

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

LUIZIANE SOUSA DA COSTA

**CONDICIONANTES GEOMORFOLÓGICOS DE DESLIZAMENTOS DE TERRA
NO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA**

**CHAPADINHA – MA
2023**

LUIZIANE SOUSA DA COSTA

**CONDICIONANTES GEOMORFOLÓGICOS DE DESLIZAMENTOS DE TERRA
NO MUNÍCIPIO DE BURITICUPU-MA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Maranhão como um dos pré-
requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Agrícola.

Orientador: Dr. Marcus Willame Lopes Carvalho

CHAPADINHA-MA

2023

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Sousa da Costa, Luiziane.

CONDICIONANTES GEOMORFOLÓGICOS DE DESLIZAMENTOS DE
TERRA NO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA / Luiziane Sousa da
Costa. - 2023.

44 p.

Orientador(a): Marcus Willame Lopes Carvalho.

Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do
Maranhão, Universidade Federal do Maranhão, 2023.

1. Degradação. 2. Imagem de satélite. 3.
Sensoriamento remoto. I. Willame Lopes Carvalho, Marcus.
II. Título.

LUIZIANE SOUSA DA COSTA

**CONDICIONANTES GEOMORFOLÓGICOS DE DESLIZAMENTOS DE TERRA
NO MUNÍCIPIO DE BURITICUPU-MA**

Monografia submetida ao corpo docente da Universidade Federal do Maranhão / Centro de Ciências de Chapadinha, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Data de aprovação: 22 / 12 / 2023

Nota: 9,3

Aprovado por:

Marcus Willame Lopes Carvalho – (Orientador)

Doutorado em Agronomia pela Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Professor Adjunto do curso de Engenharia Agrícola- (CCCh/UFMA)

Prof. Dr. Khallil De Menezes Rodrigues

Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical pelo Instituto agrônomo- (IAC)

Professor Adjunto do curso de Agronomia- CCCh/UFMA

Marco Aurélio da Silva Lira Filho- (Avaliador)

Geógrafo pela Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Mestre em Análise e Planejamento Espacial pelo Instituto Federal do Piauí (IFPI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pelo dom da vida, agradeço por ter sido meu alicerce durante minha formação, por nunca ter me abandonado e por sempre se fazer presente em minha vida.

Agradeço infinitamente aos meus pais, minha família e irmão, em especial a minha mãe que sempre foi minha inspiração, e com toda a dificuldade nunca deixou faltar nada para mim, se abdicou dos seus sonhos pelos meus, minha eterna gratidão, minha rainha.

Agradeço à família Conceição de Paula, que por cinco anos me acolheram como filha, sem o suporte de vocês eu não conseguiria, vocês foram o pilar da minha formação, minha eterna gratidão, amo todos vocês.

Aos meus melhores amigos, Adriana Costa, Elinalva Silva, Wilke Oliveira e Wellington Cruz, pelo suporte em toda minha vida, conselhos, risadas e os puxões de orelha que me fazem sempre querer tê-los em minha vida.

Aos meus amigos Breno Silva, Caio Raniele, Fabiola Monteles, Atacília Mota, Renata Gamboa e Luciana Paulino, obrigada por essa linda e árdua caminhada juntos.

Aos meus amigos, Luana Sousa, Judson Costa, Fernanda Costa, Diana Nayana e Edinaldo de Jesus, por sempre torcerem por mim e me incentivarem, levarei cada um de vocês em meu coração.

Ao Edvan Silva, por toda a parceria, conselhos, ajuda, companheirismo e palavras de incentivos.

Ao professor Fabiano Simas, por qual sempre tive admiração, obrigada pelos ensinamentos e incentivos, você foi, e é essencial para minha formação acadêmica.

À minha professora e amiga Daiane Fossati, por todo ensino, conselhos, e suporte durante a minha formação e por sempre acreditar no meu potencial você é inspiração para minha vida.

Ao professor Pedro Augusto, por toda ajuda e incentivo.

Ao professor Khalil Menezes, saiba que fostes luz na minha vida, demorei a lhe conhecer, mas, Deus faz tudo na hora certa e no tempo certo, obrigada pelo ensino, exemplo de caráter e dedicação, por cada vez em que me estendeu a mão, pelo incentivo, transparência,

cuidado e por tamanha gentileza e sinceridade, o que me fez não só querer retribuir com gratidão (o que é pouco), mas tê-lo como inspiração.

Ao professor Marcus Willame, não só pela fundamental orientação para concretização deste trabalho, como por todo conhecimento compartilhado, ideias geniais, exemplo de pulso firme e por ter acreditado no meu potencial.

Ao professor Patrício Gomes, por todo suporte, conselhos e ensinamentos repassado durante esses anos, o senhor é excepcional.

Aos demais colegas, docentes, servidores administrativos do CCCh que direta e indiretamente colaboraram durante todo meu período de graduação. Obrigada!

Por fim, agradeço a empresa SLC por ter me dado a oportunidade de estágio e por me permitir conhecer pessoas incríveis.

À minha coordenadora Maria Santos, por me acolher durante 6 meses, meus sinceros agradecimentos, sem você não estaria aqui, obrigada pelos ensinamentos, conselhos, cuidados e por me proporcionar essa experiência imensurável.

Ao seu José Osmar, pelos ensinamentos, todos foram praticados e exercidos com sucesso, o senhor é fera, lhe levarei pra vida;

Aos demais colaboradores da Usina de Beneficiamento de Algodão- UBA, meus sinceros agradecimentos a todos que se abdicaram do seu tempo para me passar seus conhecimentos, vocês foram e são essenciais para construção da minha vida profissional. Muito obrigada!

*A tua palavra é lâmpada que ilumina os meus
passos e luz que clareia o meu caminho.*

Salmos: 119: 105

RESUMO

O estudo Condicionantes Geomorfológicos de Deslizamentos de Terra no Município de Buriticupu-MA analisa os fatores geomorfológicos que contribuem para ocorrência de deslizamentos de terra nesse município específico do Maranhão. O município de Buriticupu, localizado no estado do Maranhão, é analisado em relação aos elementos geomorfológicos que podem desencadear deslizamentos de terra. Este tipo de fenômeno é comum em áreas com declividades acentuadas, solos suscetíveis e outras características específicas do relevo. O estudo inclui análise da topografia, tipo de solo, cobertura vegetal, índices de vegetação da área, chuvas, entre outros fatores que desempenham papéis cruciais na ocorrência de deslizamentos. A compreensão desses condicionantes é essencial para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e mitigação de deslizamentos de terra. Tendo em vista, que o presente trabalho tem como objetivo realizar o mapeamento das cicatrizes de deslizamento após os eventos chuvosos no município de Buriticupu, MA correlacionando os fatores geomorfológicos e pluviométricos por meio de dados utilizando SIG, abarcando um intervalo de tempo de 2017 à 2023, isto é, 3 anos, correspondente. Com base nas conclusões do estudo, pode-se sugerir medidas específicas para minimizar os riscos associados a esses eventos naturais, promovendo assim a segurança e a resiliência da comunidade local.

Palavras-chave: Degradação, sensoriamento remoto, imagem de satélite.

ABSTRACT

The study Geomorphological Conditions of Landslides in the Municipality of Buriticupu-MA analyzes the geomorphological factors that contribute to the occurrence of landslides in this specific municipality in Maranhão. The municipality of Buriticupu, located in the state of Maranhão, is analyzed in relation to the geomorphological elements that can trigger landslides. This type of phenomenon is common in areas with steep slopes, susceptible soils and other specific relief characteristics. The study includes analysis of topography, soil type, vegetation cover, vegetation indices in the area, rainfall, among other factors that play crucial roles in the occurrence of landslides. Understanding these conditions is essential for developing landslide prevention and mitigation strategies. Bearing in mind that the present work aims to map landslide scars after rainy events in the municipality of Buriticupu, MA, correlating geomorphological and rainfall factors through data using GIS, covering a time interval from 2017 to 2023, that is, 3 years, corresponding. Based on the study's findings, specific measures can be suggested to minimize the risks associated with these natural events, thereby promoting the safety and resilience of the local community.

Keywords: degradation, remote sensing, satellite image.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA.	24
FIGURA 2-MÉDIAS MENSAS DE TEMPERATURA MÁXIMA (TMÁX) TEMPERATURA MÍNIMA (TMÍN) E PRECIPITAÇÃO (P) DE BURITICUPU-MA.	25
FIGURA 3-CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA PARA O ANO DE 2017	29
FIGURA 4-CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA PARA O ANO DE 2020	31
FIGURA 5-CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA PARA O ANO DE 2023	32
FIGURA 6-MAPAS DE SOLOS E GEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA.	34
FIGURA 7-ALTO GRAU DE INTEMPERIZAÇÃO NO MATERIAL DE ORIGEM NO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA.	35
FIGURA 8-MAPAS DE DECLIVIDADE E POTÊNCIA DE ESCOAMENTO DA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA	36
FIGURA 9- PRECIPITAÇÃO MENSAL DO MUNICÍPIO DE BURITICUPU, MA DE JANEIRO DE 2017 A DEZEMBRO A OUTUBRO DE 2023.	37
FIGURA 10- ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NDVI E SAVI DA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA PARA O ANO DE 2017.	38
FIGURA 11- ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NDVI E SAVI DA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA PARA O ANO DE 2020.	39
FIGURA 12- ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NDVI E SAVI DA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE BURITICUPU-MA PARA O ANO DE 2023.	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -COMPONENTES DO INSTRUMENTO IMAGEADOR SENTINEL-2 UTILIZADOS NO TRABALHO	26
TABELA 2 -ÁREA E PORCENTAGEM DE CADA CLASSE PARA O ANO DE 2017.....	30
TABELA 3 -ÁREA E PORCENTAGEM DE CADA CLASSE PARA O ANO DE 2020.....	31
TABELA 4 -ÁREA E PORCENTAGEM DE CADA CLASSE PARA O ANO DE 2023.....	33
TABELA 5 -ÁREAS E PORCENTAGEM CORRESPONDENTES A CADA CLASSE DE RELEVO PARA ÁREA URBANA DE BURITICUPU	37

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1- CÁLCULO DO NDVI.....	27
EQUAÇÃO 2- CÁLCULO SAVI.....	27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1. Geologia	16
3.2. Cicatrizes de deslizamento.....	18
3.3. Expansão urbana e processos erosivos	19
3.4. Erosão.....	20
3.5. Voçoroca	21
3.6. Geoprocessamento.....	22
3.7. Sensoriamento remoto, NDVI e SAVI.....	23
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1. Área de estudo	24
4.2. Procedimentos e ferramentas utilizadas para pesquisas	25
4.3. Classificação supervisionada.....	26
4.4. Índices de vegetação	27
4.5. Condicionantes geomorfológicas	27
4.5.1. Declividade	27
4.5.2. Índice de potência de escoamento	28
4.5.3. Solos	28
4.5.4. Geologia	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1. Classificação supervisionada.....	28
5.2. Características ambientais e condicionantes naturais dos processos erosivos por voçorocamento.....	33

5.2.1. Solos e Geologia.....	33
5.2.2. Declividade e índice de potência de escoamento.....	35
5.3. Índices de vegetação.....	37
6.0. CONCLUSÃO	40
7.0. REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

Há muito tempo a preocupação com a degradação dos solos ganha destaque por estar diretamente relacionada com os processos produtivos e desenvolvimento socioeconômicos das populações, historicamente o município de Buriticupu, especialmente na Mesorregião Oeste Maranhense, tem seu desenvolvimento econômico baseado no uso intensivo da terra, transformando e potencializando a degradação do meio ambiente (Couto, 2015).

