

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

MARIA EDUARDA DOS SANTOS PEDROSO

**ANÁLISE TEMPORAL DO USO DO SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO BOM
JARDIM: APLICAÇÃO DE sPRI E NDVI NA AVALIAÇÃO DE ESTOQUE DE
CARBONO (CO₂ FLUX)**

UBERLÂNDIA
2024

MARIA EDUARDA DOS SANTOS PEDROSO

ANÁLISE TEMPORAL DO USO DO SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO BOM JARDIM: APLICAÇÃO DE SPRI E NDVI NA AVALIAÇÃO DE ESTOQUE DE CARBONO (CO₂ FLUX)

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof^a. Dra. Raquel Naiara Fernandes Silva

UBERLÂNDIA

2024

**ANÁLISE TEMPORAL DO USO DO SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO BOM
JARDIM: APLICAÇÃO DE sPRI E NDVI NA AVALIAÇÃO DE ESTOQUE DE
CARBONO (CO₂ FLUX)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Raquel Naiara Fernandes Silva

Uberlândia, 10 de fevereiro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Raquel Naiara Fernandes Silva, Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dra. Suelem Farias Soares Martins, Universidade Federal de Uberlândia

Dedico esse trabalho a todos os meus professores que me apoiaram até aqui, pois é através do conhecimento e da consciência que podemos criar um futuro sustentável, promissor e igualitário para o nosso planeta. Sem luta não há colheita e sem reivindicação não há liberdade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram no decorrer desta jornada, especialmente:

À minha orientadora Prof^a Dra. Raquel Naiara Fernandes Silva que teve papel fundamental na elaboração deste trabalho, que sempre acreditou em mim, que sempre me transmitiu o conhecimento da forma mais suave possível.

À professora Dra. Tatiane, que me ensinou muito sobre o ato de recuperar um ambiente degradado, ressignificando toda a destruição humana causada sobre este.

Ao CNPQ que me forneceu 1 ano de bolsa para realizar minha pesquisa.

Ao meu namorado Pedro, que tanto me apoiou nessa jornada.

À minha gata e filha Nico Robin, que me trouxe felicidade.

“Ecologia sem luta de classes é jardinagem.”

Chico Mendes

RESUMO

A bacia do Ribeirão Bom Jardim apresenta um ecossistema significativo que desempenha um papel fundamental na manutenção da biodiversidade e dos recursos hídricos. O uso de imagens de satélite e índices de vegetação tem se revelado eficazes na análise e avaliação da cobertura vegetal em bacias hidrográficas, especialmente no entendimento da biomassa e suas implicações na mitigação das mudanças climáticas. O objetivo deste trabalho é analisar as mudanças no uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão Bom Jardim, por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice De Reflectância Fotoquímica reescalonado para valores positivos (sPRI) e Fluxo de Gás Carbônico (CO2 FLUX), permitindo compreender os padrões de densidade florestal, a capacidade no sequestro de carbono atmosférico e a eficiência fotossintética da região. Primeiramente a área de estudo foi delimitada, permitindo com que se estude suas principais características tais como relevo, clima, tipo de solo e fitofisionomia, posteriormente, foi feito com o uso de SIG, a análise de uso do solo e desmatamento, usando as imagens do Landsat 7 e 5, por fim foram calculados os índices NDVI, sPRI e CO2 FLUX. Os resultados demonstram que houve uma grande supressão de vegetação nativa do cerrado entre os anos de 2002 e 2008, contribuindo para uma diminuição no sequestro de carbono e eficiência fotossintética. Essas constatações reforçam a importância da vegetação nativa do cerrado não apenas como ecossistemas valiosos, mas também como contribuintes significativos para a mitigação das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Bacia do Ribeirão Bom Jardim, CO2 FLUX, Cerrado, Preservação, SIG

ABSTRACT

The Ribeirão Bom Jardim basin features a significant ecosystem that plays a fundamental role in maintaining biodiversity and water resources. The use of satellite images and vegetation indices has proven effective in the analysis and assessment of vegetation cover in watersheds, especially in understanding biomass and its implications for climate change mitigation. The objective of this study is to analyze changes in land use and occupation in the Ribeirão Bom Jardim basin, using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the Photochemical Reflectance Index rescaled for positive values (sPRI), and Carbon Dioxide Flux (CO2 FLUX), allowing for an understanding of forest density patterns, atmospheric carbon sequestration capacity, and the photosynthetic efficiency of the region. Firstly, the study area was delineated, enabling the examination of its key characteristics such as topography, climate, soil type, and vegetation. Subsequently, using GIS (Geographic Information System), land use and deforestation analysis was conducted using Landsat 7 and 5 images. Finally, NDVI, sPRI, and CO2 FLUX indices were calculated. The results demonstrate a significant suppression of native cerrado vegetation between 2002 and 2008, leading to a decrease in carbon sequestration and photosynthetic efficiency. These findings underscore the importance of native cerrado vegetation not only as valuable ecosystems but also as significant contributors to climate change mitigation.

Keywords: Ribeirão Bom Jardim basin, CO2 FLUX, Cerrado, Preservation, GIS

Lista de Figuras:

- Figura 1: Fitofisionomias do bioma cerrado.
- Figura 2: Representação da vegetação conforme o NDVI.
- Figura 3: Representação geográfica - bacia do Ribeirão Bom Jardim.
- Figura 4: Ribeirão Bom Jardim.
- Figura 5: Cobertura Florestal da Bacia do Ribeirão Bom Jardim.
- Figura 6: Solos da bacia do Ribeirão Bom Jardim.
- Figura 7: Hipsometria da bacia do Ribeirão Bom Jardim.
- Figura 8: Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Ribeirão Bom Jardim (2020 – Landsat 5).
- Figura 9: Gráfico referente as áreas desmatadas por ano.
- Figura 10: Área desmatada por ano e região.
- Figura 11: NDVI do ano 2000.
- Figura 12: NDVI do ano de 2010.
- Figura 13: NDVI do ano de 2023.
- Figura 14: Histogramas de frequência do NDVI dos anos de 2000, 2010 e 2023, respectivamente.
- Figura 15: SPRI do ano 2000.
- Figura 16: SPRI do ano de 2010.
- Figura 17: SPRI do ano de 2023.
- Figura 18: Histogramas de frequência do sPRI dos anos de 2000, 2010 e 2023, respectivamente.
- Figura 19: CO2 FLUX do ano 2000.
- Figura 20: CO2 FLUX do ano de 2010.
- Figura 21: CO2 FLUX do ano de 2023.
- Figura 22: Histogramas de frequência do sPRI dos anos de 2000, 2010 e 2023, respectivamente.
- Figura 23: Gráfico de correlação entre o CO2 FLUX e o sPRI.
- Figura 24: Gráfico de correlação entre o CO2 FLUX e o NDVI.

Siglas e Abreviações:

APP – ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE

CO2FLUX – FLUXO DE GÁS CARBONICO

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA

IDE-SISEMA - INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL
DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

KM² – QUILÔMETROS QUADRADOS

M² – METROS QUADRADOS

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION

NDVI - ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA

PRI – ÍNDICE DE REFLECTÂNCIA FOTOQUÍMICA

QGIS – QUANTUM GIS

SCP – SEMI-AUTOMATIC CLASSIFICATION

SIG – SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

SRTM - SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION

sPRI – ÍNDICE DE REFLECTÂNCIA FOTOQUÍMICA REESCALONADO PARA
VALORES POSITIVOS

ZEE - ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Cerrado: fitofisionomias, características e importância	14
3.2 Sistemas de informações geográfica (SIG)	16
3.3 Fundamentos do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)	18
3.4 Fundamentos do pri – índice de reflectância fotoquímica e CO2 FLUX.....	19
3.5 Degradação do solo e recuperação de áreas degradadas	20
3.6 Políticas ambientais e legislação	22
4. METODOLOGIA	23
4.1 Área de estudo	23
4.2 Uso do solo.....	24
4.3 Índices de vegetação	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.1 A bacia do Ribeirão Bom Jardim.....	26
5.2 Uso e ocupação do solo.....	30
5.3 NDVI.....	32
5.4 SPRI	36
5.5 CO2 Flux.....	39
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

O uso de terra no Brasil para produção agrícola e afins representa um fator importante sobre o meio ambiente, uma vez que para sua exploração requer o desmatamento das áreas de vegetação nativa afetando diretamente nas bacias hidrográficas e na biodiversidade local. Dessa forma, há uma urgência para que haja monitoramento contínuo do uso e da ocupação do solo, a fim de ter a adoção de medidas de controle ambiental e implementação de políticas de sustentabilidade. Neste sentido, o monitoramento de terreno e de vias d'água é indispensável para o planejamento do uso da terra.

O mapeamento geomorfológico com o uso de geotecnologias atuais possibilita um estudo mais aprofundado de um determinado local. O monitoramento geomorfológico feito a partir do uso de Sistemas de informações geográficas (SIG) é um importante aliado na conservação de recursos naturais e preservação ambiental. Com o uso de SIG, é possível identificar quais os tipos de solo no local de estudo além de verificar o seu uso e manejo, principalmente em Áreas de Proteção Ambiental (APP).

As APP são definidas territorialmente levando em consideração a existência de atributos e serviços, principalmente os ecológicos, presentes no terreno e que estão nos dispositivos legais pertinentes (MEDEIROS et al., 2004). Desde a década de 70, com a criação do Programa Nacional de Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE), instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente regulamentado pelo decreto nº 4.297/2002, e a implementação de políticas públicas para o ordenamento do território, a discussão sobre o uso e a ocupação do solo tem ganhado destaque no Brasil.

De acordo com Harris et al (2021), as florestas globais liberam aproximadamente 8,1 bilhões de toneladas de dióxido de carbono na atmosfera anualmente devido ao desmatamento e à degradação, ao passo que absorvem cerca de 16 bilhões de toneladas de CO₂ a cada ano, sendo assim, a proteção de florestas primárias e secundárias maduras, é um fator crítico para o combate das mudanças climáticas.

Nos últimos anos, o país tem enfrentado grandes desafios em relação a essas questões, como o desmatamento ilegal, a expansão da fronteira agrícola e a urbanização desordenada. De acordo com informações fornecidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2018), as atividades humanas foram responsáveis por aproximadamente 1,0°C de aumento na temperatura global ao longo do último século. Essa projeção pode se estender para 1,5°C entre os anos de 2030 e 2052, caso as emissões de dióxido de carbono (CO₂) mantenham sua trajetória ascendente.

O NDVI, derivado de dados de sensoriamento remoto, é particularmente significativo ao medir a quantidade e a qualidade da vegetação em uma determinada região. Esse índice é crucial para avaliar a cobertura vegetal, identificar áreas suscetíveis à degradação e monitorar mudanças ao longo do tempo. Em bacias hidrográficas, a vegetação desempenha um papel crucial na regulação do ciclo hidrológico, influenciando a qualidade da água, a erosão do solo e a recarga de aquíferos.

A análise de parâmetros como NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), sPRI (Índice de Reflexão Espectral da Clorofila) e CO2FLUX (Fluxo de Dióxido de Carbono) desempenha um papel importante na compreensão e monitoramento das bacias hidrográficas, fornecendo informações valiosas sobre os ecossistemas aquáticos e terrestres interconectados. Essas métricas são fundamentais para avaliar a saúde e a dinâmica ambiental dessas áreas, bem como para orientar práticas de gestão sustentável e mitigação de impactos.

O sPRI, por sua vez, fornece informações específicas sobre a atividade fotossintética nas plantas. Esse índice é valioso para avaliar a saúde das plantas, identificar estresses ambientais e compreender as respostas das comunidades vegetais às mudanças nas condições climáticas e ambientais. Em bacias hidrográficas, a saúde da vegetação terrestre está diretamente relacionada à qualidade da água e à estabilidade do ecossistema.

Conforme descrito por Rahman et al. (2000), a captura de carbono pelas plantas está associada à combinação do NDVI com o PRI para formar um índice inovador denominado CO2flux. Esse índice foi criado com a finalidade de avaliar a quantidade de carbono armazenada em vegetação natural. A retenção de carbono pela vegetação desempenha um papel crucial na atenuação dos efeitos nocivos do dióxido de carbono (CO2) no meio ambiente, ao mesmo tempo em que desempenha uma função essencial no processo de fotossíntese.

A bacia do Ribeirão Bom Jardim está localizada nos municípios de Uberlândia e Uberaba, no estado de Minas Gerais. Com uma área drenada de 398,54 km², a bacia desempenha um papel crucial na região, especialmente em relação aos recursos hídricos e ao uso do solo (BRITO, 2001).

A bacia é caracterizada por um padrão de chuvas bem definido, apresentando um extenso período de estiagem de março a outubro, seguido por uma estação chuvosa de novembro a fevereiro. A área de estudo na bacia tem sido alvo de investigações voltadas para compreender a interação entre solos, relevo e recursos hídricos, bem como para monitorar a evolução do uso da terra na região. Esses estudos são essenciais para o planejamento e a gestão ambiental da bacia, visando à conservação e ao uso sustentável de seus recursos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como principal objetivo investigar e analisar os impactos das mudanças nos padrões de uso do solo na bacia do Ribeirão Bom Jardim, utilizando o índice de CO2 FLUX como indicador-chave.

