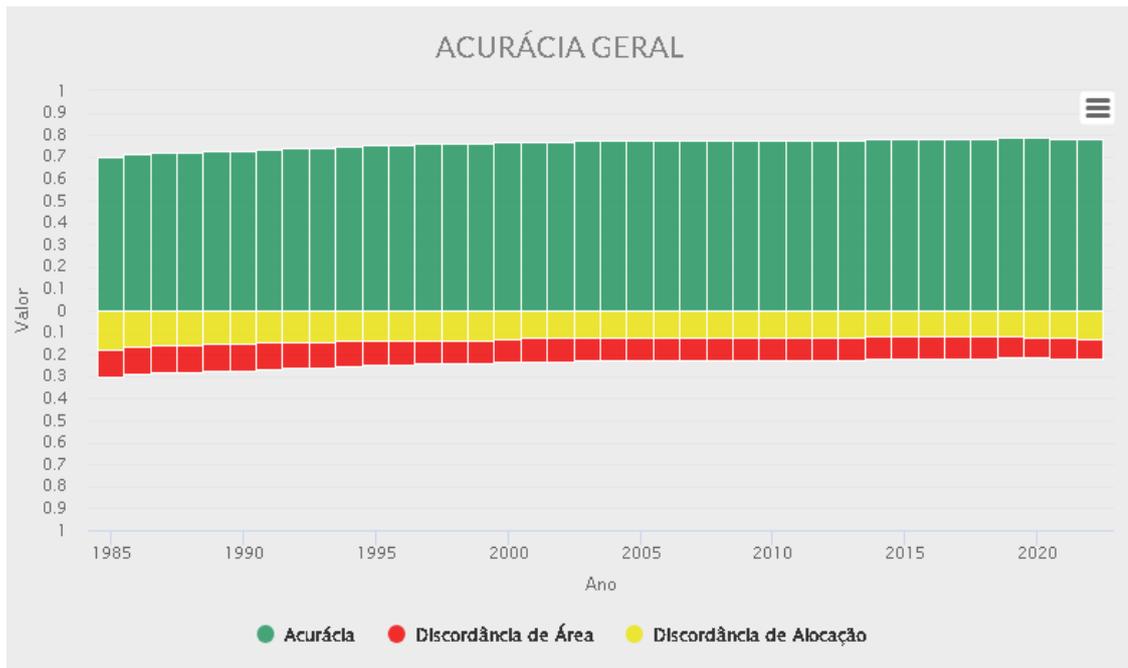


Figura 2. Gráfico da acurácia geral das classificações do MapBiomias para o Cerrado de 1985 até 2020. Fonte: MapBiomias (2024).

Na versão 8 do MapBiomias, existem 27 classes de uso e cobertura da terra. Utilizando imagens de satélite de 30 metros de resolução, o mapeamento captura uma visão geral robusta, mas resoluções mais altas (como 10 metros) poderiam refinar a detecção de detalhes e transições entre classes, melhorando ainda mais a precisão.

3.2.2 Estoque de Carbono e LULC

A ameaça à disponibilidade de recursos naturais e à preservação dos serviços ecossistêmicos é uma preocupação global crescente, o que demanda a implementação de medidas de mitigação em escala internacional (SAMBERGER, 2022). As mudanças no uso e cobertura da terra abrangem não apenas a natureza e intensidade dessas alterações, mas também considerações espaciais e temporais (VELDKAMP; VERBURG, 2004). O mapeamento dessas transformações é fundamental para diversas métricas de desenvolvimento, gestão de recursos hídricos e avaliação dos impactos ambientais, como na mudança dos estoques de carbono nos ecossistemas terrestres (OZSAHIN et al., 2018; BUTT et al., 2015). Para identificar essas mudanças, utilizam-se análises de imagens de satélite e aéreas, que permitem detectar alterações na cobertura do solo (YANG; LO, 2002).

O sensoriamento remoto (RS) e os sistemas de informação geográfica (GIS) desempenham papéis cruciais na obtenção de dados espaciais precisos e oportunamente atualizados sobre a cobertura e uso da terra. Essas ferramentas facilitam a avaliação de mudanças em áreas específicas de estudo (SRIVASTAVA et al., 2013) e são amplamente empregadas por gestores e cientistas para compreender a configuração atual da paisagem (GROOT et al., 2010). A lógica fuzzy pode ser integrada a esses métodos de mapeamento para lidar com incertezas e transições suaves entre classes de cobertura da terra, como floresta, savana e campo, permitindo uma classificação mais precisa e refletindo gradientes ecológicos complexos.

No contexto da mitigação de gases de efeito estufa (GEE), duas alternativas principais são consideradas: reduzir as emissões ou aumentar a captura de carbono (VÅGEN; LAL; SINGH, 2005). A conversão de ecossistemas naturais em agrícolas frequentemente resulta na redução dos estoques de carbono devido a práticas inadequadas de manejo, como aração, mínima devolução de resíduos e aumento da erosão (CERRI et al., 2006). Essas práticas reduzem a quantidade de biomassa que retorna ao solo, aumentam a mineralização do carbono e diminuem a biomassa subterrânea (FOLLETT, 2001; LAL, 2006).

Para o Cerrado, diferentes sistemas de manejo têm sido avaliados quanto ao balanço de carbono nos solos. Concluiu-se que o plantio direto, a pastagem cultivada não degradada e as áreas reflorestadas com Pinus e Eucalyptus são sistemas conservadores de carbono no solo, desde que condições específicas sejam observadas na implementação desses agroecossistemas (CORAZZA et al., 1999). Assim, a análise da dinâmica de cobertura da terra e o uso de metodologias avançadas de mapeamento, como a lógica fuzzy, são essenciais para a conservação e manejo sustentável dos recursos naturais.

3.2.3 Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density

Até recentemente, não havia produtos que representassem o estoque de carbono acima e abaixo do solo em escalas adequadas para modelagem (SPAWN et al., 2020). Entretanto, foi lançada a base de dados de densidade de carbono da biomassa acima e abaixo do solo denominada “*Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density*”, disponibilizada pela NASA/ORNL/DAAC, através do Oak Ridge National Laboratory para Dinâmica Biogeoquímica, uma agência afiliada à NASA encarregada da distribuição e fornecimento de serviços de dados terrestres. Esses dados têm sido amplamente utilizados em estudos ambientais, particularmente na análise do desmatamento, um tema de grande relevância nos últimos anos (SPAWN et al., 2020; CHEN et al., 2023).

Em resposta à demanda por dados ajustados de estoque de carbono para estudos e análises, Spawn et al. (2020) desenvolveram uma abordagem para harmonizar mapas específicos de biomassa, tanto acima do solo (densidade de carbono da biomassa acima do solo - AGBC) quanto abaixo do solo (densidade de carbono da biomassa abaixo do solo - BGBC). Este assunto é pouco explorado e discutido no bioma Cerrado, devido à variação da estrutura do bioma.

As bases de dados disponibilizadas fornecem estimativas para o ano de 2010 e podem ser utilizadas para prever o estoque de carbono futuro por meio de técnicas de modelagem. Essas bases de dados foram desenvolvidas a partir de literatura publicada, análises e o uso de mapas auxiliares contendo dados de cobertura de árvores, vegetação de tundra, pastagem e agricultura. Quando dados secundários não estavam disponíveis para determinadas épocas ou áreas de interesse, os autores utilizaram um modelo preditivo para gerar mapas atualizados que atendiam aos critérios do estudo (SPAWN et al., 2020).

A conversão da biomassa acima do solo para densidade de carbono acima do solo foi realizada com base na metodologia descrita por Martin et al. (2018), onde os valores de biomassa acima do solo foram multiplicados por um fator de conversão de carbono. A quantificação da densidade de carbono acima do solo inclui o carbono armazenado nos tecidos vegetais vivos localizados acima da superfície do solo, como caules, cascas, galhos e galhadas, excluindo a serapilheira ou outros detritos lenhosos (SPAWN et al., 2020).

Por meio da sobreposição de mapas manipulados e elaborados pelos autores, foram gerados mapas globais de densidade de carbono acima e abaixo do solo, juntamente com mapas de incertezas para ambos os casos referentes ao ano de 2010, com uma resolução de 300 metros. Esses dados podem ser baixados através do site do ORNL DAAC ou manipulados conforme o interesse do usuário utilizando scripts disponíveis na plataforma GEE.