A erosão vem gerando grandes prejuízos para a sociedade através da perda de solo fértil e do assoreamento dos cursos d'água, da contaminação das águas superficiais e subterrâneas com fertilizantes e agrotóxicos utilizados nas lavouras, da redução das áreas disponíveis para cultivo (Santos *et al.*, 2015). Além disso, a produção de sedimentos resulta no assoreamento de rios e reservatórios, comprometendo a geração de energia elétrica bem como causando inundações em áreas urbanas (Capoane, 2013).

Para Back e Poletto (2018) os intensos processos erosivos ocorrentes no município de Buriticupu-MA, são resultados da interação mútua entre condicionantes naturais e antrópicos. Dentre os naturais pode-se destacar: o relevo quanto agente regulador; a litologia, pelas características do material de origem; os solos, através de seus atributos físico-químicos e da sua erodibilidade; e clima, por meio dos índices pluviométricos e da erosividade das chuvas; a vegetação, a partir dos tipos de espécies e da densidade vegetacional, que desempenham papel fundamental no início e evolução dos voçorocamentos. Associados aos elementos ambientais, o homem, a partir da sua ação antrópica (Erickson *et al.*, 2006). Contudo, a problemática desta pesquisa abrange questões de erosão linear profunda, denominada como voçorocas.

A monitorização e prevenção de deslizamentos dessas terras são preocupações críticas em regiões propensas a esses eventos geológicos adversos, onde a vida humana e a infraestrutura estão constantemente expostas a riscos significativos (Santos; Galvão, 2007). Nesse contexto, o sensoriamento remoto e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) emergem como ferramentas indispensáveis e altamente eficazes. O sensoriamento remoto, que inclui o uso de satélites, drones e outras tecnologias, possibilita a coleta de dados geoespaciais precisos em grande escala. Esses dados, combinados com a capacidade dos SIG de armazenar, analisar e visualizar informações geográficas, permitem uma abordagem abrangente e baseada em dados para monitorar, avaliar riscos e implementar medidas preventivas contra deslizamentos de terra (Santos, 2017).

Esta combinação sinérgica de sensoriamento remoto e SIG desempenha um papel fundamental na proteção de comunidades e na preservação de áreas vulneráveis, ao permitir

uma melhor compreensão, resposta e gestão de riscos relacionados a deslizamentos de terra. Logo, esta exploração aprofundada examinará os métodos, as aplicações e os benefícios dessas tecnologias no contexto da prevenção e mitigação de deslizamentos de terra (Idem, p. 38, 2017). Portanto, o presente trabalho visa realizar um mapeamento das cicatrizes de deslizamentos na sede municipal de Buriticupu-MA, utilizando sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar o mapeamento das cicatrizes de deslizamentos de terra no município de Buriticupu, MA correlacionando os fatores geomorfológicos e pluviométricos.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar os processos erosivos lineares profundos presentes no município, utilizando imagens de satélite;
- Verificar a evolução das voçorocas pela aplicação de índices de vegetação em diferentes anos;
- Realizar uma classificação supervisionada para identificação dos principais usos da terra na área de estudo;
- Relacionar a ocorrência de voçorocas com as características geomorfológicas da área.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Geologia

A geologia é uma ciência que estuda a Terra, sua composição, estrutura interna e processos que ocorrem em seu interior e superfície. Ao longo do tempo, a curiosidade humana em compreender a Terra e sua formação despertou a necessidade de desenvolver métodos e técnicas para estudar o mundo ao nosso redor. Um dos primeiros geólogos a registrar suas observações foi o escocês James Hutton, no final do século XVIII. Ele percebeu que as rochas são formadas por processos naturais lentos e graduais, e que a Terra é um sistema dinâmico em constante mudança. Como destacado por Bishop e Woolf (2004), Hutton foi o precursor de uma nova abordagem na geologia, ao afirmar que "o presente é a chave para o passado" e que os processos que testemunhamos hoje eram os mesmos que ocorreram no passado distante.

Outro marco importante na história da geologia foi a teoria da tectônica de placas, desenvolvida na segunda metade do século XX. Segundo McKenzie e Parker (2017), essa teoria revolucionou nossa compreensão sobre a dinâmica do planeta e os processos responsáveis pela formação de montanhas, terremotos e vulcões. Através de estudos sísmicos e da observação de fenômenos como a deriva continental, cientistas como Alfred Wegener formularam a hipótese de que a litosfera é dividida em placas rígidas que se movem lentamente ao longo de milhões de anos. Essa teoria revelou a verdadeira escala das forças geológicas e é amplamente aceita hoje.

Juntamente com a teoria de placas tectônicas, o desenvolvimento de técnicas de datação radiométrica foi um avanço crucial para a geologia. Com base na decaída radioativa de isótopos presentes nas rochas e fósseis, cientistas conseguiram determinar a idade relativa e absoluta dos fenômenos geológicos. Conforme ressaltado por Turk e Breda (2016), a descoberta do decaimento radioativo por Ernest Rutherford no início do século XX abriu caminho para uma nova maneira de recontar a história da Terra e estabelecer uma escala cronológica mais precisa.

Além disso, a tecnologia também desempenhou um papel fundamental no avanço da geologia. A criação de equipamentos como sismógrafos, satélites e drones permitiu coletar dados e realizar investigações detalhadas de áreas anteriormente inacessíveis. De acordo com Skelly e Liu (2017), o uso de tecnologia avançada, como sensoriamento remoto e análise de imagens, contribuiu para uma melhor compreensão dos processos geológicos em larga escala, auxiliando no mapeamento das camadas internas do planeta e na identificação de recursos minerais.

Contudo, a geologia do solo desempenha um papel fundamental na gestão ambiental e na prevenção de desastres naturais, como erosões, deslizamentos de terra e inundações (Montgomery, 2007). Compreender a distribuição de solos e suas propriedades é essencial para o planejamento urbano, evitando riscos geotécnicos e promovendo a sustentabilidade (Hester e Harrison, 2007).

Portanto, a geologia do solo é uma disciplina multifacetada que contribui significativamente para nosso entendimento do ambiente terrestre, influenciando práticas agrícolas, gestão de recursos naturais e planejamento do uso do solo. A integração de dados geológicos do solo é essencial para abordar desafios ambientais e promover práticas sustentáveis (Brady e Weil, 2008).

3.2. Cicatrizes de deslizamento

As cicatrizes de deslizamento são formações geológicas resultantes de movimentos de massa, são deslizamentos de terra, quedas de rochas e fluxos de detritos. Esses eventos ocorrem frequentemente em áreas de relevo íngreme e são influenciados por uma série de fatores geotécnicos e ambientais. Os principais aspectos relacionados às cicatrizes de deslizamento, como suas características morfológicas, os processos físicos envolvidos na sua formação e os fatores que podem influenciar a ocorrência desses eventos.

As cicatrizes de deslizamento apresentam características morfológicas distintas que variam de acordo com o tipo de movimento de massa que as originou. Estudos realizados por Smith et al. (2015) mostraram que, em deslizamentos de terra rotacionais, por exemplo, é comum observar a formação de uma depressão em forma de colher, enquanto em deslizamentos translacionais a cicatriz apresenta uma forma alongada e estreita. Além disso, a geometria das cicatrizes também pode variar de acordo com a natureza do material envolvido no deslizamento, como solos, rochas ou detritos.

Vários processos físicos têm sido identificados como responsáveis pela formação das cicatrizes de deslizamento. Segundo Jones et al. (2017), a primeira etapa do processo é a ruptura da massa, que ocorre devido a tensões excessivas no material, resultantes de sobrecargas ou degradação dos componentes coesivos. Em seguida, ocorre o movimento da massa ao longo de uma superfície de falha, podendo ser causado pela ação da gravidade, pela presença de água ou por sismos. Durante o movimento, ocorre a fragmentação do material e o transporte dos detritos, resultando na formação de uma cicatriz na superfície do terreno.

A ocorrência de deslizamentos e, conseqüentemente, de cicatrizes de deslizamento é influenciada por uma série de fatores. De acordo com Chigira et al. (2019), a geologia da região é um fator determinante, pois determina a natureza dos materiais presentes e suas propriedades geotécnicas. Além disso, a topografia do terreno, a pluviosidade e a vegetação também desempenham um papel importante, uma vez que podem influenciar a estabilidade do solo e a disponibilidade de água, influenciando a ocorrência de deslizamentos. Estudos futuros também poderiam investigar a influência das mudanças climáticas na formação de cicatrizes de deslizamento, uma vez que se espera que eventos extremos, como chuvas intensas, se tornem mais frequentes no futuro.

Portanto, as cicatrizes de deslizamento são feições geomorfológicas originada de um processo de movimento de massa.

. No entanto, ainda há lacunas a serem preenchidas, e mais pesquisas são necessárias para ampliar nosso conhecimento sobre esse fenômeno e fornecer subsídios para a prevenção e mitigação de deslizamentos.

3.3. Expansão urbana e processos erosivos

A expansão urbana e os processos erosivos são temas que têm sido objeto de intensos estudos e discussões nas últimas décadas. Durante esse período, houve um crescimento acelerado das cidades e, conseqüentemente, um aumento significativo da impermeabilização do solo e da degradação dos recursos naturais. Um estudo realizado por Silva et al. (2015) mostrou que a urbanização desordenada tem grande influência na intensificação dos processos erosivos, resultando em perda de solo, assoreamento de rios e degradação dos ecossistemas adjacentes. Esses autores ressaltam a importância do planejamento urbano adequado e da adoção de medidas de controle para minimizar os impactos negativos.

A conversão de áreas naturais em espaços urbanos frequentemente resulta na substituição de vegetação por superfícies impermeáveis, como asfalto e concreto. Essa mudança na cobertura do solo aumenta o escoamento superficial, diminuindo a capacidade de infiltração da água e exacerbando os processos erosivos em ambientes urbanos (Wang et al., 2016).

Outra pesquisa relevante foi conduzida por Souza e Santos (2018), que analisaram a expansão urbana e seus efeitos sobre os processos erosivos em uma área de encosta. Os resultados mostraram que as áreas urbanizadas apresentavam maiores taxas de erosão do que as áreas não urbanizadas. Os autores destacaram a necessidade de promover a ocupação do solo de forma sustentável, evitando construções em locais suscetíveis à erosão e implementando medidas de contenção.

Um estudo mais recente, realizado por Oliveira et al. (2021), revelou que a expansão urbana acelerada tem causado a supressão de áreas vegetadas e a impermeabilização do solo, aumentando a magnitude e a velocidade dos processos erosivos. Além disso, os autores identificaram que a falta de investimentos em infraestrutura urbana adequada, como sistema de drenagem e contenção de encostas, contribuiu para o agravamento dos problemas. Essas constatações reforçam a importância de uma abordagem integrada entre planejamento urbano e gestão ambiental para prevenir e mitigar os efeitos da expansão urbana sobre os processos erosivos.

Para enfrentar esses desafios, estratégias de planejamento urbano sustentável são fundamentais. Investir em práticas como a preservação de áreas verdes, o controle de uso do

solo e a implementação de medidas de controle de erosão são abordagens cruciais para mitigar os impactos da expansão urbana nos processos erosivos (Deng et al., 2019).

