



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL

CAMPUS ARAPIRACA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE – PPGAA

MESTRADO EM AGRICULTURA E AMBIENTE

JÉSSICA EMILY DOS SANTOS SILVA

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A DESERTIFICAÇÃO NA BACIA
LEITEIRA DE ALAGOAS**

ARAPIRACA

2023

Jéssica Emily dos Santos Silva

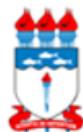
Identificação de áreas susceptíveis a desertificação na bacia leiteira de Alagoas

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Alagoas como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, para a obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. José Vieira Silva

Arapiraca

2023



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus Arapiraca
Biblioteca Setorial *Campus Arapiraca* - BSCA

S586i Silva, Jessica Emily dos Santos
Identificação das áreas susceptíveis a desertificação na bacia leiteira de Alagoas
[recurso eletrônico] / Jéssica Emily dos Santos Silva. – Arapiraca, 2026.
75 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Vieira Silva.
Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) – Programa de Pós-Graduação
em Agricultura e Ambiente Universidade Federal de Alagoas, *Campus Arapiraca*,
Arapiraca, 2023.
Disponível em: Universidade Digital (UD) – UFAL (*Campus Arapiraca*).
Referências: f. 66-75.

1. Desertificação. 2. Semiárido - Alagoas. 3. Caatinga. I. Silva, José Vieira.
II. Título.

CDU 636

Jéssica Emily dos Santos Silva

Identificação de áreas susceptíveis a desertificação na bacia leiteira de Alagoas

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Alagoas como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, para a obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Data de Aprovação: 12/04/2023

Banca Examinadora



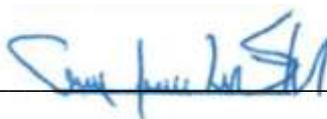
Prof. Dr. José Vieira Silva
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Campus de Arapiraca
(Orientador)



Prof. Dr. Humberto Alves Barbosa
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Campus A.C. Simões
(Examinador)



Prof.ª Dr.ª Flávia de Barros Prado Moura
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Campus A.C. Simões
(Examinador)



Prof. Dr. Cícero Gomes dos Santos
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Campus de Arapiraca
(Examinador)

AGRADECIMENTOS

Louvado seja Deus por nos transmitir Seu imenso amor através dos dons concedidos, os quais tornam possível a realização de sonhos que outrora pareceram inatingíveis. À Virgem Santíssima, minha eterna gratidão, pois sua intercessão tornou suave os desafios vivenciados.

Agradeço ao meu esposo Davi por acreditar em mim mesmo quando eu duvidei, por não medir esforços para que eu voe cada vez mais alto. Sua presença em minha vida é de fato uma dádiva.

Aos meus pais, que desde menina me incentivaram e ensinaram a ser perseverante. Aos meus irmãos pelos olhares de ternura e admiração, que enchem meu coração de confiança e me inspiram a ser melhor a cada dia. Aos amigos de toda uma vida que comigo compartilharam momentos de amadurecimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Vieira Silva por toda a confiança em mim depositada, por todos os conselhos em decisões cruciais, que tanto contribuíram para o meu desenvolvimento humano e intelectual. Desejo ter algum dia um coração tão generoso quanto o seu.

À Leandro R. M. da Silva e Anderson dos Santos, meu muito obrigada. Não conseguiria ter chegado aqui sem todo o conhecimento que comigo compartilharam. A vocês todo o meu respeito e admiração. Deus os abençoe.

Gratidão à Universidade Federal de Alagoas por seu compromisso com a educação pública. Aos professores do curso de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente cujas aulas me proporcionaram o deleite da ciência. Agradeço ainda ao motorista Danilo, sempre muito solícito durante as viagens à campo.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste sonho. Que Deus abençoe imensamente cada um de vocês.