A densidade de carbono da biomassa viva acima do solo inclui carbono armazenado em tecidos vegetais vivos localizados acima da superfície da Terra (caules, cascas, galhos, galhos). Não inclui serapilheira ou detritos lenhosos grossos que já estiveram ligados a plantas vivas, mas que desde então foram depositados e não vivem mais. A densidade de carbono da biomassa viva subterrânea inclui carbono armazenado em tecidos vegetais vivos localizados abaixo da superfície da terra (raízes).

3.2.4 Invest – Carbon Storage and Sequestration

InVEST é um programa desenvolvido pelo Natural Capital Project da Universidade de Stanford, que utiliza uma série de modelos teóricos para a análise dos serviços ecossistêmicos (SHARP et al., 2018)

Esses modelos são projetados para serem explicitamente espaciais, utilizando mapas como entrada (Inputs) e gerando mapas como saída (Outputs). Os resultados podem ser expressos em termos biofísicos, como a quantidade de carbono sequestrado, ou em termos econômicos, como o valor presente líquido desse carbono. A resolução espacial dessas análises é altamente flexível, permitindo que os usuários abordem questões em diferentes escalas, desde local até global.

Os modelos InVEST são fundamentados em funções de produção que descrevem como as mudanças na estrutura e função dos ecossistemas podem afetar os fluxos e valores dos serviços ecossistêmicos em uma determinada área terrestre ou marítima. Eles levam em consideração tanto a oferta de serviços, como habitats naturais que atuam como barreiras contra tempestades, quanto a localização e as atividades das pessoas que se beneficiam desses serviços, como a presença de comunidades e infraestrutura que podem ser afetadas por tempestades costeiras. Esses modelos são distribuídos como aplicativos independentes de softwares GIS e podem ser usados em conjunto com plataformas como QGIS ou ArcGIS para visualização dos resultados.

O *Carbon Storage and Sequestration Model (CSSM)*, integrante da suíte de software InVEST, emprega variáveis como a biomassa acima e abaixo do solo, bem como a matéria orgânica presente no solo, para simular os estoques de carbono nos diferentes reservatórios. Este modelo considera informações geoespaciais, como as categorias de uso e cobertura da terra, para estimar a quantidade de carbono armazenada em cada região.

A análise temporal das mudanças no uso e cobertura da terra, realizada através do CSSM, possibilita a avaliação da capacidade de sequestro de carbono de uma determinada área ao longo do tempo. A obtenção de dados para quantificar os estoques de carbono é realizada a partir de mapas detalhados das mudanças do uso e cobertura da terra e dos reservatórios de carbono, utilizando as funcionalidades do CSSM. Este processo fornece informações cruciais para o entendimento da dinâmica do carbono em ecossistemas terrestres.

O módulo CSSM opera avaliando a reserva de carbono através da categorização dos diferentes tipos de uso da terra como unidades de medida na superfície terrestre. A estimativa do armazenamento total de carbono em uma determinada área de estudo é derivada da

multiplicação da área total ocupada por cada tipo de terreno pelas suas respectivas densidades médias de carbono. Para ilustrar, empregamos o modelo InVEST para investigar o armazenamento de carbono na Bacia do Ribeirão Pipiripau, e projetar sua distribuição espacial com base na mudança do uso da terra de 2010 até o ano de 2020. As equações que regem esse processo são definidas como segue:

$$C_i = C_i \{acima\} + C_i \{abaixo\} + C_i \{solo\} + C_i \{morto\}$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i$$

Onde:

i representa o i -ésimo tipo de uso da terra;

C_i é a densidade total de carbono para o tipo de uso da terra i (Mg/ha^{-1});

$C_i \{acima\}$, $C_i \{abaixo\}$, $C_i \{solo\}$ e $C_i \{morto\}$ são as densidades médias de carbono acima do solo, abaixo do solo, no solo e orgânico morto para o tipo de uso da terra i (Mg/ha^{-1}), respectivamente;

C_{total} é o armazenamento total de carbono (Mg);

S_i é a área ocupada pelo tipo de uso da terra i (km^2) e

n é o número total de tipos de uso da terra.

Nesta pesquisa, o CSSM foi empregado para calcular o sequestro de carbono em uma área específica, permitindo assim a valoração econômica desse carbono (**Tabela 1**).

Tabela 1. Estoque de Carbono armazenado, por classe, acima e abaixo do solo em Mg/ha^{-1} .

Código	Classes/Usos	C acima do solo	C abaixo do solo	C do solo	C da matéria orgânica morta
3	Formação Florestal	26,63	14,53	50,24	1,8
4	Formação Savânica	11,72	10,7	47,04	1,05
9	Plantação Florestal	27,68	7,05	51,33	1
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	20,83	16,76	51,97	1,78
12	Formação Campestre	3,61	2,74	46,22	0,38
15	Pastagem	5,46	2,16	50,74	0,2
21	Mosaico de agricultura e pastagem	5,74	2,69	49,62	0
24	Área Urbana	2,52	1,74	2,44	0

25	Outras Áreas Não Vegetadas	3,49	1,61	45,95	0
33	Rio, Lago e Oceano	11,8	8,98	42,22	0
39	Soja	4,14	0,91	60,7	0,88
41	Outras Lavouras Temporárias	4,57	1,35	56,49	0
46	Café	16,27	4,44	55,85	0
48	Outras Lavouras Perenes				
62	Algodão				

Para processar o modelo, foi necessário preencher os seguintes itens:

- **Annual Price Change:** Definido como 0%, pois nossa análise vai do passado ao presente, refletindo que o valor do carbono é mais importante agora;
- **Annual Market Discount Rate:** Também definido como 0%, seguindo a mesma lógica de preferência por benefícios imediatos;
- **Price of Carbon:** Preço do carbono em unidades monetárias por tonelada;
- **Carbon Pools:** Tabela com dados quantitativos sobre carbono;
- **Current LULC and Year:** Raster com uso e cobertura do solo de 2010 e
- **Future LULC and Year:** Raster com uso e cobertura do solo de 2020.

Como resultados, foram gerados rasters com os seguintes dados:

- **Tot_c_cur_[Suffix].tif/tot_c_fut_[Suffix].tif/tot_c_redd_[Suffix].tif:** Soma de todas as "pools" de carbono, resultante dos valores na tabela de dados de carbono;
- **Delta_cur_fut_[Suffix].tif/delta_cur_redd_[Suffix].tif:** Diferença de carbono estocado entre os cenários passado e presente, em toneladas por pixel;
- **Npv_fut_[Suffix].tif/npv_redd_[Suffix].tif:** Valor econômico do carbono sequestrado entre os cenários passado e presente, em dólares por pixel.

3.3 Carbono Orgânico do Solo

O mapa de carbono orgânico do solo brasileiro, cobrindo uma profundidade de 0-30 cm e com uma resolução espacial de 1 km, foi fornecido pela Embrapa. Este mapa foi gerado no âmbito da Ação Gerencial "Mapeamento Digital de Atributos dos Solos Brasileiros". O trabalho utilizou informações ambientais disponíveis, como dados sobre solo, relevo, vegetação e clima,

associando-os a métodos matemáticos estatísticos para inferir informações em locais não medidos.

Uma das informações mais importantes deste estudo é o estoque total de carbono do solo a 0-30 cm de profundidade no Brasil, que foi estimado em 36,3 Pg (petagramas), sendo que 1 Pg equivale a 1 bilhão de toneladas. Para tanto, o mapa da distribuição espacial do estoque de carbono na área de estudo (Figura 3) foi elaborado utilizando métodos de mapeamento digital de solos a partir de dados de solos, covariáveis ambientais e softwares livres, para compor o Mapa Global de Carbono Orgânico do Solo (GSOC). Este trabalho é parte dos objetivos da Aliança Mundial pelo Solo (GSP) da FAO.