3.4. Erosão

A erosão é um fenômeno natural que ocorre quando o solo, rochas e outros materiais são desgastados e transportados por forças como vento, água, gelo ou gravidade. Esse processo pode ocorrer de forma lenta ao longo dos séculos, ou de maneira rápida durante eventos climáticos extremos (Panagos et al., 2015).

Existem diferentes tipos de erosão, cada um causado por uma combinação de fatores geológicos e climáticos. Porém, a erosão hídrica é a de maior enfoque por ser a mais comum e ocorre quando a água corre sobre a superfície do solo, carregando partículas e criando sulcos e ravinas (Carvalho et al., 2001). A mesma é resultante de diversos fatores, como a intensidade da chuva, o tipo de solo, a inclinação do terreno e a cobertura vegetal presente. Áreas com preparo convencional do solo e desprovidas de cobertura vegetal em superfície são mais suscetíveis à erosão hídrica, pois, este sistema favorece a formação do selamento superficial, caracterizado por uma fina camada de solo que se torna compactada pelo impacto direto da gota de chuva sobre o solo (Panachuki et al., 2011).

Em síntese, a erosão hídrica é um processo natural que deve ser compreendida e controlada de maneira sustentável para evitar impactos adversos no meio ambiente e nas atividades humanas. Para Panachudi et al. (2006) a erosão pode ter um impacto significativo no meio ambiente, na agricultura, nas infraestruturas e na qualidade da água, tornando sua investigação crucial para desenvolver práticas adequadas e sustentáveis.

Já a erosão eólica é causada pelo vento, que transporta partículas finas e as deposita em outras áreas. A erosão marinha ocorre devido à ação das ondas e correntes do mar, desgastando a costa e formando falésias e praias. A erosão gravitacional, por sua vez, é causada pela ação da gravidade em áreas com declives íngremes, resultando em deslizamentos de terra e avalanches. Além disso, a erosão também pode ser dividida de acordo com a intensidade do processo (Magalhães, 2001). A erosão laminar é caracterizada pela remoção uniforme da camada superior do solo, enquanto a erosão em sulcos ocorre com a formação de sulcos profundos. Já a erosão em ravinas é caracterizada por canais mais profundos, e a erosão em voçorocas é a mais severa, formando grandes crateras no solo (Ferreira, 2007).

3.5. Voçoroca

A voçoroca, como é conhecida, é um fenômeno geológico que ocorre devido à erosão acelerada do solo, resultando na formação de grandes crateras. Esse processo pode ser causado tanto por fatores naturais, como chuvas intensas e falta de vegetação, quanto por ações humanas, como desmatamento e práticas inadequadas de agricultura.

Acredita-se que a formação das voçorocas seja um processo contínuo de erosão do solo ao longo do tempo. Mudanças climáticas, como a variação de temperatura e padrões de precipitação, podem acelerar esse processo, tornando as áreas mais suscetíveis à ocorrência de voçorocas. Em sua obra "Controle de Voçorocas: Prevenção e Recuperação", o autor Rossi (2015) explica que a deficiência de cobertura vegetal é um fator crucial para o surgimento dessas crateras, uma vez que as raízes das plantas desempenham papel importante na fixação do solo.

A aplicação do conhecimento sobre a voçoroca é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e recuperação de áreas afetadas. Segundo estudos de Souza e Leal Neto (2017), a reabilitação de voçorocas requer ações multidisciplinares que envolvem desde a modificação da cobertura vegetal, com o reflorestamento de áreas afetadas, até a implantação de técnicas específicas de controle de erosão. Além disso, é necessário considerar o papel das políticas ambientais e a conscientização da sociedade para evitar o avanço das voçorocas.

De acordo com Santos e Feltran (2018) em seu estudo sobre o impacto socioambiental das voçorocas, é essencial uma abordagem integrada entre governos, comunidade e setor privado, visando a adoção de medidas preventivas e de recuperação das áreas degradadas.

Avanços nas técnicas de sensoriamento remoto e modelagem computacional têm proporcionado insights valiosos na compreensão das voçorocas. Futuras pesquisas devem continuar explorando abordagens inovadoras para o monitoramento e controle dessas feições erosivas, considerando as mudanças climáticas e a crescente pressão antropogênica sobre o solo.

Em síntese, as voçorocas representam desafios significativos para ecossistemas e comunidades locais que enfatizam a necessidade de abordagens integradas e sustentáveis para a gestão dessas feições, visando mitigar seus impactos e promover a resiliência ambiental.

3.6. Geoprocessamento

O geoprocessamento é um conjunto de técnicas utilizada em diversas áreas como a Cartografia, a Geografia, a Agronomia, a Engenharia e a Biologia. Com o avanço da tecnologia nos últimos anos, a capacidade de armazenar, processar e analisar dados geográficos de forma eficiente tem se tornado cada vez mais acessível. Segundo Lopes et al. (2018), o geoprocessamento tem como objetivo principal a manipulação de dados espaciais, combinando informações geográficas com atributos alfanuméricos, de forma a criar análises e modelos que auxiliam na tomada de decisões.

O surgimento do geoprocessamento remonta ao final da década de 1960, quando surgiram os primeiros sistemas de informação geográfica (SIG). De acordo com Câmara et al. (2001), esses sistemas foram criados com o objetivo de automatizar as tarefas de coleta, armazenamento, análise e representação de dados geográficos, que até então eram realizadas manualmente.

Uma das principais aplicações do geoprocessamento é na Cartografia, que utiliza técnicas de representação e análise espacial para a elaboração de mapas. Segundo Câmara et al. (2001), o geoprocessamento permite a criação de mapas temáticos, que apresentam informações específicas sobre determinada área. Esses mapas são de extrema importância para a tomada de decisões em diferentes setores, como planejamento urbano, gestão ambiental e agronegócio.

Além da Cartografia, o geoprocessamento também é amplamente utilizado na área ambiental. De acordo com Ferreira (2003), o uso de técnicas de geoprocessamento permite a identificação e análise de áreas de preservação ambiental, bem como a avaliação de impactos ambientais decorrentes de atividades humanas. Essas informações são essenciais para o desenvolvimento de projetos de conservação e gestão de recursos naturais.

Outra área que se beneficia do geoprocessamento é a Agricultura de Precisão. Segundo Silva et al. (2020), essa técnica utiliza dados espaciais e temporais sobre o ambiente agrícola para a tomada de decisões mais assertivas.

3.7. Sensoriamento remoto, NDVI e SAVI

O sensoriamento remoto trata-se de uma ferramenta que permite a obtenção de imagens e outros tipos de informações, oriundos da superfície terrestre, por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície (Florenzano, 2007). Ao longo dos últimos anos, várias aplicações do sensoriamento remoto têm sido exploradas.

Desde o mapeamento de áreas desmatadas na Amazônia (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, 2013) até o estudo da dinâmica das mudanças climáticas globais (National Aeronautics and Space Administration-NASA, 2018), essas técnicas têm fornecido dados valiosos em diversas áreas de pesquisa. Além disso, o sensoriamento remoto tem sido utilizado para a monitoração de desastres naturais, como enchentes (INPE, 2014), e para a análise e controle do uso do solo urbano (NASA, 2018). Isso é realizado por meio da utilização de dispositivos e sensores que capturam dados eletromagnéticos, como luz visível, infravermelha e micro-ondas, emitidos ou refletidos pelos objetos em estudo.

O sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta indispensável para diversas áreas do conhecimento. A cada ano, novas tecnologias e aplicações são desenvolvidas, o que promete um futuro ainda mais promissor para essa técnica. A utilização de sensores mais avançados, o aumento na captação de dados em tempo real e a utilização de técnicas de inteligência artificial para análise das informações coletadas são algumas das perspectivas para os próximos anos (Jameson, 2023).

O NDVI índice de vegetação normalizada (Normalized Difference Vegetation Index) e SAVI índice de vegetação ajustado ao solo (Soil-Adjusted Vegetation Index) são dois índices amplamente utilizados na área de sensoriamento remoto para avaliar a saúde e a vigorosidade das plantas. Eles são baseados em medidas de radiação eletromagnética coletadas por sensores a bordo de satélites ou aeronaves.

Segundo estudos recentes, o NDVI e o SAVI têm se mostrado ferramentas úteis para o monitoramento de áreas vegetadas. Esses índices têm sido amplamente utilizados para avaliar a saúde das culturas agrícolas, detectar estresse hídrico, monitorar a regeneração de florestas, entre outros. Um estudo de Silva et al. (2015) investigou a aplicação do NDVI e do SAVI no monitoramento de áreas degradadas de cerrado, concluindo que ambos os índices foram capazes de identificar áreas com maior e menor vigor vegetativo.

Outro estudo realizado por Souza et al. (2018) comparou o desempenho do NDVI e do SAVI no monitoramento de áreas de floresta amazônica afetadas por incêndios florestais. Os

resultados revelaram que tanto o NDVI quanto o SAVI foram capazes de detectar os danos causados pelo fogo, porém o SAVI apresentou uma maior sensibilidade na detecção de áreas com vegetação comprometida.

Em resumo, o NDVI e o SAVI se mostram como índices eficientes para a avaliação da saúde das plantas e monitoramento de áreas vegetadas. Ambos têm sido amplamente utilizados em estudos de sensoriamento remoto e seu uso tem contribuído para o entendimento e a gestão de ecossistemas e culturas agrícolas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

A área de estudo está inserida no município de Buriticupu, onde compõe a Microrregião do Pindaré, que por sua vez faz parte da Mesorregião Oeste Maranhense. A localidade está situada entre os pares de coordenadas 46°28'52, 24''O e 4°17'43,77S, e, 46°24'9,91''O e 4°22'12,12''S a uma altitude máxima de 234 metros e mínima de 61 metros (Figura 1). O território municipal analisado está situado em ambiente tipicamente amazônico de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE (2010) e Farias Filho *et al.* (2019).



Figura 1-Área de estudo no município de Buriticupu-MA.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O clima, segundo a Classificação de Köppen, é do tipo “Aw”, úmido com moderado déficit de água, com temperatura média anual entre 24,5 e 26,0 °C e precipitação média anual entre 1400 e 1800 mm. O período seco abrange os meses de junho a novembro, quando o déficit hídrico atinge 150-300 mm (Golfari, 1980; Jesus et al., 1986), situando-se o período mais seco entre julho e outubro, com a maior concentração de chuvas em fevereiro e março (Jacomine, 1986). A figura 2 mostra gráfico com o comportamento da chuva e da temperatura ao longo do ano, considerando médias climatológicas a partir de um série de dados de 30 anos observados.