2.2 Objetivos Específicos

- Coletar, processar e analisar dados de séries temporais de imagens de satélite para avaliar as mudanças no uso do solo na bacia do Ribeirão Bom Jardim, com foco na variação do NDVI ao longo do tempo.
- Identificar e mapear as áreas degradadas evidenciando a diminuição da vegetação nativa do cerrado na bacia, a partir das análises de NDVI, sPRI e CO2Flux.
- Avaliar as causas e os fatores que contribuíram para a piora do NDVI e a diminuição da vegetação nativa, incluindo a expansão da agricultura, a urbanização e outras atividades humanas.
- Contribuir para o desenvolvimento de políticas e práticas de conservação ambiental e planejamento sustentável na região, com base nas conclusões e recomendações do estudo.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

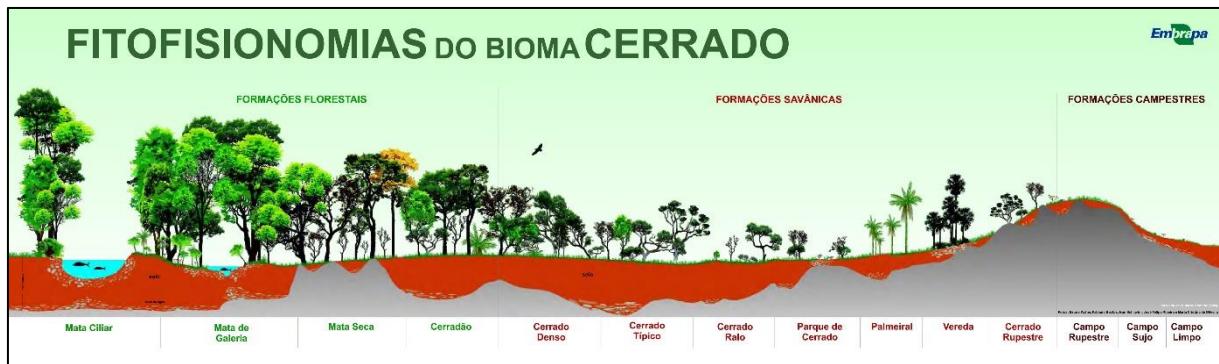
3.1 Cerrado: fitofisionomias, características e importância

O bioma do Cerrado compreende diversas formas de vegetação, cujas diferenças são, em geral, influenciadas por fatores relacionados ao solo e à topografia, como sua origem geológica, profundidade, sistema de drenagem, presença de formações rochosas no subsolo, nível do lençol freático e as características de textura e fertilidade do solo. (ALVIN, 1954; EITEN, 1972; MARIMON JUNIOR; HARIDASAN, 2005; SOARES et al., 2015).

Esses fatores edáficos e topográficos desempenham um papel fundamental na diversificação das paisagens e na ecologia do Cerrado, influenciando a composição da flora e a distribuição de espécies vegetais ao longo desse vasto bioma (ROQUETTE, 2018). Além disso, essa variabilidade ambiental é crucial para a adaptação de diferentes formas de vida, contribuindo para a rica biodiversidade que caracteriza o Cerrado. Portanto, compreender as nuances desses fatores é essencial para a conservação e manejo sustentável desse ecossistema.

O Cerrado é um bioma brasileiro conhecido por sua diversidade de fitofisionomias, que abrangem desde formações arbóreas até ambientes mais abertos, conforme demonstrado na Figura 01.

Figura 1: Fitofisionomias do bioma cerrado.



Fonte: EMBRAPA, 2021.

As principais fitofisionomias presentes no cerrado são:

- Cerrado sentido restrito: Caracterizado por uma cobertura arbórea de 20% a 50%, com árvores de baixa estatura, troncos retorcidos e ramificações irregulares, além da presença de arbustos e subarbustos. É comum encontrar indícios de incêndios nessa fitofisionomia, que pode apresentar variações, como Cerrado Denso, Cerrado Típico, Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre.
- Campo Limpo: Esta fitofisionomia é composta principalmente por vegetação herbácea, com poucos arbustos e a ausência de árvores. Também pode apresentar subtipos, dependendo das condições de umidade do solo e topografia, incluindo Campo Limpo Seco, Campo Limpo Úmido e Campo Limpo com Murundus.
- Campo Sujo: Apresenta uma estrutura herbácea e arbustiva, com arbustos e subarbustos esparsos e indivíduos de espécies do Cerrado sentido restrito, mas menos desenvolvidos. Dependendo da profundidade do lençol freático, podem ocorrer três subtipos fisionômicos: Campo Sujo Seco, Campo Sujo Úmido e Campo Sujo com

Murundus.

- Parque Cerrado: Caracteriza-se pela presença de árvores agrupadas em pequenas elevações do terreno, conhecidas como "murundus". A cobertura arbórea varia de 5% a 20%, com altura média das árvores de 3 a 6 metros.
- Cerradão: É uma formação florestal com aspectos xeromórficos, composta por árvores de médio porte com alturas de 8 a 15 metros. As copas das árvores são contínuas, proporcionando uma cobertura de solo que varia de 50% a 90%.
- Mata Seca: São formações florestais que apresentam diferentes graus de caducidade durante a estação seca, influenciados pela profundidade e qualidade do solo. Normalmente, os solos dessas áreas são ricos em nutrientes. Podem ser classificadas em três subtipos: Mata Seca Sempre-Verde, Mata Seca Semidecídua e Mata Seca Caduca.
- Mata de Galeria: É uma vegetação florestal que acompanha rios de pequeno porte e córregos, formando corredores fechados ao redor do curso d'água. As árvores têm alturas médias de 20 a 30 metros e a cobertura chega a 70% a 95%.
- Mata Ciliar: Refere-se à vegetação florestal que acompanha rios de médio e grande porte, com árvores que podem chegar a mais de 30 metros de altura. A largura de sua vegetação nas margens do rio raramente ultrapassa 100 metros.
- Palmeiral: Caracteriza-se pela presença de uma única espécie de palmeira, frequentemente com a escassa presença de árvores dicotiledôneas. Pode ocorrer em terrenos bem drenados, bem como em áreas brejosas.
- Vereda: É uma fitofisionomia que apresenta a palmeira buriti em meio a agrupamentos densos de espécies arbustivas e herbáceas, em solos saturados de água na maior parte do ano.
- Campo Rupestre: Trata-se de uma formação herbácea e arbustiva, com a presença eventual de pequenas árvores de até 2 metros de altura. Geralmente ocorre em altitudes elevadas e em áreas com afloramentos rochosos.

Essas fitofisionomias diversas contribuem para a notável biodiversidade do Cerrado, que é um dos biomas mais ricos em espécies do mundo.

3.2 Sistemas de informações geográfica (SIG)

Sistemas de Informações Geográficas (SIG), também conhecidos como Geographic

Information Systems (GIS), são um conjunto de ferramentas e tecnologias utilizadas para capturar, armazenar, gerenciar, analisar e representar dados geográficos e espaciais. Esses sistemas desempenham um papel fundamental na gestão e análise de informações relacionadas a locais geográficos, permitindo a tomada de decisões informadas em diversas áreas, como planejamento urbano, gestão de recursos naturais, transporte, agricultura, geologia, meio ambiente e muito mais.

A essência dos SIG reside na capacidade de representar dados com componentes geoespaciais, permitindo que sejam correlacionados e visualizados em um contexto geográfico. Os dados geográficos podem incluir informações como coordenadas geográficas (latitude e longitude), limites de regiões, características do terreno, redes de transporte, recursos naturais, dados demográficos e muito mais. Essa capacidade de associar dados a locais específicos e analisá-los em um contexto espacial é o que torna os SIG uma ferramenta poderosa.

Sistemas de Informação Geográfica são sistemas de informação projetados especificamente para armazenar, analisar e gerenciar dados geográficos. Esses dados se referem a objetos e fenômenos em que a localização geográfica desempenha um papel fundamental e é essencial para seu tratamento (CÂMARA 1996). De acordo com Ferreira *et al.* (2011), a capacidade de sobrepor mapas ou camadas de informações, resultando na criação de novos dados, oferece uma abordagem integrada e sistemática para compreender a dinâmica ambiental de um determinado local.

Dessa forma, as geotecnologias como o Sistema de Informações Geográficas (SIG), são de extrema importância no monitoramento de bacias hidrográficas e sobre o estado de conservação dos arredores da região analisada, sendo então de caráter decisório no gerenciamento de recursos hídricos, levando em consideração também a vantagem de se ter um baixo custo tecnológico.

Segundo Guo *et al.* (2017), entre todos os sistemas de sensores atualmente disponíveis, os sistemas ópticos têm sido os mais empregados até o momento em pesquisas sobre vegetação em Unidades Agropecuárias (AUs), com ênfase nos de média resolução espacial (variando de 4 a 30 metros). Notavelmente, os sensores Landsat TM (Thematic Mapper) e ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) são os mais utilizados para esses fins. Outros sensores, como o Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) e o Sentinel-2, ainda não foram amplamente adotados em estudos, sendo atribuído esse cenário ao lançamento recente do primeiro e à disponibilidade gratuita dos dados do segundo.

O QGIS, também conhecido como Quantum GIS, é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) de código aberto e gratuito que é amplamente utilizado em todo o mundo.

Ele fornece uma plataforma poderosa para a aquisição, análise, visualização e gerenciamento de dados geoespaciais, sendo uma importante ferramenta a ser utilizadas em análises ambientais e avaliações de impactos antrópicos.

3.3 Fundamentos do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

A degradação do meio ambiente ocorre devido a uma exploração contínua e não sustentável, ameaçando assim a conservação de florestas pelo mundo. Assim, é notável a fragilidade ambiental evidenciando a necessidade de que se tenha o estudo das transformações da paisagem. É preciso que se considere a quantidade de biomassa e assim propor estratégias de monitoramento de distúrbios naturais e aqueles considerados antrópicos.

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) permite com que sejam feitas análises de condição de vegetação natural, podendo avaliar-se o avanço do desmatamento em um determinado local com o auxílio da ferramenta (Equação 1).

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

Equação 1

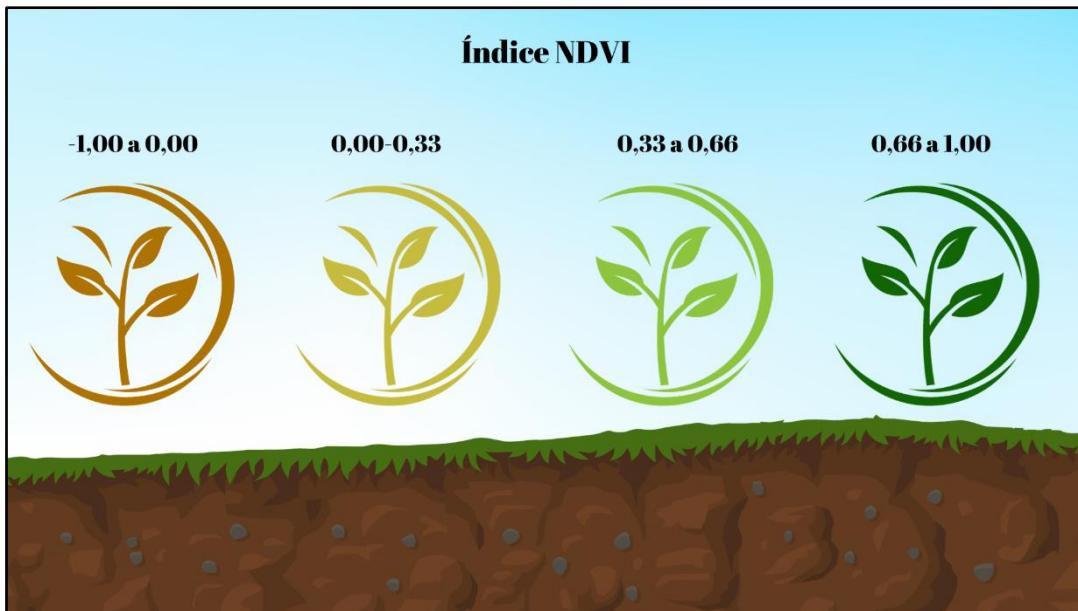
Sendo NIR a reflexão no espectro próximo do infravermelho e RED o reflexo na faixa vermelha do espectro. Dentro deste índice, há valores que variam de -1,0 à 1,0, que representam cores verdes, os valores negativos representam basicamente nuvens, neve e água, e valores que se aproximam de zero representam rochas e solo exposto.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, ou NDVI, tem a capacidade de estimar a quantidade de folhas fotossinteticamente ativas em uma determinada área, variando em uma escala de -1 a +1 (Demarchi et al., 2011). Valores de NDVI que se aproximam de +1 sinalizam uma maior densidade de cobertura vegetal, enquanto valores negativos indicam a presença de água na superfície (Allen et al., 2007; Tasumi et al., 2008; Bezerra et al., 2011). A Figura 2 apresenta um esquema representativo da coloração apresentada pela vegetação nos mapas de NDVI de acordo com o índice.

Quando a vegetação apresenta alguma patologia, sua camada esponjosa interna se deteriora e a planta passa a absorver mais luz infravermelha do que refletir. Assim, o NDVI nos permite a avaliar o estado da saúde das plantas e a abundância vegetativa com base em como a

vegetação reflete a luz em determinadas frequências. Assim, quanto mais pontos com a coloração verde, menor o estresse sofrido pela vegetação do local de estudo.

Figura 2: Representação da vegetação conforme o NDVI.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

3.4 Fundamentos do PRI – Índice de Reflectância Fotoquímica e CO₂ FLUX

O Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) é um parâmetro derivado dos dados espectrais obtidos por meio de sensores de satélite e é utilizado para analisar a produtividade e a qualidade da vegetação. O PRI representa a eficiência da utilização da luz na fotossíntese das plantas (BELLOLI, 2019).

O índice PRI é calculado a partir das diferenças de reflexão entre as bandas do verde e azul da imagem satelital, sendo normalizado para facilitar a comparação entre diferentes cenas e períodos de tempo (GAMON et al., 2015; GAMON; PEÑUELAS; FIELD, 1992). Essa normalização é importante para permitir a análise temporal da vegetação e detectar mudanças na cobertura vegetal ao longo do tempo.

O PRI é frequentemente utilizado em estudos de sensoriamento remoto e monitoramento ambiental, pois pode fornecer informações valiosas sobre a biomassa vegetal, o estoque de carbono e a produtividade agrícola.

Além disso, o PRI pode ser combinado com outros índices, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), para obter uma análise mais completa da vegetação e sua variabilidade ao longo do tempo, permitindo a análise temporal e mudanças na cobertura

vegetal.

O Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) é calculado a partir das diferenças de reflexão entre as bandas verde e azul da imagem de satélite (Equação 2). O PRI representa a eficiência da utilização da luz na fotossíntese das plantas (MAGALHÃES et al., 2023).

$$PRI = \frac{R_{green} - R_{blue}}{R_{green} + R_{blue}}$$

Equação 2

O resultado obterá valores entre -1 e 1, onde valores próximos a 1 indicam alta eficiência na utilização da luz na fotossíntese. Os valores comuns para vegetação sadia ficam entre -0,2 e 0,2 (GAMON et al., 1992).

Em alguns casos, pode ser necessário realizar um reescalonamento dos valores de PRI para evitar valores negativos, denominado de sPRI.

$$sPRI = \frac{PRI + 1}{2}$$

Equação 3

O sPRI obterá valores entre 0 e 1, onde valores próximos a 1 indicam alta eficiência na utilização da luz na fotossíntese, e valores próximos a 0 indicam baixa eficiência na utilização da luz na fotossíntese.

Portanto, a captura florestal de carbono está condicionada à combinação dos índices NDVI e sPRI, resultando na formulação de um novo índice denominado CO₂Flux, conforme proposto por Baptista em 2003 e 2004 (Equação 4). A metodologia do CO₂flux foi proposta por Rahman et al (2000).

$$CO2flux = (NDVI * sPRI)$$

Equação 4

3.5 Degradação do solo e recuperação de áreas degradadas

A deterioração de uma região ocorre quando a vegetação e, consequentemente, a fauna são danificadas, removidas ou deslocadas. A camada de solo fértil é perdida, removida ou encoberta, enquanto a vazão e a qualidade ambiental dos corpos d'água superficiais e/ou

subterrâneos sofrem modificações.

A restauração de áreas degradadas envolve a implementação de medidas para reverter os danos causados ao ambiente. Isso pode incluir a reintrodução de vegetação nativa, a reabilitação do solo, e a restauração da qualidade e fluxo dos corpos d'água afetados. Esse processo visa recuperar a biodiversidade, promover a sustentabilidade e restabelecer as condições naturais da área degradada.

As principais causas de degradação do solo incluem práticas agrícolas inadequadas, pressão populacional e exploração inadequada dos recursos naturais. Estudos e levantamentos mundiais registraram que cerca de 15% dos solos de regiões habitadas do planeta foram classificados como degradados devido às atividades humanas (OLDEMAN, 1994).

A recuperação de áreas degradadas envolve várias estratégias e técnicas, como:

Controle da erosão: A adoção do plantio direto em nível e a construção de terraços são as técnicas mais importantes no controle da erosão, evitando a degradação biológica das áreas

Matas ciliares: A restauração de matas ciliares é uma estratégia eficaz para a recuperação de áreas degradadas, pois ajudam na estabilização do solo e na prevenção da erosão

Recuperação de substratos: A caracterização de substratos para fins de recuperação de áreas degradadas é fundamental para a aplicação de técnicas adequadas

Transposição de Serapilheira: A existência da serapilheira na camada superficial do solo desempenha um papel crucial não apenas facilitando a introdução de novas sementes, mas também desempenhando um papel vital no fornecimento de nutrientes ao solo e às plantas durante seu processo de decomposição. Esse processo é considerado fundamental para restaurar a fertilidade do solo em ambientes nos estágios iniciais da sucessão ecológica (EWEL, 1976).

De acordo com Martins (2007), transferir a serapilheira e o banco de sementes do solo pode ser uma estratégia viável para acelerar o processo de sucessão em áreas onde o solo foi degradado. Isso se deve ao fato de que na camada superficial do solo ou nos restos vegetais, encontram-se diversas sementes de espécies variadas, nutrientes, matéria orgânica e microrganismos essenciais para a recuperação da fertilidade e da atividade biológica desses solos. No entanto, é importante destacar a dificuldade em determinar o componente mais adequado a ser utilizado, dada a considerável variabilidade na composição da serapilheira e do banco de sementes em diferentes locais.

Método de nucleação: Este método propõe a criação de pequenos núcleos dentro da área degradada, induzindo uma heterogeneidade ambiental e facilitando a recuperação dos ecossistemas. Os núcleos desempenham um papel essencial ao facilitar o recrutamento de novas espécies provenientes de fragmentos vizinhos e do banco de sementes local. Além disso,

exercem influência sobre a formação de novos núcleos ao longo do tempo. Esse papel dos núcleos cria condições propícias para a regeneração natural, promovendo a chegada de espécies vegetais, animais e microrganismos, e estabelecendo uma rede de interações entre eles.

Reflorestamento: O desenvolvimento de um modelo de reflorestamento da área degradada é uma medida eficaz de recuperação, que pode ser replicada em outros lotes do mesmo município ou estado.

A recuperação de áreas degradadas é um processo que requer tempo e recursos, mas é essencial para a preservação da biodiversidade, redução da erosão de solo e a restauração das capacidades de produção de alimentos e outros produtos. Salienta-se que a recuperação de uma área extensa, principalmente se acometida de erosões e ravinas profundas, possui um elevado custo, dessa forma, é necessário que surja novas medidas e legislações que garantam com que o processo seja efetivo, feito por profissionais qualificados, e que a recuperação seja assistida por 10 anos ou mais, até o crescimento total das espécies clímax.

3.6 Políticas ambientais e legislação

As políticas ambientais são um conjunto de normas, leis e ações públicas visando à preservação do meio ambiente em um dado território. No Brasil, a política ambiental é debatida desde a primeira metade do século XX e até hoje rende profundas e acaloradas discussões

O Novo Código Florestal é uma legislação brasileira que estabelece normas para a proteção e conservação da vegetação nativa, incluindo a recuperação de áreas degradadas. O código estabelece a possibilidade de transformar áreas naturais em áreas de preservação permanente, o que pode levar a uma maior degradação ambiental e a uma maior fragmentação do ecossistema. Além disso, o código não aborda adequadamente a recuperação de áreas degradadas, o que pode resultar na manutenção de áreas danificadas e na impossibilidade de restaurar a integridade e a diversidade natural das regiões afetadas. O código também estabelece penalidades para infrações ambientais, mas elas são consideradas muito baixas e não dissuasivas, o que pode resultar na falta de prevenção e na contínua degradação ambiental

Uma Área de Preservação Permanente (APP) é uma área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. A Lei nº 12.651/2012 define as categorias de APP e suas dimensões mínimas. A lei também autoriza a continuidade das atividades agrossilvipastorais, de ecoturismo e de turismo rural em áreas rurais consolidadas até

22 de julho de 2008. Contudo, a continuidade dessas atividades em uma APP, como de uso consolidado, é dependente da adoção de boas práticas de conservação de solo e água, uma vez que se trata de áreas com diversas fragilidades ambientais, demandando manejos diferenciados aos reservados às áreas produtivas fora das APPs. Para efeito de recomposição de algumas categorias de APP em áreas consideradas consolidadas, a Lei 12.651/2012 estabelece regras transitórias, indicando as dimensões mínimas a serem recompostas com vistas a garantir a oferta de serviços ecossistêmicos a elas associados

Uma Área de Preservação Permanente (APP) é uma área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. A Lei n. 12.651/2012 define as categorias de APP e suas dimensões mínimas. A lei também autoriza a continuidade das atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural em áreas rurais consolidadas até 22 de julho de 2008. Contudo, a continuidade dessas atividades em uma APP, como de uso consolidado, é dependente da adoção de boas práticas de conservação de solo e água, uma vez que se trata de áreas com diversas fragilidades ambientais, demandando manejos diferenciados aos reservados às áreas produtivas fora das APPs. Para efeito de recomposição de algumas categorias de APP em áreas consideradas consolidadas, a Lei 12.651/2012 estabelece regras transitórias, indicando as dimensões mínimas a serem recompostas com vistas a garantir a oferta de serviços ecossistêmicos a elas associados

Segundo a Lei nº 12.651/2012, as faixas marginais de cursos d'água naturais perenes e intermitentes, excluindo os efêmeros, são as seguintes:

- Cursos d'água de até 10 metros de largura: 30 metros de APP
- Cursos d'água de 10 a 50 metros de largura: 50 metros de APP
- Cursos d'água de 50 a 200 metros de largura: 100 metros de APP
- Cursos d'água de 200 a 600 metros de largura: 200 metros de APP
- Cursos d'água de largura superior a 600 metros: 500 metros de APP.

4. METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A área de estudo foi delimitada a partir de dados espaciais disponibilizados no banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais (INPE), a partir do relevo regional, delimitou-se no QGIS a bacia hidrográfica do Ribeirão Bom Jardim. Com o uso das imagens do satélite LANSAT 8, foi possível fazer uma classificação dos cursos hídricos. Após essa delimitação, extraiu-se da base de dados da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISEMA), as delimitações dos tipos de solo e das fitofisionomias da região.

Após a extração de dados ser concluída no formato ‘shapefile’, estes foram manipulados no programa QGIS, para recorte de feições e classificação de polígonos para elaboração de legendas nos mapas renderizados.

Para elaboração de mapas de relevo, foi feito o download dos arquivos do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), importante ferramenta para a distinção das diferentes unidades de relevo e setores da paisagem, encontrados na base de dados da National Aeronautics and Space Administration (NASA). Estes foram importados para o QGIS, recortou-se para a feição de delimitação da bacia, após isso, criou-se 8 classes de alturas que compreendiam a variação do relevo da região, variando de 50 em 50 metros na legenda para facilitar a compreensão.

4.2 Uso do solo

O plugin Semi-Automatic Classification (SCP) foi instalado no QGIS por meio do Gerenciador de Complementos. Uma imagem Landsat 7, do ano de 2020, foi baixada para a área de interesse, utilizando o serviço online do INPE. A imagem foi então carregada no QGIS e submetida a processos de pré-processamento, incluindo a correção atmosférica, utilizando as ferramentas disponíveis no SCP. Em seguida, a imagem foi segmentada para identificar regiões homogêneas.

A Classificação Supervisionada foi realizada no SCP para categorizar as regiões segmentadas em classes de uso do solo, com treinamento fornecido ao algoritmo. O programa roda um código que treina uma inteligência artificial, permitindo com que seja identificado os polígonos de uso do solo. O ideal é rodar o plugin por umas 5 vezes antes de elaborar o mapa, para maior precisão e acurácia. A classificação resultante foi refinada visualmente, e ajustes manuais foram feitos conforme necessário. O mapa de uso do solo foi gerado usando o SCP, ou a imagem classificada foi exportada para ser processada por outras ferramentas disponíveis no QGIS.

O resultado final, representado pelo mapa de uso do solo, foi validado comparando-o com dados de referência (Brito, 2001), e ajustes adicionais foram feitos para aprimorar a precisão. O processo utilizado, assim como os parâmetros escolhidos e os ajustes realizados,

foram documentados para referência futura.

4.3 Índices de vegetação

Para cálculo e mapeamento dos índices (NDVI, sPRI e CO2FLUX), utilizou-se as imagens do LANDSAT 5 e 7 todas referentes ao mês de outubro de cada ano (2000, 2010 e 2023), obtidas da base de dados do INPE. As bandas de cada índice foram pré-selecionadas, utilizou-se no estudo as bandas 1 (azul), 2 (verde), 3 (vermelho) e a 4 (infravermelho próximo), após isso, toda a operação foi feito de acordo com as Equações 5, 6, 7 e 8, na calculadora RASTER do QGIS.

- Para o cálculo do NDVI com as imagens do Landsat 7 e 5:

$$NDVI = \frac{(Banda\ 4 - Banda\ 3)}{Banda\ 4 + Banda\ 3}$$

Equação 5

- Para cálculo do PRI e sPRI:

$$PRI = \frac{Banda\ 2 - Banda\ 1}{Banda\ 2 + Banda\ 1}$$

Equação 6

$$sPRI = \frac{PRI + 1}{2}$$

Equação 7

- Para cálculo do CO2 FLUX:

$$CO2flux = (NDVI * sPRI)$$

Equação 8

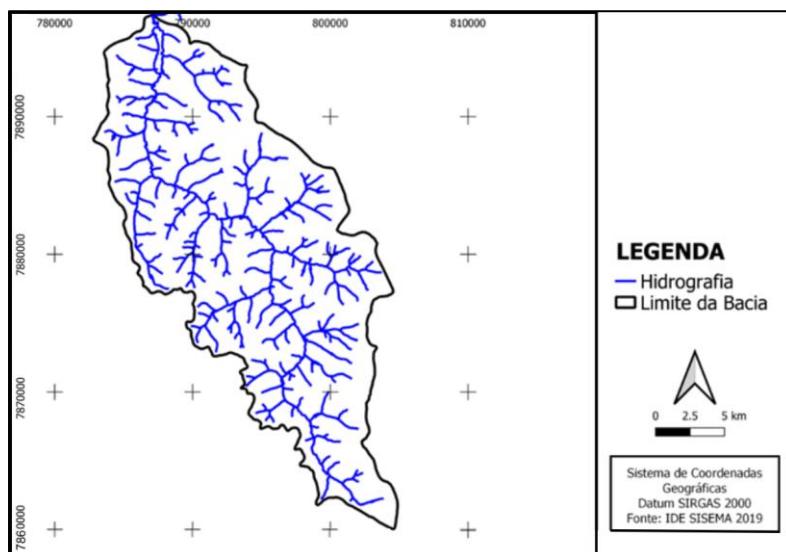
Assim, foram obtidos os histogramas e a classificação dos índices escalonados. Dessa forma, foi feito o recorte dos dados para a área da bacia de estudo, e renderizou-se os mapas nos layouts.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 A bacia do Ribeirão Bom Jardim

A bacia do Ribeirão Bom Jardim se encontra no Triângulo Mineiro no Estado de Minas Gerais. A sua bacia possui uma área de aproximadamente 398,54 km². Sua nascente se encontra na cidade de Uberaba, já a sua foz está localizada no município de Uberlândia. Situa-se entre as coordenadas 18°58'00" – 19°20'30" de latitude Sul e 48°04'00"- 48°18'00" de longitude oeste de Greenwich (BRITO, 2002). Foi feito a partir do banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e com o uso da ferramenta SIG, QGIS, o delineamento da área de estudo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Bom Jardim como mostra a Figura 3.

