UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Agrárias
Curso de Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental

Christopher Lima Ferreira

ANÁLISE COMPARATIVA DE VEGETAÇÃO POR MEIO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO: MUDANÇAS AMBIENTAIS APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM EM BRUMADINHO – MG

Montes Claros
2023

Christopher Lima Ferreira

ANÁLISE COMPARATIVA DE VEGETAÇÃO POR MEIO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO: MUDANÇAS AMBIENTAIS APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM EM BRUMADINHO – MG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais – *Campus* Regional Montes Claros, como requisito parcial para o grau de bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rodolpho Cesar dos Reis Tinini

Montes Claros
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Agrárias
Curso de Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental

ANÁLISE COMPARATIVA DE VEGETAÇÃO POR MEIO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO: MUDANÇAS AMBIENTAIS APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM EM BRUMADINHO – MG

Christopher Lima Ferreira

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof. Dr. Luiz Henrique de Souza – ICA/UFMG

Mestrando Israel Gomes Cruz – ICA/UFMG

Prof. Dr. Rodolpho Cesar dos Reis Tinini - Orientador ICA/UFMG

Montes Claros-MG, 05 de dezembro de 2023

Agradeço a Deus por ter me concedido saúde, vigor e inteligência. Agradeço aos meus familiares por todo apoio recebido. Dedicamos este trabalho de graduação a todos que acreditaram neste projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde, conhecimento, sabedoria e discernimento para lidar com as adversidades. Oro pelo senhor para continuar me protegendo, cuidando e guiando minha vida para o bem. Peço também, que Deus abençoe meus familiares, colegas e todos os colaboradores do Instituto de Ciências Agrárias – UFMG.

Agradeço aos meus pais, Armando Ferreira e Cilene Aparecida Lima Ferreira por todo amor, carinho e por ter me apoiado nos piores momentos da minha vida, pois sei muito bem que sem eles eu não teria colecionado vitórias até aqui.

Agradeço também a todos os meus colegas de curso por ter me proporcionado uma incrível experiência de aprendizado, descobertas e conhecimento sobre o curso. Além de permanecer unidos comigo durante todas essas etapas e me auxiliando nos momentos em que tive dificuldades.

Agradeço ao meu orientador Rodolpho Cesar dos Reis Tinini por ter acreditado no meu projeto, abraçar essa causa comigo, pela paciência, confiança e por propor soluções para meu trabalho. Sou grato também ao professor André Luiz Athayde, pelo fato de me instruir e colaborar de forma significativa na construção do meu trabalho.

Por fim, agradeço ao corpo docente, equipe técnica e colaboradores do ICA por manter a ordem e o bom funcionamento da instituição.

“Um espírito ativo está constantemente em busca de alguma verdade que é para ele, naquele instante, a figuração dessa verdade integral à qual ele votou seu culto. A inteligência é igual à criança, em cujos lábios os “por quê? ” não têm fim”.

(Antonin Sertillanges)

RESUMO

Estudos relacionados às mudanças ambientais oriundas das ações antrópicas ocupam grande visibilidade no âmbito da engenharia ambiental. As alterações na vegetação em determinadas regiões estão interligadas aos fatores econômicos, culturais e sociais. Nessa perspectiva, diversas ferramentas tecnológicas vêm sendo utilizadas para analisar a paisagem de um determinado ambiente. Diante disso, as geotecnologias aplicadas aos estudos ambientais, como o uso da aplicação de índices de vegetação, vêm sendo empregadas em análises de áreas que sofreram degradação ambiental. Dentre os índices de vegetação, o NDVI, SAVI, RATIO e IAF, são considerados bons indicadores da qualidade da vegetação. Assim, o presente trabalho teve por objetivo aplicar o (NDVI, SAVI, RATIO e IAF) para analisar as mudanças ambientais que aconteceram após o rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro, da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho – MG e compará-los, com intuito de verificar suas diferenças e semelhanças, além do monitoramento da região nas datas 14/01/2019, 30/01/2019, 25/04/2021 e 10/06/2023. Para isso, foram utilizadas imagens do satélite *Landsat 8-9* sensor OLI e o processamento das imagens foi realizado no *software* livre QGIS versão 3.22.5. Como resultado os presentes índices evidenciaram alterações espaciais na vegetação nos períodos considerados e os resultados apontaram semelhança entre o NDVI e SAVI, o RATIO apresentou leves semelhanças qualitativas com o NDVI, mas o IAF apresentou discrepância entre os índices.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, índices de vegetação, NDVI, SAVI, RATIO, IAF.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos das técnicas de sensoriamento remoto 19
Figura 2 – Principais regiões do espectro eletromagnético.....20
Figura 3 - Valores do NDVI.....23
Figura 4 - Localização do Município de Brumadinho – MG.....26
Figura 5 - Processo realizado para obtenção das bases cartográficas.....27
Figura 6 - Processo realizado para obtenção das imagens de satélite.....27
Figura 7 - Delimitação da área atingida pelos rejeitos de minério de ferro.....28
Figura 8 - agosto de 2018 (1) e fevereiro de 2019 (2) 29
Figura 9 - Inserção das camadas vetoriais no QGIS.....30
Figura 10 - Inserção das camadas *raster* no QGIS.....31
Figura 11 - Geração de nova camada municipal no QGIS.....31
Figura 12 - Geração de nova camada municipal *shapefile*.....32
Figura 13 - Cena da imagem do satélite *Landsat* 8-9 da região de Brumadinho – MG.....32
Figura 14 - Imagem do satélite *Landsat* 8-9 de Brumadinho – MG recortada.....33
Figura 15 - Série temporal de NDVI.....39
Figura 16 - Série temporal de SAVI.....43
Figura 17 - Série temporal de RATIO.....46
Figura 18 - Série temporal de IAF.....49
Figura 19 - Série temporal de classes de cobertura do solo do NDVI.....53
Figura 20 - Série temporal de classes de cobertura do solo do SAVI.....56
Figura 21 - Série temporal de classes de cobertura do solo do RATIO.....59
Figura 22 - Série temporal de classes de cobertura do solo do IAF.....62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Média, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos NDVI.....41
Tabela 2 - Média, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos SAVI.....45
Tabela 3 - Média, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos RATIO.....48
Tabela 4 - Média, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos IAF.....51
Tabela 5 - Área das classes do solo NDVI – 14/01/2019.....54
Tabela 6 - Área das classes do solo NDVI – 30/01/2019.....54
Tabela 7 - Área das classes do solo NDVI – 25/04/2021.....54
Tabela 8 - Área das classes de solo do NDVI – 10/06/2023.....54
Tabela 9 - Área das classes de solo do SAVI - 14/01/2019.....57
Tabela 10 - Área das classes de solo do SAVI - 30/01/2019.....57
Tabela 11 - Área das classes de solo do SAVI - 25/04/2021.....57
Tabela 12 - Área das classes de solo do SAVI – 10/06/2023.....57
Tabela 13 - Área das classes de solo do RATIO – 14/01/2019.....60
Tabela 14 - Área das classes de solo do RATIO – 30/01/2019.....60
Tabela 15 - Área das classes de solo do RATIO – 25/04/2021.....60
Tabela 16 - Área das classes de solo do RATIO – 10/06/2023.....60
Tabela 17 - Área das classes de solo do IAF – 14/01/2019.....63
Tabela 18 - Área das classes de solo do IAF – 30/01/2019.....63
Tabela 19 - Área das classes de solo do IAF – 25/04/2021.....63
Tabela 20 - Área das classes de solo do IAF – 10/06/2023.....64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM - Agência Nacional de Mineração

CENIMA - Centro Nacional de Monitoramento e Informações Ambientais

IAF - Índice de área foliar

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

NIR - Infravermelho Próximo

NDVI - Índice de vegetação por diferença normalizada

ONGs - Organizações Não Governamentais

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

RATIO - Índice de vegetação da razão simples

RED - Vermelho

REM - Radiação eletromagnética

SIRGAS 2000 - Sistema geocêntrico de referência do território Sul-americano

SAVI - Índice de vegetação ajustada ao solo

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

SIGBM - Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração

USGS - *United States Geological Survey*

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Histogramas NDVI.....40
Gráfico 2 - Histogramas SAVI.....44
Gráfico 3 - Histogramas RATIO.....47
Gráfico 4 - Histogramas IAF.....50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. REFERENCIAL TEÓRICO 16
2.1. Mineração no Brasil 16
2.2. Impactos ambientais da mineração no Brasil 16
2.3. Definição de sensoriamento remoto 18
2.6. Geoprocessamento ambiental 20
2.7. Índices de vegetação 21
2.7.1. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 22
2.7.2. índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) 23
2.7.3. índice da simples razão (RATIO) 24
2.7.4. índice de área foliar (IAF) 24
3. METODOLOGIA 25
3.1. Caracterização da pesquisa 25
3.2. Área de estudo 25
3.3. Técnica de coleta de dados 26
3.4. Técnica de análise e manipulação de dados 30
3.5. Elaboração dos mapas NDVI 30
3.6. Elaboração dos mapas SAVI 34
3.7. Elaboração dos mapas RATIO 34
3.8. Elaboração dos mapas IAF 35
3.9. Elaboração dos mapas das classes do solo dos índices de vegetação 35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 37
4.1. Resultados do NDVI 37
4.2. Resultados do SAVI 41
4.3. Resultados do RATIO 45
4.4. Resultados do IAF 48
4.5. Mapas e cálculo de áreas por classes de cobertura do solo do NDVI 51
4.6. Mapas e cálculo de áreas por classes de cobertura do solo do SAVI 55
4.7. Mapas e cálculo de áreas por classes de cobertura do solo do RATIO 58
4.8. Mapas e cálculo de áreas por classes de cobertura do solo do IAF 61
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 65
REFERÊNCIAS 66

1. INTRODUÇÃO

A indústria extrativa mineral é um conjunto de processos que envolvem pesquisa, exploração, extração e beneficiamento de minérios presentes no subsolo (Matos, 2010). Essa atividade tem relevância socioeconômica, pois fornece matéria prima para diversos setores industriais. De acordo com Matos (2010), o Brasil é considerado um dos maiores produtores de minerais do mundo. Porém, mesmo com sua importância socioeconômica, pode-se dizer que realizar o balanço entre produzir e zelar pelo meio ambiente é uma tarefa árdua e seus danos ambientais podem ser irreversíveis em alguns casos.

Após a etapa de produção do minério de ferro, a massiva produção de rejeitos se destina a barragens de armazenamentos (Pacchello, 2021). No entanto, se as estruturas hidráulicas forem dimensionadas de forma inadequada e não houver monitoramento frequente, o risco de rompimento aumenta e, em consequência disso, poderá representar grandes riscos econômicos, ambientais e sociais (Lopes, 2016).

Nesse aspecto, Vieira (2011) faz o seguinte questionamento: é possível operar uma indústria de mineração sem impactos socioeconômicos? Nesse quesito, pode-se dizer que é difícil realizar esse feito, pois existem vários fatores durante e após esse processo que degradam o ambiente em vários aspectos. Porém, existe a possibilidade de realizar operações que visam produzir com ênfase no desenvolvimento sustentável.

Durante a última década, houve vários desastres ambientais oriundos do rompimento de barragens de rejeitos de minério de ferro em Minas Gerais, como o que ocorreu no município de Brumadinho por exemplo. Logo após esses ocorridos, o solo, cursos d'água, fauna e flora sofreram impactos ambientais decorrentes das impurezas dos rejeitos de minério (Pacchello, 2021).

O rompimento da barragem alterou diferentes setores ambientais locais em poucos dias. Em relação a isso, foi necessário realizar levantamentos para fornecer indicadores e verificar a extensão territorial que os rejeitos de lama alcançaram. Assim, dados os impactos negativos desse advento com perdas econômicas e de vidas, torna-se necessário o uso de ferramentas que possam auxiliar os trabalhos na recuperação do bioma alterado em Brumadinho-MG.

Nessa perspectiva, o uso de sensoriamento remoto com técnicas de geoprocessamento se torna uma ótima ferramenta de monitoramento ambiental e análise espacial para verificar as características, mudanças e alterações que aconteceram na região da barragem, auxiliando, assim, na tomada de decisões de trabalhos de recuperação das áreas degradadas e verificar os avanços ambientais no decorrer do tempo.

O geoprocessamento é uma importante ferramenta de análise espacial que vem sendo empregado nos estudos agronômicos, ambientais, florestais, topográficos, geológicos e tudo que abrange local e espaço. Sendo assim, por meio dessa técnica, é possível estudar áreas ambientais sem a necessidade de frequentar o local. Ou seja, com o auxílio de imagens obtidas por meio de satélites, é possível editar, analisar dados, verificar a qualidade da vegetação por meio do *software* QGIS versão 3.22.5, criar relatórios e projetos para auxiliar na tomada de decisões presentes e futuras.

Frente a esse cenário, a presente proposta de pesquisa se norteia a partir do seguinte problema: Quais são as diferenças entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustada ao solo (SAVI), índice de vegetação da razão simples (RATIO) e índice de área foliar (IAF) antes e após o rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho-MG?

A importância do levantamento de dados espaciais é essencial na elaboração de projetos dentro da Engenharia Agrícola e Ambiental. Graças ao planejamento, é possível prever as possíveis respostas de um empreendimento ambiental antes de iniciar os trabalhos de campo. Quando se trata de meio ambiente, o local de análise apresenta características que mostram o bioma do local, tipo de solo, rios etc. Porém, quando se depara com um território vasto, o levantamento detalhado da área se torna inviável na maioria das vezes. A resposta para isso pode ser expressa por meio da topografia, por exemplo, que é uma ciência que busca representar e delimitar as formas e particularidades de uma área de forma detalhada (Pereira, 2019). No entanto, esse ramo da engenharia tem limitações por ser um trabalho vagaroso.

Nesse aspecto, surge o interesse de buscar formas alternativas de estudar áreas vastas que sofreram alterações antrópicas. No tocante a essa problemática, o sensoriamento remoto e geoprocessamento são ferramentas importantes para fazer o mapeamento de áreas, buscando entender em qual condição a área de estudo se encontra, seus atributos, as modificações no decorrer dos tempos e a vegetação da área.

A realização da pesquisa apresentará benefícios práticos ao aprofundar a discussão sobre as diferenças entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustada ao solo (SAVI), índice de vegetação da simples razão (RATIO) e índice de área foliar (IAF). Além disso, será possível notar as diferenças da qualidade da vegetação do antes e depois do rompimento da barragem da Mina do Córrego do Feijão no município de Brumadinho – MG por meio do monitoramento ambiental e uso de mapas de classificação do solo. Por fim, os resultados do trabalho poderão servir de subsídio para verificar as diferenças dos índices de vegetação em áreas que sofreram esse tipo de desastre ambiental.

Tendo em vista a problemática da pesquisa, o objetivo será verificar as diferenças entre os índices de vegetação NDVI, SAVI, RATIO e IAF antes e após o rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho-MG.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Mineração no Brasil

Muitos materiais, objetos e ferramentas que são utilizadas nas industrias, comercio e residências são oriundos da mineração de jazidas de rochas da crosta terrestre, pois essa atividade tem muita importância no meio social e no crescimento econômico, pelo fato de ser responsável por fornecer matéria prima para diversos setores industriais (Matos, 2010).

A mineração é fundamental na vida do homem moderno, graças a importância dos bens minerais nas atividades humanas atuais, como construção, habitação e agricultura (Matos, 2010). Diante disso, nota-se a importância da mineração para suprir demandas necessárias na sociedade e economia do país, pois graças a essas fontes é possível fabricar maquinas, veículos, eletrodomésticos e etc.

Ao analisar a literatura, nota-se que essa atividade não é recente no Brasil, segundo Fausto (2015), as atividades de mineração iniciaram por volta de 1735, quando houve descobertas de ouro em Minas Gerais, na Bahia, Goiás e Mato Grosso. Além disso, a exploração desse metal fomentou de forma significativa a economia e imigração para o Brasil (Fausto, 2015). Logo, no decorrer dos anos, essas atividades tomaram grandes proporções, mas de acordo com Luz e Lins (2004, citado por Souza Júnior; Moreira; Heineck, 2018) o emprego da mineração até o ano de 1864 limitava basicamente à produção de ouro, cobre e chumbo.

Logo, por volta do século XX, essa atividade começou a explorar diversos tipos de metais para atender interesses econômicos e, com isso, houve crescimento da quantidade de rejeitos minerais advindos da mineração e construção de barragens para realizar a estocagem dos rejeitos (Vieira, 2011).

2.2. Impactos ambientais da mineração no Brasil

A mineração no Brasil tem diversas relações sociais, ambientais e econômicas, mas é importante salientar seu potencial de impacto negativo. Diante desse aspecto, surge a necessidade de expor a realidade e influência dessa atividade no Brasil, visando à adoção de medidas preventivas e sustentáveis. Segundo Viera (2011), estudos apontam que os estados de Minas Gerais, Pará, São Paulo, Mato Grosso, Goiás e Bahia são considerados os maiores produtores de minérios do Brasil. Sendo assim, a probabilidade de ocorrência de desastres

ambientais oriundos da barragem de minério no Brasil se destina a alguns desses estados, Minas Gerais é um exemplo notável disso.

A indústria de mineração ocupa grande expansão territorial, desde a área de extração até a estrutura de sua operacionalidade (Vieira, 2011). Além disso, a estrutura da jazida de mineração causa desequilíbrio de biomas e ecossistemas (Vieira, 2011). De acordo com o relatório da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2022, p. 2) “No dia 31/07/2022, havia 909 barragens de mineração cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), das quais 496 estavam enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens”. A seguir, durante esse período, foi constatado pelo relatório que existem 63 barragens em situação de emergência declarada (ANM, 2022).

No estado de Minas Gerais, existem cerca de 346 barragens de mineração, onde 213 estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e 133 não inseridas (ANM, 2022). Diante desses dados, as incertezas em relação à segurança dessas 133 barragens podem causar presentes preocupações e futuros problemas, pois o histórico de rompimento de barragens em Minas Gerais não é nada positivo.

Diante desse quadro de rompimentos de barragens que ocorreram em Minas Gerais nas últimas décadas, o rompimento da barragem da Vale, na mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG), foi considerado o maior desastre ambiental do Brasil e o segundo maior desastre do século XXI (Pacchello, 2021). Além disso, os rejeitos cobriram uma extensão territorial de 297,28 hectares de terras, incluindo matas, pastagens, lavouras, água, moradia e habitação etc. (Pereira; Cruz; Guimarães, 2019), além de ocasionar a perda de vidas humanas, pois, segundo o G1 (2023), 270 pessoas morreram devido a esse acidente.

Ao analisar a bibliografia sobre impactos da mineração em Brumadinho, nota-se que o rompimento da barragem causou mudanças de coberturas da terra muito relevantes (Pereira; Cruz; Guimarães, 2019). Diante dessa problemática, nota-se que os impactos da mineração são inevitáveis, pois de qualquer forma esse sistema irá causar modificações no meio ambiente, mas, no caso de rompimentos de barragens, essas mudanças ocorrem de forma brusca, acarretando diversas perdas que estão relacionadas com fauna e flora local.