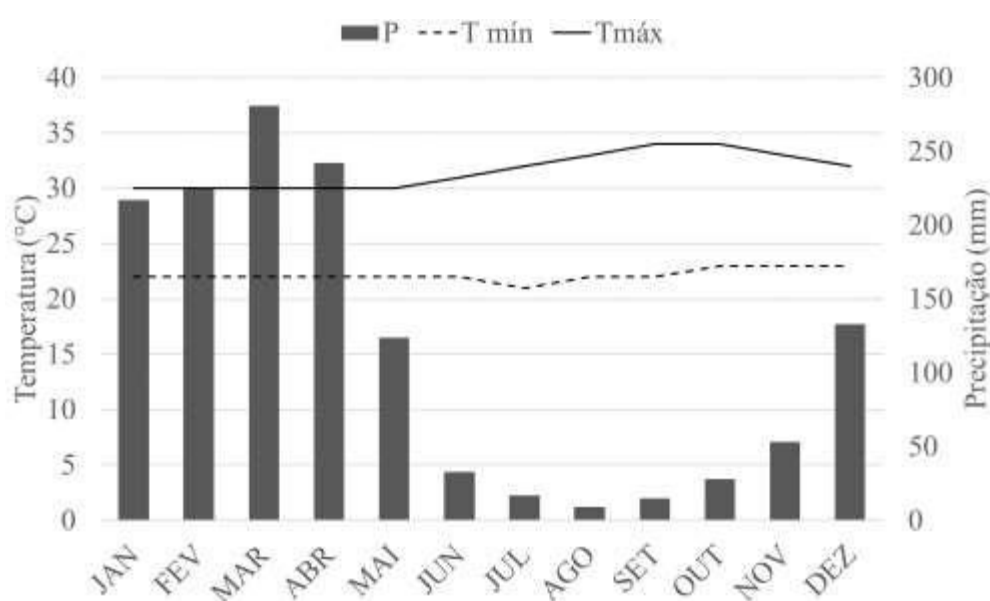


Figura 2—Médias mensais de Temperatura máxima (Tmáx) Temperatura mínima (Tmín) e Precipitação (P) de Buriticupu-MA.

Fonte: Site Clima Tempo (2023).

Por ser uma das últimas ramificações da Serra do Gurupi, no sentido norte, o relevo da região apresenta-se em forma de um grande tabuleiro, separado por vales na direção norte-sul, com altitudes médias de 350 m, com superfície plana e levemente ondulada e planície aluvionar que caracteriza-se por apresentar uma superfície extremamente horizontada, onde os sedimentos inconsolidados (areias, argilas e cascalhos) encontram-se depositados nos cursos d’água do município (Macedo et al., 2021).

4.2. Procedimentos e ferramentas utilizadas para pesquisas

Delimitou-se uma área de aproximadamente 2056 hectares de forma a abranger a parte urbana do município de Buriticupu e as área atingidas pelos deslizamentos. Foram utilizadas imagens orbitais por meio de plataforma gratuita do instrumento imageador

Sentinel-2A, produto L2A nas datas de 27 de novembro de 2017, 05 de agosto de 2020 e 25 de agosto de 2023 de forma a avaliar as cicatrizes de deslizamento antes e após os eventos chuvosos do ano de 2023. Com auxílio do software SIG em plataforma livre QGIS 3.28.11, utilizou-se as bandas B2, B3, B4 e B8 (Tabela 1) correspondentes aos espectros azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente, para realizar a mesclagem e composição colorida da área de estudo.

Tabela 1-Componentes do instrumento imageador Sentinel-2 utilizados no trabalho.

Resolução (m)	Banda	Nome da banda	Comprimento médio da onda (nm)
10	B2	Azul	492,4
	B3	Verde	559,8
	B4	Vermelho	664,6
	B8	NIR	832,8

Fonte: Adaptado de *Sentinel Hub* (2023).

4.3. Classificação supervisionada

A metodologia de classificação de uso da terra foi realizada com o complemento Dzetsaka, disponível para o QGIS utilizando o modelo de Mistura Gaussiana (Fauvel et al., 2015). Esta metodologia aplica a identificação pixel a pixel por meio de vetorização de zonas específicas e a classificação das estruturas alvos, que, por mínima distância, toma como referência, para cada classe, um ponto (pixel) no espaço multidimensional definido pela média estatística de cada banda espectral considerada. O algoritmo associa cada ponto (pixel) desconhecido à classe cuja média estatística está mais próxima ao ponto (pixel) de referência/classe. Assim, cada pixel das áreas de treinamento é avaliado e assinalado à classe à qual este tem a maior probabilidade de pertencer (Vale; Silva, 2019). Segundo Silva et al. (2020), esse método de classificação utilizando o Dzetsaka Classification tool, possui como principais características a simplicidade e agilidade aliadas à um excelente produto de classificação.

Utilizou-se a composição das bandas B1, B3 e B8 para obtenção de uma imagem colorida e obtenção das amostras correspondentes à cada classe de uso e ocupação da terra. Neste processo de classificação foi feita a identificação de solo exposto, cicatrizes de deslizamento, mata, pastagem, água, atividade agrícola e área urbanizada.

Foram utilizados atributos do terreno como covariáveis de classificação, como os índices de vegetação, declividade, índice de escoamento, mapa de solos e geologia na busca

de alcançar o melhor mapeamento das cicatrizes de deslizamento.

4.4. Índices de vegetação

De posse das imagens, com o auxílio do software QGIS 3.28.11 foram realizados os cálculos dos índices de vegetação, a fim de avaliar a cobertura vegetal da área. Utilizou-se a “Calculadora Raster”, algoritmo com a capacidade de realizar os cálculos referentes às expressões matemáticas de cada índice de vegetação, sendo estes: índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), desenvolvido por Rouse et al. (1973), e o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) desenvolvido por Huete (1988) que objetiva corrigir as interferências do solo a partir do NDVI, Equações 1 e 2, respectivamente.

$$NDVI = \frac{NIR - Ver}{NIR + Ver} \quad (1)$$

Equação 1- Cálculo do NDVI

$$SAVI = \frac{(NIR - Ver) \times (1 - L)}{NIR + Ver + L} \quad (2)$$

Equação 2- Cálculo SAVI

Onde: *NIR* corresponde a banda no espectro do infravermelho próximo, *Ver* corresponde a banda no espectro do vermelho e *L* é o fator de ajuste do solo e varia de acordo com sua característica de reflectância (calor e brilho), dependendo da densidade da vegetação (Marcussi et al., 2010).

4.5. Condicionantes geomorfológicas

4.5.1. Declividade

As informações sobre o relevo foram obtidas do Projeto TOPODATA (Tratamento dos dados SRTM realizados pelo Projeto Topodata do INPE), que disponibiliza dados geomorfométricos locais para todo o território nacional (Valeriano, 2008). - O Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo em questão disponibilizado pelo Projeto TOPODATA estava sem referência espacial, logo foi necessário colocar a projeção desta imagem para o padrão do Sistema de Coordenadas utilizadas nas demais imagens analisadas neste trabalho. Os dados estão estruturados em quadrículas compatíveis com a articulação 1:250.000, em folhas de 1° de latitude por 1,5° de longitude.

Para a elaboração do mapa temático de declividade utilizou-se a ferramenta de reclassificação por tabela do QGIS segundo as classes de declividade da EMBRAPA (1979).

4.5.2. Índice de potência de escoamento

O índice de potência de escoamento (SPI, do inglês: Stream Power Index) é baseado na suposição de que o escoamento é relativo a uma superfície topográfica específica, sendo este a medida de potencial de erosão no escoamento de água (Moore et al., 1991). Em resumo, é o índice que mede o poder erosivo devido ao escoamento superficial (Khosravi et al., 2016).

No presente estudo foi seguida a metodologia utilizada por Coaguila (2017) para o SPI, por meio do software QGIS 3.28.11 utilizando a ferramenta *r.watershed* nativa do GRASS no processamento de dados obtidos das cartas do TOPODATA.

4.5.3. Solos

As informações sobre os solos foi obtido no endereço https://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php. Este plano de informação apresenta a distribuição geográfica dos solos do Brasil, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2006), classificado até o terceiro nível categórico na escala 1:5.000.000.

4.5.4. Geologia

O mapa correspondente à geologia da área foi obtido no endereço <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22527>. O arquivo digital da Cartografia Geológica do Brasil na escala de 1:1.000.000 foi elaborado a partir da junção das 46 folhas da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, lançadas pela CPRM em 2004, unidas, harmonizadas e parcialmente atualizadas (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2021).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Classificação supervisionada

Com base na (Figura 3) para o ano de 2017, por meio do método de classificação identificou-se as classes de áreas correspondentes a solo exposto, cicatrizes de deslizamento, mata nativa, pastagem, água, atividade agrícola e área urbanizada, respectivamente. Para o ano em questão, a maior proporção da área de estudo (37,26%) era ocupada por mata nativa, com 781,55 ha seguida pela área caracterizada como pastagem abrangendo cerca de 30,24% da área delimitada. Por outro lado, a menor proporção da área (0,18%) era ocupada pela

classe de corpos hídricos, com 3,78 ha, respectivamente (Tabela 2).

Quanto às cicatrizes de deslizamento, pode-se observar que estas já se faziam presentes em 2017, ocupando uma área de 77,10 ha, que corresponde em proporção à 3,68% da área de estudo (Tabela 2). Nota-se também que tais classes de cicatrizes de deslizamento se encontram sempre próximas das áreas urbanizadas e de pastagem, caracterizadas por uma vegetação menos densa, ocupavam 30,24% ou 634,26 ha da área de estudo.

De acordo com Campos (2019) o município de Buriticupu vem sofrendo com os processos erosivos nas últimas décadas. A erosão na região é extremamente elevada, formando voçorocas com dimensões que podem alcançar 50 m de largura, 40 m de profundidade e extensão superior a 400 m.

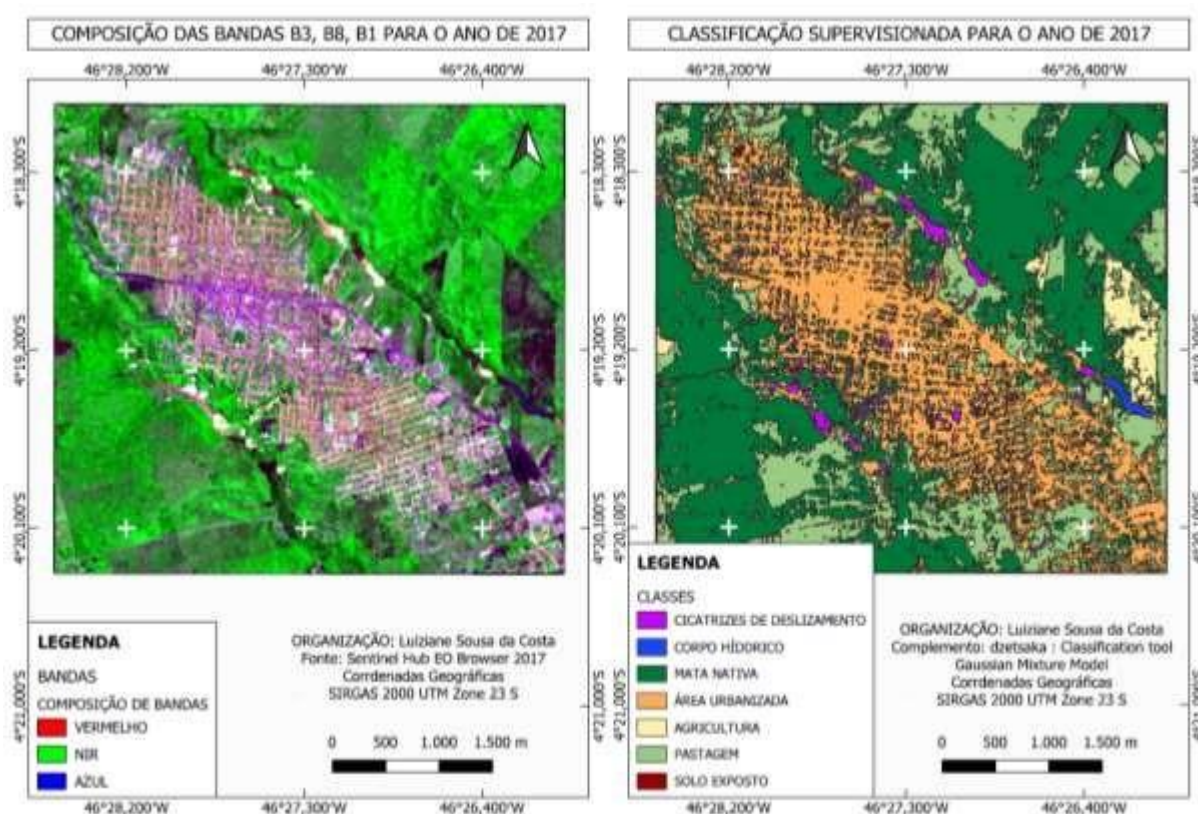


Figura 3-Classificação supervisionada da área urbana do município de Buriticupu-MA para o ano de 2017.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 2-Área e porcentagem de cada classe para o ano de 2017.