Figura 3: Representação geográfica da bacia do Ribeirão Bom Jardim.



Fonte: elaboração própria, 2023.

A Figura 4 evidencia a presença de assoreamento na proximidade das margens do Ribeirão Bom Jardim. Técnicas agrícolas inadequadas, como aração excessiva, práticas de pastoreio mal gerenciadas e ausência de práticas de conservação do solo, contribuem para a erosão e, consequentemente, para o assoreamento, podendo ocasionar em impactos significativos nos ecossistemas aquáticos, reduzindo a qualidade da água, destruindo habitats aquáticos e prejudicando a biodiversidade. Além disso, pode afetar negativamente atividades humanas, como a navegação e o abastecimento de água.

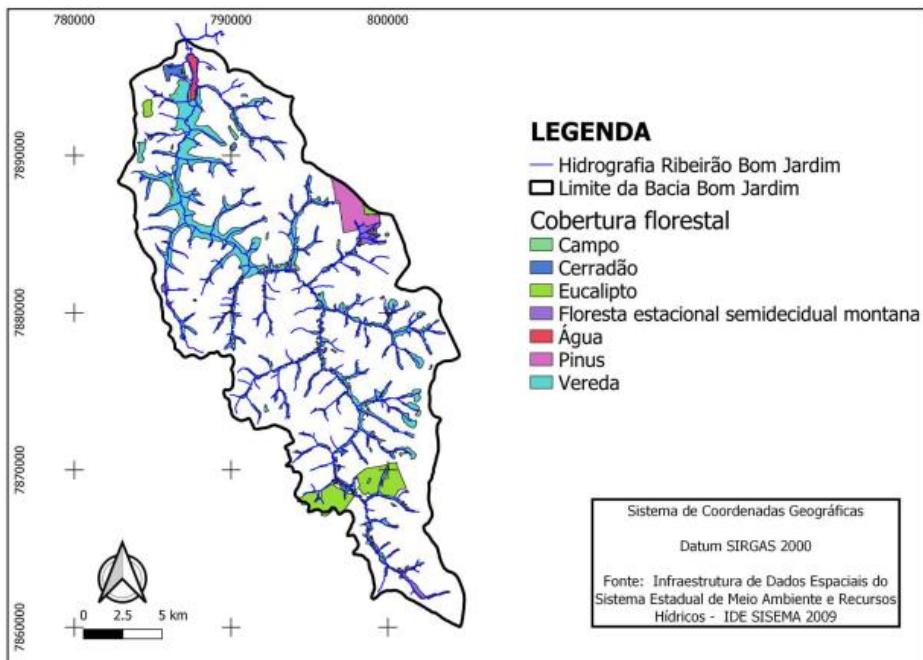
Figura 4: Ribeirão Bom Jardim.



Fonte: acervo próprio, 2023.

A área de estudo desta pesquisa é a Bacia do Ribeirão Bom Jardim que antes das intervenções antrópicas sua cobertura florestal era composta integralmente pelas coberturas vegetais nativas do cerrado, sendo essas: cerradão, floresta estacional semidecidual montana e vereda, conforme Figura 5.

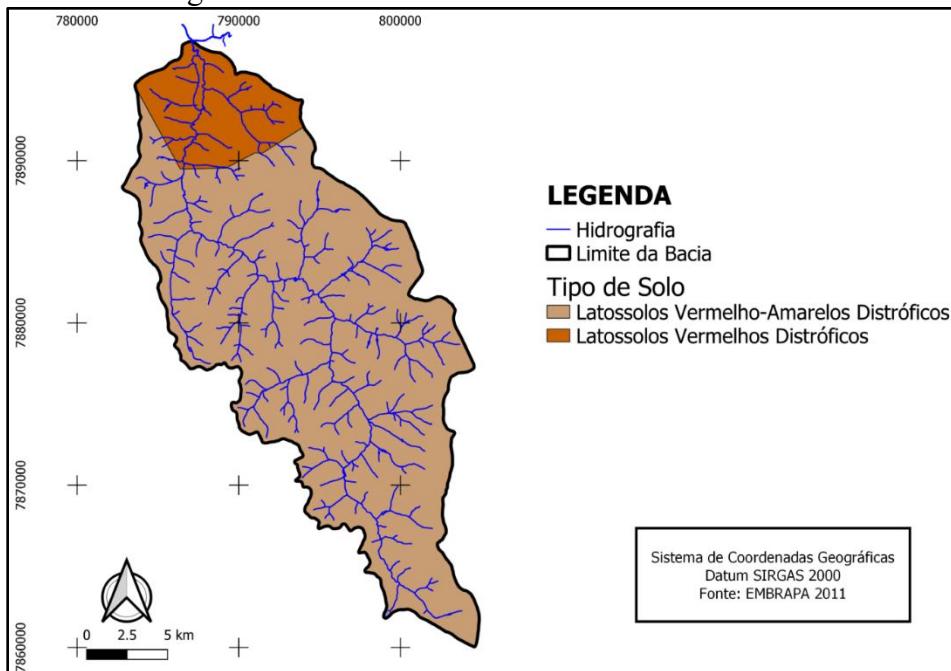
Figura 5: Cobertura Florestal da Bacia do Ribeirão Bom Jardim.



Fonte: elaboração própria, 2023.

A região da bacia composta por latossolos, conforme Figura 6, sendo caracterizados por intemperismo e pela presença de horizonte com argilas de baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e argilas com predominância de óxidos de ferro, alumínio titânio e silício. Os latossolos são comuns em regiões tropicais e equatoriais. A baixa CTC destes solos faz com que estes retenham menos água e nutrientes, sendo assim um solo com menor fertilidade, porém com boas características físicas para atividades agrícolas, sendo bem estruturados e com elevada permeabilidade devido à alta porosidade. Vale destacar que os Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos são solos profundos e ocorrem comumente em ambientes bem drenados. Devido ao fato de possuírem elevada profundidade, facilita o desenvolvimento radicular de algumas espécies. O relevo da região onde estes solos se encontram costumam ser plano ou ondulado. Os Latossolos Vermelhos Distróficos apresentam uma coloração avermelhada devido a presença de óxido de ferro no material originário e os Latossolos Vermelho-Amarelos possuem cor, textura e estruturas uniformes independente da profundidade. Nestes solos ocorrem a maior parte da produção de grãos no país, devido a facilidade para a mecanização agrícola em função do relevo plano ou ondulado. Em contrapartida, são solos com baixa fertilidade, altamente suscetível a compactação.

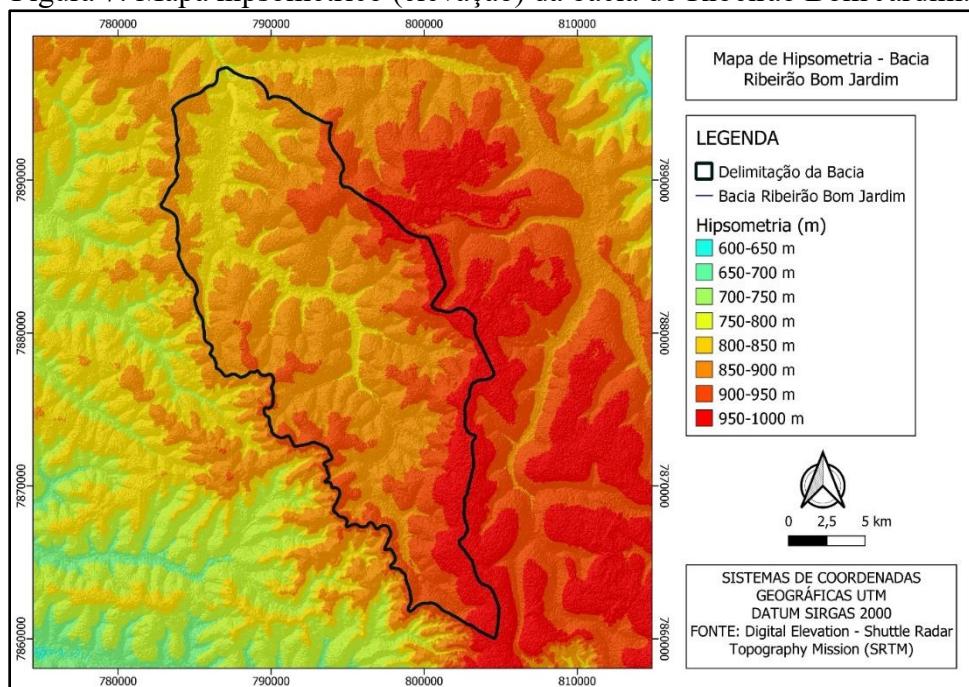
Figura 6: Solos da bacia do Ribeirão Bom Jardim.



Fonte: elaboração própria, 2023.

O relevo da bacia varia entre 950 e 750 metros, conforme a Figura 7. Destaca-se que Brito (2001) realizou a cartografia das inclinações na região da bacia do ribeirão Bom Jardim, indicando que a maior parte da referida bacia (80,09%) possui topografia predominantemente plana a levemente ondulada.

Figura 7: Mapa hipsométrico (elevação) da bacia do Ribeirão Bom Jardim.

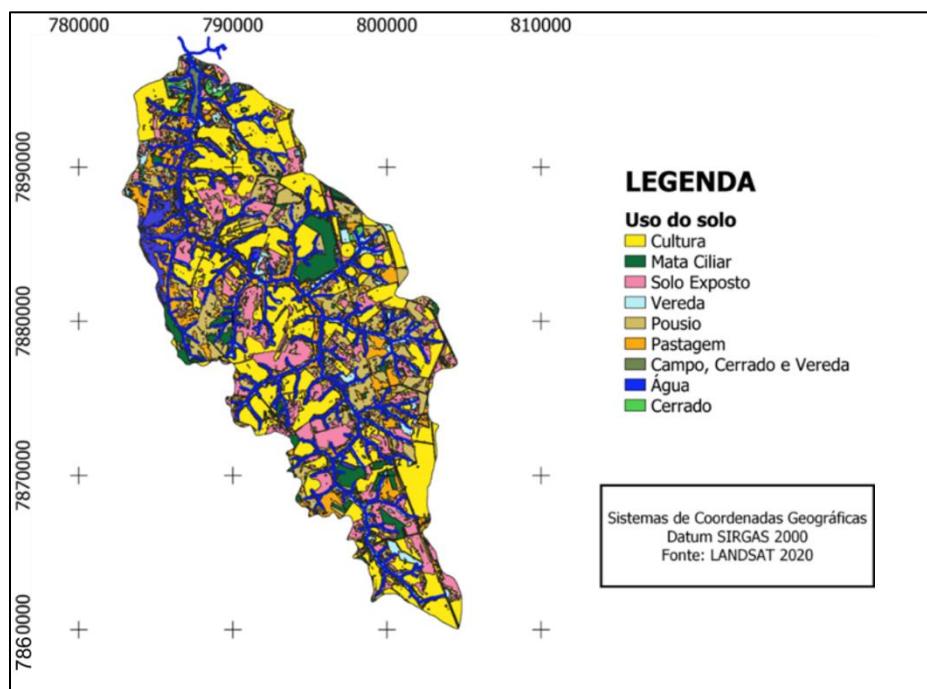


Fonte: Elaboração própria, 2023 .

5.2 Uso e ocupação do solo

Com a realização de pesquisa por imagens de satélite, foi possível a partir de uma ‘clusterização’, definir quais são os usos do solo na região da bacia do Ribeirão Bom Jardim, conforme mostra a Figura 6. Analisando a Figura, percebe-se que as ações antrópicas são as predominantes na região.

Figura 8: Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Ribeirão Bom Jardim (2020 – Landsat 5).



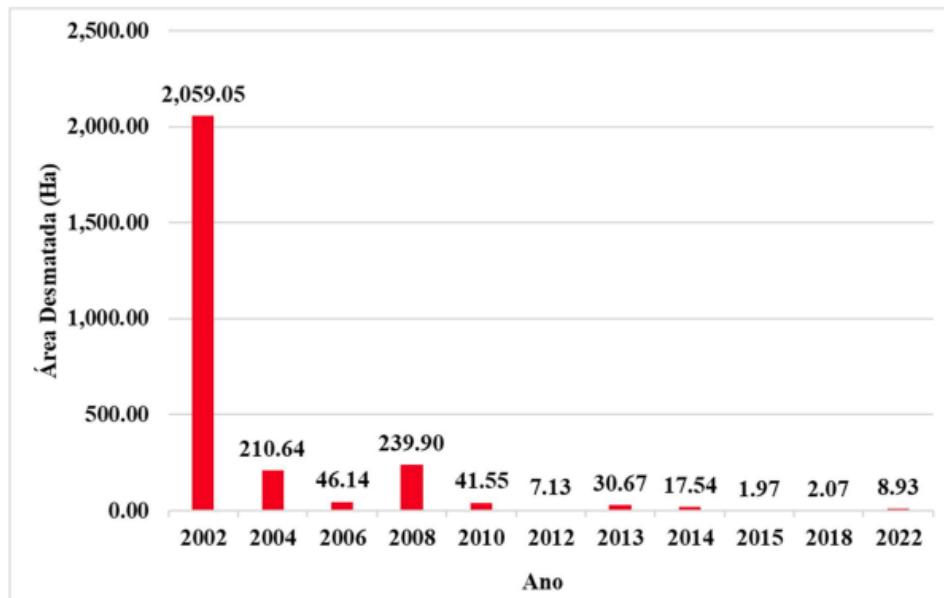
Fonte: elaboração própria, 2023.