2.3. Definição de sensoriamento remoto

Diante dos tempos modernos, o sensoriamento remoto vem ocupando cada vez mais espaço no monitoramento ambiental. Alguns exemplos disso podem ser notados em reportagens que são transmitidas pelos veículos de comunicação ao mostrar dados meteorológicos, ameaças de fenômenos naturais e áreas que foram desmatadas em determinadas regiões. Sendo assim, tal ferramenta permite por meio de análises espaciais, verificar a situação passada e presente da área de estudo, realizar projeto e planejamento de revitalização de áreas degradadas por meio de bases de dados que foram coletadas.

O sensoriamento remoto é definido como um conjunto de técnicas que busca a coleta de informações sobre objetos, sem que haja contato físico (Novo; Panzoni, 2001). Entretanto, essa definição abrange muitas coisas, pois é possível obter informações sobre objetos por meio da descrição em forma de áudio, texto e figuras.

Assim, outra definição de sensoriamento remoto é dada por: “Sensoriamento Remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres” (Meneses *et al*., 2012, p. 3). Para Elachi (1987, citado por Novo, 2010) sensoriamento remoto obtém informações sobre o objeto por meio das interações que o mesmo impõe aos campos eletromagnéticos, acústicos ou potenciais.

Apesar de existirem várias definições para o sensoriamento remoto, essa definição pode ser limitada a utilização de sensores que medem alterações e informações que os objetos impõem ao campo eletromagnético (Novo, 2010). Existem diversas razões para isso, sendo uma das principais, segundo Novo (2010, p. 27) “a radiação eletromagnética não necessita de um meio de propagação, como os demais campos”.

Sendo assim, as informações obtidas pelos sensores, tem por principal finalidade estudar eventos dentro do espaço terrestre a partir do registro e da análise das interações da radiação eletromagnética (Novo, 2010). Os presentes dados são usados para realizar monitoramento ambiental e mapeamento temático, por exemplo.

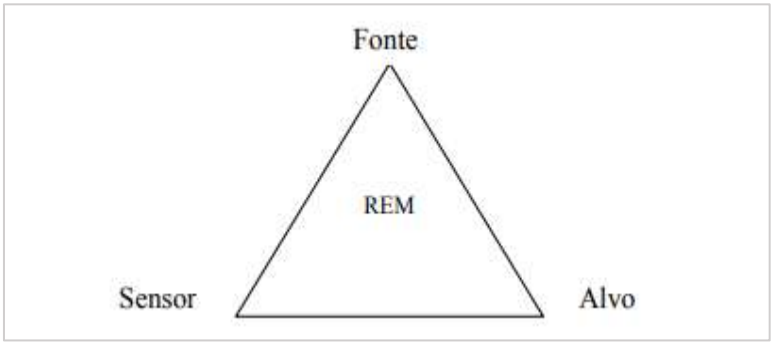
2.4. Radiação eletromagnética

Já que o sensoriamento remoto busca sensorear áreas a distância por meio de sensores ópticos que ficam acoplados nos satélites, percebe-se então que o satélite observa cada parte do planeta Terra para coletar informações e transmitia-las (Liu,2007).

A captação dessas imagens funciona de acordo com a trajetória da radiação eletromagnética, no qual o sol emite energia eletromagnética incidente sobre o planeta terra e a energia refletida é captada pelos satélites na forma de sinais, logo, o satélite envia os dados coletados a estação de recepção. Em seguida, os sinais são convertidos em dados por meio de operações matemáticas complexas (Liu, 2007).

O comportamento do sensoriamento remoto se baseia em quatro fatores: radiação eletromagnética, fonte, sensor e alvo (Figura 1). A fonte da radiação eletromagnética é o sol, o sensor faz a coleta e o registro da REM refletida pelo alvo (Novo; Panzoni, 2010).

Figura 1: Elementos das técnicas de sensoriamento remoto

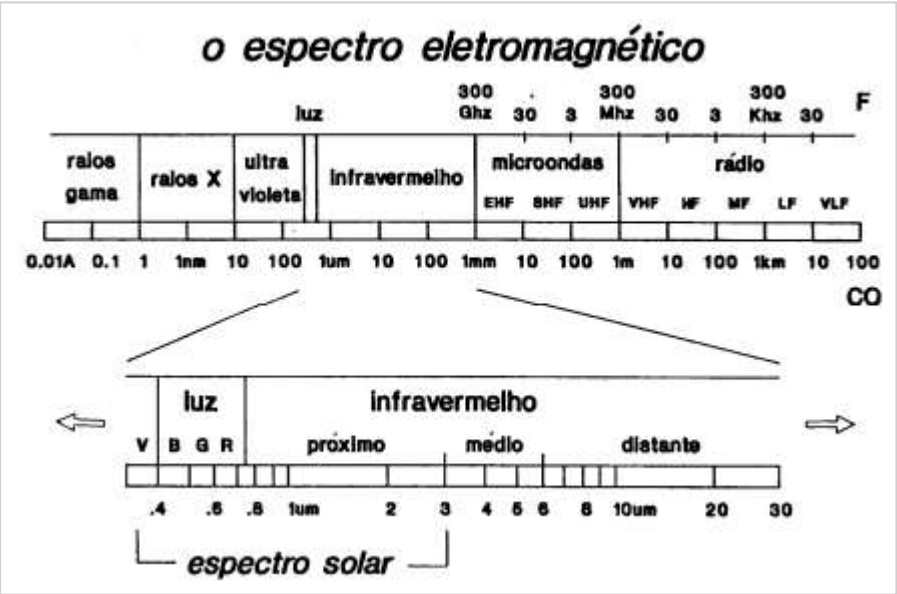


Fonte: Novo e Panzoni (2001).

A REM é o elemento fundamental nas técnicas de geoprocessamento, se propaga no espaço a velocidade da luz e sua interação com o meio pode ser explicada por meio do modelo corpuscular ou ondulatório (Novo; Panzoni, 2010). De acordo com Meneses *et al*. (2012), isso significa que a REM se propaga no espaço, ao mesmo tempo, em forma de onda e energia.

O espectro eletromagnético é dividido em regiões espectrais, passando pelos raios gama, raios x, ultravioleta, luz, infravermelho, micro-ondas e rádio (Figura 2). Assim, as que sofrem influência da atmosfera são denominadas de janelas atmosféricas. Sendo assim, existem vários valores em determinadas regiões espectrais, mas as maiores intensidades de REM estão compreendidas entre 0,4 a 0,7 µm, pois, no sensoriamento remoto, esses comprimentos que estão na região do infravermelho, serão vistos e notados pelo homem pelo fato de ser visível. Sendo assim, esse espectro será o mais estudado (Novo; Panzoni, 2010).

Figura 2: Principais regiões do espectro eletromagnético



Fonte: Novo e Panzoni (2001).

2.6. Geoprocessamento ambiental

Os sistemas de informações geográficas (SIG) são de extrema importância no levantamento de dados agrícolas, ambientais e florestais. Diante disso, os profissionais e pesquisadores que são responsáveis por essa área, utilizam tais ferramentas para monitorar áreas, analisar e realizar projetos em seu campo de estudo, para que possam realizar previsões e potencializar a assertividade na criação de projetos com auxílio de *software*, imagens de satélite, *plugins*, camadas *shapefile* e mapas temáticos. Pois isso poderá facilitar a compreensão dos responsáveis técnicos que irão executar os devidos projetos.

Para Santos *et al.* (2022) as geotecnologias são ferramentas para se estudar o território, utilizados por profissionais e pesquisadores da área. Diante disso, é possível perceber que a utilização de SIG tem enorme abrangência em diversas áreas e é de suma importância para analisar, qualificar e quantificar o grau da vegetação como objeto de estudo, por exemplo.

De acordo com Liu (2007), o SIG é utilizado na integração e análise de várias fontes, como imagens de satélites, mapas de vegetação e dados estatísticos. Sendo assim, essas variedades de informações disponíveis nas geotecnologias, facilitam a obtenção de dados vetoriais e matriciais para a construção do processo de geração de mapas e posteriormente a interpretação dos dados referentes ao estudo.

O conhecimento sobre o uso da terra tem chamado a atenção pela necessidade de garantir a sustentabilidade e o desenvolvimento social (IBGE, 2006). No caso do Brasil, por ter um vasto território, o conhecimento do uso de SIG aplicado ao monitoramento ambiental, constitui uma importante ferramenta de planejamento no monitoramento ambiental e gestão ambiental.

Nesse sentido, vale salientar que as tragédias ambientais não ocorrem por acaso, geralmente são ocasionadas por ações antrópicas. Além disso, antes da ocorrência de algum desastre ambiental é possível notar alguns indicativos que mostram previsões sobre o desastre. Com isso, Santos *et al*. (2015), afirmam que que as geotecnologias passam a se tornar ferramentas aliadas à topografia, sensoriamento remoto e geoprocessamento quando se refere a análise ambiental.

Porém, para obter dados precisos e eficientes sobre um empreendimento de exploração ambiental é necessário a utilização de ferramentas relacionadas ao geoprocessamento, para auxiliar na tomada de decisões e minimizar as chances de ocorrer algum impacto de grande escala.

Assim, o estudo interdisciplinar entre geoprocessamento e meio ambiente é uma ferramenta importante para que os pesquisadores, cientistas e estudantes possam direcionar seus estudos em diferentes campos de pesquisas ambientais. Essas pesquisas são necessárias para verificar as perdas ocorridas em desastres ambientais e utilizar as descobertas como subsidio na elaboração de futuros estudos e projetos de proteção e revitalização ambiental.

2.7. Índices de vegetação

Os estudos relacionados à proteção da vegetação são importantes para monitorar e preservar florestas, matas nativas e o meio ambiente. Sendo assim, de acordo com Liu (2007), os índices de vegetação são usados para quantificar a distribuição espacial das vegetações por meio de dados obtidos por satélites mediante a radiação eletromagnética, pois esses índices são oriundos das diversas equações matemáticas dos dados que são obtidos por meio das reflectâncias da radiação eletromagnética, por sensores remotos.

O acompanhamento da cobertura vegetal por meio de técnicas de sensoriamento remoto, podem ser efetuadas a um baixo custo-benefício em relação as demais técnicas e com resultados satisfatórios (Mass, 1999 citado por Ferrari; Santos; Garcia, 2011). Além disso, os índices de vegetação podem ser a forma mais acessível de realçar o vigor da vegetação verde e em contrapartida, minimizar os efeitos do solo na cobertura vegetal da área (Jackson; Huete, 1991

citado por Ferrari; Santos; Garcia, 2011). Assim, o objetivo do índice de vegetação é distinguir o que é vegetação e não vegetação (Liu, 2007).

Segundo Liu (2007), existem vários tipos de índices de vegetação e, os mais usados dentre eles estão compreendidos nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo. Isso ocorre pelo fato de 90% da alteração da resposta espectral da vegetação estar nas bandas do vermelho e infravermelho próximo, isso ocorre devido aos fatores biofísicos das plantas (Rosa, 2009 citado por Demarchi; Piroli; Zimback, 2011).

No que se refere as faixas espectrais dos índices de vegetação, observa-se o seguinte fenômeno na banda do vermelho no qual as faixas espectrais mais aproveitadas pela folha durante o processo da fotossíntese refletem ao vermelho (0,65 a 0,72 um) e ao azul (0,45 a 0,50 um), respectivamente (Rosa, 2009 citado por Demarchi; Piroli, Zimback, 2011)

Em contrapartida, “na faixa do infravermelho próximo (0,7 a 1,3 μm), a absorção da radiação eletromagnética é muito baixa (menos de 15 %) e a reflectância pode chegar a 50 % dependendo da estrutura anatômica das folhas” (Moreira, 2001 citado por Demarchi; Piroli; Zimback, 2011).

Com isso, as informações obtidas por sensoriamento remoto são importantes nas análises ambientais, por serem responsáveis pela obtenção de dados que se relacionam com os ganhos ou reduções das áreas de vegetação (Rosemback; França; Florenzano, 2005).

2.7.1. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

Existem mais de quarenta índices de vegetação na literatura (Ferrari; Santos; Garcia, 2011)., sendo o NDVI proposto por Rouse (1973), o índice mais notável dentre os demais, e são utilizados pela comunidade acadêmica com objetivo de estudar e analisar áreas ambientais (Eduvirgem *et al.,* 2016). Sendo assim, o presente índice é aceitável por possuir capacidade para obter detalhes em áreas com vegetação, e o aumento da vegetação no passar dos anos (Lobato *et al.,* 2010).

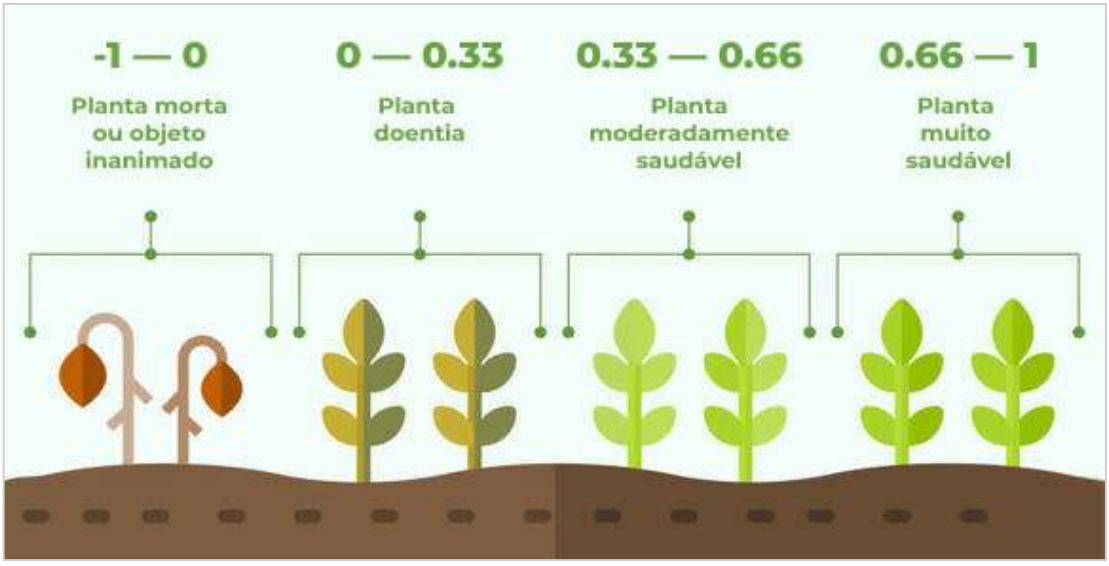
O NDVI destaca o contraste da radiação refletida nas bandas do infravermelho e vermelho, o que é diretamente proporcional ao processo da fotossíntese (Mascarenhas *et al*., 2008). Com isso, torna-se possível verificar o contraste entre bioma e não bioma por meio da atividade fotossintética (Lucchetta, 2020).

A desvantagem do NDVI está relacionada com o efeito espectral do solo em relação a vegetação, o que prejudica o estudo e analises dos dados gerados (Elmore *et al*., 2000 citado por Demarchi; Piroli; Zimback, 2011). Em seguida, o autor afirma que esse efeito provoca

variações nos valores de series temporais de NDVI, devido as diferenças de brilhos entre os diferentes objetos de estudo, como solo e arvores.

O NDVI gerado em ambiente SIG, apresenta valores que variam de -1 a 1 (Figura 3). Por definição, os valores mais próximos de 1, apresentam vegetação densa, saudável e de alta atividade biológica, enquanto os valores próximos de 0, apresentam vegetação rasteira ou com pouca atividade biológica (Rosendo, 2005 citado por Coutinho *et al.*, 2016).

Figura 3: Valores do NDVI



Fonte: EOS (2020).

Por meio da figura 3 é possível interpretar os quatros estágios de NDVI. No entanto, Coutinho *et al*. (2016) relatam que o resultado negativo do NDVI está associado à região que possui corpos hídricos.

2.7.2. Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI)

O SAVI apontado por Huete (1988), tem por finalidade incluir as influências do solo ao NDVI. Nesse caso, quando se encontra cobertura vegetal baixa ou intermediaria na área analisada os efeitos do solo exposto costuma interferir ou alterar nos resultados do NDVI, com isso, usa-se o SAVI para realizar o ajuste desse fenômeno (Gameiro *et al*, 2017).

O presente índice se assemelha ao NDVI, mas se difere pelo fator L contido na equação, a variação desse fator é de 0 a 1, onde valores aproximados a 0,25 indicam áreas com vegetação

mais densa, 0,5 vegetação moderadamente densa e 1 vegetação com algum tipo de deficiência hídrica ou cobertura muito baixa (Rosendo, 2005 citado por Coutinho *et al.,* 2016).

O SAVI costuma ser utilizado em análises onde há presença de solo exposto em relação a vegetação, regiões áridas de vegetação longínqua ou para culturas que estão no estágio inicial de crescimento (EOS, 2022).

2.7.3. Índice da simples razão (RATIO)

O RATIO proposto por Birth e Macvey (1968), é baseado na razão entre o infravermelho próximo e o vermelho, onde os valores aumentam com o crescimento da vegetação na banda do infravermelho próximo, por outro lado, os valores decrescem com o aumento da vegetação na banda do vermelho, gerando um modelo que é bastante sensível à presença de biomassa vegetal (Diodato *et al*., 2021).

O índice é usado para estudar áreas com cobertura vegetal de alta densidade, pois o índice possui boa correlação com áreas que possuem biomassa vegetal (Fitz, 2020).

O presente índice é calculado pela divisão de valores de refletância contidos em bandas do infravermelho próximo por aqueles contidos na banda do vermelho, buscando crescimento e estimativas dos biomas analisados (Pearson; Meller, 1972 citados por Coutinho *et al.,* 2016).

2.7.4. Índice de área foliar (IAF)

O IAF é usado para estudar a superfície da folhagem da área analisada e verificar a superfície do solo que as folhas podem ocupar (EOS, 2022). Esse índice é usado para estudar a qualidade vegetal da silvicultura, clima e biomas (EOS, 2022). Em termos relacionados ao geoprocessamento, o índice é “um indicador da biomassa de cada pixel da imagem” (Allen *et al*., 2002 citado por Gameiro *et al*, 2017, p.17).

De acordo com Coutinho *et al.* (2016) o IAF deriva do NDVI e SAVI, com isso, costuma apresentar resultados semelhantes. Além do mais, a resposta do índice está relacionada com o clima do local, qualidade da vegetação e com índice pluviométrico (Coutinho *et al., 2016*).

Sendo assim, o IAF é “definido pela razão entre a área foliar de uma vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação” (Gameiro *et al.*, 2017, p.17). Contudo, o índice minimiza a os efeitos do solo na vegetação, por meio do fator L (Diodato *et al.,* 2021).

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da pesquisa

O presente trabalho busca descrever, analisar e comparar as diferenças entre índices de vegetação do município de Brumadinho – após o rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão, buscando as diferenças entre os índices para analisar o desastre ambiental ocorrido na barragem de mineração.