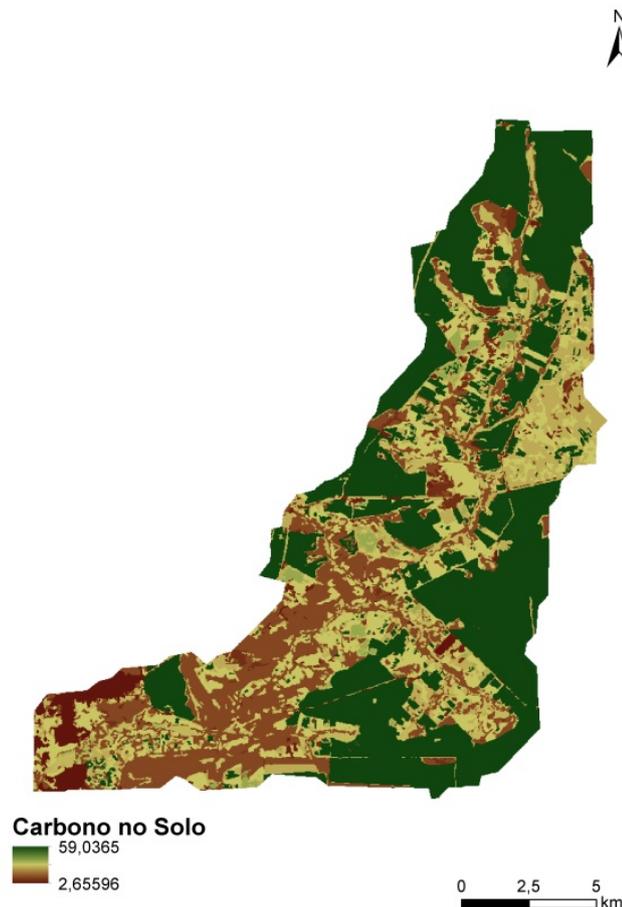


Figura 3. Distribuição espacial do Carbono orgânico no Solo (ton)_ na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pipiripau, situada no Distrito Federal – DF. Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

3.4 Carbono da Matéria Orgânica Morta

Os dados para as classes de uso do solo foram extraídos da literatura, conforme apresentado na **Tabela 2**. Para classes com área inferior a 0,001%, os valores foram considerados zero devido à sua insignificância nos resultados.

Tabela 2. Quantidade de Carbono da matéria orgânica morta

Código	Classes/Usos	C da matéria orgânica morta	Fonte
3	Formação Florestal	1,8	LIMA et al. (2020), IPCC (2006) e INEGEE (2021).
4	Formação Savânica	1,05	REZENDE; PAIVA; PEREIRA (2011).
9	Plantação Florestal	1	CARDOSO et al. (2015).
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	1,78	LIMA et al. (2020), IPCC (2006) e INEGEE (2021)
12	Formação Campestre	0,38	LIMA et al. (2020), IPCC (2006) e INEGEE (2021)
15	Pastagem	0,2	WOOMER et al. (2004)
21	Mosaico de agricultura e pastagem	0	Zero
24	Área Urbana	0	Zero
25	Outras Áreas Não Vegetadas	0	Zero
33	Rio, Lago e Oceano	0	Zero

39	Soja	0,88	WOOMER et al. (2004).
41	Outras Lavouras Temporárias	0	Zero
46	Café	0	Zero
48	Outras Lavouras Perenes	0	Zero
62	Algodão	0	Zero

-
1. REZENDE; PAIVA; PEREIRA (2011).
 2. BALBINOT et al. (2008).
 3. CARDOSO et al. (2015).
 4. LIMA et al. (2020), IPCC (2006) e INEGEE (2021).
 5. Foi adotado Zero Toneladas de Carbono
 6. WOOMER et al. (2004).
-

Na América do Sul, incluindo o Brasil, o preço do crédito de carbono gira em torno de US\$ 4,00 por tonelada. Essa informação é suportada por diversas fontes que analisam os mercados de carbono globais: Ekko Green e InfoMoney por exemplo. Informações do Observatório de Bioeconomia da Fundação Getulio Vargas (FGV) indicam que na América do Sul o preço médio da tonelada de carbono é de cerca de US\$ 4,00. Os valores do Custo Social do Carbono (SCC) assumidos para o INVEST então foram de US\$ 5,00 por tonelada de Carbono. Estas informações foram utilizadas para a valoração do Carbono sequestrado na área de estudo entre 2010 e 2020.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise do uso e cobertura do solo entre 2010 e 2020

Para a análise do uso e cobertura do solo no período de 2010 a 2020, foram incluídas apenas as classes que apresentaram área superior a 1% da área total da bacia. A Figura 4 apresenta em detalhes os resultados das variações nos estoques de carbono que ocorreram ao longo desse período para a bacia do Ribeirão Pipiripau. As formações de cerrado senso estrito e as campestres foram reduzidas em mais de 4% e 2% na área de estudo, respectivamente. As pastagens também diminuiriam aproximadamente 4%, enquanto as plantações de soja aumentaram 21% na área de estudo. Essas variações refletem mudanças importantes nas

dinâmicas de uso do solo, permitindo uma compreensão mais aprofundada dos impactos ambientais associados às diferentes práticas e coberturas vegetais.

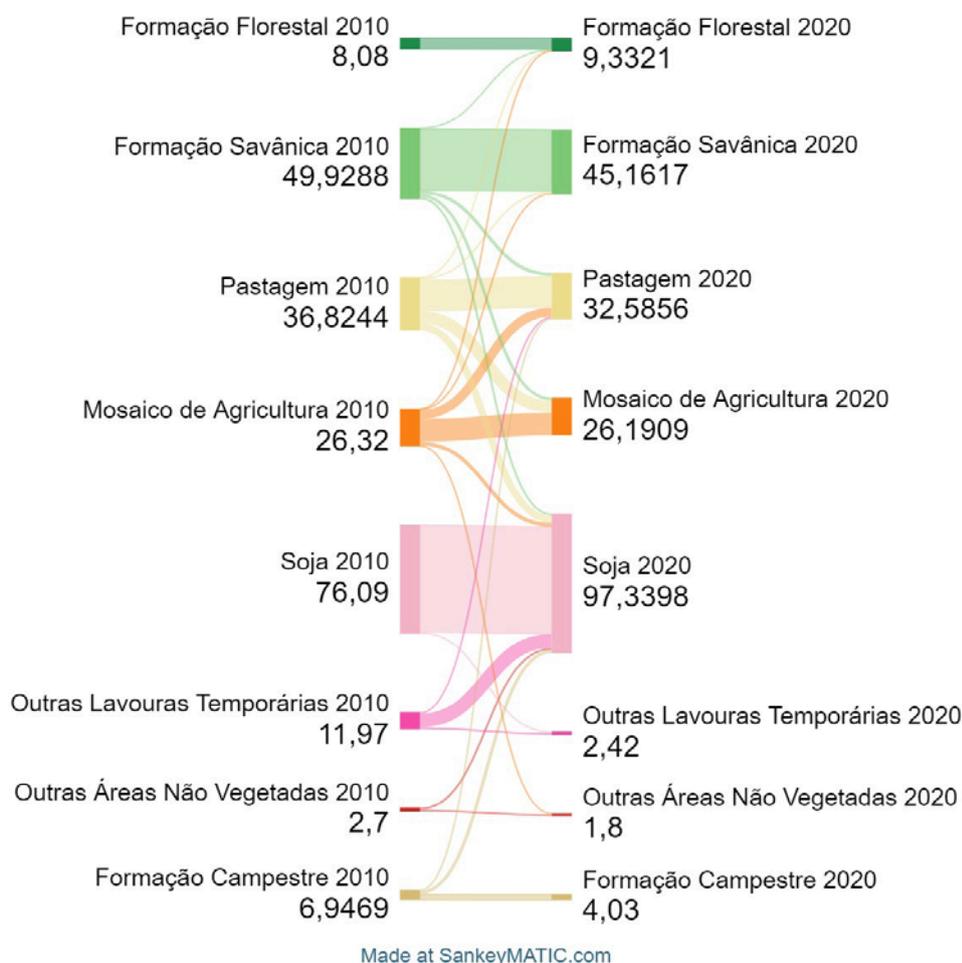


Figura 4. Diagrama de Sankey mostrando a variação na conversão do uso do solo entre os anos de 2010 e 2020 em km².

Na Tabela 3 é possível observar as mudanças na área de diferentes classes de uso do solo. A área de Formação Florestal na Bacia do Ribeirão Pipiripau apresentou um aumento de 1,14 km² (13,01%) ao longo da década, passando de 8,76 km² em 2010 para 9,90 km² em 2020. Esse crescimento é um indicativo positivo, sugerindo que foram implementadas atividades de recuperação ou conservação de áreas florestais nativas, cruciais para a manutenção da biodiversidade e para o sequestro de carbono.

Por outro lado, as formações savânicas foram reduzidas na área de estudo, diminuindo de 52,54 km² em 2010 para 46,24 km² em 2020. Isso representa uma redução total de 6,30 km², o que equivale a uma variação percentual negativa de 12%. Essa redução é preocupante, dado

que as formações savânicas desempenham um papel crucial na ecologia regional e no sequestro de carbono.