RESUMO

Localizada na região Nordeste, a região semiárida do estado de Alagoas corresponde a aproximadamente 32% de seu território e ao longo dos anos vem demonstrando diversos indícios de desertificação. A desertificação é um processo derivado da degradação das terras nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de um conjunto de fatores naturais e antrópicos, que incluem variações climáticas e atividades humanas, sendo considerado um dos maiores problemas ambientais da contemporaneidade. Por conseguinte, objetivou-se identificar, através do sensoriamento remoto e de visitas em campo, territórios desertificados ou com um alto nível de degradação em municípios do Semiárido de Alagoas. Desse modo, dados de satélite referentes ao período de 2013 a 2022 foram empregados para a identificação e o monitoramento de regiões desertificadas ou em potencial, sendo processados no Qgis. Além disso, fotografias e anotações foram feitas através de visitas na área de estudo. Foi constatado que os diferentes níveis de precipitação ao longo da série temporal têm efeito significativo sobre os índices de desertificação, que apresentaram melhores resultados para períodos de maior umidade. A atividade pecuária é predominante no território analisado, seguido de floresta que, ainda assim, teve sua área reduzida em detrimento da ascensão da agropecuária. A expressiva degradação da área de estudo e a intensa antropização das áreas classificadas como naturais no MapBiomas foram evidenciadas através das visitas em campo, indicando a vulnerabilidade da região ao processo de desertificação. O sensoriamento remoto fornece informações valiosas acerca da dinâmica espaço-temporal de determinada região, entretanto, assegurar a integridade de seus dados por meio do monitoramento *in loco* é imprescindível, dadas as limitações as quais as ferramentas de geoprocessamento estão submetidas.

Palavras-chave: desertificação; semiárido; Alagoas; Caatinga.

ABSTRACT

The Alagoas state is located in the Brazilian Northeast and has about 32% of its area covered by the semi-arid region. Over the years, this semi-arid region has shown strong and diverse signs of susceptibility to desertification. Desertification is a process derived from land degradation in arid, semi-arid and dry sub-humid zones, resulting from a set of natural and anthropic factors, which include climate variations and human activities, being considered one of the greatest contemporary environmental problems. In this way, through remote sensing and field visits, the objective was to identify desertified territories or those with a high level of susceptibility to degradation in the semiarid region of Alagoas. Thus, satellite data referring to the period from 2013 to 2022 were used to identify and monitor desertified or potential regions, being processed in Qgis. In addition, photographs and notes were taken through on-site visits to the study area. It was found that the different levels of precipitation along the time series have significant effects on desertification rates, which showed better results for periods of higher humidity. Livestock activity is predominant in the territory analyzed, followed by the forest, which, even so, had its area reduced due to the rise of agriculture and livestock. The significant degradation of the study area and the intense anthropization of areas classified as natural in MapBiomas were evidenced through field visits, indicating the region's high vulnerability to the desertification process. Remote sensing provides valuable information about the space-time dynamics of a given region, however, ensuring data integrity through in loco monitoring is essential, given the limitations to which geoprocessing tools are subject.

Keywords: desertification; semi-arid; Alagoas; Caatinga.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do trabalho.....	27
Figura 2 - Localização dos municípios do estado de Alagoas que correspondem a área de estudo.....	28
Figura 3 - Localização dos pontos selecionados para a visita na área de estudo.....	36
Figura 4 - Dinâmica de uso e cobertura do solo para municípios do semiárido alagoano.....	37
Figura 5. Reclassificação de uso e cobertura do solo na área de estudo entre 2013 e 2021.....	39
Figura 6 - Precipitação anual acumulada (mm) para a área de estudo de 2013 a 2022.....	40
Figura 7 - Precipitação espacializada de 90 dias para a área de estudo.....	41
Figura 8 - Distribuição espaço-temporal do NDVI em municípios do semiárido alagoano.....	42
Figura 9 - Distribuição espaço-temporal do SAVI em municípios do semiárido alagoano.....	47
Figura 10 - Distribuição espaço-temporal do TGSÍ em municípios do semiárido alagoano.....	49
Figura 11 - Distribuição espaço-temporal do albedo em municípios do semiárido alagoano.....	51
Figura 12 - Áreas visitadas no município de Jaramataia, em 15/02/2023, correspondentes aos pontos 1 (A) e 2 (B).....	54
Figura 13 - Áreas visitadas no município de Batalha, em 15/02/2023, correspondentes aos pontos 3 (A) e 4 (B).....	55
Figura 14 - Registro <i>in loco</i> de trecho do rio Ipanema, em Batalha.....	55
Figura 15 - Área visitada no município de Belo Monte, em 15/02/2023, correspondente aos pontos 5 (A e B).....	56
Figura 16 - Área visitada no município de Belo Monte, em 15/02/2023, correspondente ao ponto 6 (A e B).....	57
Figura 17 - Áreas visitadas no município de Jacaré dos Homens, em 15/02/2023, correspondentes aos pontos 7 (A) e 8 (B).....	57
Figura 18 - Área visitada no município de Monteirópolis, em 15/02/2023, correspondente ao ponto 9 (A e B).....	58
Figura 19 - Área visitada no município de Monteirópolis, em 15/02/2023, correspondente ao ponto 10 (A, B, C e D).....	59
Figura 20 - Área visitada no município de São José da Tapera, em 16/02/2023, correspondente ao ponto 11.....	59
Figura 21 - Área visitada no município de São José da Tapera, em 16/02/2023, correspondente ao ponto 12.....	60