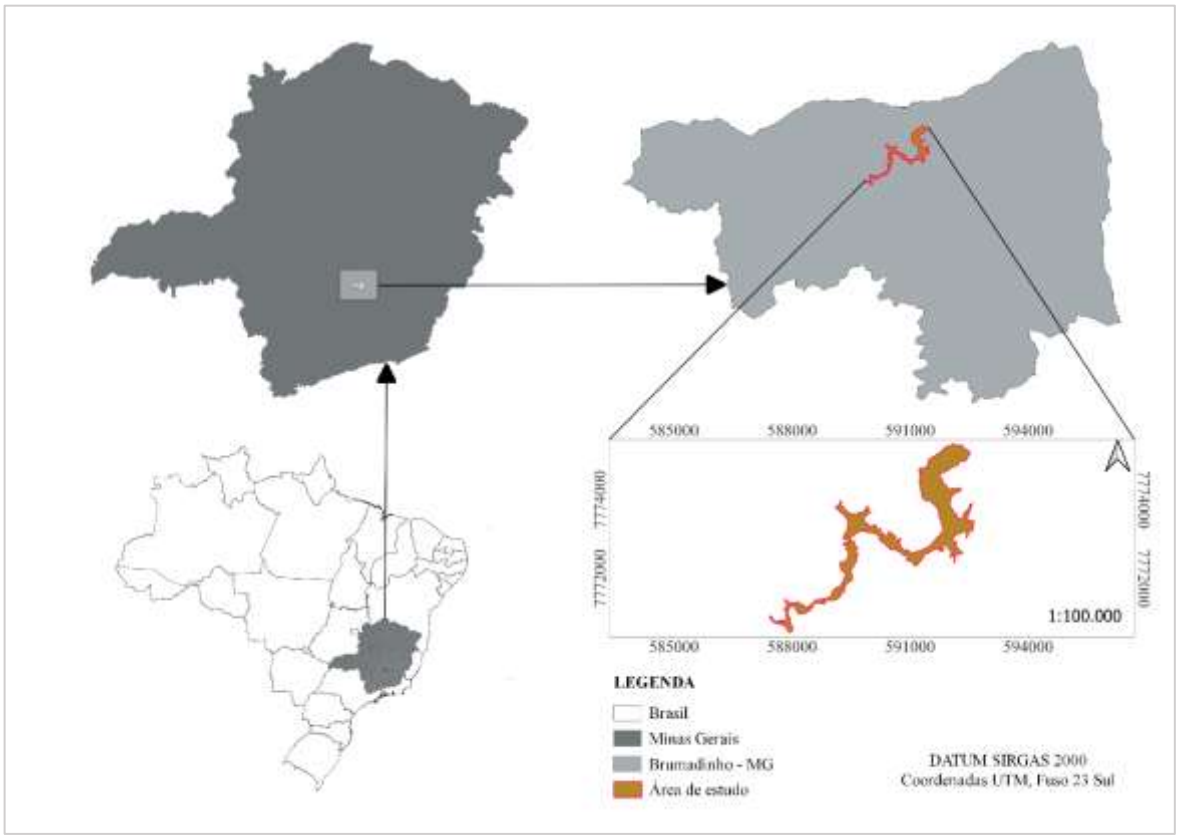
Sobre os procedimentos técnicos, a pesquisa se caracteriza como experimental, na qual escolhem-se as variáveis que vão influenciar e causar efeitos sobre o objeto de estudo (Gil, 1991 citados por Kauark; Manhães; Medeiros, 2010). Essa pesquisa é apropriada para avaliar um processo, pois é uma investigação sobre determinada situação, buscando soluções de problemas práticos.

3.2. Área de estudo

O município de Brumadinho-MG está inserido na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte, coordenadas geográficas de 20° 7’ 6” de latitude sul e 44° 12’ 4’’ de longitude oeste e altitude de 881 metros (IBGE, 2021). O município possui 639,434 km^2 de área territorial, com população de 38.915 habitantes e densidade demográfica de 60,86 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2022). A área da pesquisa se encontra entre as coordenadas (96° 51' 28,8" S, -34° 53' 9,6" O), (96° 14' 20" S, -53° 57' 7,2" O), (47° 38' 49,2" S, -6° 44' 34,8" O) e (102° 18' 36" S, -40° 22' 4 ,8" O).

Segundo Iannelli e Rigoletto (2020), o município se encontra dentro do bioma mata atlântica, apresentando características de florestas estacionais semideciduais, matas de galerias próximos aos cursos d’água e com abundância de recursos hídricos. De acordo com Iannelli e Rigoletto (2020), a cidade se encontra no quadrilátero ferrífero, local rico em minério de ferro, que em consequência promove as atividades econômicas oriundas da mineração (Figura 4).

Figura 4: Localização do Município de Brumadinho - MG

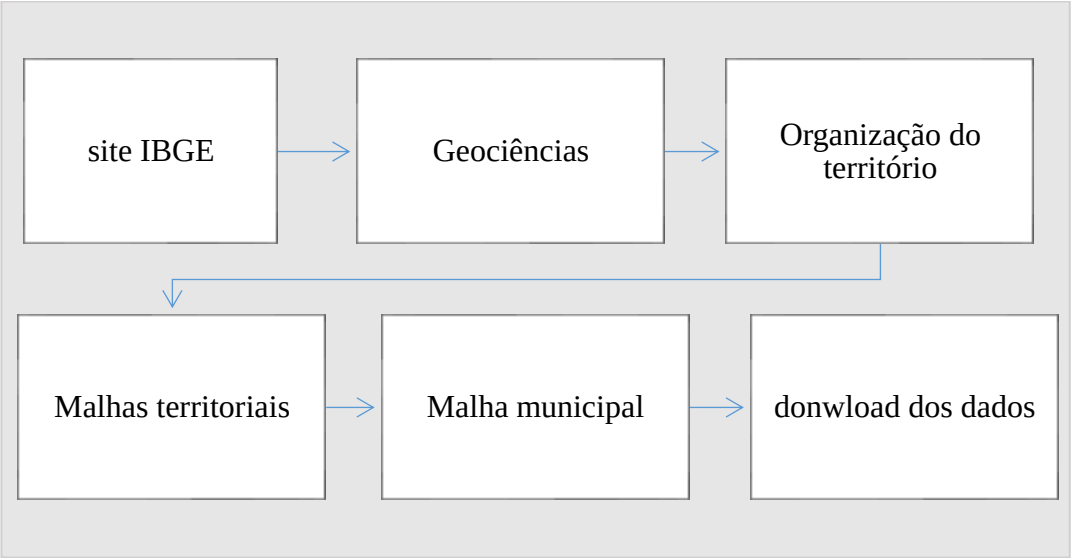


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.3. Técnica de coleta de dados

Para montar as bases de dados, realizou-se a aquisição das malhas municipais do estado de Minas Gerais, disponíveis no site do IBGE, 2023., seguindo o procedimento ilustrado na Figura 5. Esse procedimento é importante para fazer a elaboração dos mapas de localização e mapas dos índices de vegetação. Além disso, esses arquivos *shapefile* foram usados como bases para fazer o recorte das imagens de satélites (arquivos *raster*), no qual as cenas obtidas são maiores que a área territorial de Brumadinho-MG. Com isso, foi feito o recorte de acordo com a extensão territorial de Brumadinho, facilitando a compreensão e visualização das imagens.

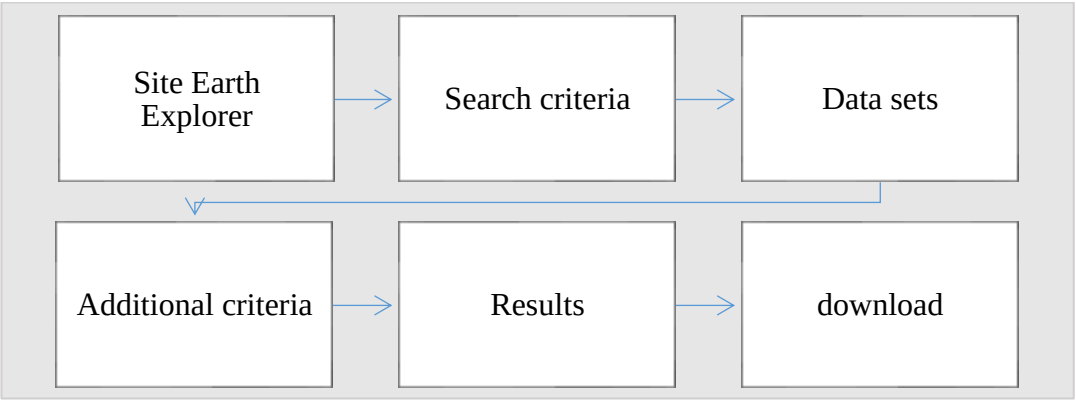
Figura 5: Processo realizado para obtenção das bases cartográficas



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em seguida, para se obter as imagens do município de Brumadinho-MG na elaboração dos mapas de cobertura vegetal, realizou-se a aquisição da série temporal das imagens de 14 de janeiro de 2019, 30 de janeiro de 2019, 25 de abril de 2021 e 10 de junho de 2023 por meio do site do Serviço Geológico dos Estados Unidos - USGS. Esse procedimento foi realizado conforme a Figura 6.

Figura 6: Processo realizado para obtenção das imagens de satélite



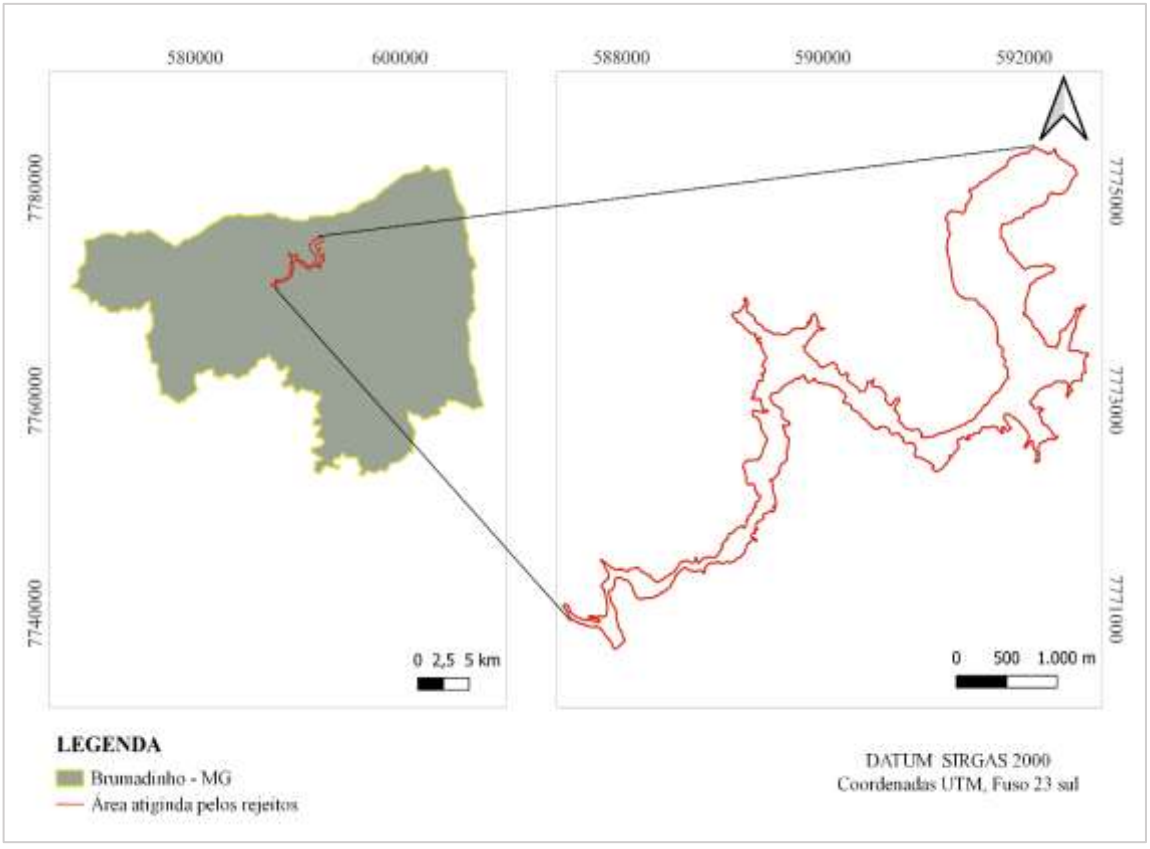
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para esse trabalho utilizou-se imagens do satélite *Landsat 8-9 Operational Land Imager* (OLI) e do *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), esse satélite possui nove bandas espectrais e 30 metros de resolução espacial para as bandas 1 a 7 e 9 (USGS, 2023). Porém, no presente

trabalho utilizou-se a banda 4 do vermelho com comprimento de onda entre 0,64 - 0,77 μm e a banda 5 do infravermelho com comprimento de onda entre 0,85 - 0,88 μm.

Foi coletado também, como informação, a área delimitada afetada pelos rejeitos de minério em formato *shapefile*, por meio do site agenciadenoticias.ibge.gov.br (Figura 7). Essa informação geoespacial sobre o local afetado dentro do município pode ser visualizada por meio de arquivos *kml*, *cv* e *shp*, podendo ser interpretadas por diferentes *softwares* de geoprocessamento (IBGE, 2019).

Figura 7: Delimitação da área atingida pelos rejeitos de minério de ferro.



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

A figura 8 possui duas imagens, a primeira representa o período que antecede o rompimento da barragem e a segunda corresponde ao período posterior. Com isso, por meio dessas imagens panorâmicas nota-se uma grande mudança na vegetação após o acidente.

Figura 8: agosto de 2018 (1) e fevereiro de 2019 (2).

Fonte: *Google Earth Pro* (2023).

Para realizar a edição das bases cartográficas e elaborar os mapas dos índices de vegetação, utilizou-se o *software* livre e gratuito QGIS, versão 3.22.5. Com essas edições foi possível calcular os índices de vegetação de cada imagem, compreender o comportamento e as respostas dos índices de vegetação em relação ao acontecimento analisado, instigados diretamente pela presença de rejeitos de minério de ferro no solo.

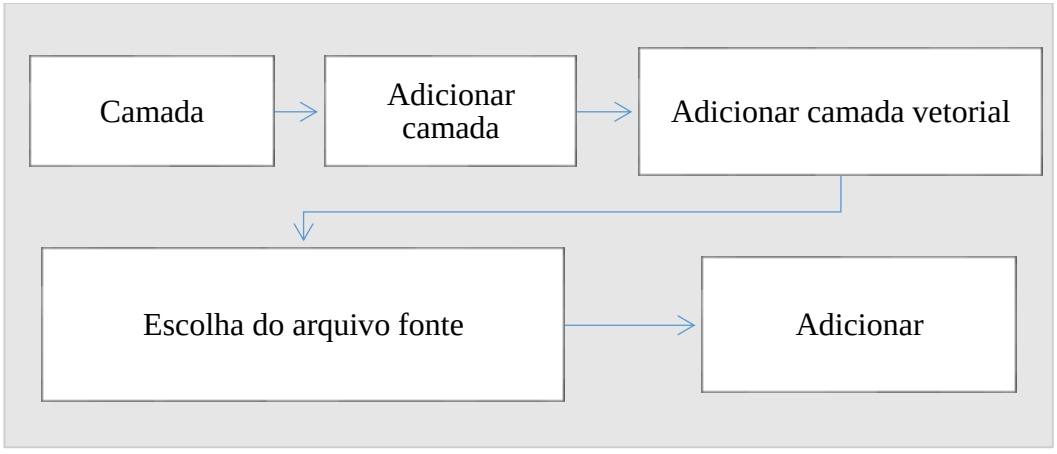
3.4. Técnica de análise e manipulação de dados

As imagens escolhidas para o trabalho compreendem os anos de 2019 até 2023, e os meses em que houve a coleta da base de dados estão relacionados aos períodos secos ou com pouca cobertura de nuvens. Ou seja, ao realizar o *download* das imagens, no item critérios adicionais em linha de cobertura de nuvens, foi alterado para somente 20% de cobertura de nuvens. Esse procedimento foi realizado para se obter várias imagens entre o intervalo de datas, no qual o leque de escolhas das imagens se tornou mais abundante, facilitando a escolha da melhor imagem dentre elas.

3.5. Elaboração dos mapas NDVI

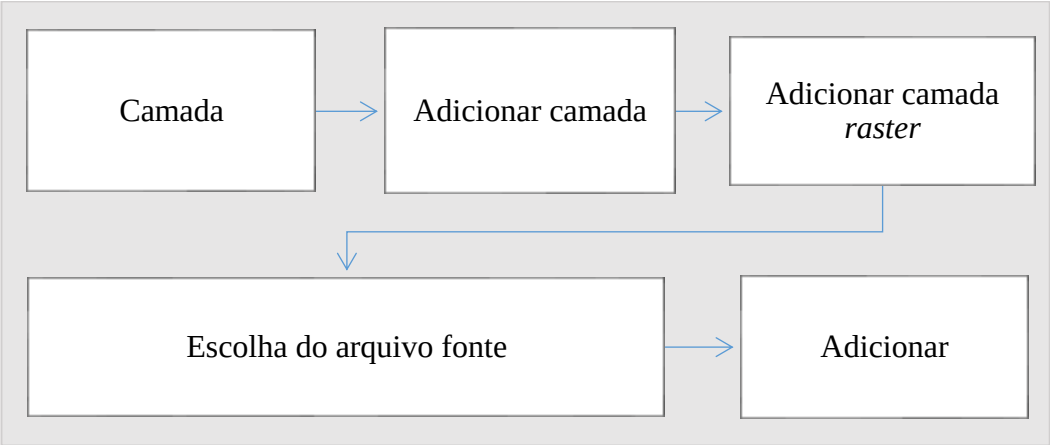
Com os arquivos coletados, salvos e descompactados no computador, foi adicionado no QGIS camadas vetoriais dos municípios de Minas Gerais e camadas *raster* das imagens de satélites por meio do menu barra de ferramentas de acordo com o diagrama da Figura 9. Em seguida, foi realizado o mesmo procedimento, porém com arquivos *raster* (Figura 10).

Figura 9: Inserção das camadas vetoriais no QGIS



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 10: Inserção das camadas *raster* no QGIS

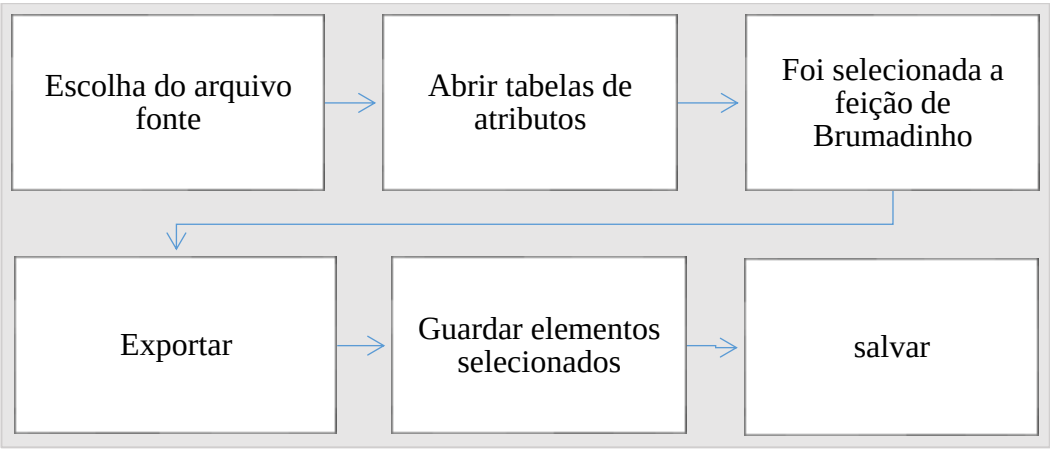


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O sistema de referência de coordenadas dos dados vetoriais e *raster* possui a configuração: EPSG:4674 - SIRGAS 2000 e EPSG:32623 - WSG 84 / UTM zone 23N, consecutivamente. Porém, foi necessário reprojetar os dados para a configuração: EPSG:31983 - SIRGAS 2000 / UTM zone 23S, que é o DATUM oficial no qual se encontra o município de Brumadinho-MG.