Em contraste, as Plantações Florestais tiveram um incremento significativo, de 0,6372 km² para 2,59 km², representando uma variação percentual de 306,62%. Embora essas plantações contribuam para o estoque de carbono, é importante considerar que a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos proporcionados por formações florestais nativas são superiores aos das florestas plantadas.

Tabela 3. Mudanças na área de diferentes classes de uso do solo na Bacia do Ribeirão Pípiripau.

Classe/Us	Para	Conversão em km ²	Porcentagem (%)
Formação Florestal	Formação Florestal	8,09	95,06
Formação Savânica	Formação Savânica	43,22	70,76
	Pastagem	2,36	3,86
	Mosaico de Agricultura e Pastagem	2,08	3,41
	Soja	1,55	2,54
Plantação Florestal	Plantação Florestal	0,43	66,74
Formação Campestre	Formação Campestre	4,04	48,43
	Pastagem	0,69	8,24
	Mosaico de Agricultura e Pastagem	0,49	5,86
	Soja	2,23	26,75
Pastagem	Pastagem	21,98	53,24
	Mosaico de Agricultura e Pastagem	8,37	20,27
	Soja	4,90	11,87
Mosaico de Agricultura e Pastagem	Mosaico de Agricultura e Pastagem	15,75	60,28
	Soja	2,67	10,20
Área Urbana	Área Urbana	4,62	99,66
Outras Áreas Não Vegetadas	Outras Áreas Não Vegetadas	1,25	45,01
	Soja	1,47	52,83
Soja	Soja	75,07	96,32
Outras Lavouras Temporárias	Outras Lavouras Temporárias	1,40	42,65
	Soja	9,50	29,02

As áreas destinadas à Pastagem diminuíram consideravelmente, de 39,87 km² em 2010 para 33,39 km² em 2020, uma redução de 6,48 km² (16,26%). Esta diminuição pode estar

associada à intensificação da agricultura, particularmente a expansão da soja, que é evidenciada pelo aumento significativo dessa cultura. O Mosaico de Agricultura e Pastagem se manteve relativamente estável, com uma ligeira redução de 0,43 km² (1,50%), indicando uma manutenção das práticas de uso misto da terra.

A área ocupada pelos cultivos de soja aumentou substancialmente, de 80,84 km² para 97,39 km², correspondendo a um incremento de 16,55 km² (20,47%). Esse crescimento expressivo reflete a intensificação da monocultura de soja na região, provavelmente impulsionada por fatores econômicos e políticas agrícolas favoráveis. Em contrapartida, outras lavouras temporárias apresentaram uma redução substancial de 14 km² para 3,28 km², uma variação negativa de 10,72 km² (76,57%), possivelmente indicando uma migração de áreas cultivadas com diversas culturas temporárias para a monocultura de soja.

Observou-se uma marcante diversidade de classes de uso da terra convergindo para a produção de soja em 2020, com particular destaque para a significativa contribuição das áreas não vegetadas, que tiveram quase metade de sua extensão ser transformada para a cultura da soja. Durante o período de 2010 a 2020, uma tendência notável foi a expansão significativa das áreas agrícolas e de pastagem, abrangendo uma variedade de origens de uso e cobertura do solo.

Apesar da dimensão relativamente pequena da formação florestal e da formação savânica dentro da bacia em estudo, aproximadamente 50 km² desta classe, aproximadamente 21,27% em comparação aos 235 km² da bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau, estes ecossistemas se mantiveram predominantemente conservados. Isso evidencia a eficácia de medidas de conservação e políticas voltadas para a preservação dessas áreas de extrema importância para a biodiversidade e para o equilíbrio ambiental regional.

As Áreas Urbanas registraram um pequeno aumento de 4,89 km² para 4,99 km² (2,04%), refletindo uma expansão urbana relativamente modesta. A classe denominada “Outras Áreas Não Vegetadas” foi reduzida significativamente de 4,45 km² para 2,63 km², uma variação de -40,90%, o que pode indicar um aumento em áreas vegetadas ou uso agrícola e, portanto, um acréscimo no estoque de carbono total.

Além disso, é interessante notar que as áreas convertidas para usos agrícolas e pecuários, em sua maioria, derivaram de terrenos anteriormente não vegetados e de culturas alternativas em sistema de consórcio e rodízio entre si. Esse padrão de conversão, embora represente uma transformação significativa na paisagem, demonstra uma certa mitigação do desmatamento na bacia, ao menos em comparação com cenários de conversão direta de florestas ou savanas.

Essas observações estão alinhadas com estudos anteriores (SPERA et al., 2016) que identificam a expansão da agricultura como um dos principais motores de mudança no uso da terra, e ressaltam a importância de estratégias de gestão sustentável para garantir a conservação dos recursos naturais e dos ecossistemas essenciais para a saúde ambiental e socioeconômica da região.

4.2 Dinâmica do estoque de Carbono da biomassa acima e abaixo do solo

Para analisar a dinâmica do estoque de carbono tanto acima quanto abaixo do solo, foi calculada a média de carbono em toneladas por hectare (Mg/ha^{-1}) para os anos de 2010 e 2020. Esse cálculo utilizou as variações das áreas dos diferentes usos do solo em 2020, multiplicadas pela média das densidades de carbono obtidas em 2010.

Esse procedimento nos permite identificar quanto carbono foi adicionado ou removido da área de estudo, considerando as diferentes classes de uso do solo. Com isso, podemos entender melhor as mudanças no estoque de carbono associadas às transformações na cobertura vegetal e nas práticas de manejo do solo ao longo do tempo, proporcionando uma visão detalhada dos impactos ambientais decorrentes dessas dinâmicas.

A **Figura 5** apresenta os mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2010 e 2020.

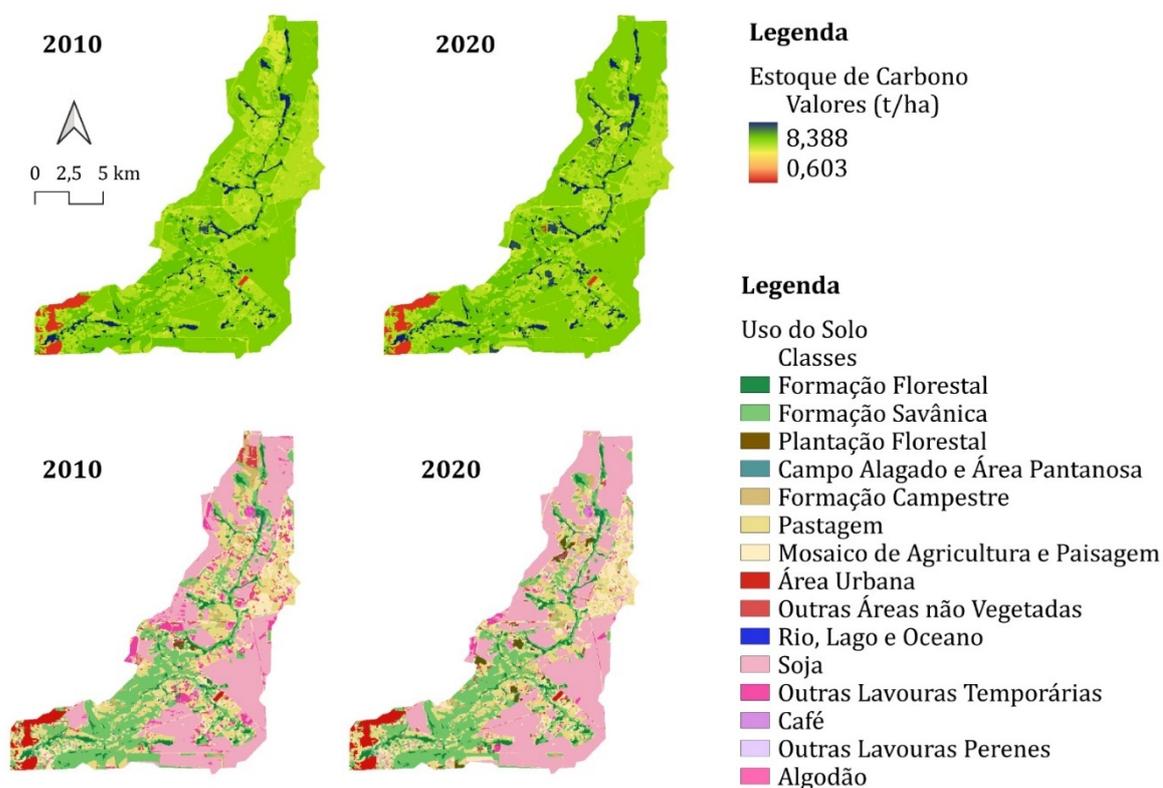


Figura 5. Estoque de Carbono Total nos anos 2010 e 2020 e respectivas classes de uso e cobertura da terra.