Figura 22 - Áreas visitadas no município de Pão de Açúcar, em 16/02/2023, correspondentes aos pontos 13 (A) e 14 (B, C e D).....	61
Figura 23 - Áreas visitadas no município de Palestina, em 16/02/2023, correspondentes aos pontos 15 (A) e 16 (B).....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do Landsat 8/OLI.....	30
Tabela 2 - Caracterização das imagens selecionadas para o estudo.....	30
Tabela 3 - Grupos de classes do MapBiomas Brasil segundo as alterações ocorridas entre os anos de 2013 e 2021.....	32
Tabela 4 - Localização dos pontos definidos para a visita in loco na área de estudo.....	35
Tabela 5 - Distribuição das classes de Uso e Cobertura do Solo para 2013 e 2021.....	38
Tabela 6 - Distribuição das classes do NDVI para a área analisada.....	43
Tabela 7 - Comparação da distribuição territorial (km ²) dos Índices SAVI e NDVI na área de estudo.....	46
Tabela 8 - Área (%) correspondente às classes do TGSI.....	49
Tabela 9 - Área correspondente à distribuição do Albedo de superfície, em porcentagem (%)......	52
Tabela 10 - Temperatura (°C) registrada no decorrer das visitas aos pontos na área de estudo.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APD	Áreas em Processo de Degradação resultante da ação antrópica
CHIRPS DAILY	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data
GEE	Google Earth Engine
GPS	Global Positioning System
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
NDVI	Normalized difference vegetation index
OLI	Operational Land Imager
ONU	Organização das Nações Unidas
QGIS	<i>Quantum</i> Gis
REM	Fluxo de radiação eletromagnética
SAVI	Soil-adjusted vegetation index
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithms for Land
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TGSI	Topsoil grain size index
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
3	REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1	SEMIÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO	14
3.2	BIOMA CAATINGA	15
3.3	DESERTIFICAÇÃO	17
3.4	SENSORIAMENTO REMOTO	20
3.4.1.1	Normalized difference vegetation index – NDVI.....	23
3.4.1.2	Soil-adjusted vegetation index – SAVI	24
3.4.1.3	Topsoil grain size index – TGSI.....	24
3.4.1.4	Albedo	25
4	METODOLOGIA	27
4.1	FLUXOGRAMA DA PESQUISA	27
4.2	ÁREA DO ESTUDO	28
4.3	DADOS ESPACIAIS	29
4.4	PRECIPITAÇÃO	31
4.5	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	31
4.6	INDICADORES DE DESERTIFICAÇÃO.....	33
4.7	DADOS DE CAMPO	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	USO E COBERTURA DO SOLO	37
5.2	PRECIPITAÇÃO	39
5.3	INDICADORES DE DESERTIFICAÇÃO.....	41
5.3.1	Normalized difference vegetation index – NDVI.....	41
5.3.2	Soil-adjusted vegetation index – SAVI	44
5.3.3	Topsoil grain size index – TGSI.....	48
5.3.4	Albedo	50
5.4	DADOS DE CAMPO.....	53
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