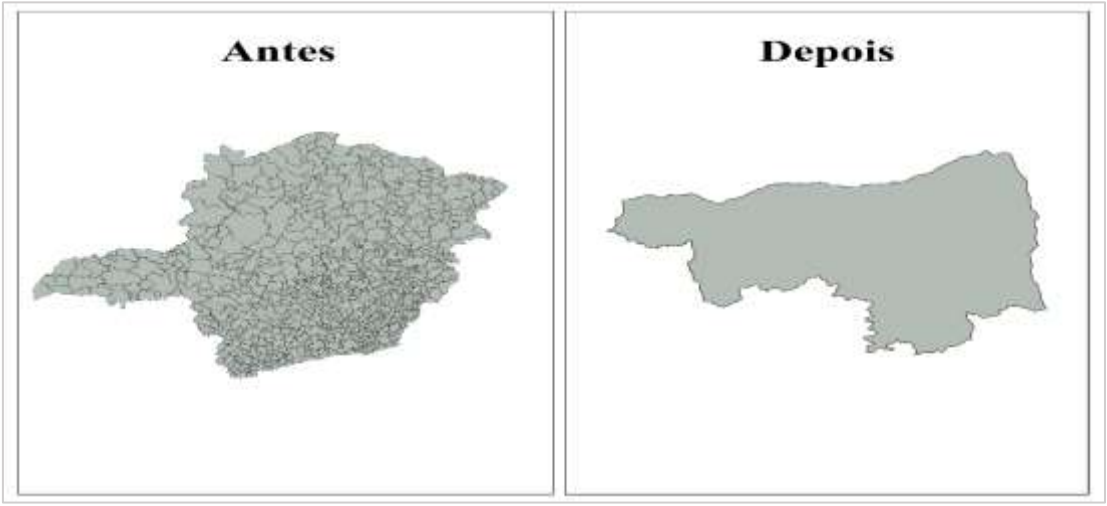
A seguir, na tabela de atributos dentro do item camadas, foi selecionado o Município de Brumadinho entre os municípios do estado de Minas Gerais, de acordo com o diagrama da figura 11. Em seguida, no item exportar, a camada selecionada foi arquivada gerando um novo arquivo *shapefile* municipal (Figura 12).

Figura 11: Geração de nova camada municipal no QGIS



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

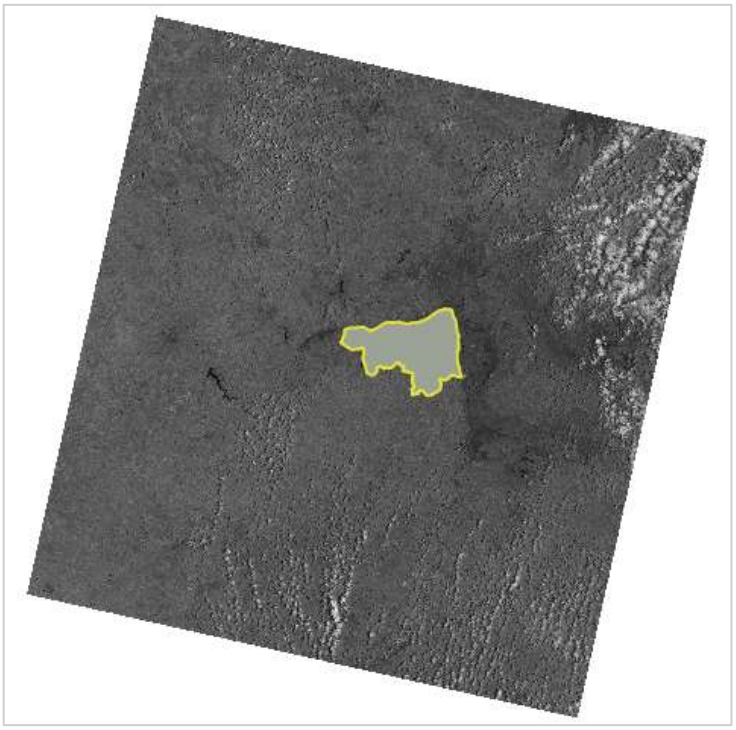
Figura 12: Geração de nova camada municipal *shapefile*



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

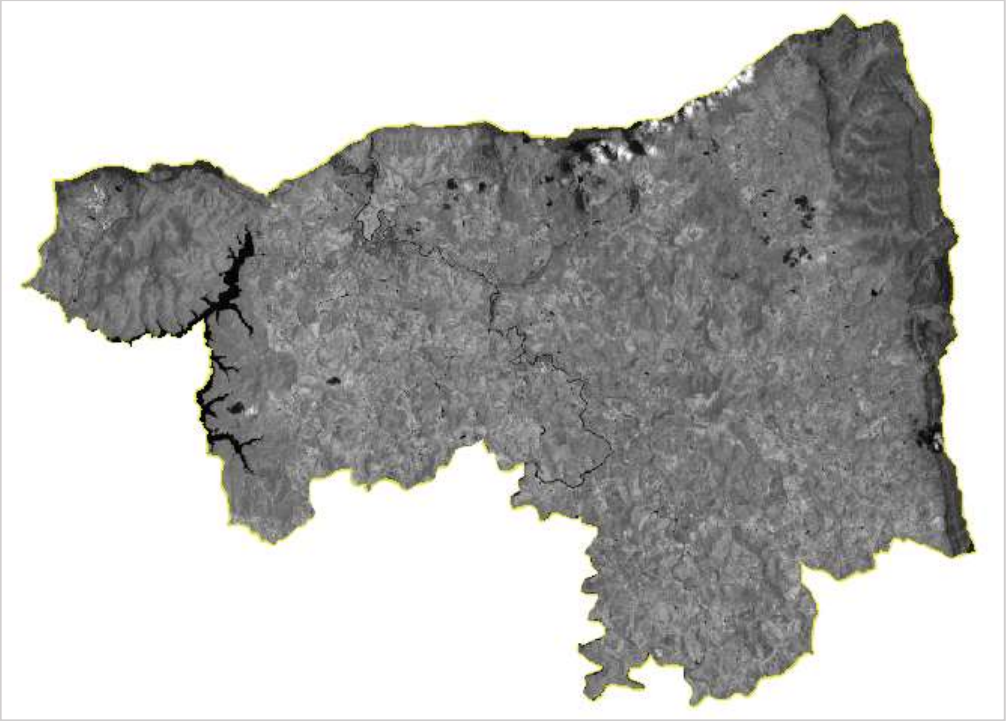
As imagens de satélites possuem cenas maiores do que a extensão territorial do Município. Ou seja, a imagem abrange o local de estudo e os municípios vizinhos (Figura 13). Diante disso, realizou-se o recorte dos arquivos *raster* de acordo com os limites do município como mostra a figura 14, por meio da ferramenta recortar *raster* pela camada de máscara.

Figura 13: Cena da imagem do satélite *Landsat* 8-9 da região de Brumadinho - MG



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 14: Imagem do satélite Landsat 8-9 de Brumadinho – MG recortada



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Depois da realização desses procedimentos, gerou-se o NDVI por meio da calculadora raster. Com os dados inseridos em formato *GeoTIFF*, não surge a necessidade de introduzir outros dados específicos. Assim, foi inserido a seguinte equação matemática (Equação 1.1):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \tag{1.1}$$

Onde: infravermelho próximo (*NIR*) e vermelho (*RED*) são os valores da refletância das bandas b5 e b4, do *Landsat* 8-9. Com isso, aplicou-se a seguinte fórmula na calculadora raster do *software* (Equação 1.2).

$$NDVI = \frac{(b5 - b4)}{(b5 + b4)} \tag{1.2}$$

A imagem gerada por meio do NDVI, possui cores em tons de cinza, essa imagem pode ser interpretada por meio do gráfico do histograma e dos resultados do cálculo do índice. No entanto, como o tipo de renderização é em banda simples cinza, a visualização do mapa temático não fornece informação detalhada das cores da vegetação, solo e água. Sendo assim,

foi aplicado a banda simples falsa cor para verificar a área vegetada, cursos d'água e locais com terra.

3.6. Elaboração dos mapas SAVI

Como a base cartográfica do mapa anterior concluída, usou-se as mesmas técnicas e os mesmos arquivos para elaboração dos mapas do índice SAVI. O índice de vegetação ajustado ao solo será calculado a partir dos valores do fluxo radiante no infravermelho próximo (*NIR*), do fluxo radiante na região vermelho do visível (*RED*), e de uma constante de ajuste L, responsável por realçar as variações de cores, uma vez que representa o fator de ajuste de correção do efeito do brilho do solo, o qual varia de acordo com a densidade de cobertura vegetal, conforme mostrado na equação 2.1 (Rosendo, 2005 citados por Coutinho *et al.*, 2016).

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)}\ (1 + L) \qquad (2.1)$$

Onde: infravermelho próximo (*NIR*) e vermelho (*RED*) são os valores da refletância das bandas b5 e b4, do *Landsat* 8-9 e o fator L corresponde a 0,5 para vegetação moderadamente densa. Com isso, aplicou-se a seguinte fórmula na calculadora raster do software (Equação 2.2):

$$SAVI = \frac{(b5 - b4)}{(b5 + b4 + 0{,}5)}\ (1 + 0{,}5) \qquad (2.2)$$

Com isso, gerou-se o mapa SAVI. Em seguida, aplicou-se o tipo de renderização de banda simples falsa cor.

3.7. Elaboração dos mapas RATIO

Com os mesmos procedimentos e técnicas dos itens 3.5 e 3.6 o índice de vegetação por razão simples foi calculado por meio da razão entre o vermelho visível (*RED*) e o infravermelho próximo (*NIR*) de acordo com a equação 3.1 (Pearson; Meller, 1972 citados por Coutinho *et al.*, 2016).

$$RATIO = \frac{(NIR)}{(RED)} \quad (3.1)$$

Onde: infravermelho próximo (*NIR*) e vermelho (*RED*) são os valores da refletância das bandas b5 e b4, do *Landsat* 8-9. Com isso, aplicou-se a seguinte fórmula na calculadora raster do software (Equação 3.2).

$$RATIO = \frac{(b5)}{(b4)} \quad (3.2)$$

Em seguida, gerou-se o índice RATIO e aplicou-se o tipo de renderização de banda simples falsa cor.

3.8. Elaboração dos mapas IAF

Usando os mesmos parâmetros anteriores, o índice de área foliar foi calculado por meio da equação 4.1 (Allen; Tasumi; Trezza, 2002 citados por Coutinho *et al.*, 2016).

$$IAF = \frac{ln((0{,}69 - SAVI)/0.59)}{(0.91)} \quad (4.1)$$

No qual, na equação do IAF foi inserido na calculadora raster o índice SAVI calculado.

Os procedimentos realizados para se obter os índices de vegetação da área afetada pelos rejeitos se repetiu da mesma forma. Porém, foi realizado apenas o recorte da área delimitada.

A seguir, por meio desses arquivos foi gerado os dados estatísticos de cada índice, obtidos pela ferramenta estatística da camada raster. Em seguida foi gerado um arquivo PDF com os valores da média, desvio padrão, máximos e mínimos.

3.9. Elaboração dos mapas das classes do solo dos índices de vegetação

Os mapas de reclassificação de áreas por classe de cobertura do solo foram realizados para cada índice de vegetação. Esse procedimento foi utilizado para se obter a área de regiões com vegetação, solo sem cobertura vegetal e corpos hídricos ou objetos inanimados. Por meio das ferramentas: Reclassificar por tabela; Converter raster para vetor (poligonizar); Calculadora

de campo; Estatísticas da camada vetorizada; Cálculo de cada classe por meio da ferramenta feições selecionadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados do NDVI

Segundo a análise do Centro Nacional de Monitoramento e Informações Ambientais (CENIMA) do IBAMA a área total atingida pelos rejeitos de minério foi aproximadamente 203,92 ha. Lucchetta (2020), calculou 298,55 ha por meio do vetor disponibilizado pelo IBGE. No presente trabalho, usou-se o mesmo vetor, mas o valor encontrado foi aproximadamente 302,25 ha por meio da ferramenta de vetorização avançada. Mas vale salientar que o vetor disponibilizado pelo IBGE não é formado por um polígono totalmente fechado. Ou seja, foi possível notar interrupções nas linhas da área durante o fechamento do polígono e devido a isso houve alteração no valor total da área. Em consequência disso, os valores divergiram dos demais artigos estudados. Porém, isso não foi um empecilho para a realização do presente trabalho, pois esse polígono delimitado pode ter valores diferentes devido aos satélites, *softwares* e métodos usados nos demais trabalhos.

Por meio desse polígono, calculou-se o NDVI que representa a saúde da vegetação baseado em como a vegetação reflete a luz. Sendo assim, quanto mais próximos de 1 os valores de NDVI maior sua densidade vegetal, quanto mais próximo de 0 menor sua densidade vegetal e os valores negativos estão relacionados com presença de água. Assim, os mapas representam as respostas da aplicação do NDVI na área atingida pelo rejeito das seguintes datas: 14/01/2019, 30/01/2019, 25/04/2021 e 10/06/2023, respectivamente (Figura 15).

Ao analisar a imagem do dia 14/01/2019, nota-se que as mudanças que ocorreram na vegetação interferiram no valor do NDVI dos mapas posteriores. Ou seja, o valor do NDVI de desse período teve 0,406 em seu máximo e 0,03 em seu mínimo, isso demonstra que a vegetação que se encontrava dentro do perímetro durante esse período estava moderadamente saudável.

Por outro lado, no período de 30/01/2019 houve decréscimo nos valores máximos e mínimos de NDVI, por meio dos valores obtidos do NDVI foi possível notar mudanças relacionadas com a vegetação, pois o valor máximo se deu em 0,183, isso demonstra perdas de biomassa vegetal ou redução das atividades biológicas das plantas em relação ao período anterior. Por outro lado, o valor de 0,027 demonstram áreas com pouca vegetação, sendo que esse valor está relacionado com as áreas atingidas pelos rejeitos.

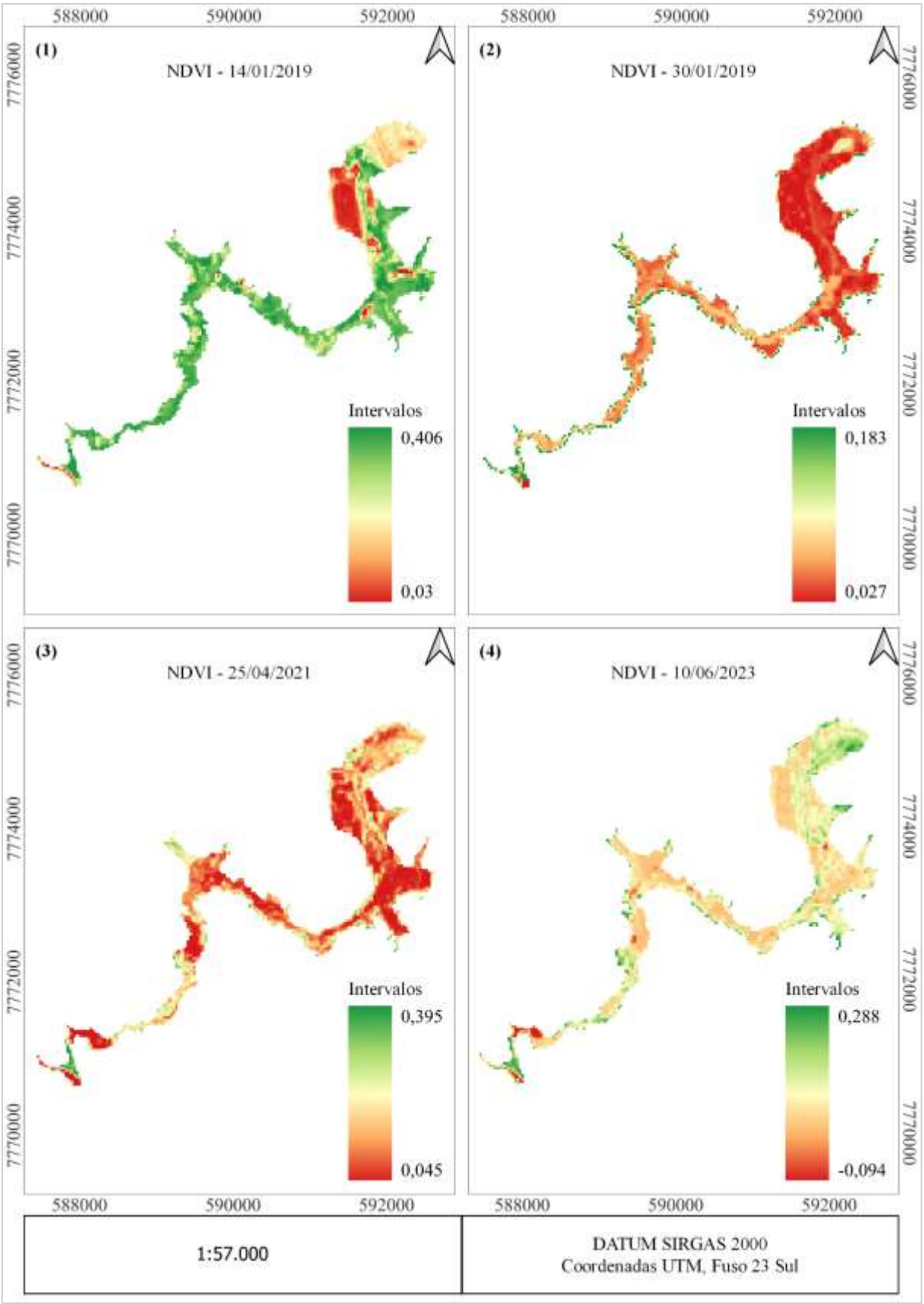
Na data de 25/04/2021 houve aumento significativo tanto no máximo ficando com 0,395 como no mínimo ficando com 0,045. Esse fator pode estar relacionado com a regeneração

natural da vegetação no decorrer do tempo, de acordo com o NDVI, a vegetação do local durante esse período indicava vegetação moderadamente saudável.

No NDVI de 10/06/2023, houve redução no valor máximo ficando com 0,288 e no valor mínimo ficando com -0,094, como o valor máximo se aproximou de 0 durante esse período, nota-se que a vegetação se encontrava com pouca atividade biológica, vegetação seca, rasteira ou doentia. Além disso, os valores negativos representaram regiões com presença significativa de água (Figura 15).

Em seguida, utilizou-se o histograma como ferramenta de distribuição estatística descritiva, analisando com que frequência os valores dos *pixels* se repetem em cada índice.