Complementarmente, na **Tabela 4** são apresentadas as áreas de cobertura das diferentes classes de uso e cobertura do solo consideradas na área e período de estudo.

Tabela 4. Estoque de Carbono Acima e Abaixo do Solo para os anos de 2010 e 2020.

Classes/Usos	Área Km ² (2010)	C acima do solo (2010)	C abaixo do solo (2010)	Área Km ² (2020)	C acima do solo (2020)	C abaixo do solo (2020)
Formação Florestal	8,76	26,33	14,37	9,90	26,63	14,53
Formação Savânica	52,54	12,51	11,42	46,24	11,72	10,70
Plantação Florestal	0,64	27,15	6,92	2,59	27,68	7,05
Campo Alagado e Área Pantanosa	0,72	20,85	16,77	0,64	20,83	16,76
Formação Campestre	8,98	3,76	2,85	5,01	3,61	2,74
Pastagem	39,87	5,84	2,32	33,39	5,46	2,16
Mosaico de agricultura e pastagem	28,74	5,76	2,71	28,31	5,74	2,69
Área Urbana	4,89	2,52	1,74	4,99	2,52	1,74
Outras Áreas Não Vegetadas	4,45	3,55	1,64	2,63	3,49	1,61
Rio, Lago e Oceano	0,09	11,80	8,98	0,06	11,80	8,98
Soja	80,84	3,55	0,78	97,39	4,14	0,91
Outras Lavouras Temporárias	14,00	5,12	1,52	3,28	4,57	1,35
Café	0,20	16,25	4,43	0,33	16,27	4,44
Outras Lavouras Perenes	0	0	0	0,01	0	0
Algodão	0	0	0	0,11	0	0

De maneira geral, o carbono acima do solo aumentou ligeiramente de uma média geral para a bacia do Ribeirão Pibiripau de 26,33 Mg/ha⁻¹ para 26,63 Mg/ha⁻¹, enquanto o carbono abaixo do solo subiu de 14,37 Mg/ha⁻¹ para 14,53 Mg/ha⁻¹. Esse aumento é consistente com estudos que mostram que florestas maduras continuam a sequestrar carbono tanto na biomassa aérea quanto no solo ao longo do tempo (SILVER et al., 2000).

O estoque de carbono acima do solo na formação savânica diminuiu de 12,51 Mg/ha⁻¹ em 2010 para 11,72 Mg/ha⁻¹ em 2020. De maneira similar, o carbono abaixo do solo também apresentou uma redução, passando de 11,42 Mg/ha⁻¹ para 10,70 Mg/ha⁻¹. Essas reduções são reflexos diretos da diminuição da área de formação savânica e das possíveis alterações nas práticas de uso do solo. Estudos mostram que a conversão de áreas naturais para usos agrícolas e pastoris resulta em perda de carbono do solo e da biomassa vegetal (LAL, 2004).

As savanas tropicais podem atuar como importantes sumidouros de carbono, e a sua conversão para outros usos pode liberar carbono armazenado, contribuindo para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GRACE et al, 2006). Essa mudança de uso da terra é uma tendência observada em muitas regiões do Cerrado brasileiro, onde a pressão por terras agrícolas leva à conversão de formações naturais (SPERA et al., 2016).

Para áreas de Plantações Florestais, o carbono acima do solo aumentou de 27,15 Mg/ha⁻¹ para 27,68 Mg/ha⁻¹ e o carbono abaixo do solo de 6,92 Mg/ha⁻¹ para 7,05 Mg/ha⁻¹. De acordo com Richards et al. (2020) esse aumento pode ser associado a políticas de reflorestamento e manejo sustentável que promovem a plantação de florestas comerciais, que embora menos biodiversas, são eficazes em sequestrar carbono.

Em áreas de Pastagem, o carbono acima do solo caiu de 5,84 Mg/ha⁻¹ para 5,46 Mg/ha⁻¹, e o carbono abaixo do solo de 2,32 Mg/ha⁻¹ para 2,16 Mg/ha⁻¹. As pastagens, quando bem manejadas, podem atuar como importantes sumidouros de carbono (CONANT et al., 2001).

Para a área ocupada pela cultura da Soja, o carbono acima do solo subiu de 3,55 Mg/ha⁻¹ para 4,14 Mg/ha⁻¹, enquanto o carbono abaixo do solo aumentou de 0,78 Mg/ha⁻¹ para 0,91 Mg/ha⁻¹. Apesar do aumento na área, a soja geralmente armazena menos carbono do que as pastagens ou florestas, uma vez que se trata de uma cultura anual (FEARNSIDE, 2015).

Para as outras áreas não vegetadas, os estoques de carbono acima do solo diminuíram ligeiramente de 3,55 Mg/ha⁻¹ em 2010 para 3,49 Mg/ha⁻¹ em 2020, e o carbono abaixo do solo diminuiu de 1,64 Mg/ha⁻¹ para 1,61 Mg/ha⁻¹. Embora esses números sejam relativamente pequenos comparados a áreas vegetadas, a redução da área não vegetada teve implicações importantes para o sequestro de carbono na bacia.

A conversão de áreas não vegetadas para áreas vegetadas (florestas, savanas, ou plantações florestais) geralmente resulta em um aumento no sequestro de carbono, através do crescimento vegetal onde é incorporado carbono a biomassa da planta à medida que ela se desenvolve e sequestrando CO² para fotossíntese, com acúmulo de matéria orgânica no solo e/ou por fim reduzindo a erosão, fazendo com que o carbono permaneça armazenado no solo. Vegetação nativa e plantada têm a capacidade de capturar e armazenar carbono na biomassa acima do solo e nas raízes, contribuindo positivamente para a mitigação das mudanças climáticas (LAL, 2004). Assim se confirma o que já havia sido comprovado em outros estudos, em que as áreas urbanas e outras áreas não vegetadas, quando revegetadas, podem contribuir significativamente para a captura de carbono, especialmente em regiões que antes eram usadas para agricultura intensiva ou outras atividades que degradaram a terra (HARRIS et al., 2006).

Os resultados desse estudo indicam que o estoque de carbono na Bacia do Ribeirão Pibiripau aumentou de 1.511.818,57 Mg/ha⁻¹ em 2010 para 1.522.135,84 Mg/ha⁻¹ em 2020. Este incremento de 18.362,52 Mg/ha⁻¹ ao longo de uma década é um indicador positivo, sugerindo uma ligeira melhora na capacidade da bacia de atuar como sumidouro de carbono. Esse aumento pode ser parcialmente atribuído às mudanças no uso do solo observadas durante o período, especialmente ao incremento nas áreas de formação florestal e plantação florestal.

O aumento do estoque de carbono observado na Bacia do Ribeirão Pibiripau está alinhado com os achados de diversos estudos que destacam a importância das florestas e áreas vegetadas na captura e armazenamento de carbono. Segundo Silva et al. (2023), iniciativas de reflorestamento e conservação de florestas nativas têm um impacto significativo na mitigação das mudanças climáticas através do sequestro de carbono atmosférico.

Finalmente, observou-se que o incremento das plantações florestais, embora menos eficiente em termos de biodiversidade, também contribui para o aumento do estoque de carbono, conforme apontado por Richards et al. (2020).

4.3 Análise da variação do estoque de carbono entre 2010 e 2020

O estudo sobre a variação do estoque de carbono na Bacia do Ribeirão Pibiripau, no Distrito Federal, entre 2010 e 2020, revelou mudanças significativas no uso do solo que impactaram diretamente o carbono armazenado na região. A análise mostrou uma complexa dinâmica de expansão e redução de diferentes classes de uso do solo, cada uma contribuindo de maneira distinta para o sequestro de carbono.

A expansão significativa na área de soja e a diversificação de culturas, como café e algodão, são visíveis na imagem de uso do solo de 2020 (**Figura 6**). Estas mudanças no uso da

terra, especialmente em grandes monoculturas, têm um impacto direto na variação de carbono, contribuindo para o aumento dos estoques de carbono devido à conversão de áreas não vegetadas em áreas de cultivo agrícola.