No Semiárido do Brasil destaca-se o bioma Caatinga cuja variedade fisionômica é resultado da grande diversidade das condições ambientais, tendo como principais fatores o clima e a pedogênese. Os diferentes tipos de solos e fisionomias constatados em sua extensão territorial e a distribuição geralmente esparsa de suas árvores e arbustos constitui um ecossistema terrestre de grande riqueza biológica (SOUZA *et al.*, 2019). Entretanto, estima-se que aproximadamente 80% da vegetação da Caatinga foi impactada pelas atividades agropecuária e extrativista, proporcionando um cenário propício à degradação do solo (SOUZA; ARTIGAS; LIMA, 2015).

A degradação do solo em regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de diferentes fatores, tais como as variações climáticas e atividades humanas, é caracterizada como desertificação. Esse processo é considerado um dos maiores problemas ambientais da contemporaneidade e constitui um dos grandes entraves ao desenvolvimento das áreas secas do planeta (IPCC, 2020; BEZERRA *et al.*, 2020).

O processo de desertificação consagra riscos de cunho ambiental e social. De um lado, por interferir na biodiversidade, diminuir a disponibilidade hídrica e provocar a perda física e química dos solos e, por outro lado, em razão de transformar terras agricultáveis em terras inférteis e improdutivas, comprometendo as atividades ligadas ao campo, a produção de alimentos e à seguridade da população local, corroborando para eventos migratórios (ALBUQUERQUE, 2020).

O semiárido nordestino apresenta elevadas temperaturas e taxas de insolação, além de pouca amplitude térmica. Os totais pluviométricos são baixos e apresentam alta variabilidade no tempo e espaço. Elevadas taxas de evapotranspiração e déficit hídrico também podem ser verificadas nesta localidade (ZANELLA, 2014). Ademais, o Nordeste brasileiro é considerado uma das regiões secas mais populosas do planeta. Essas características corroboram para que o território nordestino seja considerado a região do Brasil que apresenta maiores problemas ambientais de degradação da terra e desertificação (BEZERRA *et al.*, 2020).

Localizado na região Nordeste, o estado de Alagoas é formado por 102 municípios em uma extensão territorial de 27.830,661 km² da qual 8.819,30 km² corresponde a sua porção semiárida (IBGE, 2018). Um estudo do Instituto do Meio Ambiente de Alagoas (IMA, 2018) indica que o semiárido alagoano é uma área susceptível a desertificação e diversos municípios já têm demonstrado sinais de que esse processo está ocorrendo em pelo menos 90% de seu território, são eles Monteirópolis, Palestina, São José da Tapera, Jacaré dos Homens, Pão de

Açúcar, Batalha, Belo Monte e Jaramataia. Dada a conjuntura, faz-se necessário conter a degradação ambiental para prevenir a desertificação e/ou mitigar seus efeitos.

A dinamicidade dos processos que contribuem para a desertificação exige a utilização de técnicas de monitoramento para identificar mudanças no ambiente de forma rápida, prática e eficiente. A utilização do sensoriamento remoto é uma alternativa para a realização dessa avaliação, devido sua rapidez e baixo custo operacional, além de se mostrar eficiente no cálculo dos parâmetros biofísicos (TEIXEIRA *et al.*, 2019).

O sensoriamento remoto admite, a partir de sensores que captam a radiação solar emitida ou refletida pela superfície, medir grandezas físicas que estão associadas, por exemplo, ao crescimento e à avaliação da vegetação, proporcionando a criação de modelos de quantificação de biomassa ou a detecção de anomalias fenológicas presentes na vegetação nativa, essenciais à análise dos impactos ambientais sobre diversas variáveis de determinado ambiente (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2014). Quando validadas em campo, a contribuição de tais informações pode ser estendida as mais diversas áreas do conhecimento, corroborando para o planejamento de ações que visam combater e recuperar áreas em desertificação e conservação da biodiversidade.