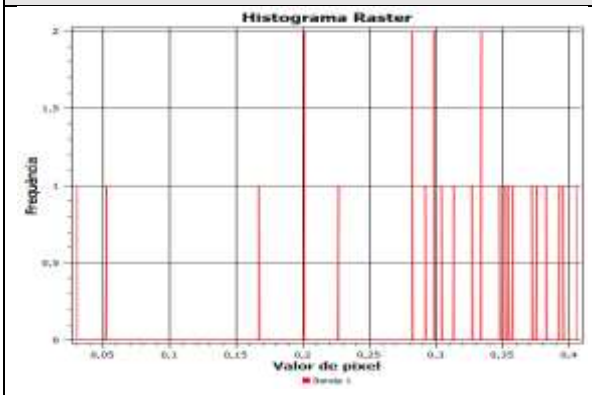
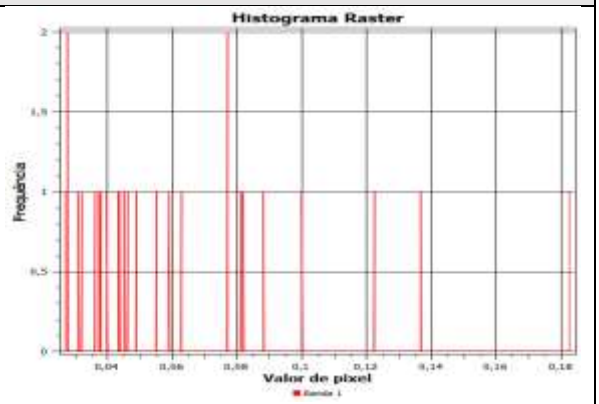
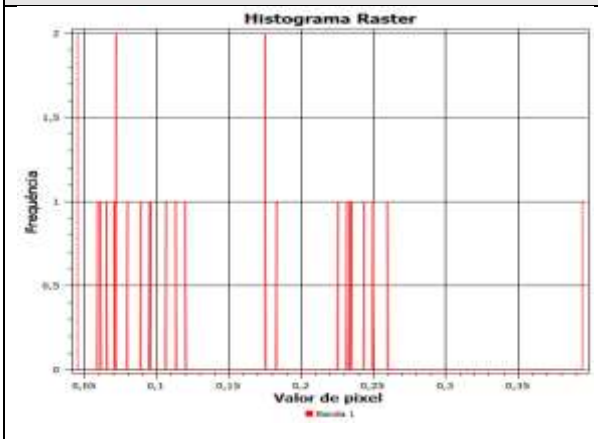
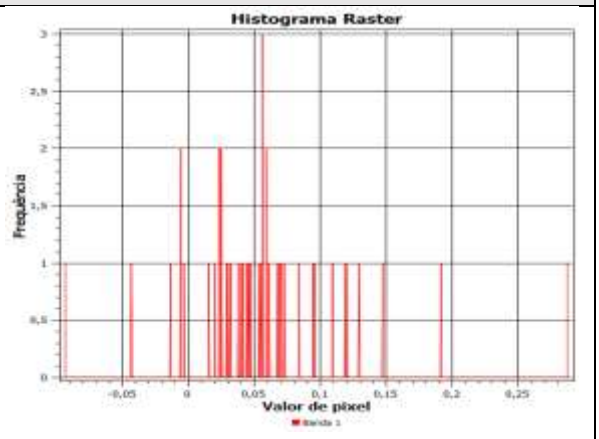
Figura 15: Série temporal de NDVI



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os histogramas a seguir demonstram a frequência com que os valores dos *pixels* se repetem, esses conjuntos de dados gráficos estão associados aos valores dos intervalos dos *pixels* dos mapas (Gráfico 1). De acordo com o histograma do NDVI 1 houve maior frequência de *pixels* nos intervalos [0,200; 0,334]. O histograma do NDVI 2 apresentou maior frequência de *pixels* nos intervalos [0,028; 0,077]. Em seguida, o histograma do NDVI 3 apresentou maior frequência nos intervalos [0,045; 0,176]. Por fim, o histograma do NDVI 4 apresentou maior frequência nos valores de *pixels* nos intervalos [0,056; 0,057]. A maioria desses valores se aproximou de 0, o que leva a entender que remete a presença de rejeitos no solo, exceto o NDVI:1.

Gráfico 1: Histogramas NDVI

1: Histograma NDVI – 14/01/2019	2: Histograma NDVI – 30/01/2019
	
3: Histograma NDVI – 25/04/2021	4: Histograma NDVI – 10/06/2023
	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com uso da ferramenta estatística da camada *raster*, foi possível encontrar os valores de média, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos índices de vegetação do presente estudo. Esses valores gerados para cada *raster* mostra variabilidade entre cada índice analisado.

A tabela 1 apresentou maior desvio padrão no NDVI 1, já o NDVI 2, 3 e 4 teve diferenças relativamente baixas. Algo similar ocorreu com o valor máximo, que por vez foi maior no NDVI 1, os 4 valores negativos tiveram leves diferenças. Vale salientar que ao gerar os dados estatísticos dos NDVI, os valores máximos e mínimos tiveram leves diferenças dos valores que estão nos mapas da figura 15, geralmente a ferramenta de estatística da camada raster tem mais precisão.

Tabela 1: Média, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos valores de NDVI

Índices	**Média**	**Desvio padrão**	**Mínimo**	**Máximo**
NDVI 1: 14/01/2019	0,285	0,113	- 0,116	0,479
NDVI 2: 30/01/2019	0,071	0,059	- 0,100	0,376
NDVI 3: 25/04/2021	0,127	0,082	- 0,111	0,426
NDVI 4: 10/06/2023	0,093	0,067	- 0,128	0,334

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.2. Resultados do SAVI

O SAVI é usado para suavizar o encontro da luminosidade do solo na vegetação usando o fator L na equação do NDVI, cujo objetivo é diminuir os efeitos do solo e umidade do solo para amenizar as interferências que o mesmo pode causar na vegetação analisada (EOS, 2022). Ainda, Oliveira *et al*. (2007) relata que o SAVI é considerado um índice híbrido por usar a razão de bandas com medidas de ajuste para diminuir o efeito da presença do solo em meio à vegetação.

O fator L de 0,5 utilizado para representar a vegetação intermediaria da área atingida pelos rejeitos mostrou um mapa semelhante ao NDVI, mas com valores diferentes entre os intervalos comparado ao NDVI. Ao analisar os resultados do mapa SAVI – 14/01/2019 da figura 16 nota-se aumento significativo no valor máximo e mínimo em relação ao mapa do NDVI, pois o presente índice apresentou 0,609 em seu máximo e 0,045 em seu mínimo. Diante disso, percebe-se que durante esse período os indicativos mostraram valores relativamente altos relacionados a vegetação, sendo considerado vegetação moderadamente saudável, faltando poucos valores para ser considerada vegetação muito saudável.

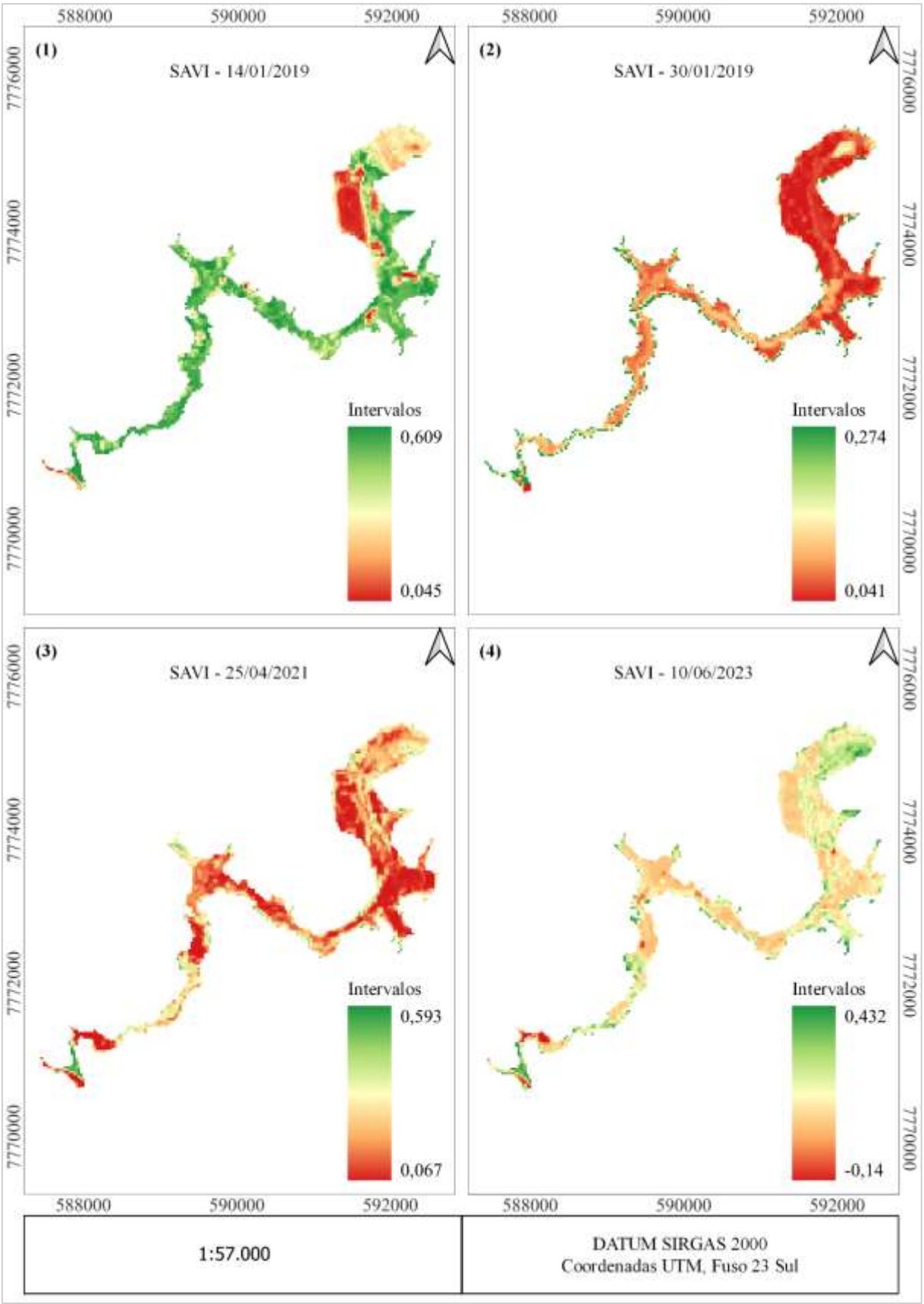
Os mapas posteriores ao acontecimento, como o mapa SAVI – 30/01/2019 da figura 16 teve redução significativa no valor máximo em relação ao mapa anterior. Ou seja, depois do rompimento da barragem, foi possível notar uma redução significativa, chegando a um valor

máximo de 0,274 o que indica vegetação morta, doentia ou com pouca atividade biológica. Em relação ao valore mínimo, não houve mudança significativa.

O mapa SAVI – 25/04/2021 da figura 16 apontou em seu máximo uma mudança positiva em relação ao período anterior. Ou seja, com o valor máximo de 0,593 e mínimo de 0,067 indicando vegetação moderadamente saudável nesse período, mas esses valores que retrata a vegetação são inferiores ao período analisado antes do rompimento da barragem. Diante disso, nota-se uma certa recuperação do bioma da região.

O mapa SAVI – 10/06/2023 demostra em sua grande maioria uma extensão territorial com solo exposto e com pouca cobertura vegetal. Por outro lado, o valor máximo indica vegetação moderadamente saudável. Porém, essa vegetação ocupa poucas áreas da região afetada em relação aos locais sem cobertura vegetal e o valore mínimo negativo de -0,14 está associado aos locais com presença d’água ou solo sem nenhuma vegetação, pois esse valor ainda se aproxima de 0, mesmo sendo negativo (Figura 16).

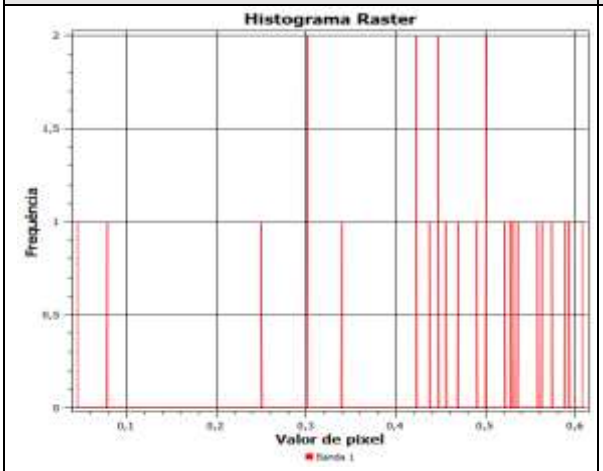
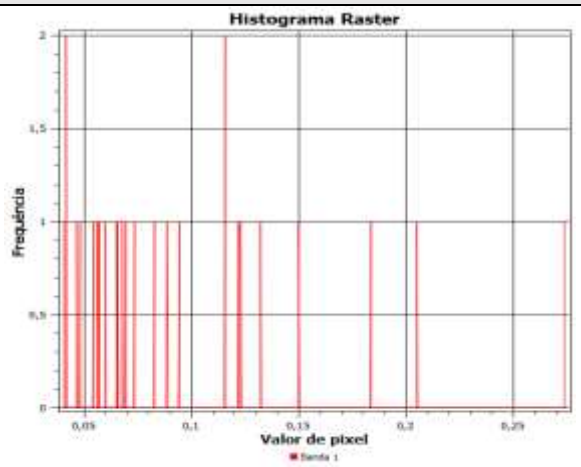
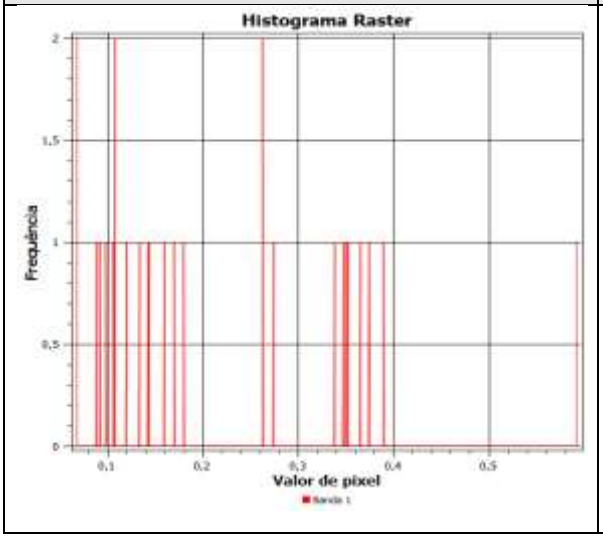
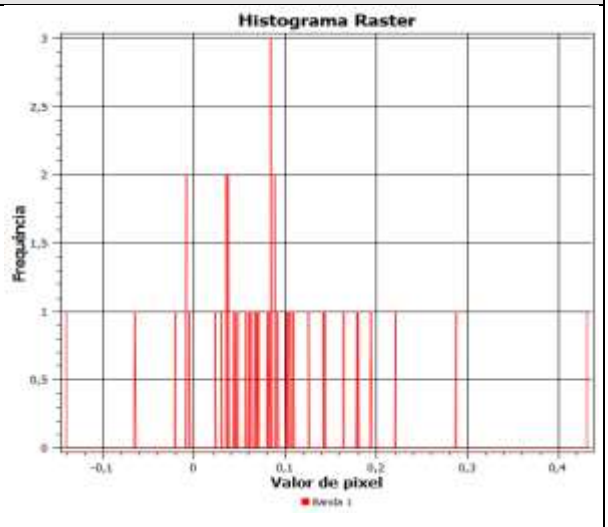
Figura 16: Série temporal de SAVI



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os histogramas SAVI demonstram a frequência com que os valores dos *pixels* se repetem (Gráfico 2). De acordo com o histograma do SAVI 1 houve maior frequência de *pixels* nos intervalos [0,300; 0,500]. O histograma do SAVI 2 apresentou maior frequência de *pixels* nos intervalos [0,041; 0,116]. Em seguida, o histograma do SAVI 3 apresentou maior frequência nos intervalos [0,068; 0,264]. Por fim, o histograma do NDVI 4 apresentou maior frequência nos valores de *pixels* nos intervalos [0,084; 0,086]. Os valores que se aproximaram de zero indicam presença de solo exposto, o SAVI (1) se distanciou dos demais valores.

Gráfico 2: Histogramas SAVI

1: Histograma SAVI – 14/01/2019	2: Histograma SAVI – 30/01/2019
	
3: Histograma SAVI – 25/04/2021	**4: Histograma SAVI – 10/06/2023**
	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao analisar a tabela 2, nota-se que os valores do desvio padrão, máximos e mínimos tiveram uma leve relação com os resultados da tabela 1. Ou seja, o desvio padrão e os valores

mínimos e máximos do SAVI 1 foram maiores do que os demais índices da tabela, mas os valores entre o NDVI e SAVI foram diferentes. Porém, foi possível notar comportamentos similares entre os índices de acordo os dados estatísticos, mesmo o SAVI demonstrando valores mais elevados. Além disso, vale salientar que os valores máximos e mínimos da tabela 2 são levemente diferentes dos resultados dos mapas da figura 16 devido a maior precisão da ferramenta de estatística da camada raster.