A partir da carta de uso e ocupação do solo da bacia do Ribeirão Bom Jardim, foi possível levantar a área ocupada em função do tipo de uso no ano de 2022, conforme Tabela 1. De acordo com a tabela, pode-se observar que as ações antrópicas ocupam um território maior que a vegetação nativa do Cerrado, correspondendo a cerca de 70,88% enquanto a vegetação nativa e corpos d’água correspondem a 29,11% do território analisado. Nota-se que o tipo de uso de maior ocupação se trata de culturas anuais, aquelas que finalizam seu ciclo produtivo após um ano.

De acordo com Brito, 2001, no ano de 1999 a região da bacia do Ribeirão Bom Jardim possuía 13,8% de sua área ocupada por cerrado nativo (campo cerrado e cerrado), esse valor atualmente mostrado na Tabela 1 corresponde somente a 7,13% de Campo Cerrado e 3,06 %

de Cerrado nativo, totalizando somente 10,19 %. Segundo os dados do INPE (2023), obtidos através do satélite Landsat 5, houve no ano de 2002 uma supressão considerável na região da bacia, a maior supressão de vegetação nativa em 20 anos, este fato ocorre devido a necessidade de aumentar a faixa de terra destinada a produção agrícola e criação de gado de corte. Segundo Borges (2019), em meados da década de 50, toda a região da bacia apresentava a vegetação nativa do Cerrado devidamente preservada. Porém, a partir da década de 1960 iniciou-se a abertura de uma nova rede rodoviária, dessa forma, grandes comunidades ecossistêmicas deram lugar a agricultura extensiva e à pecuária, sendo um ponto de partida para a ocupação do cerrado. Essa ocupação iniciou-se com a exploração extrativista e na maioria dos casos predatória. Observa-se a partir da Figura 7 que a maior parte do desmatamento ocorreu antes de 2008, dessa forma, de acordo com o Novo Código Florestal instaurado em 2012, essas áreas se enquadram como áreas rurais consolidadas, ou seja, área de imóvel rural com ocupação antrópica preexistente a 22 de julho de 2008. Assim, os indivíduos que cometem crimes ambientais referentes a supressão ilegal de vegetação nativa, desde que integrem o Programa de Regularização Ambiental (PRA), um programa que regulariza o imóvel ou posse rural, suspende as punições dos autores dos atos, interrompendo a prescrição penal.

Figura 9: Gráfico referente às áreas desmatadas por ano.

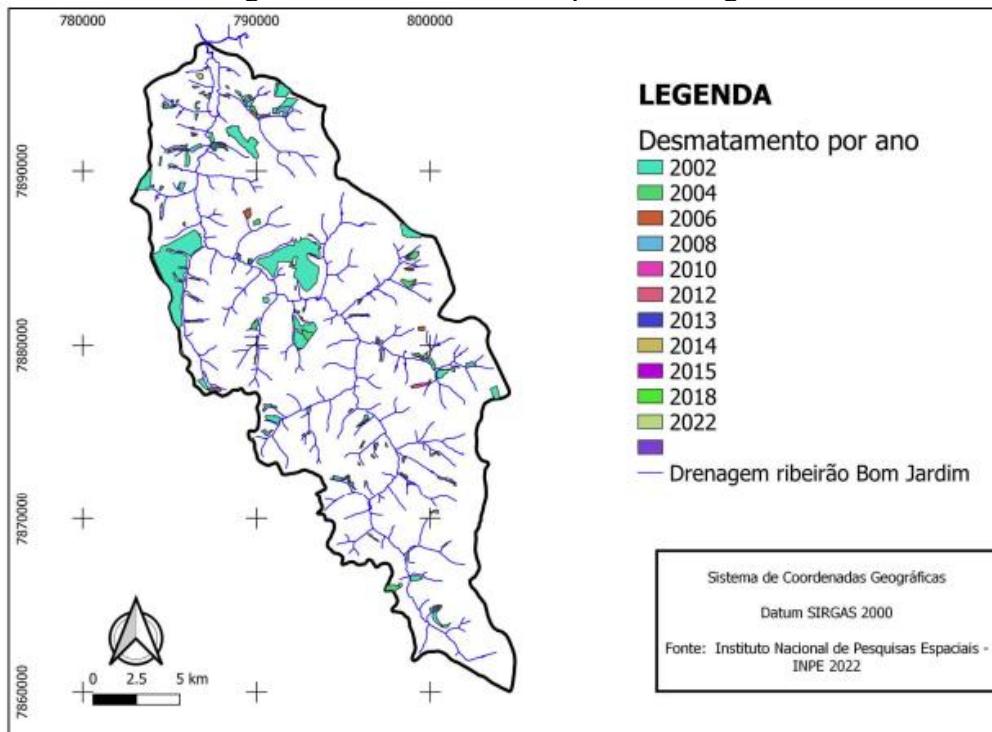


Fonte: Adaptado, INPE, 2023.

Segundo dados fornecidos pelo INPE (2023), conforme mostra a Figura 6, em 2002 a área desmatada na bacia do ribeirão Bom Jardim ultrapassou os dois mil hectares, devido à

exploração da região visando áreas propícias para a expansão de atividades agrícolas. O Cerrado mineiro foi alvo de um intenso processo de desmatamento com a vegetação nativa do cerrado, que estava devidamente preservada até a década de 50, dando lugar à produção de culturas diversas. Porém, como citado anteriormente, de acordo com a lei 12.651, de 25 de maio de 2012, nenhum dos crimes ambientais relacionados a supressão de vegetação nativa, deverá ser punido, desde que os produtores rurais infratores tenham aderido ao PRA. Dessa forma, esse tipo de atitude tornou impune vários autores de atos ilícitos ambientais ocorridos no cerrado até 22 de julho de 2008. Na Figura 8 é possível identificar os locais onde a exploração agrícola foi mais intensa, muitos destes locais estão próximos a cursos d'água da bacia, ocupando solos hidromórficos onde antes havia a vegetação de Vereda.

Figura 10: Área desmatada por ano e região.



Fonte: Elaboração própria, 2023 .

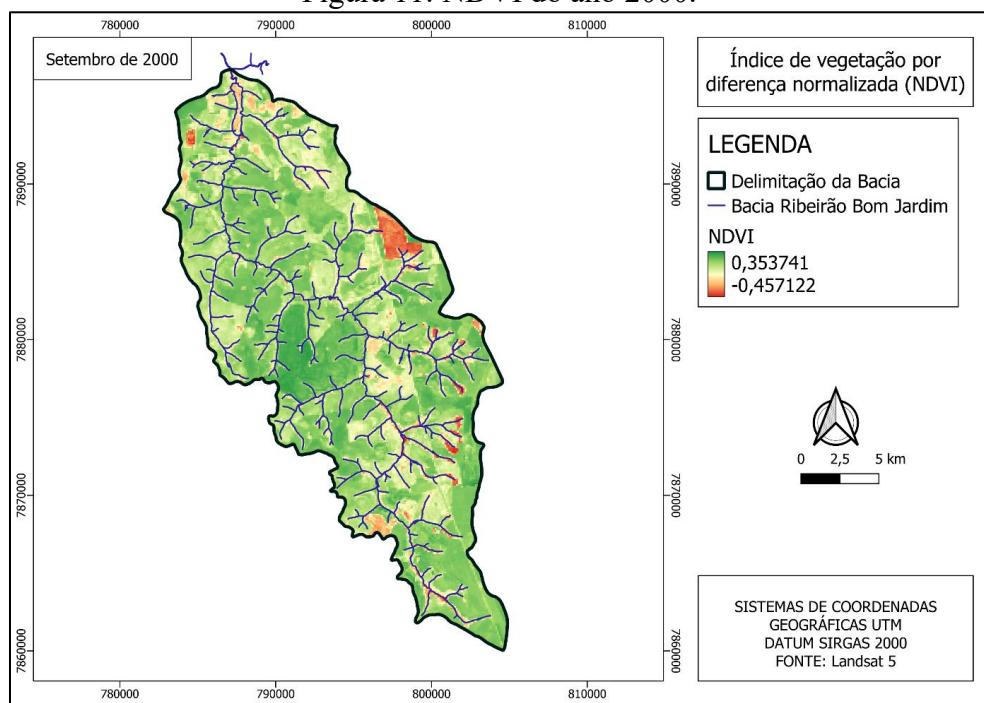
5.3 NDVI

Os mapas de NDVI (Figuras 11, 12 e 13) apresentaram uma grande variação temporal. No ano 2000 os valores são bem maiores de comparados com os anos de 2010 e 2013, devido a supressão de vegetação nativa que ocorreu fortemente entre os anos 2000 e 2008, conforme apontado na Figura 9.

Ressalta-se que, durante o ano, os valores de NDVI podem variar bruscamente devido

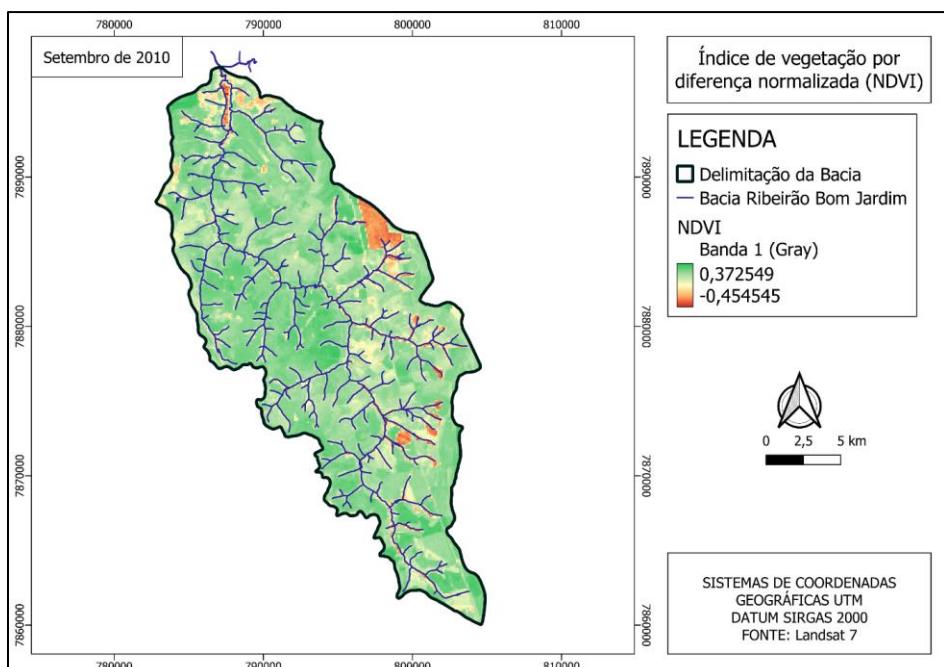
ao período chuvoso que se inicia no começo de outubro, e também pela safra de milho e se soja, pois, diferentes espécies apresentam um comportamento de reflexão diferente.

Figura 11: NDVI do ano 2000.



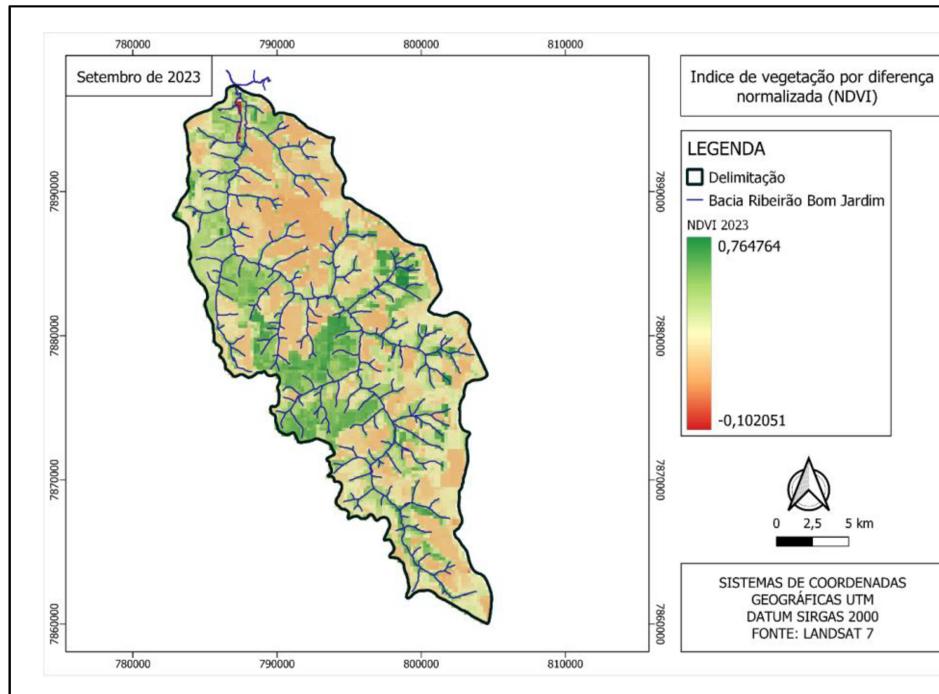
Fonte: Elaboração própria, 2023 .

Figuras 12: NDVI do ano de 2010.



Fonte: Elaboração própria, 2023 .