Destarte, o uso de técnicas para o monitoramento e avaliação da ocorrência de desertificação no semiárido alagoano poderá contribuir para a elucidação de dados precisos referentes a essa temática?

2 OBJETIVOS

Identificar áreas desertificadas ou altamente degradadas no Semiárido Alagoano, durante os anos de 2013 a 2022, com emprego de dados de sensoriamento remoto, visando:

- Determinar NDVI (Normalized difference vegetation index), SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index), TGSi (Topsoil grain size index) e Albedo de superfície para o período de 2013 a 2022;
- Definir o comportamento da vegetação no espaço e tempo quanto à precipitação;
- Analisar a transição de classes de uso e cobertura do solo;
- Verificar a eficácia dos dados de cada índice no reconhecimento de áreas desertificadas;
- Validar dados remotos através de visitas *in loco* no território do Semiárido de Alagoas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 SEMIÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO

A região semiárida do Nordeste brasileiro compreende uma área de 1.182.697 km², onde estão inseridos 1.262 municípios. Aproximadamente 28 milhões de pessoas vivem nesta região, o que corresponde a 46% da população do Nordeste e 13% da população nacional (SUDENE, 2021), tornando-se uma das regiões secas mais populosas do mundo (AB'SABER, 1985; REGO, 2012), bem como uma das maiores áreas propensa ao fenômeno de desertificação (INSA, 2014).

O Semiárido brasileiro é uma região bastante afetada pela ocorrência de secas. A existência deste espaço é justificada pela união de fatores climáticos que se referem a influência de centros de alta pressão originados no Atlântico Sul, que invadem os sertões secos, e a presença de massas de ar equatoriais nas depressões interplanálticas nordestinas (SUDENE, 2021).

Seus aspectos climáticos são caracterizados pela insuficiência e má distribuição de chuvas, dispondo de uma média anual que varia entre 300 e 800 mm ao ano, com períodos seco e chuvoso de 6-8 e 4-6 meses, respectivamente. Além disso, as altas temperaturas médias anuais que vão de 23° a 27°C, como também a elevada evapotranspiração potencial de aproximadamente 3.000 mm ao ano são fatores que engendram prejuízos diversos, tais como baixo rendimento das atividades agropecuárias e suprimento hídrico ineficiente para populações rurais e urbanas (SILVA *et al.*, 2010).

Com uma economia em crise decorrente da falta de organização das suas principais atividades econômicas, historicamente vinculadas à criação de gado e ao plantio de lavouras, sobretudo de algodão, a maior parte da população do Semiárido vive de uma “economia sem produção”, isto é, baseada nas transferências de renda promovidas pelo governo (SILVA *et al.*, 2010; TEIXEIRA, 2016). A intensificação do processo de desertificação tende a agravar ainda mais esse cenário, pois ela atinge diretamente o desenvolvimento da agropecuária, dado que a degradação do solo prejudica os recursos hídricos, a vegetação e a biodiversidade das áreas afetadas, provocando impactos econômicos e sociais que reduzem significativamente a qualidade de vida da população (BEZERRA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2010).

A susceptibilidade das regiões sujeitas à desertificação é determinada por altas taxas de evapotranspiração, baixa precipitação anual, alta concentração populacional e elevado índice de pobreza. Cerca de 20% do território brasileiro possui áreas degradadas, sendo o Nordeste a

localidade cujas áreas convenientes ao processo de desertificação totalizam 1.143.491 km², contudo o grau de conhecimento destes processos degradativos e sua extensão ainda não são suficientes, demandando constantes atualizações (BEZERRA *et al.*, 2020; PAN BRASIL, 2004).

Uma variedade de solos pode ser encontrada no Semiárido brasileiro, sob a predominância de Neossolos Litólicos (19%), Latossolos (19%), Argissolos (15%) e Luvisolos (13%), que representam 66% dos 15 tipos de solos existentes na Caatinga (SALCEDO; SAMPAIO, 2008). Entraves de fertilidade e profundidade do perfil, como também limitações de drenagem e de elevados teores de sódio (Na) trocável, fazem com que cerca de 82% da região revele solos de baixo potencial produtivo (CUNHA *et al.*, 2008; SILVA, 2000).