Tabela 2: Média, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos valores de SAVI

Índices	**Média**	**Desvio padrão**	**Mínimo**	**Máximo**
SAVI 1: 14/01/2019	0,427	0,169	- 0,175	0,719
SAVI 2: 30/01/2019	0,106	0,089	- 0,150	0,564
SAVI 3: 25/04/2021	0,190	0,123	- 0,167	0,639
SAVI 4: 10/06/2023	0,140	0,101	- 0, 192	0,501

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3. Resultados do RATIO

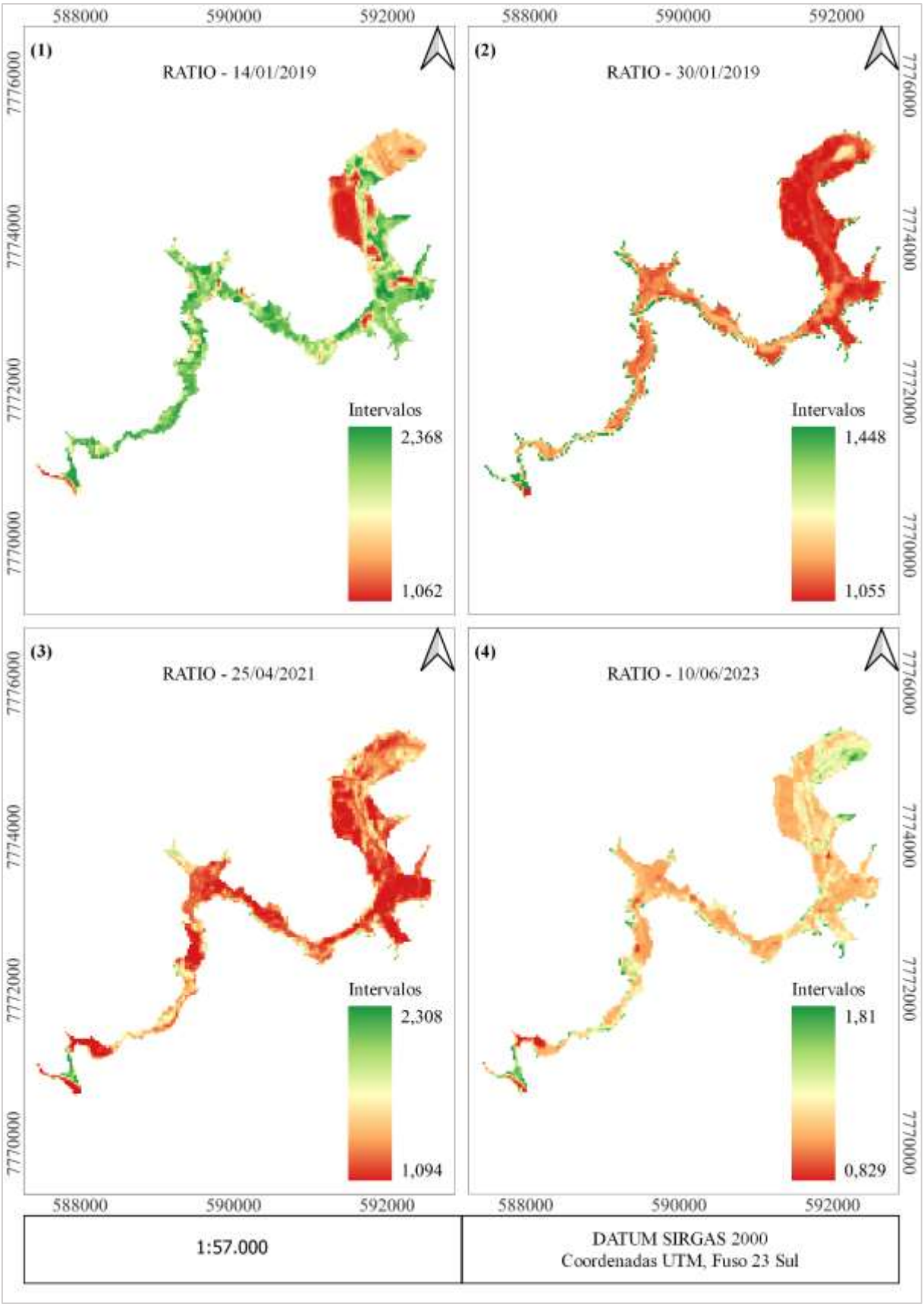
Ao comparar os índices RATIO com os demais, nota-se uma leve semelhança em relação aos valores máximos de acordo com cada período. Ou seja, os valores são diferentes, mas a variação entre cada período tem ligação com os índices anteriores. No período anterior ao desastre da barragem, o NDVI e SAVI mostrou maior vigor da vegetação, o mesmo ocorreu com o índice RATIO, que por sua vez teve o valor elevado em relação aos demais períodos posteriores ao acontecimento.

No mapa 14/01/2019, o valor máximo de 2,368 representa vegetação de alta atividade biológica e no mínimo de 1,062 representam locais com presença de água ou solo exposto. No mapa 30/01/2019, nota-se que houve diminuição do valor máximo que corresponde a vegetação e o valor mínimo diminuiu tendendo a se aproximar de zero, o que indica locais afetados pelos rejeitos de minério de ferro (Figura 17).

No mapa 25/04/2021, houve um aumento significativo em seu máximo, correspondendo a uma leve recuperação da vegetação na área degradada pelos rejeitos, já o valor mínimo teve um aumento levemente moderado o que indica locais sem presença de vegetação ou com cicatrizes no solo causada pelos rejeitos (Figura 17).

Ao analisar os intervalos do mapa 10/06/2023 minuciosamente, percebe-se que o valor máximo foi menor em relação aos mapas de 14/01/2019 e 25/04/2021 (Figura 17).

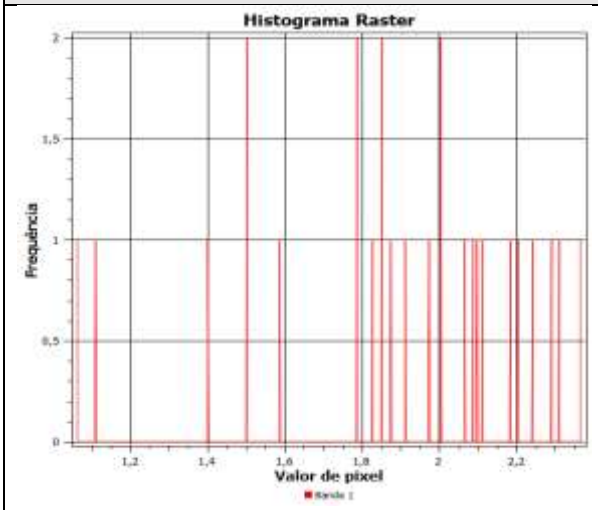
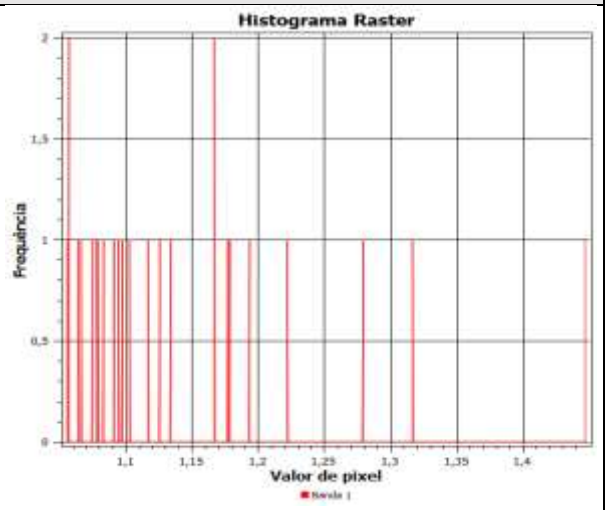
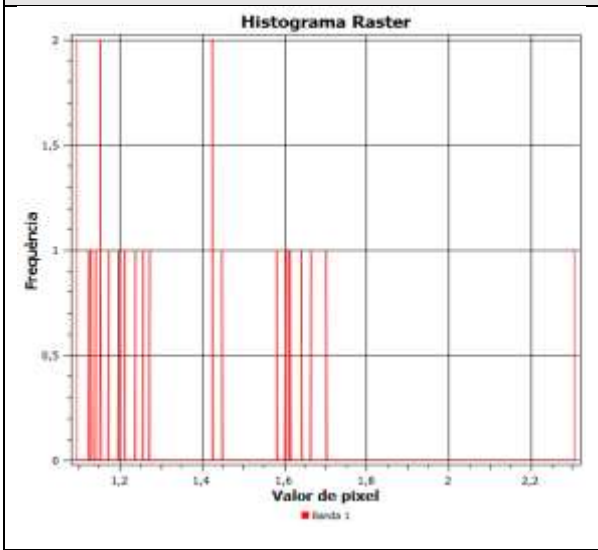
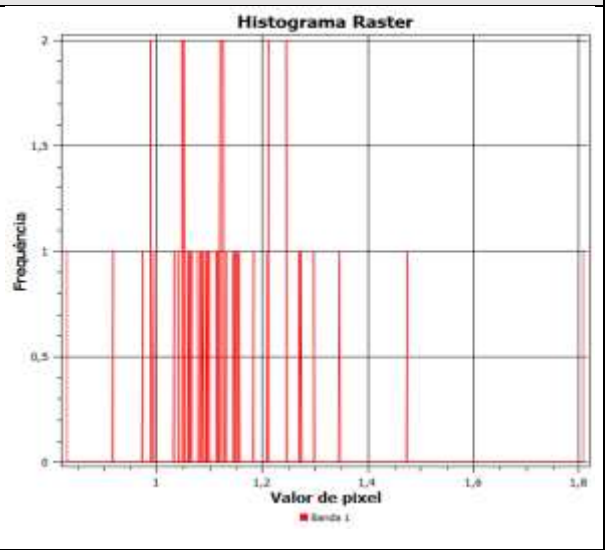
Figura 17: Série temporal do RATIO



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De acordo com o histograma do RATIO 1 houve maior frequência de *pixels* nos intervalos de 1,5 a 2. O histograma do RATIO 2 apresentou maior frequência de *pixels* no intervalo de 1,056 a 1,168. Em seguida, o histograma do RATIO 3 apresentou maior frequência no intervalo de 1,096 a 1,427. Por fim, o histograma do RATIO 4 apresentou maior frequência nos valores de *pixels* no intervalo de 0,973 a 1,247. O RATIO 1 apresentou maiores valores entre os demais (Gráfico 3).

Gráfico 3: Histogramas RATIO

1: Histograma RATIO – 14/01/2019	2: Histograma RATIO – 30/01/2019
	
3: Histograma RATIO – 25/04/2021	4: Histograma RATIO – 10/06/2023
	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os dados estatísticos do RATIO apontados na tabela 3, demonstrou valores mínimos positivos, o maior valor de desvio padrão e máximo ocorreram no RATIO 1. Por outro lado,

assim como nas tabelas 1 e 2, o menor valor de máximo ocorreu no RATIO 4, indicando período com pouca cobertura vegetal.

Tabela 3: Média, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos RATIO

Índices	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
RATIO 1: 14/01/2019	1,861	0,402	0,790	2,845
RATIO 2: 30/01/2019	1,163	0,163	0,818	2,205
RATIO 3: 25/04/2021	1,312	0,234	0,799	2,484
RATIO 4: 10/06/2023	1,219	0,176	0,772	2,003

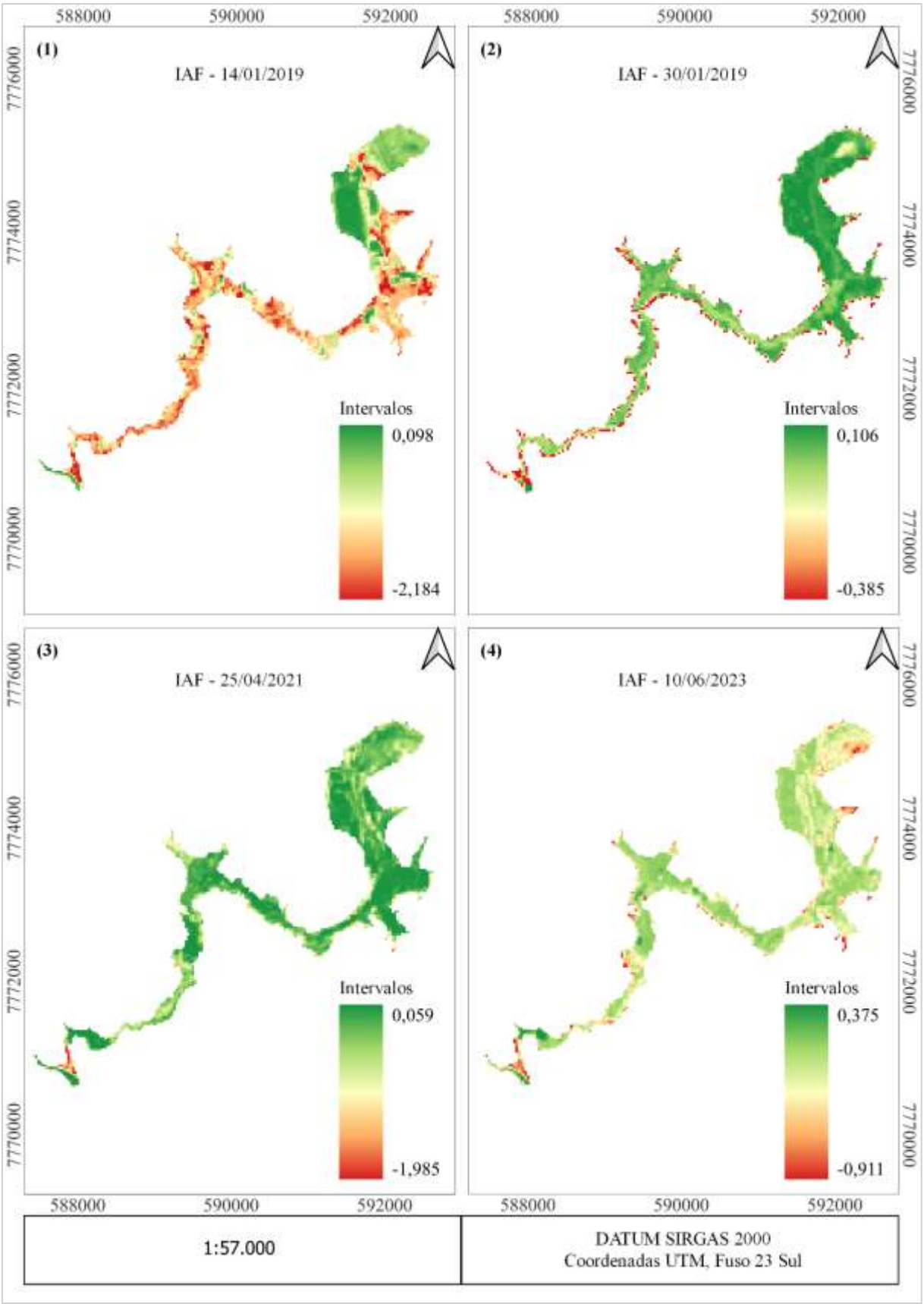
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.4. Resultados do IAF

O IAF de 14/01/2019 apresentou valor máximo de 0,098 e mínimo de -2,184, o que indica pouca ocupação de área da folhagem em relação ao território e os valores negativos indicam locais com presença de água. O IAF de 30/01/2019 apresentou valor máximo de 0,106 e mínimo de -0,385, indicando pouca ocupação de área foliar em relação ao território e os valores negativos indicam locais com presença de água (Figura 18).

O IAF de 25/04/2021 apresentou valor máximo de 0,059 e mínimo de -1,985 indicando diminuição na saúde da vegetação, o valor mínimo representaram locais com presença de água. O IAF de 10/06/2023 apresentou maior valor máximo em relação aos períodos anteriores (Figura 18). Diante dos resultados obtidos por meio do IAF, nota-se que houve crescimento da vegetação após o rompimento da barragem, como representado no mapa 30/01/2019 da figura 18. Porém, era de se esperar diminuição na qualidade da vegetação, pois essa data compreende o período posterior ao rompimento da barragem. Com isso, o IAF apresentou comportamento e resultados diferentes do NDVI, SAVI e RATIO.

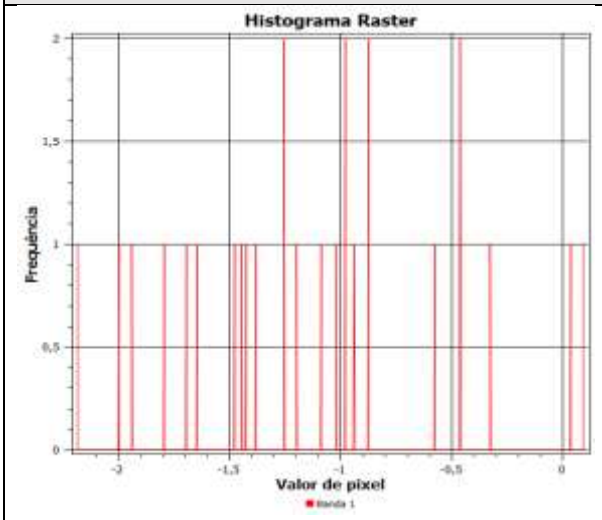
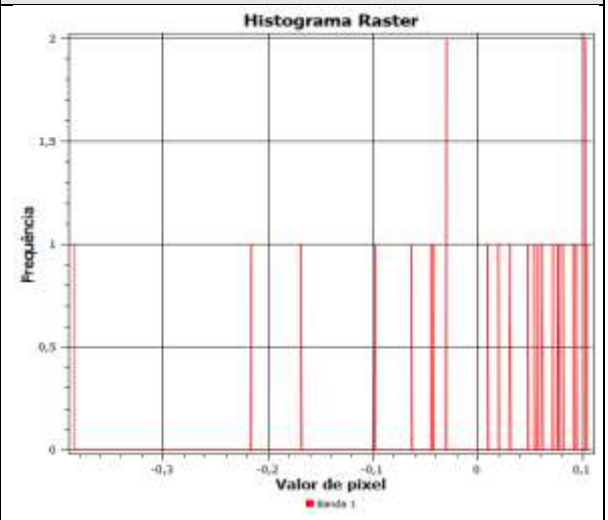
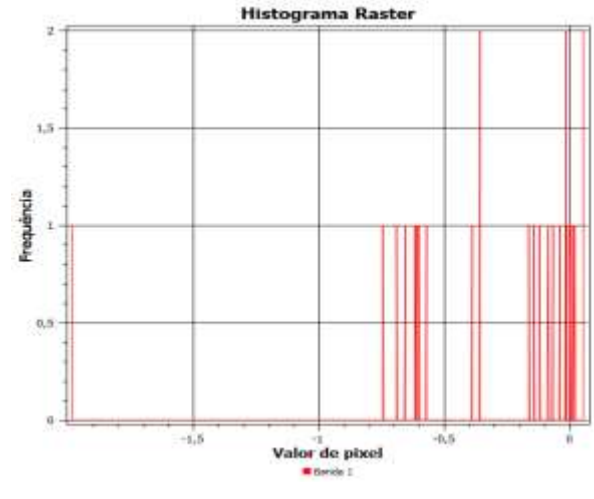
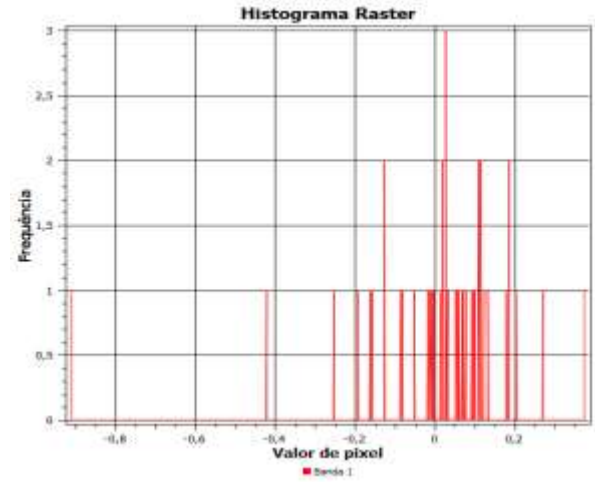
Figura 18: Série temporal de IAF



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O histograma IAF 1 apresentou maior frequência de *pixels* no intervalo [-1,255; -0,457]. Em seguida, o IAF 2 apresentou maior frequência de *pixels* no intervalo [-0,03; 0,104]. O IAF 3 apresentou maior frequência de *pixels* no intervalo [-0,359; 0,055]. Por fim, o IAF 4 apresentou maior frequência de *pixels* no intervalo de [-0,128; 0,185] (Gráfico 4).

Gráfico 4: Histogramas IAF

1: Histograma IAF – 14/01/2019	2: Histograma IAF – 30/01/2019
	
3: Histograma IAF – 25/04/2021	**4: Histograma IAF – 10/06/2023**
	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os valores estatísticos do IAF da tabela 4, demonstraram valores diferentes do NDVI, SAVI e RATIO. Ou seja, o maior valor de máximo ocorreu no IAF 4, enquanto o menor valor de máximo ocorreu no IAF 2 e o maior desvio padrão ocorreu no IAF 1. Esses dados estatísticos mostram discordância do desvio padrão do IAF 1 em relação aos posteriores e o valor máximo do IAF 4 foram diferentes dos valores do NDVI 4, SAVI 4 e RATIO 4 das tabelas 1, 2 e 3,

respectivamente. E isso deduz que houve maior vegetação no mês de junho de 2023 do que no período de janeiro de 2019 antes do rompimento da barragem, o que não é verdade, pois de acordo com os resultados do NDVI, SAVI e IAF foi possível notar maior qualidade da vegetação antes do rompimento da barragem.