Áreas em vermelho e amarelo indicam perda de carbono e correspondem às áreas agrícolas, de pastagem, outras áreas não vegetadas e áreas urbanas. A conversão de florestas ou vegetação natural em áreas agrícolas ou pastagens resulta em perda de carbono, tanto no solo quanto na biomassa acima do solo. Esta tendência é comum em regiões de expansão agrícola, onde a necessidade de novas áreas de cultivo leva ao desmatamento e degradação do solo (GIBBS et al., 2010; RUDORFF et al., 2011).

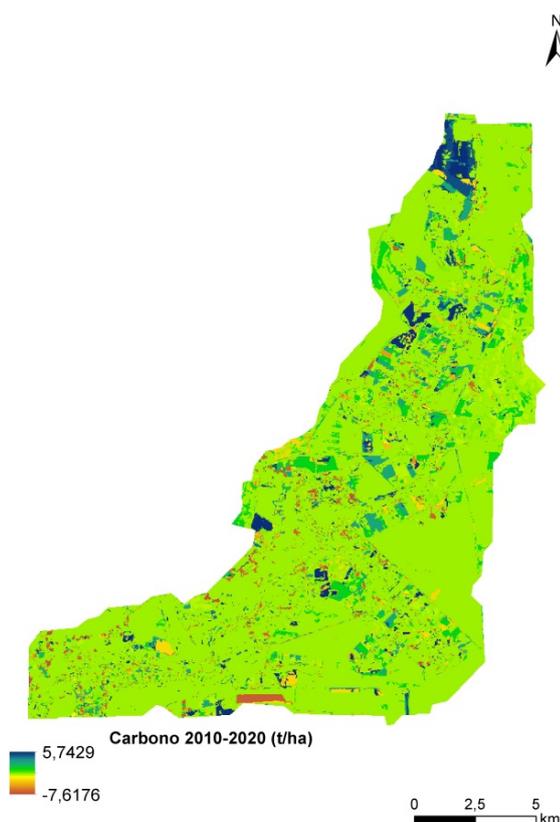


Figura 6. Distribuição espacial da variação no Estoque de Carbono da Bacia do Ribeirão Pipiripau, no Distrito Federal, entre os anos de 2010 e 2020.

As áreas que apresentam pouca variação de carbono podem estar relacionadas a regiões de mosaico de agricultura e pastagem, onde há um equilíbrio entre atividades agrícolas e vegetação remanescente. Este tipo de uso do solo pode resultar em menor variação no estoque de carbono, pois a presença contínua de vegetação pode compensar parcialmente as emissões de carbono provenientes das atividades agrícolas (FOLEY et al., 2011).

O aumento da área e do carbono armazenado, tanto na superfície quanto no subsolo, indica uma recuperação ou ampliação da cobertura florestal. Isso pode ser resultado de esforços de reflorestamento ou recuperação de áreas degradadas, conforme destacado por vários estudos que enfatizam a importância da restauração florestal para mitigar as mudanças climáticas (CHAZDON et al., 2016).

Por outro lado, a diminuição da área e do carbono sugere a conversão dessas terras para o uso agrícola. Esse fenômeno é comum em regiões onde a pressão por terras agrícolas é alta (GIBBS et al., 2010). Enquanto o aumento significativo na área e no carbono armazenado aponta para uma intensificação das atividades de plantação florestal, possivelmente com fins comerciais ou de conservação.

A redução na área de pastagens e a relativa estabilidade no mosaico indicam uma possível conversão de pastagens para cultivos agrícolas, uma tendência observada em várias regiões tropicais (FOLEY et al., 2011). Contudo, a expansão significativa na área de soja reflete o crescimento da agricultura de commodities, um fator crucial no desmatamento e na mudança de uso da terra em várias regiões, especialmente na América do Sul (RUDORFF et al., 2011).

Finalmente, o aumento na área de cultivo de café e a introdução de algodão, embora em menor escala, indicam uma diversificação das culturas agrícolas.

5.4 Análise econômica do carbono na Bacia do Ribeirão Piriapau

A **Figura 7** aponta que nas áreas com maior sequestro de carbono temos até US\$ 28,71 por pixel, que no caso da área total é expressa pelo limite em hectares, e nas áreas que tivemos perda de carbono, chegamos a um valor de – US\$ 38,08. A área mais significativa que ilustra essa mudança é a classe de Áreas não vegetadas que de 2010 para 2020 teve uma redução de 40,9% na sua área o que fez com que se tornasse a classe onde está concentrado o maior valor econômico, com indicação de que foi efetuado um reflorestamento na área ou um grande plantio, justificando assim o impacto positivo no sequestro de carbono.

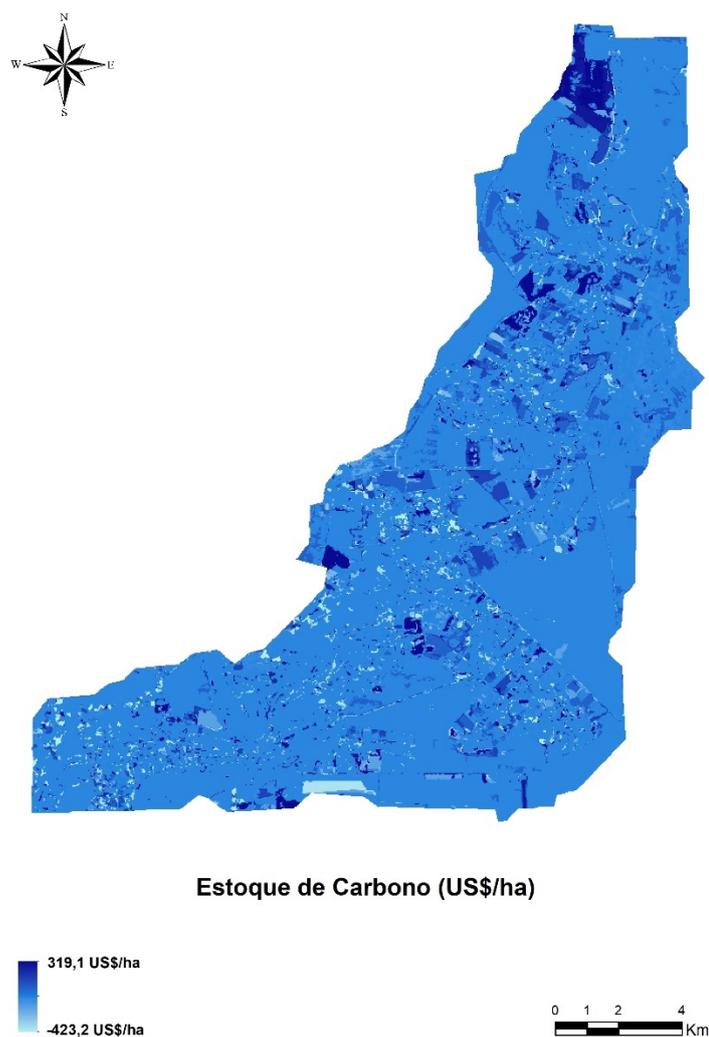


Figura 7. Valoração Econômica em Dólares por hectare (US\$/ha) para o estoque de carbono na Bacia do Ribeirão Pipiripau, no Distrito Federal.

O ganho líquido do estoque de carbono na Bacia do Ribeirão Pipiripau de 2010 para 2020 é avaliado em aproximadamente US\$ 91.812,58 (**Tabela 5**). Este valor econômico atribuído ao estoque de carbono destaca a importância de políticas de conservação e reflorestamento não apenas do ponto de vista ambiental, mas também econômico. A valorização econômica do carbono armazenado pode servir como um incentivo adicional para os proprietários de terras adotarem práticas sustentáveis, reforçando a ideia de que a conservação ambiental pode ser financeiramente viável e vantajosa.

Tabela 5. Valoração de cada classe de uso da terra em termos de Carbono.

Código LULC	Classe/Uso	Média US\$	Valor US\$
3	Formação Florestal	2,23	24535,12
4	Formação Savânica	0,31	16111,49
9	Plantação Florestal	9,73	28042,38
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	0,87	614,28
12	Formação Campestre	-0,52	-2889,16
15	Pastagem	-0,34	-12737,69
	Mosaico de agricultura e		
21	pastagem	-0,57	-17944,91
24	Área Urbana	-1,74	-9644,85
25	Outras Áreas Não Vegetadas	-2,04	-5944,74
33	Rio, Lago e Oceano	-0,83	-56,40
39	Soja	0,69	74792,20
41	Outras Lavouras Temporárias	-0,22	-809,03
46	Café	3,80	1404,76
48	Outras Lavouras Perenes	-26,12	-156,73
62	Algodão	-29,95	-3504,21
Balanco geral			91.812,51

A quantidade de carbono armazenada no período e área de estudo (235 km²) foi significativa, com incremento do estoque de carbono estimado em 18.362,52 toneladas ao longo de uma década. Isto sugere que as práticas de manejo e as políticas de conservação tiveram impactos positivos na manutenção e sequestro de carbono nesta bacia hidrográfica nos últimos anos. Este valor pode ser comparado a estudos em outras bacias hidrográficas semelhantes, como os estudos desenvolvidos por Fearnside (2010), onde mostram que as áreas de floresta tropical podem armazenar entre 150 e 300 toneladas de carbono por hectare.