Classe	Área (ha)	Porcentagem (%)
Solo exposto	11,44	0,55
Cicatrizes de deslizamento	77,10	3,68
Mata	781,55	37,26
Pastagem	634,26	30,24
Água	3,78	0,18
Atividade agrícola	82,15	3,92
Área urbanizada	507,48	24,19

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Para o ano de 2020 (Figura 4), a classe de pastagem ultrapassou a classe de mata nativa e assumiu a primeira posição como classe de maior ocupação da área de estudo, com um aumento em proporção, superior a 7%, quando comparadas as áreas dos anos de 2017 chegando a 796,85 ha (Tabela 3), com mais de 160 ha superior ao primeiro ano. A classe que ocupou a menor proporção da área de estudo continuou sendo os corpos hídricos, com um pouco mais de 5 ha, equivalendo a 0,25% entres as demais classes.

A classe de cicatrizes de deslizamento sofreu uma leve queda para o ano de 2020 em relação ao ano de 2017, com uma redução discreta de área um pouco mais que 2,6 ha, caindo de 3,68% para 3,22% em proporção de ocupação da área de estudo. Um aumento considerável foi observado para a classe de solo exposto, que subiu de 0,55% no ano de 2017 para 10,95% no de 2020, com mais de 218 ha de diferença entre os anos comparados (Tabela 3). Esta classe se encontra principalmente para o lado Leste do município de Buriticupu-MA, junto às classes de atividade agrícola e de pastagem.

Ainda, a classe de área urbana apresentou uma queda de um pouco mais que 9% na proporção de área ocupada no ano de 2017 para o ano de 2020, sendo reduzida de 507,48 ha (Tabela 2) para 316,32 ha (Tabela 3).

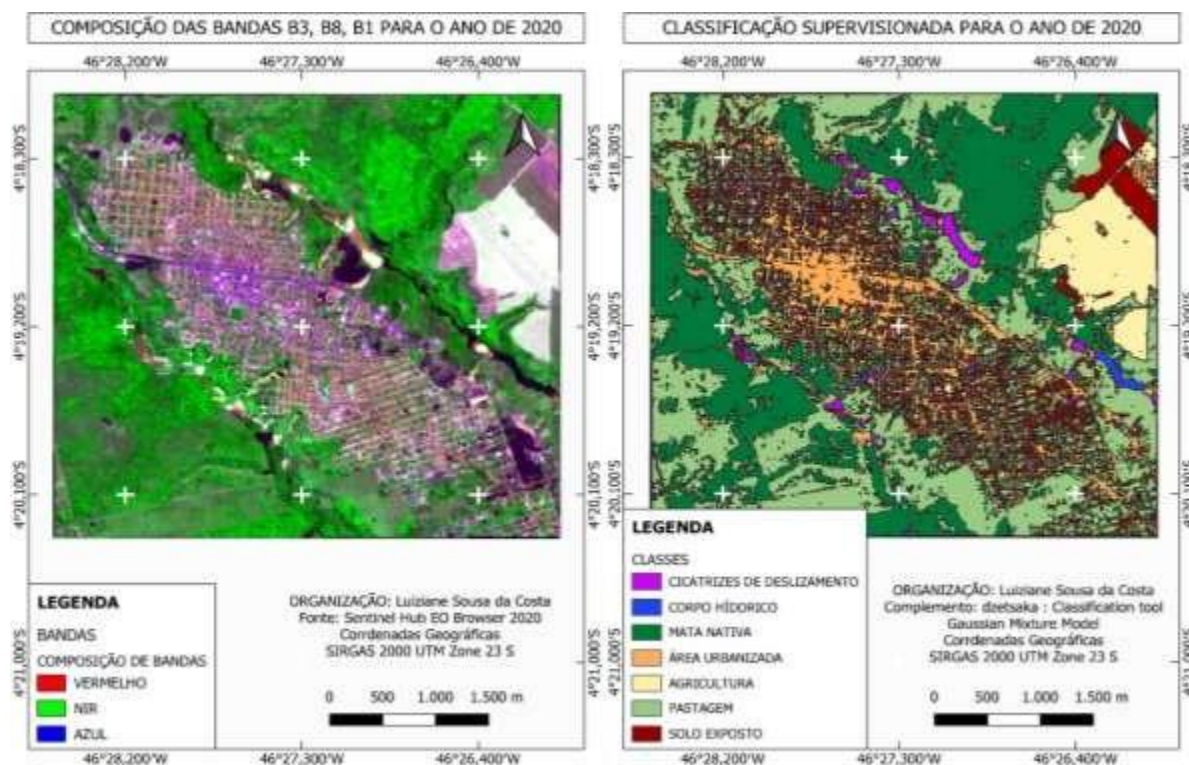


Figura 4-Classificação supervisionada da área urbana do município de Buritcupu-MA para o ano de 2020.

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Tabela 3-Área e porcentagem de cada classe para o ano de 2020.

Classe	Área (ha)	Porcentagem (%)
Solo exposto	229,76	10,95
Cicatrices de deslizamento	67,47	3,22
Mata	541,53	25,81
Pastagem	796,85	37,99
Água	5,26	0,25
Atividade agrícola	140,57	6,70
Área urbanizada	316,32	15,08

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para o ano de 2023 (Figura 5) a classe de mata nativa volta a ocupar a primeira posição em proporção de área ocupada na área de estudo, com 24,90% ou 522,44 ha de toda a área analisada (Tabela 4). Assim como para os dois primeiros anos, a classe de corpos hídricos continuou sendo a classe com menor porcentagem de ocupação da área de estudo, com 0,36% ou um pouco mais de 7,6 ha. Ainda, identificou-se uma queda acima de 18% para a classe de área de pastagem em relação ao ano de 2020, saindo de 796,85 ha para 408,61 ha em 2023, provavelmente em decorrência do aumento da área agrícola, que passou de 82,15 para 140,57 ha.

Para a classe de cicatrizes de deslizamento foi identificado um aumento de quase 5% em área ocupada em relação ao ano de 2020. Ainda para as classes de solo exposto e atividade agrícola foram identificados aumentos de 6,43% e 7,46%, respectivamente. A partir da Figura 5 é possível observar que foram abertas novas áreas para agricultura no lado sudoeste da área urbana do município de Buriticupu-MA, ao passo que no lado leste deste a área que antes era ocupada com agricultura passou a ser quase que totalmente ocupada pela classe de solo exposto, isto é, áreas abandonadas após exploração agrícola. Para a parte mais sudeste da área urbanizada pode-se observar a inserção nesta das classes de cicatrizes de deslizamento e solo exposto.

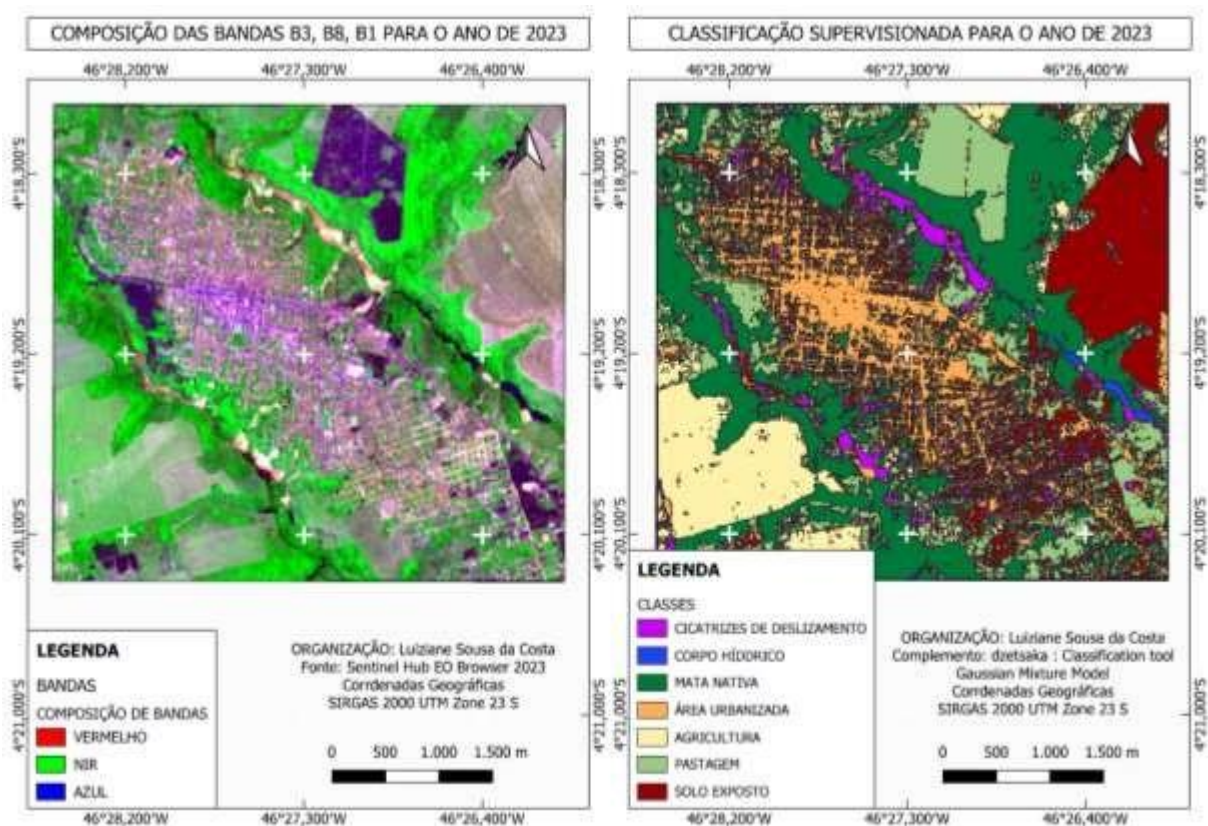


Figura 5-Classificação supervisionada da área urbana do município de Buriticupu-MA para o ano de 2023.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 4-Área e porcentagem de cada classe para o ano de 2023.