Os métodos usados para gerar os mapas de índices de vegetação e os resultados que estão presentes nas tabelas 1,2,3 e 4 foram os mesmos. Porém, os valores de máximos e mínimos que estão nas tabelas citadas tiveram leves diferenças dos valores máximos e mínimos dos mapas das figuras 15, 16, 17 e 18, geralmente isso ocorre por causa da precisão da ferramenta de estatísticas da camada raster.

Ao comparar os valores máximos e mínimos da tabela 4 com os valores presentes nos mapas da figura 18, percebe-se diferenças significativas. O possível motivo para esses resultados pode estar relacionado com a aplicação do índice em áreas que foram cobertas por rejeitos de minério de ferro.

Tabela 4: Média, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos IAF

Índices	**Média**	**Desvio padrão**	**Mínimo**	**Máximo**
IAF 1: 14/01/2019	- 1,111	0,700	-3,668	0,420
IAF 3: 30/01/2019	- 0,030	0,217	-1,698	0,388
IAF 3: 25/04/2021	- 0,224	0,325	- 2,690	0,410
IAF 4: 10/06/2023	- 0,098	0,226	- 1,251	0,443

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.5. Mapas e cálculo de áreas por classes de cobertura do solo do NDVI

A figura 19 mostra as classes de uso de solo da série temporal de NDVI e a área ocupada por cada classe, o mapa foi gerado contendo 5 classes de cobertura do solo, essas coberturas mostram as regiões que possuem vegetação, solo com cobertura vegetal, solo exposto e locais com corpos hídricos, o que pode ser interpretado também com lugares atingidos pelos rejeitos.

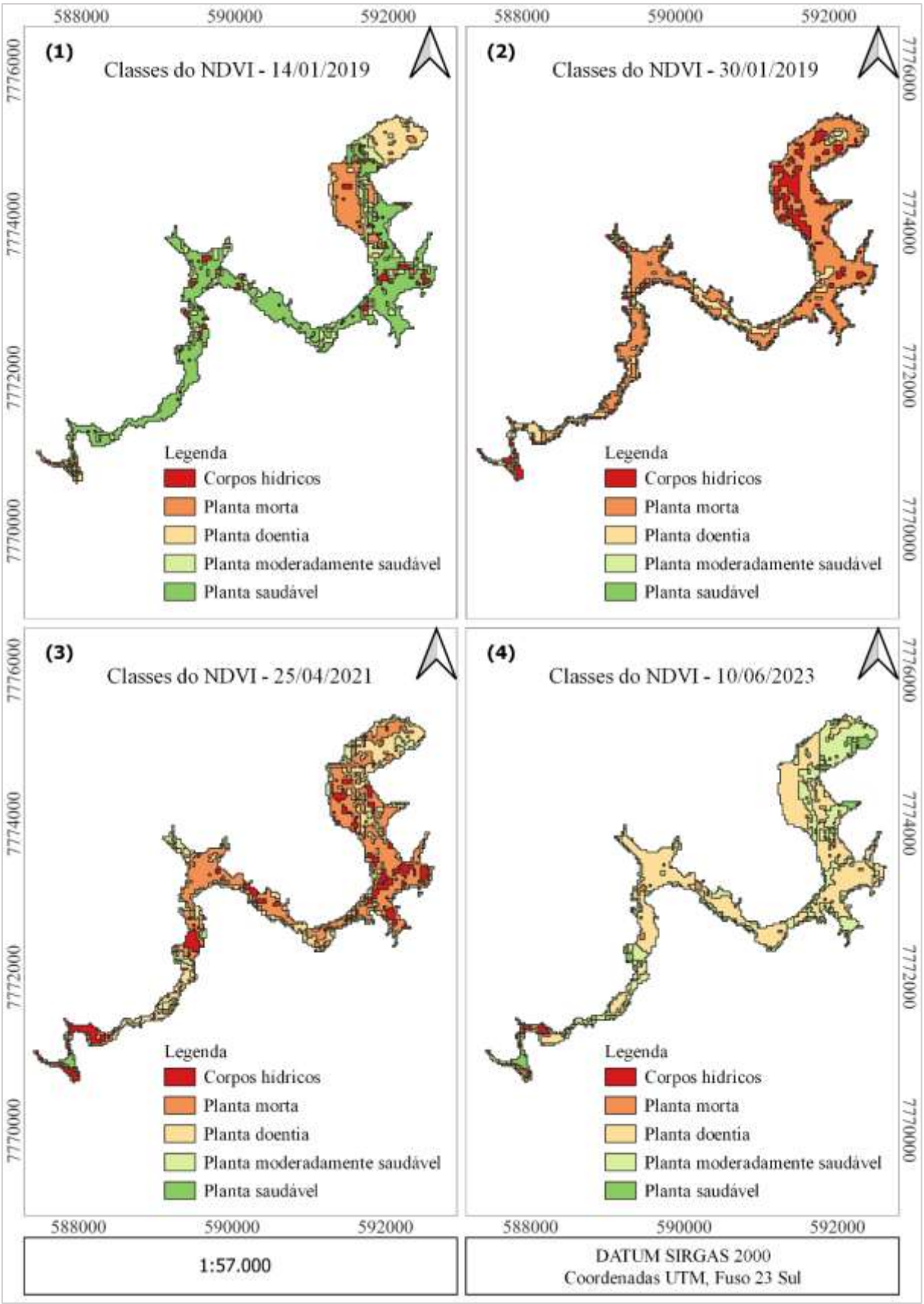
Com isso, se obteve os cálculos de cada área em hectares conforme a tabela 5, que indica que no período de 14/01/2019 a região se encontrava com 53,31% com plantas consideradas saudáveis, o que corresponde a uma área de 160,93 ha e cerca de 15,36% com plantas consideradas moderadamente saudáveis, o que caracteriza cerca de 46,38 ha, isso mostra que durante esse período havia maior quantidade de vegetação em relação as demais classes de solo.

No período de 30/01/2019, após o rompimento da barragem, tanto na figura 19 como na tabela 6, nota-se uma grande redução nas áreas com vegetação de modo geral. Ou seja, em regiões que possuem plantas saudáveis o percentual foi de 3,67, correspondendo a área de 11,08 ha, por outro lado, houve aumento significativo nas regiões com plantas mortas, ficando com 55,97% em relação a área total, esse fenômeno ocorreu devido a ocupação de rejeito de minério de ferro na região afetada.

Em 25/04/2021, as regiões com plantas mortas e plantas doentias ocuparam 136,44 e 83,21 ha o que corresponde a 45,20% e 27,56%, respectivamente. Enquanto às áreas com plantas moderadamente saudáveis e plantas saudáveis ocuparam 37,10 e 6,21 ha correspondendo a 12,29% e 2,05%, respectivamente. Sendo assim, por meio desses dados é possível perceber que após 2 anos e 3 meses não houve recuperação notória da área atingida (Tabela 7).

Na tabela 8, no período de 10/06/2023, as regiões ocupadas por plantas doentias ficaram com 169,84 ha o que corresponde a 56,26% da área total e nas regiões ocupadas por plantas moderadamente saudáveis ficaram com 94,29 ha o que indica 31,24% da área total. Com isso, nota-se que a classificação do solo do mapa de NDVI e cálculo de áreas de ocupação do solo mostraram as variações de cada classe de solo no decorrer de 4 anos após o rompimento da barragem.

Figura 19: Série temporal de classes de cobertura do solo do NDVI



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 5: Área das classes do solo do NDVI – 14/01/2019

Classes de solo do NDVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	15,39	5,10
Planta morta	34,58	11,46
Planta doentia	44,58	14,77
Planta moderadamente saudável	46,38	15,36
Planta saudável	160,93	53,31
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 6: Área das classes do solo do NDVI – 30/01/2019

Classes de solo do NDVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	51,96	17,21
Planta morta	168,94	55,97
Planta doentia	50,07	16,59
Planta moderadamente saudável	19,81	6,56
Planta saudável	11,08	3,67
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 7: Área das classes do solo do NDVI – 25/04/2021

Classes de solo do NDVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	38,90	12,89
Planta morta	136,44	45,20
Planta doentia	83,21	27,56
Planta moderadamente saudável	37,1	12,29
Planta saudável	6,21	2,06
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 8: Área das classes do solo do NDVI – 10/06/2023

Classes de solo do NDVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	3,33	1,10
Planta morta	6,57	2,18
Planta doentia	169,84	56,26

Planta moderadamente saudável	94,29	31,24
Planta saudável	27,83	9,22
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.6. Mapas e cálculo de áreas por classes de cobertura do solo do SAVI

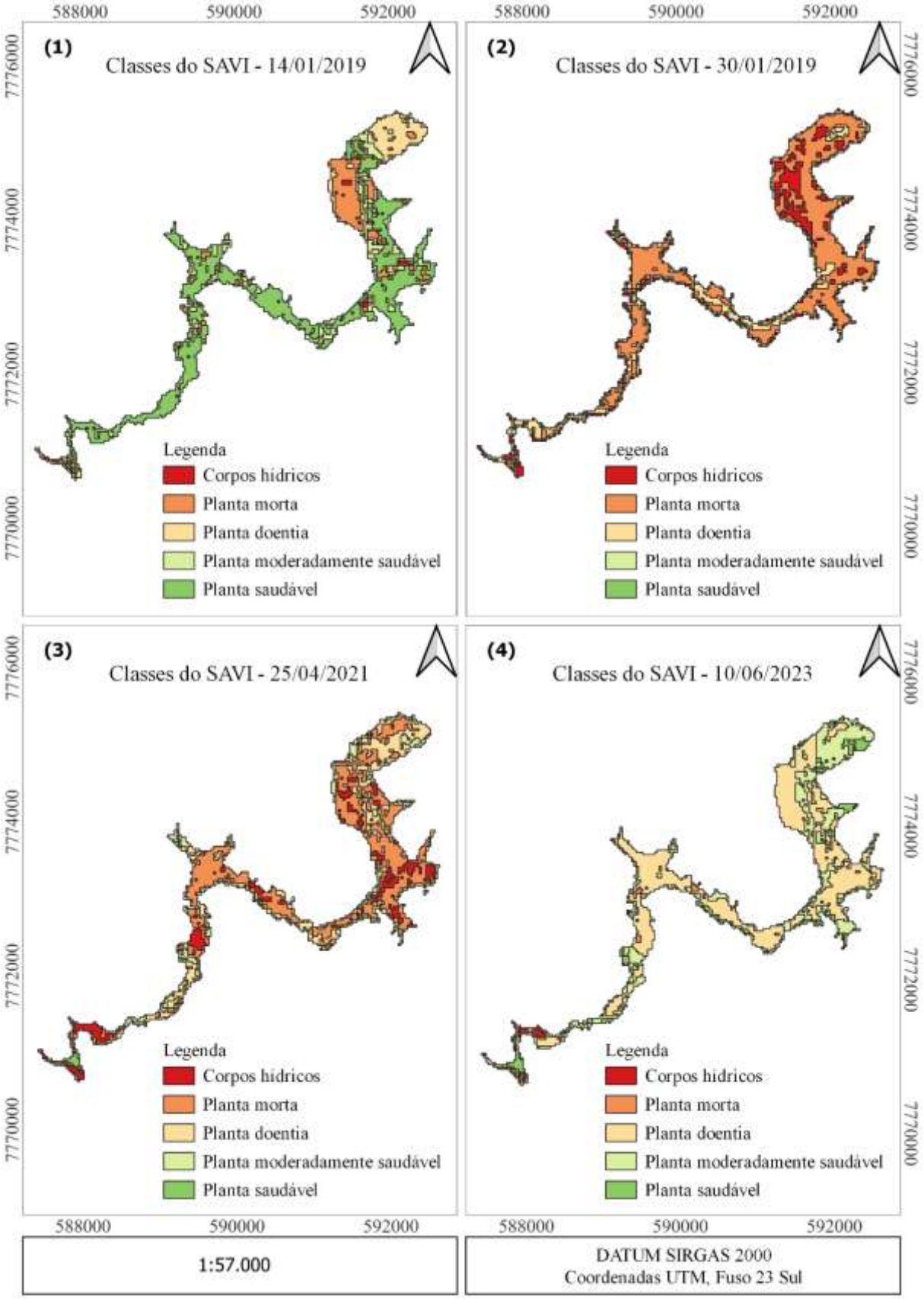
A representação da série temporal de classes de solo do SAVI, representado na figura 20 se assemelha ao NDVI, porém os resultados da tabela 9 do SAVI foram levemente diferentes dos resultados da tabela 5 do NDVI. Tanto no NDVI quanto no SAVI, os resultados das áreas ocupadas por plantas saudáveis foram os mesmos e os demais resultados foram levemente semelhantes, com exceção dos locais com presença de corpos hídricos e regiões com plantas mortas.

Em 30/01/2019 na tabela 10, o SAVI registrou 169,57 ha de solo ocupados por plantas mortas e 52,41 ha de áreas com corpos hídricos, esses dados foram responsáveis por ocupar cerca de 73,53% da área total do estudo durante esse período. Por outro lado, houve redução significativa em todas as classes de solo com presença de vegetação.

Os valores do SAVI apontados em 25/04/2021 na tabela 11, permitiram destacar como maior ocupação territorial o uso do solo com presença de plantas mortas, ficando com 138,14 ha e em seguida o uso do solo coberto por plantas doentias com 83,12 ha de ocupação da área. Ou seja, essas áreas foram responsáveis por ocupar cerca de 73,30% da área total durante esse período. Com isso, é possível notar que durante esse período ainda havia cicatrizes causadas pelos rejeitos.

Em 10/06/2023 na tabela 12, a classe de solo ocupada por plantas doentias foi responsável por preencher 56,26% do território total. Em seguida, as áreas com presença de plantas moderadamente saudáveis ficaram com 31,24 % do território.

Figura 20: Série temporal de classes de cobertura do solo do SAVI



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 9: Área das classes do solo do SAVI - 14/01/2019

Classes de solo do SAVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	3,24	1,07
Planta morta	46,74	15,48
Planta doentia	44,58	14,77
Planta moderadamente saudável	46,38	15,37
Planta saudável	160,92	53,31
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 10: Área das classes de solo do SAVI - 30/01/2019

Classes de solo do SAVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	52,41	17,36
Planta morta	169,57	56,17
Planta doentia	49,08	16,26
Planta moderadamente saudável	19,81	6,57
Planta saudável	10,99	3,64
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 11: Área das classes de solo do SAVI - 25/04/2021

Classes de solo do SAVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	37,28	12,35
Planta morta	138,14	45,76
Planta doentia	83,12	27,54
Planta moderadamente saudável	37,1	12,29
Planta saudável	6,22	2,06
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 12: Área das classes de solo do SAVI – 10/06/2023

Classes de solo do SAVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	3,33	1,1
Planta morta	6,66	2,21
Planta doentia	169,84	56,26

Planta moderadamente saudável	94,29	31,24
Planta saudável	27,74	9,19
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.7. Mapas e cálculo de áreas por classes de cobertura do solo do RATIO

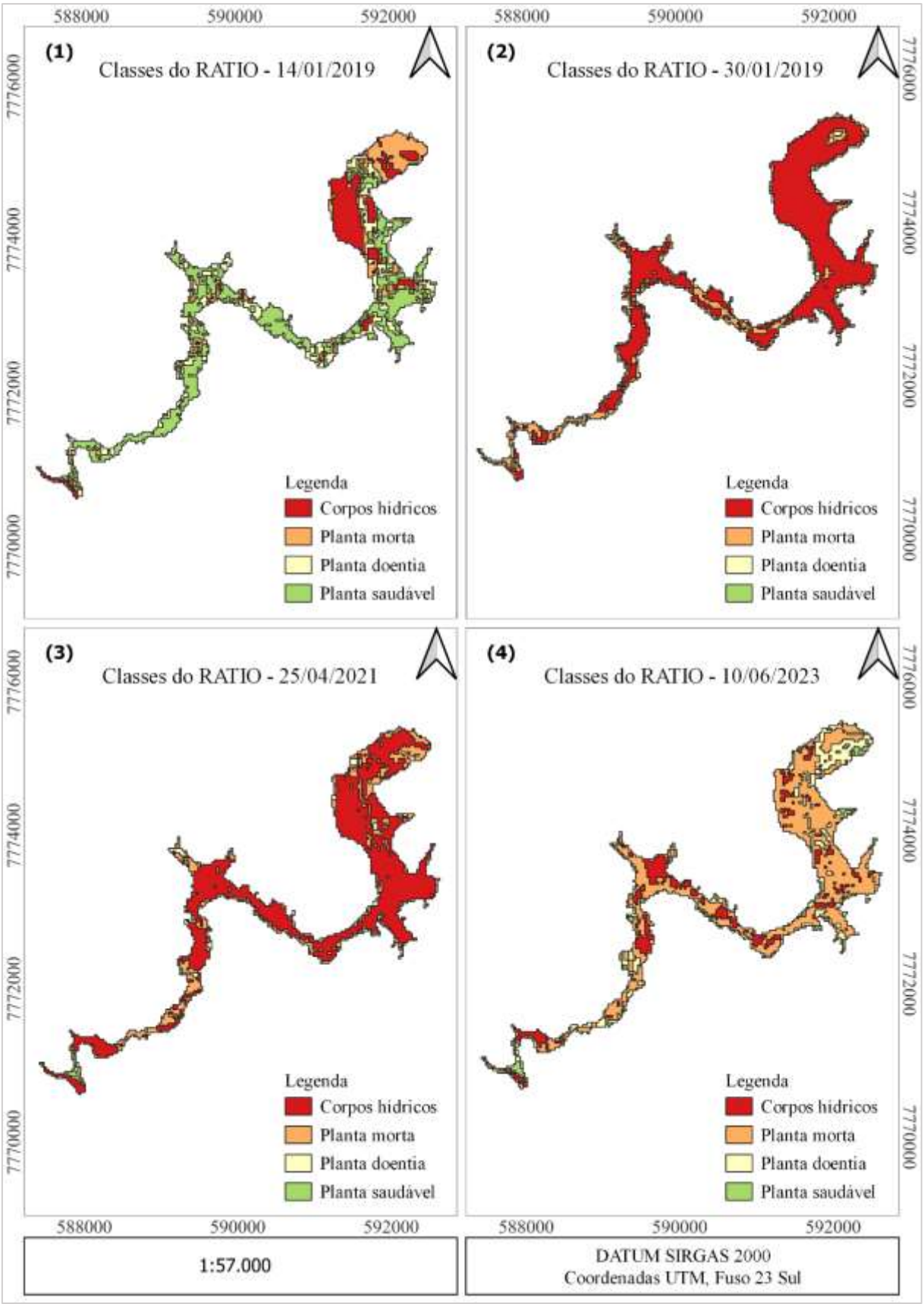
Os mesmos métodos utilizados para gerar os mapas de classificação do NDVI e SAVI foi aplicado ao RATIO. Porém, no RATIO gerou-se 4 classes de cobertura do solo, mas mesmo assim, foi possível distinguir as classes de solo que possuem vegetação e as classes de solo exposto (Figura 21).