Embora a Bacia do Ribeirão Pipiripau não apresente predominância de floresta densa em sua paisagem, a quantidade de carbono estocada nestas formações foi substancial, indicando o alto potencial da região para contribuir com a mitigação das mudanças climáticas. Com isso, o valor estimado dos serviços ambientais hidrológicos na bacia excede os 3 milhões de reais (CAMELO, 2011), sendo que 20% deste total se deve ao sequestro de carbono da área.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado sobre a Bacia do Ribeirão Pipiripau demonstrou a relevância da dinâmica de uso e cobertura do solo na determinação do estoque de carbono, essencialmente para a mitigação das mudanças climáticas e a gestão ambiental sustentável. Entre 2010 e 2020, houve um aumento significativo nas áreas de formações florestais nativas e de plantações florestais, indicando um potencial recuperação e conservação dessas áreas, cruciais para o sequestro de carbono e a manutenção da biodiversidade.

A análise do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica Ribeirão Pipiripau revelou que a área de formação florestal aumentou 13%, enquanto as plantações florestais tiveram um incremento de 307%, um aumento de 0,6 km² para 2.6 km². Estes aumentos sugerem que práticas de manejo sustentável e políticas de reflorestamento estão apresentando efeitos positivos na área de estudo. Em contrapartida, houve uma redução de 12% na área de formação savânica, destacando a necessidade de estratégias específicas para a conservação dessas formações vegetais. As áreas de pastagens também foram reduzidas em 16,3%, a maior parte convertidas em mosaicos de agricultura e plantios de soja.

Houve um incremento de 10.317 Toneladas de Carbono na bacia hidrográfica Ribeirão Pipiripau entre 2010 e 2020, passando de um total de 1.511.818,57 toneladas em 2010 para 1.522.135,84 toneladas em 2020. Isto indica uma ligeira melhoria na capacidade desta bacia de atuar como sumidouro de carbono, alinhado com as iniciativas de reflorestamento e conservação de florestas nativas, que contribuem com a mitigação das mudanças climáticas. A valoração econômica do carbono incrementado foi estimada em US\$ 91.812,58, considerado o ganho líquido no período de estudo, reforçando a importância de políticas de conservação do ponto de vista ambiental e econômico, mediante a adoção de práticas sustentáveis do uso e manejo da terra.

A análise econômica do carbono destacou que as áreas com maior sequestro de carbono estão associadas aos reflorestamentos e grandes plantações agrícolas, indicando que essas áreas podem gerar benefícios econômicos através da comercialização de créditos de carbono. Este ganho contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, diminuindo a pegada de carbono das empresas e permitindo que elas desempenhem um papel ativo na mitigação das mudanças climáticas.

A valorização do carbono como serviço ambiental hidrológico, estimada em mais de 3 milhões de reais, com 20% deste valor atribuído ao sequestro (incremento) de carbono, evidenciando o potencial econômico da conservação ambiental.

5 REFERÊNCIAS

- AHAMED, T.; TIAN, L.; ZHANG, Y.; TING, K. C. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. *Biomass and Bioenergy*. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 2455-2469, 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de Diagnóstico Socioambiental da Bacia do Ribeirão Pipuripau**. Programa Produtor de Água, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual Operativo do Programa Produtor de Água**. 2. ed. Brasília: ANA, 2012. Disponível em: <<https://goo.gl/wdXssY>>. Acesso em: 10 Maio. 2016.
- ANGELOPOULOU, Theodora et al. Remote sensing techniques for soil organic carbon estimation: **A review**. *Remote Sensing*, v. 11, n. 6, p. 676, 2019.
- ASSAD, Eduardo Delgado et al. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. **ILPF: Inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, p. 153-67, 2019.
- BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K. DE; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. *Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, v. 1, p. 131-149, 2008.
- BARNES, M. C.; TODD, A. H.; LILJA, R. W.; BARTEN, P. K. **Forests, Water and People: Drinking water supply and forest lands in the Northeast and Midwest United States**. 2009.
- BOTELHO, R. G. M. Planejamento Ambiental em Microbacias Hidrográficas In: GUERRA.A.J.T.; SILVA, A.S. da; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações.**, Rio de Janeiro, 2010.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas: cerrado**. Brasília: MMA, 2011. 200 p.
- BUTT, A., SHABBIR, R., AHMAD, S. S., & AZIZ, N. Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan. *The Egyptian journal of remote sensing and space science*, 18(2), 251-259, 2015.
- CAMELO, A.P.S. **Quantificação e valoração dos serviços ambientais relativos à conservação do solo e da água na bacia do ribeirão Pipuripau**. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Florestal. Trabalho de conclusão de curso. 2008.
- CHAVES, H. M. L.; PIAU, L. P. Efeito da variabilidade da precipitação pluvial e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento de uma bacia hidrográfica do Distrito Federal. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 32, nº1, p.333- 343. 2008.
- CHAZDON, R. L., & URIARTE, M. Natural regeneration in the context of large-scale forest and landscape restoration in the tropics. *Biotropica*, 48(6), 709-715, 2016.
- CHEN, Yongzhe et al. Maps with 1 km resolution reveal increases in above-and belowground forest biomass carbon pools in China over the past 20 years. *Earth System Science Data*, v. 15, n. 2, p. 897-910, 2023.
- CONANT, Richard T.; ELLIOTT, Edward T. Manejo de pastagens e conversão em pastagens: efeitos no carbono do solo. *Ecological applications*, v. 11, n. 2, p. 343-355, 2001.
- CORAZZA, E. J. et al. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 425-432, 1999.
- DE SOUZA SILVA, IZAIAS SOUZA; EVANGELISTA, JAQUELINE PEREIRA; DE MELO, SANDRO CRISTIANO. Fragmentação do cerrado mato-grossense e suas implicações socioambientais: um estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Suspiro. *Cadernos de Ensino, Ciências & Tecnologia*, v. 2, n. 4, p. 28-49, 2021.

- DISPERATI, A.; SANTOS, J. D.; OLIVEIRA FILHO, P. D.; NEEFF, T. Aplicação da técnica “filtragem de locais máximas” em fotografia aérea digital para a contagem de copas em reflorestamento de *Pinus elliottii*. **Scientia Forestalis**, v. 76, n. 1, p. 45-55, 2007.
- DUARTE, T. E. P. N.; LEITE, L. B. **Cidades médias no cerrado brasileiro: desafios para a conservação da biodiversidade**. Terra Plural, Ponta Grossa, v. 14, p. 1–7, 2020.
- FEARNSIDE, Philip M. Florestas tropicais. **Ciência e política de mudanças climáticas**, págs. 484-493, 2010.
- FEARNSIDE, Philip M. Amazon dams and waterways: Brazil’s Tapajós Basin plans. **Ambio**, v. 44, p. 426-439, 2015.
- FOLEY, J., RAMANKUTTY, N., BRAUMAN, K. et al. Soluções para um planeta cultivado. **Nature** 478, 337–342 (2011). <https://doi.org/10.1038/nature10452>.
- FOLLETT, R. F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. **Soil and tillage research**, v. 61, n. 1-2, p. 77-92, 2001.
- FURLEY, Peter A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian cerrados. **Global Ecology and Biogeography**, v. 8, n. 3-4, p. 223-241, 1999.
- GIBBS, W.W. A escolha das prioridades. **Scientific American SCIAM**, v.4, n.41, p.100-107, 2005. (Edição Especial).
- GIBBS, H.K., RUESCH, A.S., ACHARD, M.K., CLAYTON, M.K., HOLMGREN, P., RAMANKUTTY, N., FOLEY, A. Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. **Proceedings of National Academy of Sciences** 107, no.38, 16732-16737, 2010.
- GOMES, L.; MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M. M. C. How can we advance the knowledge on the behavior and effects of fire in the Cerrado biome? **Forest Ecology and Management**, v. 417, p. 281-290, 2018.
- GONZÁLEZ-JARAMILLO, V.; FRIES, A.; BENDIX, J. AGB estimation in a tropical mountain forest (TMF) by means of RGB and multispectral images using an unmanned aerial vehicle (UAV). **Remote Sensing**, v. 11, n. 12, p. 1413, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11121413>
- GRACE, Peter R. et al. SOCRATES—um modelo simples para prever mudanças de longo prazo no carbono orgânico do solo em ecossistemas terrestres. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 5, p. 1172-1176, 2006.
- GROOT, Jeroen CJ; JELLEMA, André; ROSSING, Walter AH. Designing a hedgerow network in a multifunctional agricultural landscape: Balancing trade-offs among ecological quality, landscape character and implementation costs. **European Journal of Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 112-119, 2010.
- HARRIS, JA, HOBBS, RJ, HIGGS, E., & ARONSON, J. Restauração ecológica e mudança climática global. **Restauração Ecológica**, 14 (2), 170-176, 2006.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Biomass brasileiros**. Disponível em: <<https://cnae.ibge.gov.br/en/component/content/94-7a12/7a12-vamos-conhecer-o-brasil/nosso-territorio/1465-ecossistemas.html?Itemid=101#cerrado>>. Acesso em: 03/05/2024.
- IIZUKA, Kotaro et al. Estimating tree height and diameter at breast height (DBH) from digital surface models and orthophotos obtained with an unmanned aerial system for a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forest. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 13, 2018.
- LAL, RATTAN. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