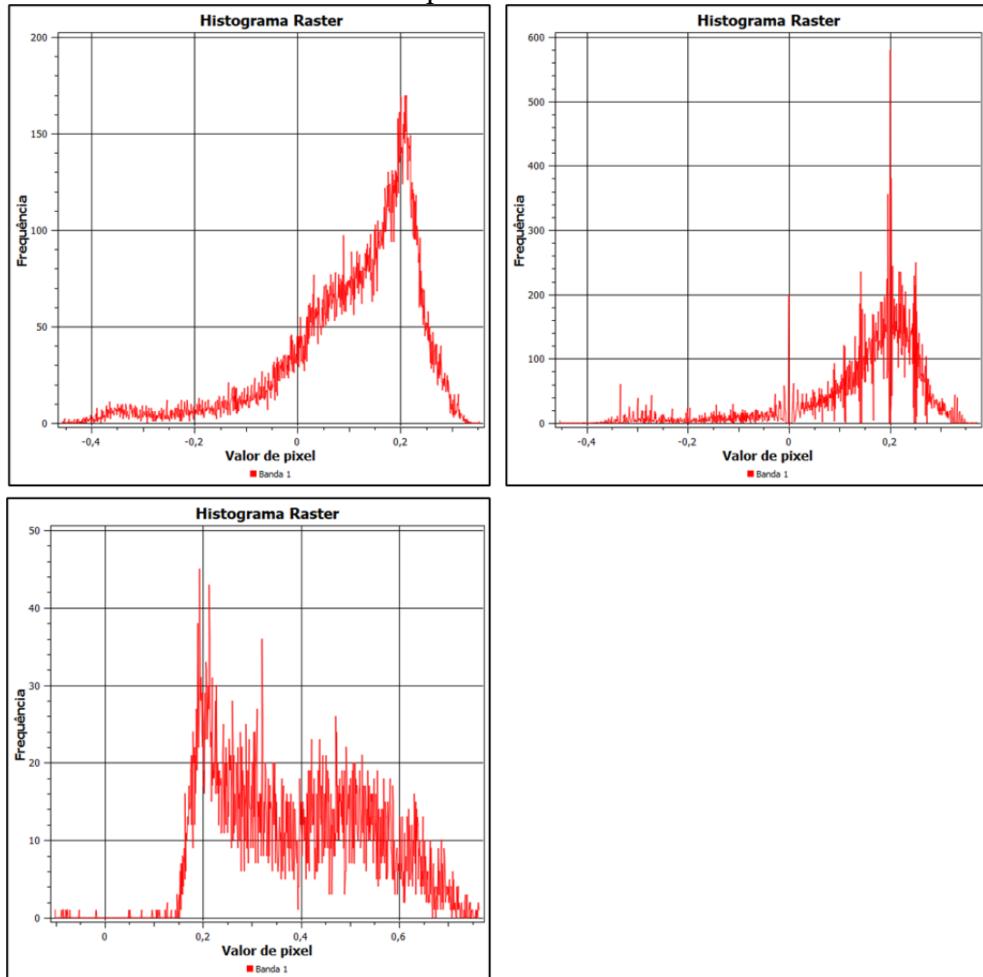
Figura 13: NDVI do ano de 2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023 .

A frequência de valores mais elevados do NDVI (Figuras 14), ocorreu nos anos 2000, e valores menores de frequência foram vistos nos anos de 2010 e 2023, devido a grande diminuição da densidade vegetal. Além disso, nota-se que o NDVI é maior em áreas de cobertura vegetal significativa, e menor em áreas de culturas anuais.

Figura 14: Histogramas de frequência do NDVI dos anos de 2000, 2010 e 2023, respectivamente.



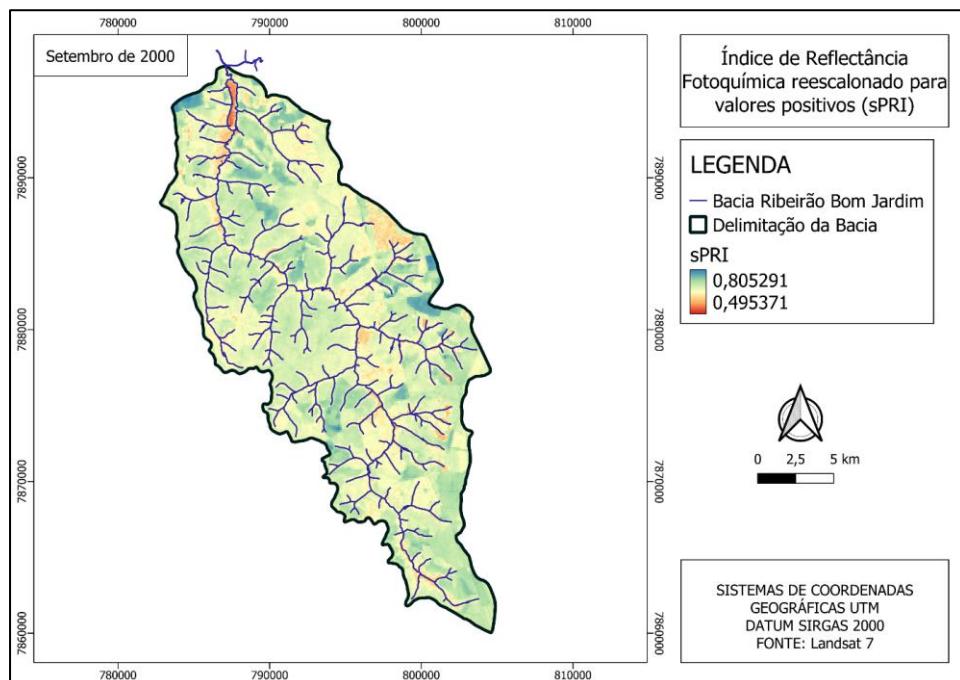
Fonte: Elaboração própria, 2023 .

Os histogramas da Figura 14 demonstram que no ano 2000 a frequencia de pixels com NDVI acima de 0,2 era bem maior, situando-se em torno de 190, e que no ano de 2023 passou a ser em torno de 45. Se formos levar em consideração a safra de culturas anuais, e o período de plantio, ainda sim esses resultados podem confirmar os efeitos da supressão de vegetação nativa, visto que, em todos esses anos foram obtidas imagens da mesma época, ou seja, no ínicio do plantio de soja que ocorre no começo de outubro. Devido ao fato de que os arquivos rasters não foram pré tratados por programas de ajuste, os histogramas apresentam *outliers*, ou seja, valores extremos indicando possíveis erros em pequenas áreas do mapa.

5.4 SPRI

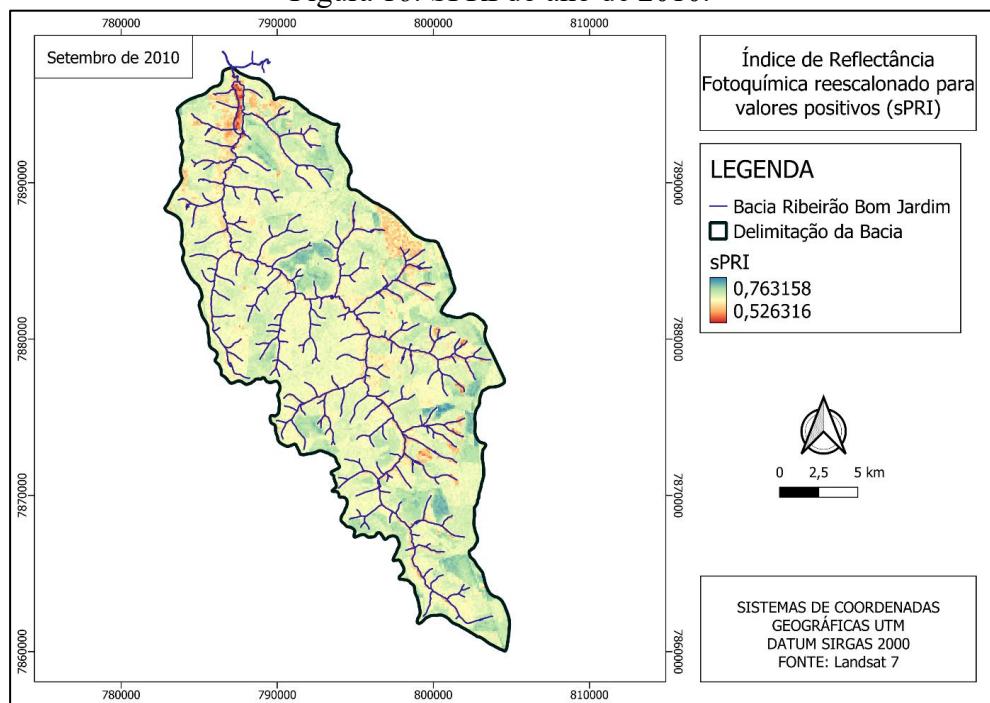
Os mapas de sPRI (Figuras 17,8 e 19), apresentaram valores maiores para os anos 2000 e 2010, os valores próximos de 1 representam a vegetação com maior eficiência fotossintética, nota-se que a amplitude de valores diminui conforme o passar dos anos, o que condiz com o comportamento do NDVI que também diminuiu seus valores conforme o passar dos anos. Este fato evidencia que, a supressão de vegetação nativa afetou diretamente na eficiência fotossintética das plantas.

Figura 15: SPRI do ano 2000:



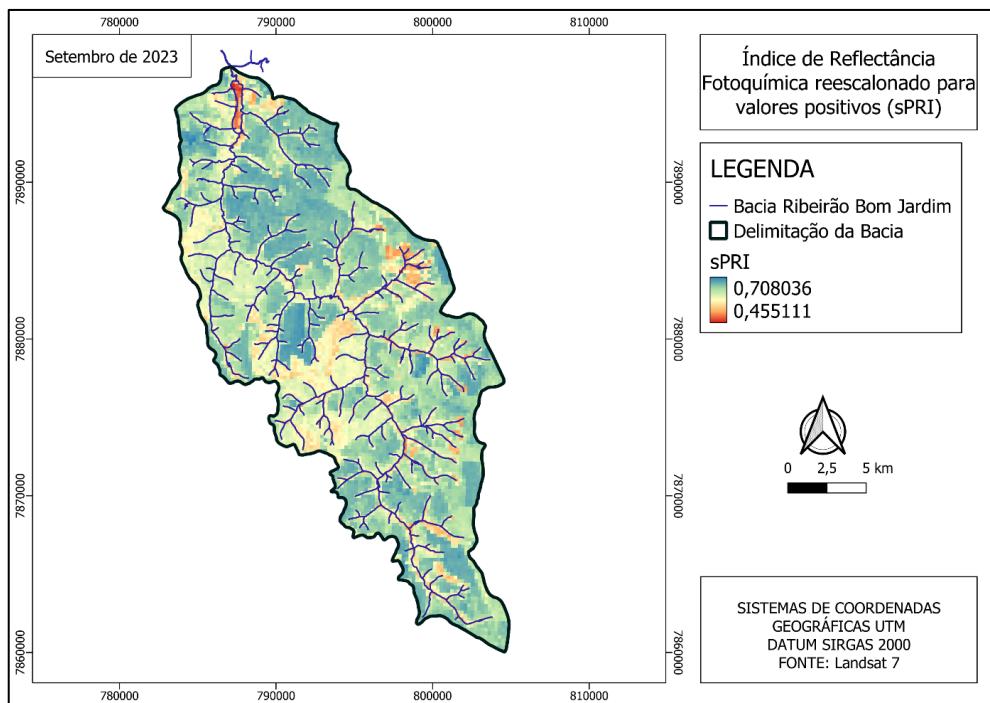
Fonte: Elaboração própria, 2023 .

Figura 16: SPRI do ano de 2010.



Fonte: Elaboração própria, 2023 .

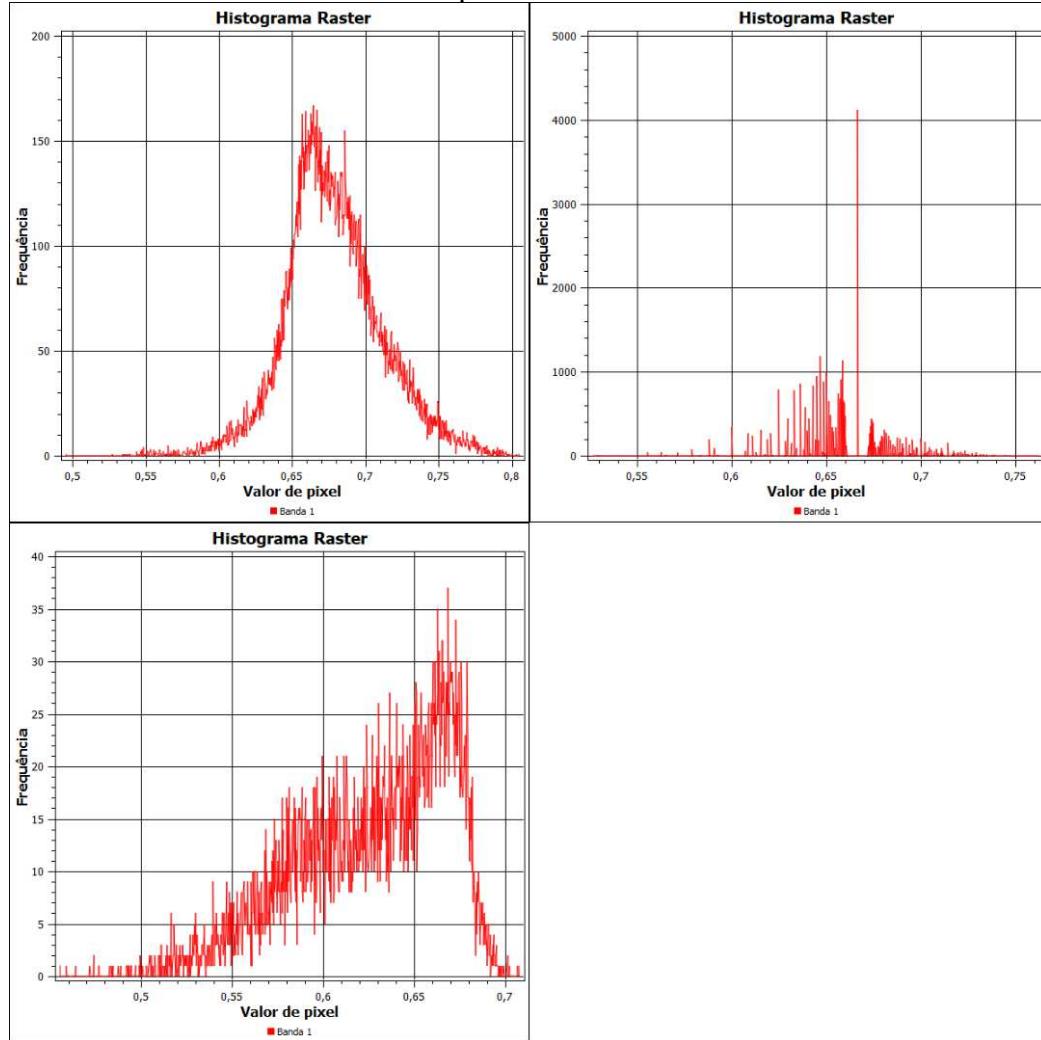
Figura 17: sPRI do ano de 2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023 .