Por meio da tabela 13, cerca de 125,54 ha foi ocupado por plantas saudáveis e 67,90 ha foi ocupado por plantas doentias, essas áreas foram responsáveis por ocupar maior extensão territorial da região delimitada. Apesar da classificação do solo do RATIO mostrar valores diferentes do NDVI e SAVI, a ocupação territorial de cada classe teve leve semelhança em questão de proporção de área ocupada por cada classe.

Na tabela 14, cerca de 215,31 ha foi ocupado por corpos hídricos ou rejeitos de minério, isso representa 71,33% do total da área, mas vale salientar que não é possível afirmar que essa área toda foi ocupada somente por água e rejeito. Em seguida 60,16 ha foi ocupada por plantas mortas, correspondendo a 19,93%. Ou seja, ambas as classes que não representam vegetação de certo modo, foi responsável por ocupar aproximadamente 91,26% da extensão territorial da área delimitada.

Na tabela 15, o RATIO não mostrou mudanças significativas em relação ao período anterior, pois teve leves alterações. A seguir, na tabela 16 a classe de solo coberta por plantas mortas ficou com 183,17 ha e a classe de solo com vegetação doentia ficou com 55,38 ha, representando aumento significativo de vegetação em comparação aos períodos de 30/01/2019 e 25/04/2021.

Figura 21: Série temporal de classes de cobertura do solo do RATIO



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 13: Área das classes de solo do RATIO – 14/01/2019

Classes de solo do RATIO	Área (ha)	%
Corpos hídricos	50,34	16,68
Planta morta	58,08	19,24
Planta doentia	67,90	22,49
Planta saudável	125,54	41,59
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 14: Área das classes de solo do RATIO – 30/01/2019

Classes de solo do RATIO	Área (ha)	%
Corpos hídricos	215,31	71,33
Planta morta	60,16	19,93
Planta doentia	16,57	5,49
Planta saudável	9,82	3,25
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 15: Área das classes de solo do RATIO – 25/04/2021

Classes de solo do RATIO	Área (ha)	%
Corpos hídricos	213,25	70,64
Planta morta	67,36	22,32
Planta doentia	17,65	5,85
Planta saudável	3,60	1,19
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 16: Área das classes de solo do RATIO – 10/06/2023

Classes de solo do RATIO	Área (ha)	%
Corpos hídricos	48,72	16,14
Planta morta	183,17	60,68
Planta doentia	55,38	18,35
Planta saudável	14,59	4,83
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

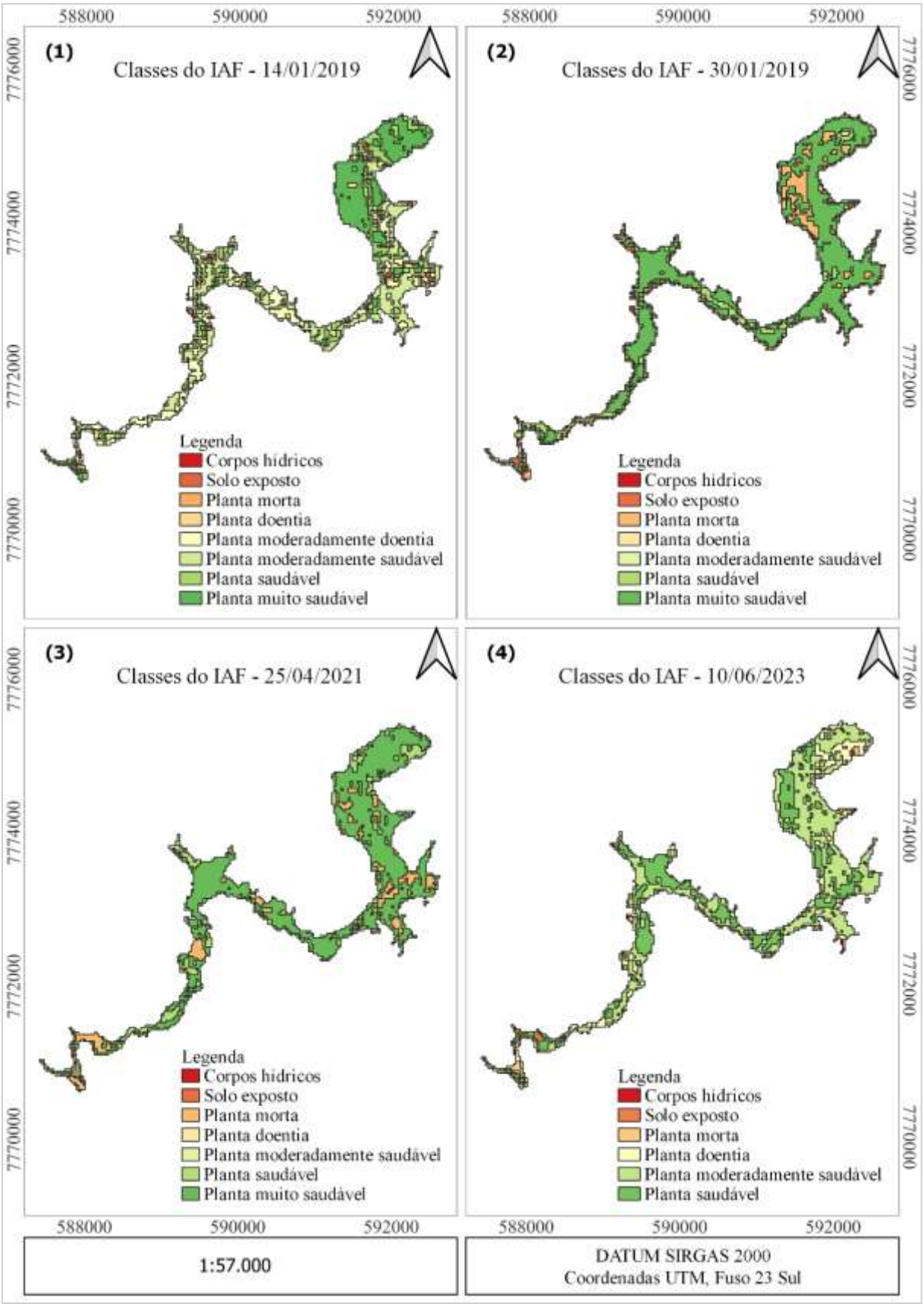
4.8. Mapas e cálculo de áreas por classes de cobertura do solo do IAF

O IAF gerou mais classes que o NDVI, SAVI e RATIO, provavelmente ocorreu isso porque os intervalos gerados pelo IAF foram maiores que os intervalos dos demais índices presentes no trabalho, mas os procedimentos aplicados foram os mesmos em todos as classificações de solo dos índices do presente trabalho. Na figura 22 o IAF teve em média 7 classes de solo por mapa, a interpretação dos mapas e das tabelas se resume em área ocupada por vegetação e solo exposto para melhor compreensão dos dados.

Na tabela 17, nota-se que os valores das áreas de vegetação e solo expostos foram diferentes dos valores do NDVI, SAVI e RATIO. Ou seja, a soma das áreas ocupadas por vegetação corresponde a 221, 22 ha do total da área, isso indica que essas áreas ocupam cerca de 73,28% da área total.

Após o rompimento da barragem, os dados da tabela 18 indicaram aumento na classe de solo ocupada por vegetação muito saudável, esse dado contrariou os resultados do NDVI, SAVI e RATIO, que por vez teve diminuição das áreas verdes após a região ser atingida pelos rejeitos. O mesmo processo ocorreu na tabela 19, que relata maior extensão territorial de áreas com vegetação. Por fim, na tabela 20 a área de vegetação moderadamente saudável ocupou maior extensão territorial.

Figura 22: Série temporal de classes de cobertura do solo do IAF



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 17: Área das classes de solo do IAF – 14/01/2019

Classes de solo do SAVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	0,27	0,09
Solo exposto	4,34	1,43
Planta morta	7,39	2,45
Planta doentia	3,26	1,07
Planta moderadamente doentia	65,38	21,68
Planta moderadamente saudável	97,70	32,36
Planta saudável	52,42	17,37
Planta muito saudável	71,10	23,55
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 18: Área das classes de solo do IAF – 30/01/2019

Classes de solo do SAVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	0,18	0,06
Solo exposto	15,13	5,01
Planta morta	35,66	11,81
Planta doentia	9,36	3,11
Planta moderadamente saudável	15,76	5,22
Planta saudável	41,61	13,78
Planta muito saudável	184,16	61,01
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 19: Área das classes de solo do IAF – 25/04/2021

Classes de solo do SAVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	0,09	0,03
Solo exposto	0,45	0,15
Planta morta	38,01	12,59
Planta doentia	1,53	0,51
Planta moderadamente saudável	7,02	2,33
Planta saudável	50,07	16,58
Planta muito saudável	204,69	67,81
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 20: Área das classes de solo do IAF – 10/06/2023

Classes de solo do SAVI	**Área (ha)**	**%**
Corpos hídricos	1,35	0,45
Solo exposto	1,98	0,66
Planta morta	12,16	4,03
Planta doentia	42,78	14,17
Planta moderadamente saudável	159,84	52,95
Planta saudável	83,75	27,74
Total	**301,86**	**100**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho mostrou que os índices de vegetação e a reclassificação de classe do solo mostraram-se adequados à avaliação da área atingida pelos rejeitos de minério de ferro em Brumadinho-MG. Além disso, foi possível notar as diferenças ambientais que aconteceram após o rompimento da barragem, causando perdas de biomassa vegetal por meio dos índices de vegetação, tabelas e classificação do solo.

O NDVI e SAVI apresentaram certa similaridade nos dados qualitativos e quantitativos, tanto na análise dos índices quanto na classificação e cálculo de área das classes do solo. No entanto, vale salientar que o SAVI revelou valores mais elevados em relação ao NDVI. Sendo assim, apesar das leves diferenças, os índices foram eficientes na obtenção de respostas por meio das interações com o alvo estudado e seus resultados foram satisfatórios.

O RATIO apresentou resultados qualitativos levemente semelhante ao NDVI e SAVI. Porém os resultados quantitativos foram diferentes, mas mesmo com essa diferença foi possível notar redução de biomassa vegetal após o rompimento da barragem com a utilização do presente índice. Com isso, notou-se que a resposta do RATIO mostrou padrões de mudanças na vegetação semelhante ao NDVI.

O IAF não atendeu aos critérios do trabalho, pois esse índice se mostrou discrepante dos demais, apresentando resultados fora do padrão. Ou seja, era de se esperar que a aplicação dos presentes índices revelasse diminuição das áreas com vegetação após o rompimento da barragem, os resultados do IAF foram diferentes dos demais índices.

Diante disso, entende-se que a necessidade de estudar e investigar áreas que sofreram degradação ambiental é um assunto importante na engenharia ambiental, mas serão necessárias pesquisas futuras que investiguem esse tipo de questão com mais profundidade, utilizando outros sensores de alta resolução espacial e outros índices de vegetação, cujo objetivo é obter maiores informações possíveis da área. Contudo, tais informações poderão servir de subsídio para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

Agência de Notícias IBGE. **Novos dados geoespaciais mostram área atingida pelo rompimento da barragem**, 2019. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/23808-novos-dados-geoespaciais-mostram-area-atingida-pelo-rompimento-da-barragem. Acesso em: 25 set. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. **Report Mensal de Barragens de Mineração**, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao. Acesso em: 22 mai. 2023.

COUTINHO, M. A. N. *et al*. Análise comparativa dos índices de vegetação NDVI, SAVI, RATIO E IAF para identificação de queimadas. **Caderno de Ciências Agrárias**, Montes Claros, v.8, n. 1, p. 70-81, abr. 2016.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L.; Análise 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. **Departamento de Geografia (UFPR)**, Curitiba, p. 234-271, 2011.

EDUVIRGEM, R. V.; Parque do Ingá, Maringá, Paraná: Análise da vegetação utilizando o Landsat 8 OLI. **Boletim do observatório ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, Campos dos Goytacazes, v. 16, n. 22022, p. 198-215, 2022.

CHERLINKA, V. EOS DATA ANALYTICS. **NDVI FAQ:** Tudo o que você precisa saber sobre o índice. 25 set. 2020. Disponível em: https://eos.com/pt/blog/ndvi-faq/. Acesso em: 18 out. 2023.

FAUSTO, B. **História do Brasil.** 14. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2015.

FITZ, P. R. CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE E ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO: uma análise comparativa. **Geosul**, Florianópolis, v.35, n.76, p. 171-188, dez. 2020.

GAMEIRO, S. *et al*. Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. **Terrae**, v.13, n.1-2, p.15-22, mai.2016.

G1. 2023. **Quatro anos da tragédia em Brumadinho**: 270 mortes, três desaparecidos e nenhuma punição., 2023. Disponível em:https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2023/01/25/quatro-anos-da-tragedia-em-brumadinho-270-mortes-tres-desaparecidos-e-nenhuma-punicao.ghtml. Acesso em: 22 mai. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Brumadinho,** 2023. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/brumadinho/panorama. Acesso em: 16 out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manuais Técnicos em Geociências:** Manual Técnico de Uso da Terra. 2ª ed. Rio de Janeiro, IBGE, n. 7, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Malhas territoriais,** 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads> Acesso em: 06 mai. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE – IBAMA. **Rompimento de barragem da Vale em Brumadinho (MG) destruiu 269,84 hectares**. IBAMA, Brasília, 30 jan. 2019. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/noticias/730-2019/1881-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg-destruiu-269-84-hectares. Acesso em: 17 out. 2023.

KAUARK, F.; MANHÃES, F. c.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa**: guia prático. Itabuna: Via Litterarum, 2010.

LIGUORI, C; LEVY, D. R. BRUMADINHO: da ciência à realidade. **LiberArs**, São Paulo, p.166, 2020.

LIU, W. T. H **Aplicações de Sensoriamento Remoto**, Campo Grande: editora UNIDERP, 2007.

LOBATO, R. B. MENEZES, J. LIMA, L. A. SAPIENZA, J. A. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para Análise da Redução da Mata Atlântica na Região Costeira do Distrito de Tamoios Cabo Frio/RJ. **Caderno de Estudos Geoambientais**, v. 1, p. 14/2-23, 2010.

LUCCHETTA, Beatriz Cirino. **Uso de imagens do OLI/LANDSAT 8 no estudo de desastres ambientais**: Estudo de caso do rompimento da barragem em Brumadinho – MG. Orientador: Fernanda Silva Oliveira. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2020.

LUIZ FERRARI, J; SANTOS, A. R. dos; GARCIA, R. F.; Análise da vegetação por meio da subtração de imagem NDVI na sub-bacia hidrográfica do córrego do horizonte. **Engenharia Ambiental,** Espirito Santo do Pinhal, v. 8, n. 3, p. 003-018, 2011.

LOPES, L. M. N.; O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. **Periódico eletrônico da PUC Minas**, Niterói, v. 5, p. 1-14, jun. 2016.

MACEDO, C. E. S. de. *et al*. Detecção da Variação de Cobertura Vegetal a Partir da Estimativa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na Unidade de Conservação do Parque Estadual das Carnaúbas - CE com Utilização de Técnicas do Sensoriamento Remoto. **Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ)**, Rio de Janeiro, v. 43-2, p. 477-485, 2020.

MASCARENHAS, L. M. A.; FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L.G. Sensoriamento Remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: Análise da cobertura vegetal remanescente na Bacia do Rio Araguaia. **Sociedade & Natureza**, v. 21, n 1, p. 5-18, 2009.

MATOS, A. T. de. **Poluição Ambiental:** impactos no meio físico. ed. Viçosa: UFV, 2010.

MENESES, P. R. *et al*. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** Brasília: CNPq, 2012. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=3072510&forceview=1. Acesso em: 21. abr. 2023.

NOVO, de M. L. M. E.; PANZONI, J. F. **Introdução ao sensoriamento remoto:** São José dos Campos: INPE, 2001.

NOVO, de M. L. E. **Sensoriamento Remoto:** princípios e aplicações. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, L. G. L. de; PEREIRA, L. M.; PEREIRA, G.; MORAES, E. C. M.; MAEDA, E. E. Estudo da variabilidade de índices de vegetação por meio de de imagens do ETM+/LANDSAT 7. In: Anais XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, SC. **Anais...**Florianópolis: INPE, 2007. p. 5995-6002.

PACCHELLO, S. N. **Impactos ambientais e socioeconômicos causados pelo rompimento da barragem de Brumadinho.** 2021. 27f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) - Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2021.

Paranhos Filho, A. C., et al. **Geotecnologias para aplicações ambientais** [recurso eletrônico]. Maringá, PR: UNIEDUSUL, 2021.

PEREIRA, L. F.; CRUZ, G. de B.: GUIMARÃES, R. M. F.; Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. **Journal of Environmental Analysis and Progress,** v. 04, n. 02, p. 122-129, fev. 2019.

PEREIRA, R. A. D. **Introdução ao estudo da topografia**. ed. Pelotas: Editora da Universidade Federal de Pelotas, 2019.

ROSEMBACK, R.; FRANÇA, A, M, S.; FLORENZANO, T.G. Análise Comparativa dos Dados NDVI Obtidos de Imagens CCD/CBERS e TM/Landsat5 em uma Área Urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, 2005. **Anais**. São José dos Campos, INPE, p. 1075-1082.

SANTOS, A. R. *et al*. **Curso Introdutório ao QGIS (CI-QGIS)**: Videoaulas Descritas Passo a Passo – Volume 1. Alegre: CAUFES, 2022.

SANTOS, A. R. dos. *et al*. **Geotecnologias e Análise Ambiental**: aplicações práticas. Alegre: CAUFES, 2015. Disponível em: http://www.mundogeomatica.com.br/Livro_Geoteconologia_Analise_Ambiental.htm. Acesso em: 2 abr. 2023.

SERGIEIVA, K. EOS DATA ANALYTICS - EOS. **Índices de vegetação para impulsionar soluções digitais**, 2022. Disponível em: https://eos.com/pt/blog/indices-de-vegetacao/.Acesso em: 20 out. 2023.

SOUZA JUNIOR, T. F.; MOREIRA, E. B.; HEINECK, K. S.; Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil. **Revista do Instituto Federal do Rio Grande do Norte**, v. 5, n. 34, p. 01-39, jan. 2018.

SOUSA, L. F. A. de; GIONGO, P. R. Revisão de literatura: uso do geoprocessamento na avaliação da degradação de pastagens. **Revista Sapiência: Sociedade, Saberes e Práticas Educacionais**, v. 11, n. 01, p. 01-16, 2022.

USGS - Science for a changing world. Disponível em: https://earthexplorer.usgs.gov/. Acesso: 24 out. 2023.

USGS – Science for a changing world. **What are the band designations for the Landsat satellites?** Disponível em: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites. Acesso em: 14 nov. 2023.

VIEIRA, A. E.; A (in) sustentabilidade da indústria da mineração no Brasil. **Estação Científica (UNIFAP)**, Macapá, v. 1, n. 2, p. 01-15, 2011.