Classe	Área (há)	Porcentagem (%)
Solo exposto	364,56	17,38
Cicatrizes de deslizamento	171,4	8,17
Mata	522,44	24,90
Pastagem	408,61	19,48
Água	7,64	0,36
Atividade agrícola	296,97	14,16
Área urbanizada	326,14	15,55

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

5.2. Características ambientais e condicionantes naturais dos processos erosivos por voçorocamento

5.2.1. Solos e Geologia

A litologia é um dos principais fatores que influenciam o processo erosivo. A composição mineralógica das rochas determina sua resistência à erosão. Rochas mais duras, como rochas ígneas e metamórficas, são mais resistentes à erosão do que rochas sedimentares, que são mais facilmente desagregadas. As características estruturais das rochas também influenciam a erosão. Rochas fraturadas ou fissuradas são mais suscetíveis à erosão, pois as fraturas permitem que a água e o vento penetrem mais facilmente nas rochas e as destruam (Campos, 2019).

A geologia do município de Buriticupu, no Maranhão, é marcada pela presença da Bacia Sedimentar do rio Parnaíba. Esta bacia é composta por rochas sedimentares de diferentes épocas geológicas, incluindo o Cretáceo (representado pela formação Itapecuru), o Terciário (representado pelos Depósitos Detrito-Lateríticos) (Figura 6) e o Quaternário (Góes; Feijó, 1994; Brito Neves, 1998). De acordo com Campos (2019) a constituição geológica de Buriticupu apresenta grande vulnerabilidade à erosão, que associada aos demais fatores, configura-se como um importante condicionante dos voçorocamentos.

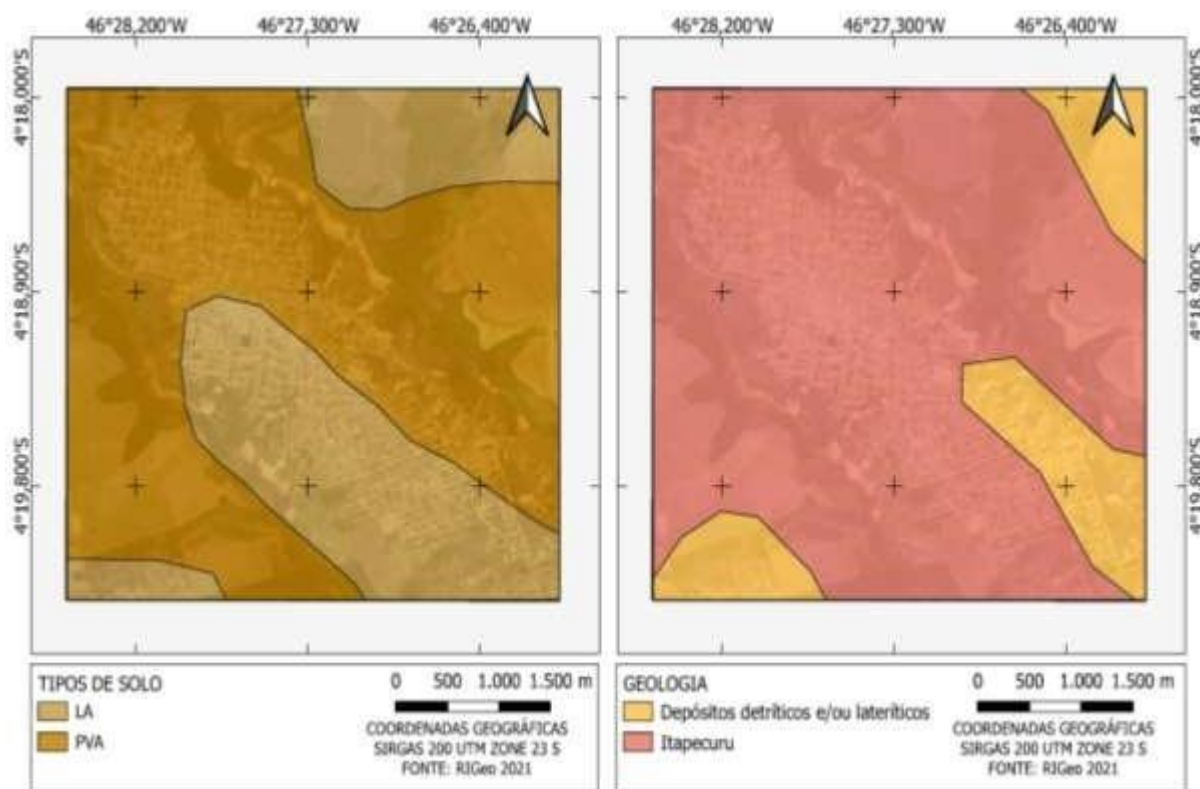


Figura 6-Mapas de solos e geológico do município de Buriticupu-MA.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Há preponderância do Latossolo Amarelo e Argissolo Vermelho Amarelo, esses solos são altamente ácidos, com pH em torno de 4,0. A acidez potencial é formada por uma pequena camada de alumínio e uma grande participação do hidrogênio. O hidrogênio é um elemento dispersante, o que dificulta a formação de agregados no solo. Por outro lado, o óxido de alumínio é um elemento agregante, o que facilita a formação de agregados e, consequentemente, possibilita a estruturação dos solos. No entanto, essa condição contribui grandemente para uma alta erodibilidade da cobertura pedológica no município (Farias Filho, 2019).

Ainda, Farias Filho (2019) destaca que “além dos atributos morfológicos, químicos e físicos dos solos definirem por si só uma elevada suscetibilidade dos solos no município aos processos erosivos, as atividades antrópicas contribuem de forma significativa para a erodibilidade, sendo as atividades mais impactantes: a ocupação de áreas de risco, o péssimo planejamento urbano, atividades agropecuárias degradantes, extração de madeira e supressão de vegetação e queimadas.”

Os Depósitos Detrito-Lateríticos são sedimentos de composição arenosa e argilosa, mal selecionados e mal consolidados. Possuem seixos de quartzo, caulim e limonita dispersos. A coloração é amarelada ou avermelhada, devido à presença de óxidos de ferro. No contato

com as rochas subjacentes, o material é mais grosseiro, podendo formar conglomerados, com maior concentração de seixos de quartzo (Correia Filho et al., 2011). É a que tem maior expressão geográfica e aflora, praticamente, em todos os quadrantes do município de Buriticupu (Figura 7).



Figura 7-Alto grau de intemperização no material de origem no município de Buriticupu-MA.

Fonte: Adaptado de Campos (2019).

5.2.2. Declividade e índice de potência de escoamento

A declividade acentuada das áreas próximas às vertentes (Figura 8) facilita o escoamento superficial das chuvas, levando o material orgânico para longe do solo. Além dos fatores físicos, os químicos também influenciam na erodibilidade dos solos. O pH, o conteúdo de matéria orgânica, a saturação por bases e a capacidade de troca catiônica são alguns dos atributos químicos que contribuem para a erosão (Farias Filho, 2019). No município de Buriticupu, o agravamento dos processos erosivos é observado há décadas (Campos, 2019). Os solos predominantes na região são os Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos e os Latossolos Amarelos distróficos (Medeiros et al., 2023). Esses solos são derivados de materiais geológicos de origem sedimentar pouco consolidados e muito friáveis, o que os torna mais suscetíveis à erosão.

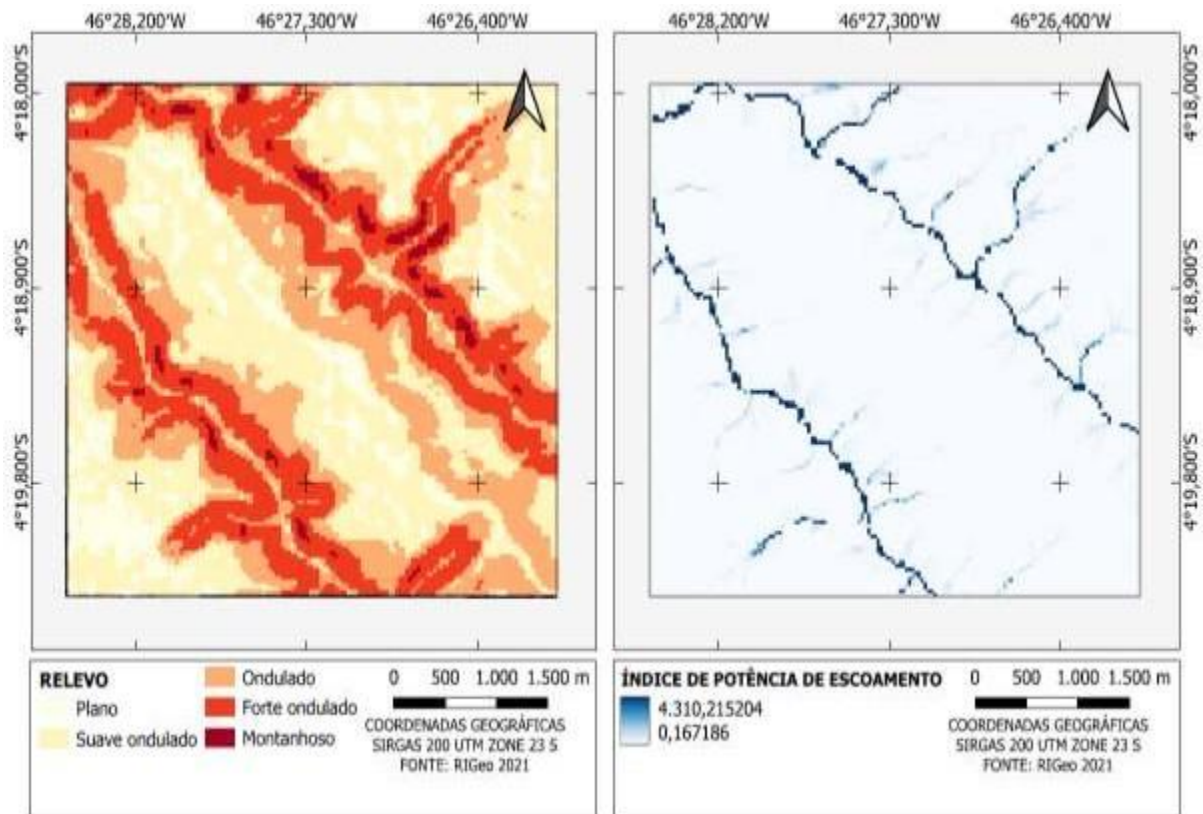


Figura 8-Mapas de declividade e potência de escoamento da área urbana do município de Buriticupu-MA.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Pode-se observar na Figura 8, a área urbanizada do município de Buriticupu que está situada sobre as classes de relevo plano a ondulado, com suas bordas cercadas por relevo forte ondulado em sua maioria. Junto a isto, observa-se que o índice de potência de escoamento mais alto fica exatamente entre as áreas de relevo forte ondulado e montanhoso, o que deixa a área urbana suscetível à erosão em eventos de fortes e/ou prolongadas chuvas, por exemplo, considerando todos os atributos geológicos já mencionados anteriormente para o município. Valores mais elevados de potência do escoamento geralmente correspondem às áreas íngremes, lineares e escarpadas, verificando locais com maior risco de aparecimento de canais de erosão e ravinas. Os baixos valores ocorrem em áreas planas e várzeas, indicando locais de menor risco de ocorrência de processos erosivos por fluxos concentrados (CAPOANE, 2015).

Silva et al. (2019) avaliaram a correlação entre as cicatrizes de deslizamento e o relevo do município de Rio Casca-MG e detectaram que mais de 60% das cicatrizes estão associadas à classe de relevo forte ondulado.

A Tabela 5 mostra a proporção da área de estudo ocupada por cada classe de relevo do município de Buriticupu-MA, onde pode-se observar que mais da metade da superfície em estudo conta com relevo ondulado a forte ondulado quando somados.