- LAL, RATTAN. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. **Land degradation & development**, v. 17, n. 2, p. 197-209, 2006.
- MAPBIOMAS, **Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2020** - São Paulo, Brasil, 2021 - 93 páginas. Disponível em: <<http://alerta.mapbiomas.org>>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- MAPBIOMAS. Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. 2021. **Projeto MapBiomas – Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <<https://plataforma.mapbiomas.org/>>. Acessado em: 13 de maio de 2024.
- MARTIN, A. R.; DORAISAMI, M.; THOMAS, S.C. Global patterns in wood carbon concentration across the world's trees and forests. **Nat. Geosci.** v. 11, n. 915, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0246-x>.
- MARTINS, A. P.; GALVANI, E. Desempenho do algoritmo SEBAL para estimativa de vazão em bacias hidrográficas do Cerrado Brasileiro. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 687-698, 2020.
- MENEZES, R. S. C. et al. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, v. 390, p. 114943, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943>
- MUTANGA, ONISIMO; KUMAR, LALIT. Google earth engine applications. **Remote sensing**, v. 11, n. 5, p. 591, 2019.
- NUKUSHEVA, A. et al. Global warming problem faced by the international community: international legal aspect. **International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics**, v. 21, p. 219-233, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10784-020-09500-9>
- OZSAHIN, Emre; DURU, Umit; EROGLU, Ilker. Land use and land cover changes (LULCC), a key to understand soil erosion intensities in the Maritsa Basin. **Water**, v. 10, n. 3, p. 335, 2018.
- PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de carbono em cerrado *sensu stricto* do Distrito Federal. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 527-538, 2011.
- PATENAUDE, Genevieve; MILNE, Ronald; DAWSON, Terence P. Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation: reporting to the Kyoto Protocol. **Environmental Science & Policy**, v. 8, n. 2, p. 161-178, 2005.
- PICOLI, M. C. A.; CAMARA, G.; SANCHES, I.; SIMÕES, R.; CARVALHO, A.; MACIEL, A.; COUTINHO, A.; ESQUERDO, J.; ANTUNES, J.; BEGOTTI, R. A.; ARVOR, D.; ALMEIDA, C. Big earth observation time series analysis for monitoring Brazilian agriculture. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 145, p. 328-339, 2018
- PIMM, S. L.; JENKINS, C. Conservação da biodiversidade. **Scientific American SCIAM**, v.4, n. 41, p.58-65, 2005. (Edição Especial).
- PINHEIRO, E. D. S.; DURIGAN, G. Dinâmica espaço-temporal (1962-2006) das fitofisionomias em unidade de conservação do Cerrado no sudeste do Brasil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 32, p. 441-454, 2009.
- POULTER, B.; FRANK, D.; CIAIS, P.; MYNENI, R. B., *et al.* Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. **Nature**, v. 509, n. 7502, p. 600-603, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature13376>
- RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V.; SOUZA, A. L. & NARDELLI, A. M. B. **Quantificação de Biomassa e estimativa de estoque de**

- carbono em uma floresta madura no município de Viçosa, Minas Gerais.** *Árvore*, Viçosa-MG, v. 33, n. 5, p. 917-926, 2009.
- RICHARDS, Ryan C. et al. Farmer preferences for reforestation contracts in Brazil's Atlantic Forest. **Forest Policy and Economics**, v. 118, p. 102235, 2020.
- ROCHA, A. J. A. Caracterização limnológica do Distrito Federal. In: Novaes Pinto, M. (og). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. 2. Ed. Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2007. 469-492p.
- ROQUETTE, J. G. **Distribuição da biomassa no Cerrado e a sua importância na armazenagem de carbono.** *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 28, n. 3, p. 1350–1363, 1 jul.-set., 2018.
- ROSA, M.; SHIMBO, J. Z.; AZEVEDO, T. MapBiomass-Mapeando as transformações do território brasileiro nas últimas três décadas. **VIII Simpósio de Restauração Ecológica**, p. 95-100, 2019.
- RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor et al. The soy moratorium in the Amazon biome monitored by remote sensing images. **Remote Sensing**, v. 3, n. 1, p. 185-202, 2011.
- SAMBERGER, Caroline. The role of water circularity in the food-water-energy nexus and climate change mitigation. **Energy Nexus**, v. 6, p. 100061, 2022.
- SCHWAB, Klaus; DAVIS, Nicholas. **Aplicando a quarta revolução industrial.** Edipro, 2019.
- SHARP R, CHAPLIN-KRAMER R, WOOD S, GUERRY A, TALLIS H, RICKETTS T. InVEST User's Guide Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Version 3.5.0. The Natural Capital Project. Stanford University, University of Minnesota, **The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund**, 2018.
- SHUKLA, P. R.; SKEG, J.; BUENDIA, E. C.; MASSON-DELMOTTE, V., et al. (eds) *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*; **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Geneva**, Switzerland, 2019; in press.
- SILVA, D.; GALVANIN, E. A. S.; MENEZES, R. Spatio-temporal analysis of land use/land cover change dynamics in Paraguai/Jauquara Basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 6, p. 1-20, 2022.
- SILVA, ALANA GABRIELA MIRA. Sequestro de carbono por árvores urbanas no bairro das Graças em Recife-PE. 2023. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Brasil.
- SILVER, WHENDEE L.; OSTERTAG, REBECCA; LUGO, ARIEL E. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. **Restoration ecology**, v. 8, n. 4, p. 394-407, 2000.
- SPAWN, S. A., SULLIVAN, C. C., LARK, T. J., & GIBBS, H. K. Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 112, 2020.
- SPERA, S. A., GALFORD, G. L., COE, M. T., MACEDO, M. N., & MUSTARD, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global change biology**, v. 22, n. 10, p. 3405-3413, 2016.
- SRIVASTAVA, A., BREWER, A. K., MAUSER-BUNSCHOTEN, E. P., KEY, N. S., KITCHEN, S., LLINAS, A., ... & Treatment Guidelines Working Group The World Federation Of Hemophilia. **Guidelines for the management of hemophilia. Haemophilia**, v. 19, n. 1, p. e1-e47, 2013.
- STRASSBURG, B. B.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A. et al. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 4, p. 1-3, 2017.

- VELASTEGUI-MONTOYA, A., MONTALVÁN-BURBANO, N., CARRIÓN-MERO, P., RIVERA-TORRES, H., SADECK, L., & ADAMI, M. Google Earth Engine: a global analysis and future trends. **Remote Sensing**, 15(14), 3675, 2023.
- VÅGEN, T.-G.; LAL, Rattan; SINGH, B. R. Soil carbon sequestration in sub-Saharan Africa: a review. **Land degradation & development**, v. 16, n. 1, p. 53-71, 2005.
- VELDKAMP, A.; VERBURG, PETER H. Modelling land use change and environmental impact. **Journal of environmental management**, v. 72, n. 1-2, p. 1-3, 2004.
- YANG, XIN; LO, C. P. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 9, p. 1775-1798, 2002.
- YU, C. M. **Sequestro florestal de carbono no Brasil: dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. Annablume, 2004.