Os histogramas de frequência (Figuras 20, 21 e 22), demonstram, que com o passar dos anos, a frequência de valores elevados diminuiu bruscamente, não passando de 40 para o ano de 2023.

Figuras 18: Histogramas de frequência do sPRI dos anos de 2000, 2010 e 2023, respectivamente.

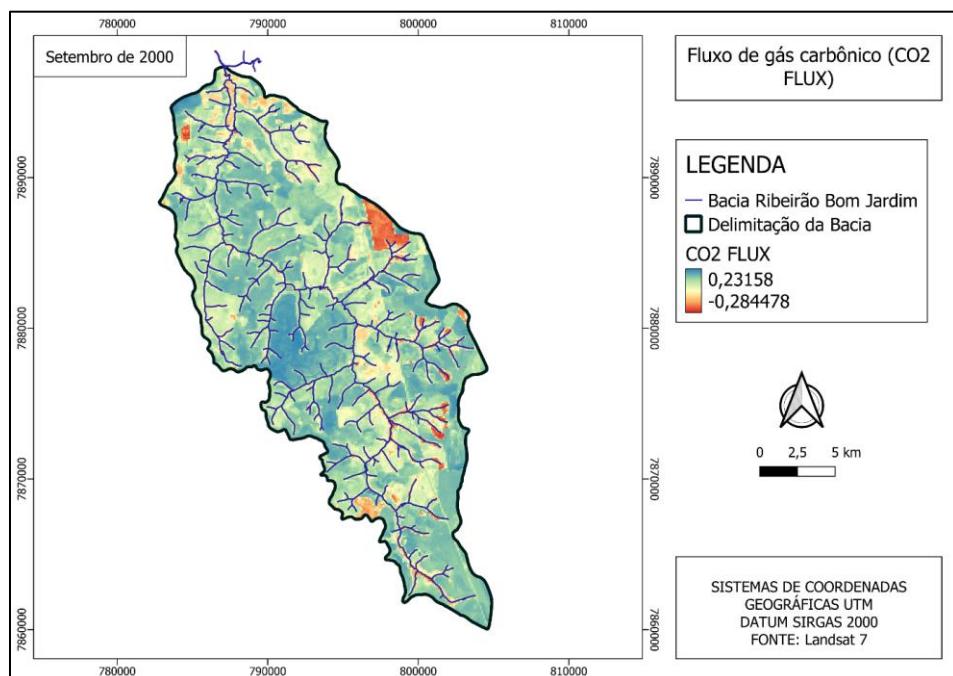


A diminuição no sPRI ao longo dos anos corrobora os resultados do NDVI, indicando uma degradação na qualidade da vegetação na bacia. Ressalta-se que, valores negativos não significam a não utilização do carbono, as culturas anuais tais como soja e milho podem estar realizando fotossíntese, com diferentes eficiências de utilização da radiação ativa, ou seja, utilizam o carbono atmosférico, mas com eficiência demasiadamente baixa comparado com a vegetação nativa local. Além disso, a evapotranspiração realizada pela vegetação nativa do cerrado, é muito mais eficiente se compararmos com as culturas anuais como a soja e milho, pois, apresentam raízes mais profundas e extensas, enquanto a soja e milho possuem raízes mais superficiais.

5.5 CO2 Flux

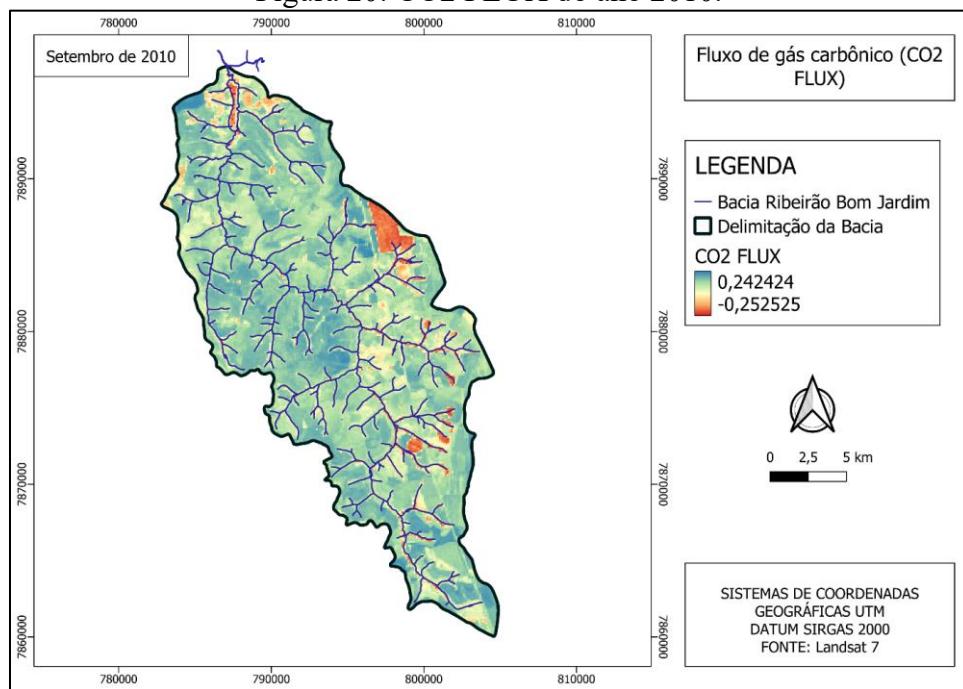
Os mapas de CO2 Flux apresentam maiores valores para o ano 2000 de acordo com as Figuras 19,20 e 21 respectivamente. Essa diminuição é explicada pela supressão de vegetação nativa que avançou conforme os anos, devido a expansão agropecuária. Dessa forma, florestas ou áreas de vegetação natural, reduzem a capacidade dessas áreas de atuarem como sumidouros de carbono, onde o CO2 é removido da atmosfera e armazenado nas plantas e no solo. Isso pode levar a um aumento líquido nas emissões de CO2 para a atmosfera, um gás que potencializa o efeito estufa e o aquecimento global.

Figura 19: CO2 FLUX do ano 2000.



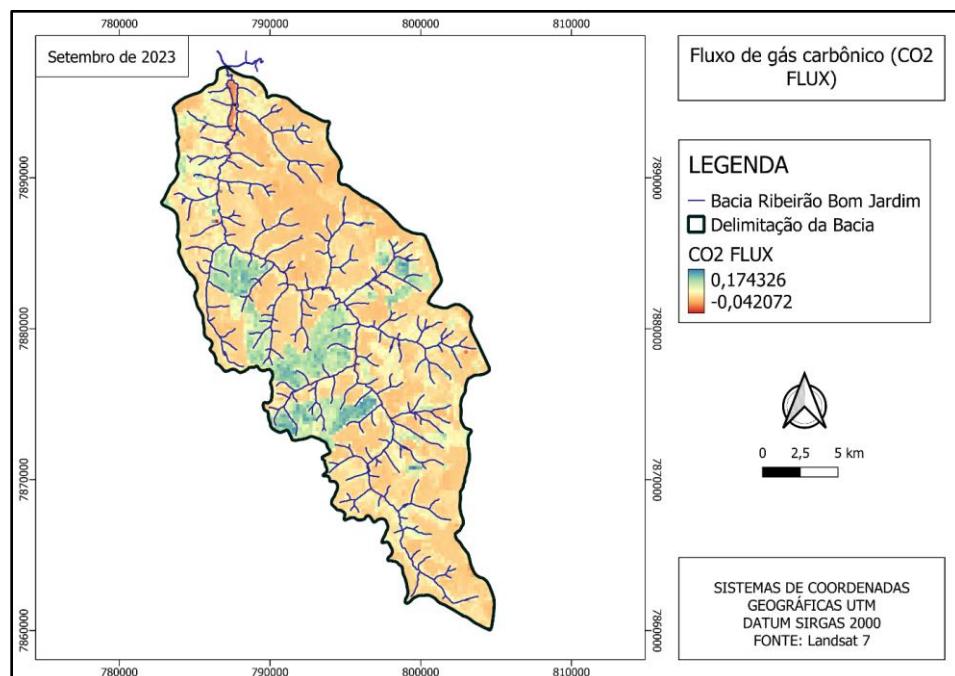
Fonte: Elaboração própria, 2023 .

Figura 20: CO2 FLUX do ano 2010.



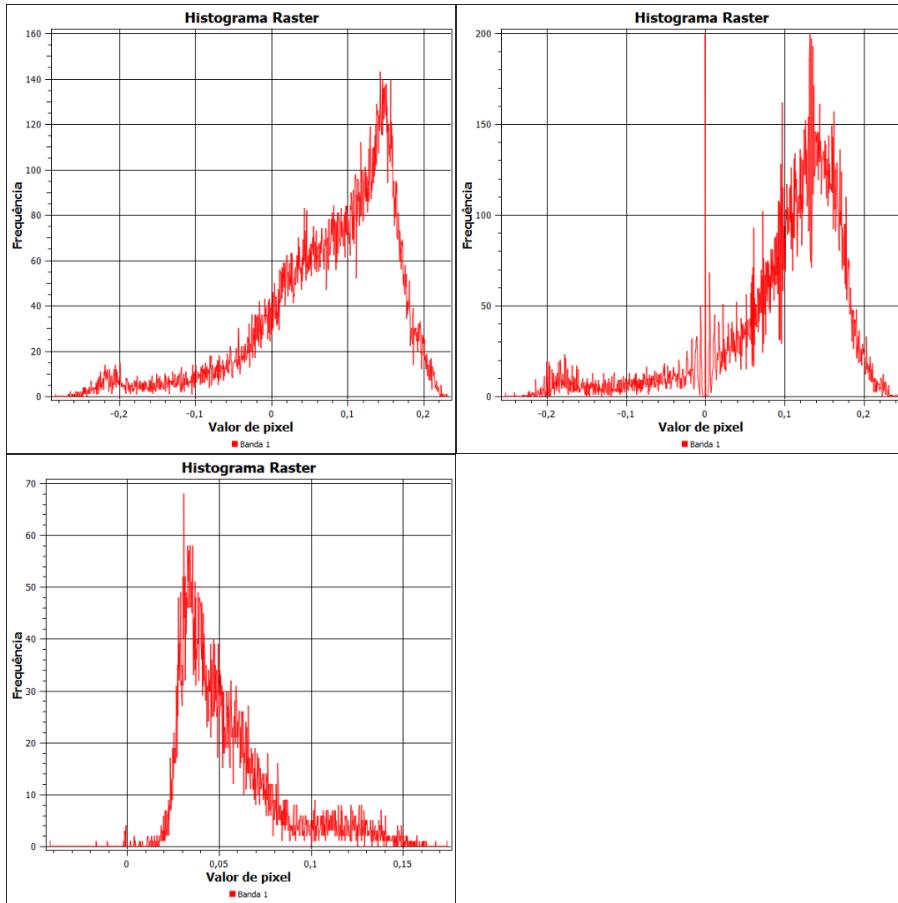
Fonte: Elaboração própria, 2023 .

Figura 21: CO2 FLUX do ano 2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023 .

Figura 22: Histogramas de frequência do CO2 FLUX dos anos de 2000, 2010 e 2023, respectivamente.

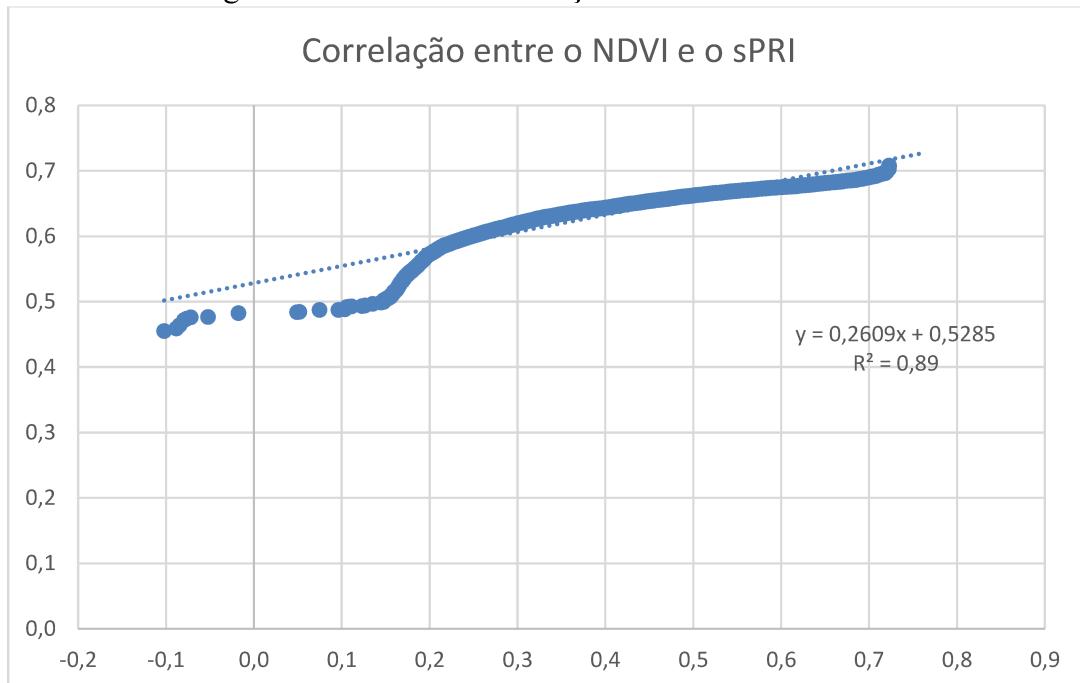


Fonte: Elaboração própria, 2023 .