Tabela 5–Áreas e porcentagem correspondentes a cada classe de relevo para área urbana de Buriticupu.

Relevo	Declividade (%)	Área (ha)	(%)
Plano	0 a 3	579,85	11,32
Suave	3 a 8	232,81	33,87
Ondulado	8 a 20	507,86	28,19
Forte ondulado	20 a 45	39,50	24,69
Montanhoso	>45	696,63	1,92

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Os dados de precipitação ao longo do período de estudo para a região podem ser observados na Figura 9. Nota-se que por volta de março dos anos de 2020 e 2023 ocorreram os maiores índices pluviométricos, superiores a 500 mm, coincidindo com o agravamento dos eventos de deslizamento que ocorreram nestes anos. Em março de 2023 o município de Buriticupu foi atingido por fortes chuvas que acarretaram fortes enxurradas provocando o desenvolvimento de enormes voçorocas com até 500 m de extensão e 70 m de profundidade, o que arrastou casas e pessoas (G1 Maranhão, 2023).

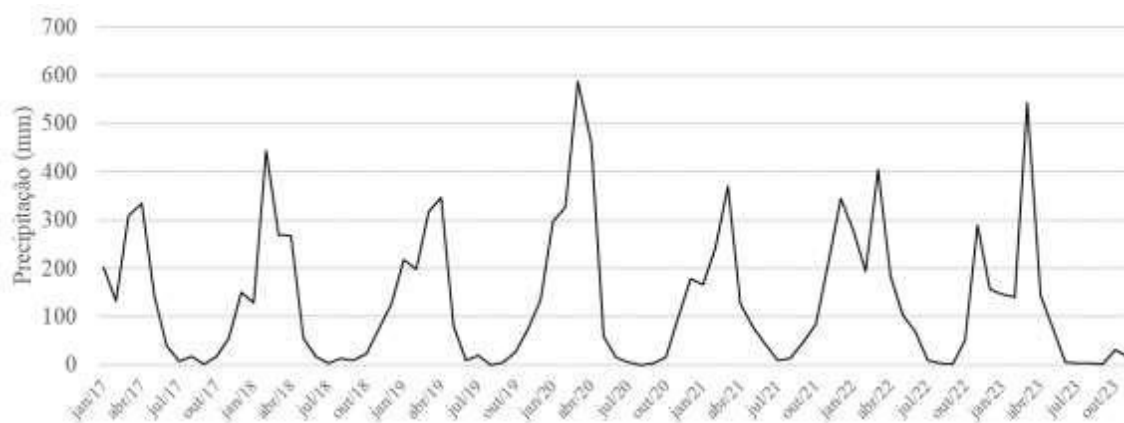


Figura 9- Precipitação mensal do município de Buriticupu, MA de janeiro de 2017 a dezembro a outubro de 2023.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

5.3. Índices de vegetação

Os mapas de índice de vegetação foram essenciais para a tomada de decisão na classificação das áreas para uso da terra e identificação das cicatrizes de deslizamento. Nas Figura 10, 11 e 12 é possível observar os valores de NDVI e SAVI para os anos de 2017, 2020 e 2023, respectivamente. Observa-se que os índices apresentaram sensibilidade à variabilidade espacial de forma semelhante. Para o ano de 2017 a área correspondente à mata correspondia a 64 e 63 % da área delimitada, para NDVI e SAVI respectivamente. No ano de 2020 observa-se

redução da área de mata para 52% para o NDVI e 43% para o SAVI. Nos anos de 2023 observa-se uma grande redução da área de mata correspondendo a apenas 30 para NDVI e 31% para o SAVI. Observa-se uma redução de aproximadamente 20% da área correspondente à mata que circunda o município. Como visto nos mapas de classificação, essa redução se deu pela expansão das áreas agrícolas e das áreas identificada como solo exposto.

Farias Filho et al. (2023), analisou o avanço e consolidação da agricultura intensiva no município de Buriticupu utilizando índices de vegetação e observou aumento de solos expostos, com culturas de médio e alto vigor vegetativo e redução de cobertura vegetal nativa. Constatou-se também que parte das atuais áreas agrícolas ocupam antigas pastagens e que o avanço da agricultura intensiva tem prejudicado a população das comunidades.

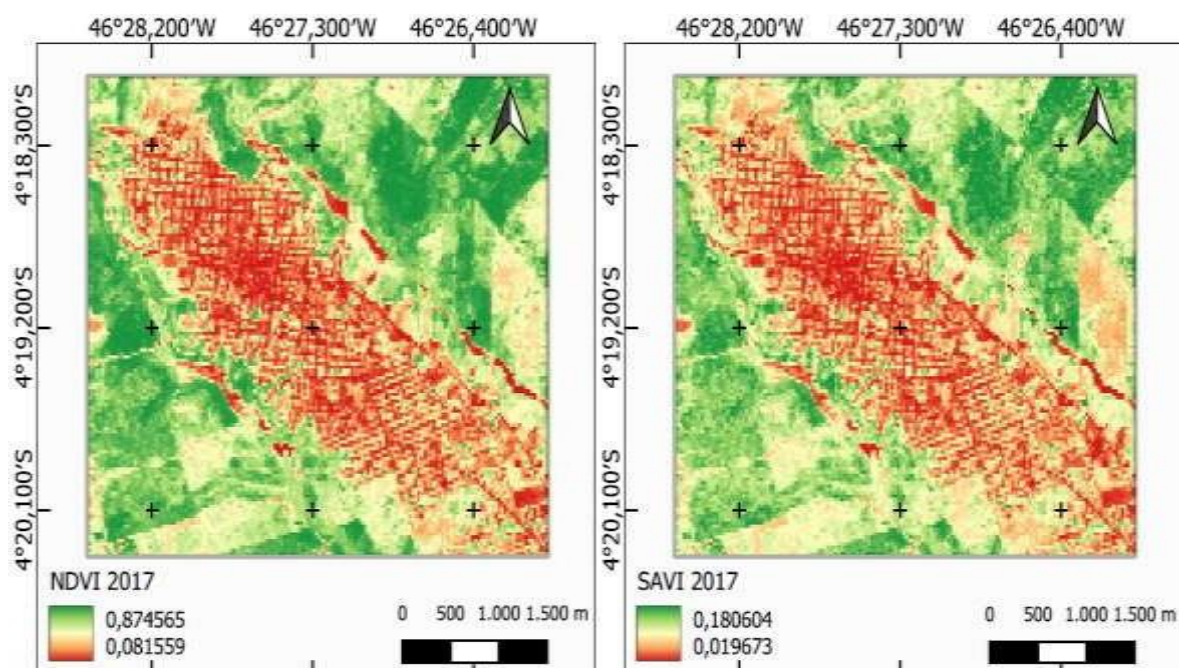


Figura 10- Índices de vegetação NDVI e SAVI da área urbana do município de Buriticupu-MA para o ano de 2017.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

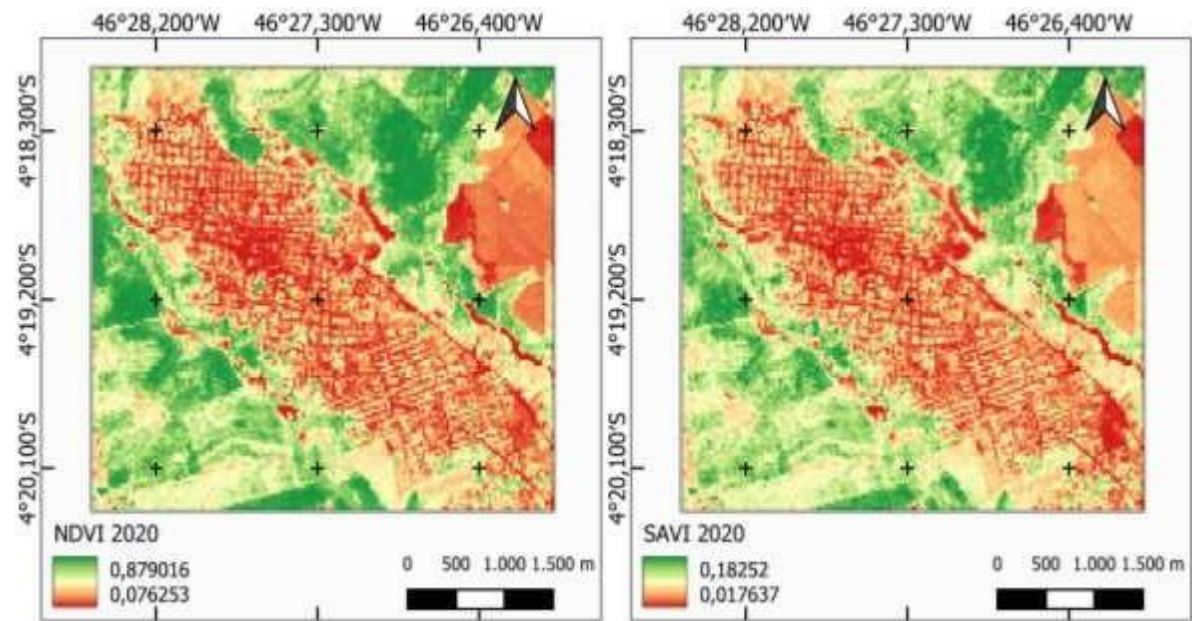


Figura 11- Índices de vegetação NDVI e SAVI da área urbana do município de Buriticupu-MA para o ano de 2020.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

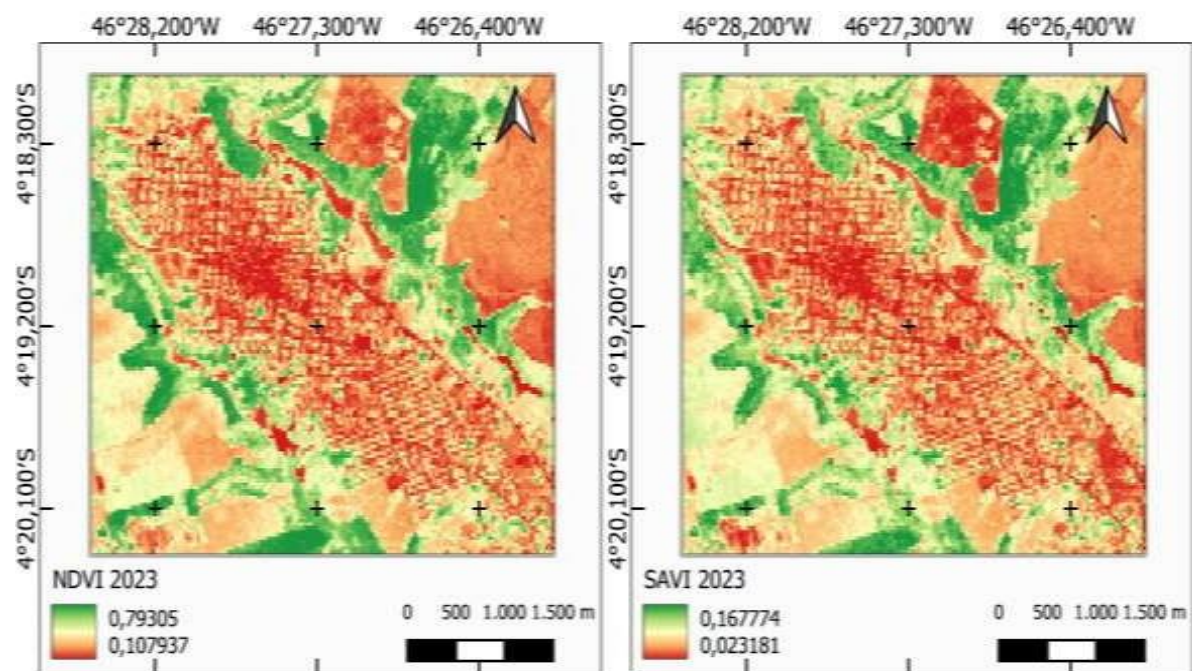


Figura 12- Índices de vegetação NDVI e SAVI da área urbana do município de Buriticupu-MA para o ano de 2023.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

6.0. CONCLUSÃO

A partir dos mapas de classificação foi possível identificar uma grande expansão das cicatrizes de deslizamento que ocorreram no período de 2017 a 2023.