Os histogramas demonstram que a frequência de valores acima de 0,1 diminuiram bruscamente com o passar dos anos. Demonstrando uma diminuição na captura de carbono. A remoção da vegetação nativa pode alterar o balanço de carbono em um ecossistema, aumentando as emissões de CO2 decorrentes da decomposição da biomassa vegetal e do solo, bem como diminuindo a capacidade de absorção de CO2 através da fotossíntese. Além das consequências para o ciclo do carbono, a supressão de vegetação nativa também pode resultar na perda de habitats e biodiversidade. Isso pode afetar negativamente os ecossistemas locais, causando extinção de espécies e desequilíbrios ecológicos.

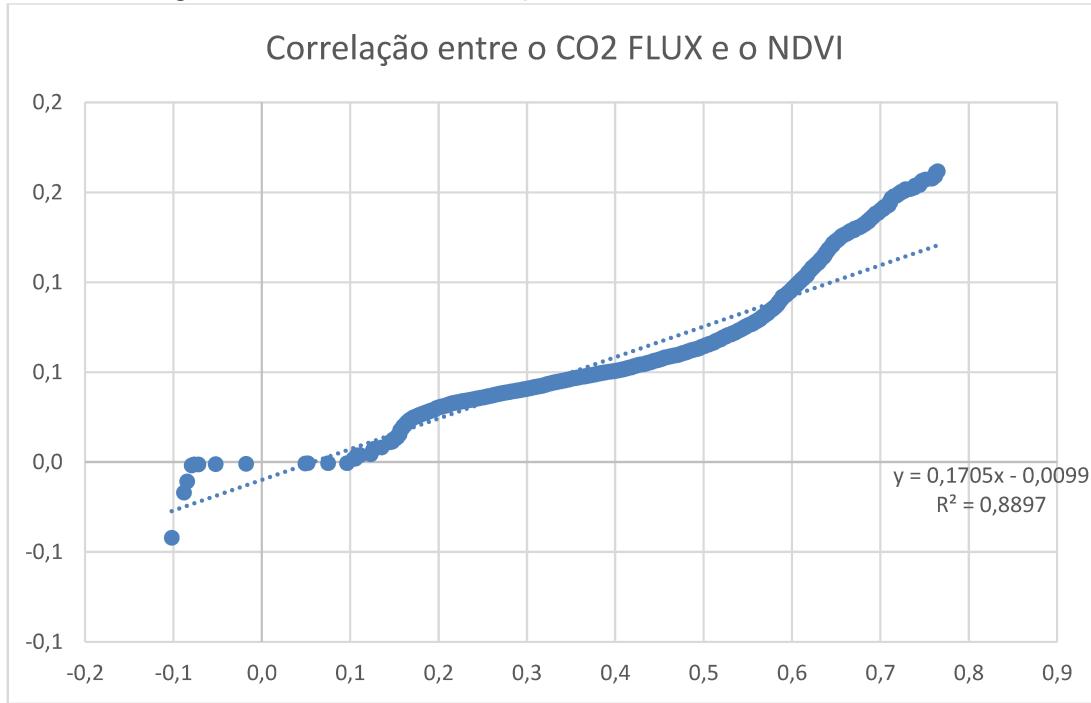
As Figuras 23 e 24 demonstram a correlação entre o NDVI, sPRI e CO2 FLUX. Embora seja possível notar os valores *outliers* destoando do conjunto de dados, ainda sim foi possível obter uma correlação que desse um resultado esperado frente as mudanças no uso e ocupação do solo.

Figura 23: Gráfico de correlação entre o NDVI e sPRI.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 24: Gráfico de correlação entre o CO2 FLUX e o NDVI.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Valores positivos acima de 0 representam as áreas com maior capacidade de fixação do CO2. Foi apresentado uma correlação alta entre os índices NDVI e sPRI e o CO2 FLUX.

A redução no CO2 flux com o passar dos anos está em conformidade com as mudanças nos índices de vegetação (NDVI e SPRI), indicando que o desmatamento impactou diretamente

a capacidade da vegetação de participar ativamente no ciclo do carbono.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise temporal do uso do solo na bacia do Ribeirão Bom Jardim permitiu identificar mudanças significativas na cobertura vegetal e no uso do solo na região. A avaliação de estoque de carbono indicou que a região sofreu uma perda significativa de vegetação nativa, a troca da região de Cerrado por áreas de cultivo influenciou na modificação dos parâmetros biofísicos da superfície, devido às alterações na biomassa e nas características ópticas da área. O NDVI e sPRI indicaram valores superiores nas regiões com vegetação característica de Cerrado e Mata Ciliar, enquanto foram registrados valores inferiores nas áreas destinadas à agricultura. A cena de 2000 apresentou um desempenho superior no processo de sequestro de carbono, pois exibiu índices NDVI e sPRI mais elevados, indicando vigor vegetativo, isso resulta em um aumento no sequestro de carbono, visto no índice CO2 FLUX. Após os anos de maior supressão (entre 2002 e 2008), a região apresentou uma brusca diminuição na capacidade de estocar carbono e na eficiência fotossintética. Assim, como o NDVI e sPRI apresentaram alta correlação com o CO2 FLUX, conclui-se que as áreas de vegetação nativa apresentam capacidade maior de estoque de carbono do que as áreas de culturas anuais e as áreas com solo exposto ou degradadas.

Dessa forma, se mostra necessário, a avaliação de um plano para a recuperação de áreas degradadas e a melhoria do uso do solo. A proposta de plano de recuperação de áreas degradadas na bacia do Ribeirão Bom Jardim deve incluir ações como a recuperação de áreas degradadas, a restauração de áreas de preservação permanente (APPs) e a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis. A implementação desse plano pode contribuir para a melhoria da qualidade da água e da biodiversidade da região, além de aumentar o estoque de carbono na região.

A recuperação de áreas degradadas em bacias hidrográficas é um componente crucial na promoção da sustentabilidade ambiental e na conservação dos recursos hídricos. A degradação de ecossistemas terrestres pode resultar em efeitos adversos na qualidade da água, na biodiversidade e nos serviços ecossistêmicos oferecidos pelas bacias hidrográficas. Portanto, estratégias eficazes de recuperação são essenciais para restaurar a funcionalidade dessas áreas e garantir a saúde a longo prazo dos ecossistemas aquáticos e terrestres.

A análise de parâmetros como NDVI, sPRI e CO2FLUX desempenham um papel significativo na identificação de áreas degradadas e na avaliação do sucesso das iniciativas de

recuperação. O NDVI, por exemplo, pode ser utilizado para monitorar a evolução da cobertura vegetal, identificar áreas com baixa atividade vegetativa e orientar a seleção de espécies vegetais adequadas para a restauração. A análise do sPRI pode oferecer insights sobre a saúde das plantas e sua capacidade de se recuperar em ambientes degradados.

Além disso, a gestão eficaz da recuperação de áreas degradadas em bacias hidrográficas frequentemente envolve a implementação de práticas como o plantio de espécies nativas, a construção de estruturas de contenção de erosão, a restauração de ecossistemas ripários e a promoção da conectividade ecológica. Essas ações visam restabelecer a biodiversidade, melhorar a infiltração de água no solo, reduzir a erosão e, consequentemente, melhorar a qualidade da água nas bacias hidrográficas.

Ademais, programas de reflorestamento e restauração de áreas degradadas contribuem significativamente para a mitigação das mudanças climáticas, uma vez que as florestas desempenham um papel fundamental na absorção de carbono da atmosfera.

Os índices utilizados possibilitaram a detecção da progressão da degradação na bacia do Ribeirão Bom Jardim, refletindo fielmente as mudanças ambientais ao longo dos anos. Para obter resultados mais precisos ao utilizar CO2Flux e PRI, é essencial considerar uma combinação de modelos e métodos de classificação de imagens. Além disso, experimentos de campo que integrem torres de medição de CO2flux são cruciais para uma avaliação mais abrangente.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSSEN, W. et al. Satellite based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration, (METRIC) - Applications. *Journal of Irrigation And Drainage Engineering*, v. 133, p. 395-406, 2007.
- ALVIN, P. T. Teoria sobre a formação dos campos cerrados. *Revista Brasileira de Geografia*, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4, 1954.
- ASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, v.13, n. 2, p. 51-63, 2008.
- BAPTISTA, G. M. M. Mapeamento do Sequestro de Carbono e de Domos Urbanos de CO₂ em Ambientes Tropicais, por meio de Sensoriamento Remoto Hiperespectral. *Geografia (Rio Claro)*, v. 29, p. 189–202, 2004.
- BAPTISTA, G. M. M. D. Validação da Modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS HYPERION. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11 (SBSR), 2003, Belo Horizonte. Anais...São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1037-1044. Disponível em: http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.07.21.45/doc/10_002.pdf, 2003.
- BELLOLI, T. F. Estimativa de biomassa estoque de carbono de vegetação macrofítica a partir de dados espectrais e de campo, Banhado grande, RS. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa De Pós-Graduação Em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre – RS, 2019.
- BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. da; BEZERRA, B. G. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 7, p. 709-717, 2011.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Institui o novo código florestal brasileiro.
- BRASIL. Lei nº 20.922, de 16 de outubro de 2013. Dispõe sobre as políticas florestal e de biodiversidade no Estado de Minas Gerais.
- BRITO, J. L. S. Adequação das potencialidades do uso da terra na bacia do Ribeirão Bom Jardim no Triângulo Mineiro (MG): ensaio de geoprocessamento. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Acesso em: 01 dez. 2022.
- BRITO, J. L. S. Os solos da Bacia do Ribeirão Bom Jardim e suas relações com relevo e os recursos hídricos, Uberlândia (MG). 2002. *Caminhos de Geografia*. 3. 20-40

Câmara, G.; Medeiros, C.B.; Casanova, M.A.; Hermely, A.; Magalhães, G. Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica. Campinas, Instituto de Computação/UNICAMP. (1996)

Congedo, Luca, (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>.

CONAMA – Resolução nº 429, 28 de fevereiro de 2011: Dispõe sobre a metodologia de recuperação das Áreas de Preservação Permanente – APPs.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Analise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo - SP usando imagens LANDSAT-5. RA 'E GA, v. 21, p. 234-271, 2011.

EITEN, G. The cerrado vegetation of Brazil. *The Botanical Review*, New York, v. 38, n. 2, p. 201-338, 1972.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Bioma Cerrado. Coleção Entomológica da Embrapa Cerrados. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cerrados/colecao-entomologica/bioma-cerrado>. Acesso em: 26 de outubro de 2023.

EWEL, J. J. Litter fall and leaf decomposition in a tropical forest succession in eastern Guatemala. *Journal of Ecology*, v.64, n.1, p.293-308, 1976.

FERREIRA, C. C., MIRANDOLA, P. H., SAKAMOTO, A. Y., GONÇALVES, F. Uso de SIG para análise da vulnerabilidade ambiental da Bacia do Alto Sucuriú – MS/BR. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.1169.

GAMON, J. A.; KOVALCHUCK, O.; WONG, C. Y. S.; HARRIS, A.; GARRITY, S. R. Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. *Biogeosciences*, v. 12, n. 13, p. 4149-4159, 2015. GUO, M.; Li, J.; Sheng, C.; Xu, J.; Wu, L. A Review of Wetland Remote Sensing. *Sensors*, n. 17, 2017. Art No. 777.

Gamon, J. A.; Penuelas, J.; Field, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, v.41, n.1, p.35-44, 1992.

Harris, N.L., Gibbs, D.A., Baccini, A. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Chang.* 11, 234–240 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01382-0>

020-00976-6

IBAMA. Ecossistemas Brasileiros: Projetos de Conservação e Manejo de Ecossistemas. 2003.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Gerência de Estudos e Análises da Dinâmica. 2022.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Catálogo de imagens Landsat 7; INPE, 2000.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Catálogo de imagens Landsat 7; INPE, 2010.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Catálogo de imagens Landsat 5; INPE, 2021.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Catálogo de imagens Landsat 7; INPE, 2023.

Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - (IDE-Sisema) - Disponível em: <
<http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/#>>.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.). Genebra, Suíça: Working Group / Technical Support Unit, 2018.

MAGALHÃES, D. S. et al. Análise espaço-temporal do CO2Flux e NDVI da região de integração do Caeté - Nordeste da Amazônia Legal Brasileira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2021, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2021. p. 1-8. Disponível em:
<http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2023/05.17.18.01/doc/156028.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2023.

MARIMON JUNIOR, B. H.; HARIDASAN, M. Comparação da vegetação arbórea e características edáficas de um cerradão e um cerrado sentido restrito em áreas adjacentes sobre solo distrófico no leste de Mato Grosso, Brasil. *Acta Botânica Brasilica* , Belo Horizonte, v. 19, n. 4, p. 913-926, 2005.

MARTINS, S. V. Recuperação de matas ciliares. Viçosa: Aprenda Fácil, 2007. 255p.

OLDEMAN, L. R. The global extent of soil degradation. In: GREENLAND, D. J.; SZABOCLS, I. Soil Resiliense and sustainable Land Use. CabInternational: Wallingford, 1994. p.99-118.

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

RIBEIRO, J. F.; HARIDASAN, M. Comparação fitossociológica de um cerrado denso e um cerradão em solos distróficos no Distrito Federal. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 35., Manaus. Anais... Manaus: SBB, 1984.

Ribeiro, J. F & Walter, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (Ed.). Cerrado: ecologia e flora v. 2. Brasília: EMBRAPA-CERRADOS, 2008. 876 p.

ROQUETTE, J. G. DISTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA NO CERRADO E A SUA IMPORTÂNCIA NA ARMAZENAGEM DO CARBONO. Ciência Florestal, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 1350–1363, 2018. DOI: 10.5902/1980509833354. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/33354>. Acesso em: 25 out. 2023.

Rouse JW, Haas RH, Schell JÁ, Deering DW & Harlan JC (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Greenbelt, NASA/GSFC. 371p

SOARES, M. P. et al. Relationship between edaphic factors and vegetation in savannas of the Brazilian midwest region. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 39, p. 827-829, 2015.