As ações antrópicas em consonância com as características de solo e relevo observadas na área de estudo tiveram grande influência para intensificação dos processos erosivos.

Apesar das poucas alterações na área urbanizada, observou-se que houve grande expansão susceptível à erosão. E como consequência intensa redução da área de mata.

7.0. REFERÊNCIAS

- ALFARABI, Mochamad Seandy; SUPRIATNA, Supriatna; MANESA, Masita Dwi Mandini; RUSTANO, Andry. Geomorphology and Landslide-Prone Area in Cisolok District, Sukabumi Regency. **E3S Web Conf.** [S. I.], v. 125, p. 1-6, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912501005>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: [10.1127/0941-2948/2013/0507](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507).
- APPAH, John. Understanding cold-water corals' health and ecosystems on the Irish margin, NE Atlantic; a critical look into the ecology, geology, hydrodynamic processes and human impacts. 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10468/14468/>. Acesso em 07 out. 2023.
- BACK, Álvaro José; POLETO, Cristiano. Distribuição espacial e temporal da erosividade das chuvas no estado de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**. [S. I.], v. 22, p. 381-403, 2018. Disponível em: [http://hdl.handle.net/10183/179648](https://hdl.handle.net/10183/179648). Acesso em: 08 out. de 2023.
- BISHOP, A. W.; WOOLF, A. B. **Geological Perspectives of Global Climate Change**. Oxford University Press. 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Keith-Kvenvolden-2/publication/251431257_Gas_hydrates-Geological_perspective_and_global_change/links/5494660e0cf2ec133755bde6/Gas-hydrates-Geological-perspective-and-global-change. Acesso em 17 dez. de 2023.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212100/1/SNLCS-Miscelania-1-1979.pdf>. Acesso em: 05 jan de 2024.
- JACOMINE, P. K. T. 1986. Levantamento exploratório – Reconhecimento de solos do Estado do Maranhão. vol. 1. EMBRAPA/SNLCS: Rio de Janeiro (Boletim de Pesquisa, 35). 522p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/336095>. Acesso em: 16 dez. de 2023.
- CAMPOS, Augusto Antonio Carvalho. Condicionantes dos processos erosivos na área urbana de Buriticupu–MA: o caso da voçoroca do bairro Santos Dumont. 2019. Disponível em: <http://localhost:8080/jspui/handle/123456789/1692>. Acesso em: 16 dez. de 2023.
- CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. INPE, São José dos Campos. 2001. 345 p. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao>. Acesso em: 17 dez. de 2023.
- APOANE, Viviane. Utilização do fator topográfico da RUSLE para análise da susceptibilidade a erosão do solo em uma bacia hidrográfica com pecuária intensiva do Sul do Brasil. **Revista Geonorte**. [S. I.], v. 4, n. 11, p. 85-101, 2013. Disponível em: <https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1137>. Acesso em: 08 out. de 2023.

CARVALHO, José Camapum de; LIMA, Marisaides Cruz; MORTARI, Diógenes. Considerações Sobre Prevenção e Controle de Voçorocas. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia-GO, p. 1-10, 03 a 06 de maio de 2001. Disponível em: <https://livrozilla.com/doc/960289/considera%C3%A7%C3%B5es-sobre-preven%C3%A7%C3%A3o-e-controle-de-vo%C3%A7orocas>. Acesso em 08 out. de 2023.

COUTO, Xoán. **A adoção de práticas agroecológicas por camponeses: estudo de caso no oeste maranhense**. Belém, 2015. 122 p. TESE (Mestrado em Agriculturas Familiares e Desenvolvimento Sustentável) - Universidade federal do Pará. Disponível em: https://ppgaa.propesp.ufpa.br/dissertacoes_mafds/XOAN%20CARLOS%20SANCHEZ.pdf.

ERICKSON, Silva Almeida; COELHO, Emanuel Martins Simões. Processo de recuperação de área degradada por voçorocas. **Revista Científica Semana Acadêmica**. Fortaleza, 2016. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/processo-de-recuperacao-de-area-degradada-por-vocorocas>. Acesso em: 02 out. de 2023.

FERREIRA, Leandro Valle. 2007. A vegetação da campinarana do Campo dos Perdidos em São Luiz do Tapajós: subsídios para a criação de uma unidade de conservação. **Revista ufj**, Belém, Pará, p. 49-67. Disponível em: <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/download/72354/38667/349612>. Acesso em: 17 de dez. de 2023.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 2ª ed. do Imagens para Estudos Ambientais. Oficina de Textos, São Paulo, 2007. 101p. Disponível em: https://www.poisson.com.br/livros/cartografia/sensoriamento_remoto/fundamentos_e_uso_vo_l1.pdf. Acesso em: 17 dez. de 2023.

GRAY, Murray. Geodiversity: A significant, multi-faceted and evolving, geoscientific paradigm rather than a redundant term. **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 132, n. 5, p. 605-619, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2021.09.001>.

Golfari, L. 1980. Zoneamento ecológico para reflorestamento da área de influência da Serra de Carajás. **Revista da CVRD**, 1(2):8-18. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672008000400004>.

HESTER, R. E., & Harrison, R. M. (Eds.). (2007). **Geologia do Solo e Contaminação do Solo**. Royal Society of Chemistry. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/11949/1/>. Acesso em: 05 jan. 2024.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Amazônia Legal**. 2013. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 04 out. de 2023.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Queimadas**. 2014. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>. Acesso em: 04 out. de 2023.

Jesus, R.M. de; Menandro, M.S.; Thibau, C.E. 1986. Manejo florestal em Buriticupu. Anais 1 Simpósio do Trópico Úmido. EMBRAPA/CPATU: Belém. p.245-251. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672008000400004>.

JULIANA SOUSA PEREIRA; SILVIO CARLOS RODRIGUES. Estudos sobre Voçorocas: uma avaliação da produção científica brasileira (2009/2019). v. 34, n. 1, 26 set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-65923>.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. – KÖPPEN, W.; R. GEIGER (Eds.): Handbuch der Klimatologie. – Gebrüder Bornträger, Berlin, 1, 1-44, part C. 1936. Disponível em: https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1936.pdf. Acesso em: 17 dez. de 2023.

LOPES, R.L. et al. Geoprocessamento do uso e cobertura do solo no Estado de São Paulo: uma análise do ciclo canavieiro. Geographia Meridionalis, v.18, n.1, p. 21-32, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/download/4982/3769>. Acesso em: 08 out. de 2023.

MAGALHÃES, Ricardo Aguiar. Erosão: Definições, Tipos e Formas de Controle. **In:** VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia- GO, 03 a 06 de maio de 2001. Disponível em: <https://docplayer.com.br/4579307-Ricardo-aguiar-magalhaes-companhia-energetica-de-minas-gerais-cemig-e-mail-richard-cemig-com-br-resumo-abstract-introducao-metodologia-definicoes.html>. Acesso em: 17 dez. de 2023.

MATSUSHITA, B.; YANG, W.; CHEN, J.; ONDA, Y. G. Qiu Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest Sensors, 7 (2007), p. 2636–2651. DOI: <https://doi.org/10.3390/s7112636>.

MONTGOMERY, D. R. (2007). **Soil Erosion and Agricultural Sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences**. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>.

Acesso em jan. 2024.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). Climate Change: Vital Signs of the Planet. 2018. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/>. Acesso em: 04 out. 2023

OLIVEIRA, L. A. et al. Avaliação da vulnerabilidade da expansão urbana acelerada em áreas de encosta: estudo de caso no município X. **In:** Anais do Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 8, São Paulo. 2021.

ÖZDOĞAN, MEHMET; DELİORMANLI, AHMET. Landslide detection and characterization using terrestrial 3d laser scanning (lidar). **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 16, n. 4, 2019. DOI: [10.13168/AGG.2019.0032](https://doi.org/10.13168/AGG.2019.0032).

PANACHUKI, Elói; ALVES SOBRINHO, Teodorico; VITORINO, Antônio Carlos Tadeu; CARVALHO, Daniel Fonseca de; URCHEI, Mário Artemio. Avaliação da infiltração de água no solo, em sistema de integração agricultura-pecuária, com uso de infiltrômetro de aspersão portátil. **Acta Sci. Agron.**, v. 28, n. 1, p.129-137, 2006. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/252952>. Acesso em: 08 out. de 2023.

PANACHUKI, Elói; BERTOL, Ildegardis; ALVES SOBRINHO, Teodorico; OLIVEIRA, Paulo Tarso Sanches de; RODRIGUES, Dulce Buchala Bicca. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. [S. l], v. 35, n. 5, p.1777- 1785, 2011. DOI: [10.1590/S0100-06832011000500032](https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500032).

PANAGOS, Panos; BORRELLI, Pasquale; MEUSBURGER, Katrin; ALEWELL, Christine; LUGATO, Emanuele; MONTANARELLA, Luca. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. **Land Use Policy**. [S. l.], v. 48, p. 38-50, 2015. DOI: [10.1016/j.landusepol.2015.05.021](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021).

SANTOS, Celso Santos; GALVÃO, Thiago. Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas em áreas urbanas. In: CARACTERIZAÇÃO E TIPOLOGIA DE ASSENTAMENTOS PRECÁRIOS: ESTUDOS DE CASOS BRASILEIROS. Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9613>. Acesso em: 02 out. de 2023.

SANTOS, Ivaneide. **Novas metodologias para representação geoespacial e valorização dos elementos da geodiversidade**: integração de geotecnologias, recursos online e realidade aumentada. Pernambuco, 2017. 268 p. TESE (Mestrado em Geociência) - Universidade federal do Pernambuco. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/23189>. Acesso 17 dez. de 2023.

SILVA, G. S. T. et al. Agricultura de precisão: uma revisão bibliográfica. *Revista de Agricultura Neotropical*, v. 7, n. 1, p. 79-95, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000100027>.

SILVA, Max Gonçalves dos Santos e; LOBON, German Sans; FERREIRA, Nilson Clementino; SCALIZE, Paulo Sergio. Análise evolutiva de processo erosivo acelerado em uma área urbana da cidade de Goiânia. **Revista Monografias Ambientais**. [S. l.], v. 14, n. 2, p. 38-48, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236130817991>.

SOUZA, R. A.; SANTOS, M. P. Expansão urbana e impactos ambientais: um estudo das áreas de encosta em Palmas - TO. **Revista Geográfica de América Central**, v. 2 (62E), p.1-18, 2018. Disponível em: <https://www.revistaea.org/pf.php?idartigo=2447>. Acesso em: 17 dez. 2023.