A região apresenta um relevo muito variável. Sua altitude média fica entre 400 e 500 m, podendo atingir 1.000 m. Aproximadamente 37% da área é de encostas com 4 a 12% de inclinação, sendo que 20% dessas encostas têm inclinação maior que 12%, o que estabelece uma presença marcante de processos erosivos nas áreas antropizadas. Tais aspectos contribuem para a ocorrência das 17 grandes unidades de paisagem encontradas na região, subdivididas em 105 unidades geoambientais, de um total de 172 no Nordeste como um todo (SILVA *et al.*, 1993)

É importante salientar que a região Semiárida do Brasil possui uma vegetação peculiar. O bioma Caatinga é predominante neste ambiente. No entanto, considerando a ausência de informações e o fato do Semiárido brasileiro ser a região seca mais populosa do planeta, ações antrópicas têm levado ao uso insustentável de seus recursos naturais, ameaçando um bioma ainda pouco conhecido (FERNANDES; QUEIROZ, 2018).

3.2 BIOMA CAATINGA

O bioma Caatinga ocupa grande parte do semiárido brasileiro. Sua extensão territorial de aproximadamente 800.000 km² está situada entre os paralelos de 3°17' S e meridianos 35°45' W, completamente inserida no semiárido, envolvendo regiões dos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Sudoeste do Piauí, partes do interior da Bahia e do Norte de Minas Gerais. Apresenta alta diversidade ecológica de espécies vegetais, sendo considerada a maior do mundo em contexto semiárido (MARANGON *et al.*, 2016; MORO *et al.*, 2016).

A Caatinga pertence ao bioma global de Florestas e Arbustais Tropicais Sazonalmente Secas, apresentando a maior riqueza de espécies vegetais dentre os núcleos deste bioma, uma

vez que 23% do total de suas espécies são endêmicas. Ainda que vastas áreas da Caatinga permaneçam inexploradas ou pouco estudadas, o conhecimento atual permite afirmar que ocorrem pelo menos 3.150 espécies de plantas, distribuídas em 950 gêneros e 152 famílias de angiospermas, onde se destacam as famílias Leguminosae, Poaceae, Cactaceae e Bromeliaceae. No caso específico da Caatinga, essa grande heterogeneidade vegetacional resulta de adaptações da flora a condições locais de clima e solo (QUEIROZ *et al.*, 2017).

Em uma área de paisagens diversas e compostas por um mosaico de arbustos espinhosos, a vegetação da Caatinga é formada, sobretudo por plantas xerófitas, as quais desenvolveram mecanismos para sobreviver perante ambientes com poucos recursos hídricos. Esse tipo de vegetação expõe mecanismos de resistência à seca, a exemplo de sistema radicular profundo e extenso, caules com vasos lenhosos curtos e de pequeno diâmetro, espinhos ou acúleos, hábito perene, folhas pequenas ou folíolos céreos ou rugosos e superfície foliar ondulada com os estômatos localizados na parte côncava. Essas estratégias morfofisiológicas elevam a probabilidade de sobrevivência das espécies vegetais em meio as adversidades do ambiente (ARAÚJO FILHO, 2013; PRADO, 2003).

Regiões do Semiárido Nordeste onde os solos são férteis e o suprimento de água é relativamente alto permitem o desenvolvimento da Caatinga Arbórea. Essa vegetação tem fisionomia florestal e suporta o estabelecimento de árvores mais altas e mais robustas, muitas das quais restritas a essa formação como *Alseis floribunda* (Rubiaceae), *Brasiliopuntia brasiliensis* (Cactaceae) e *Samanea inopinata* (Leguminosae). As áreas rochosas fornecem também superfícies abundantes para espécies de plantas rupícolas. Esses ambientes possuem alta incidência solar e solo muito raso ou inexistente, sendo ocupados por espécies com adaptações para sobreviver a condições extremas, tais como a macambira-de-flecha (*Encholirium spectabile*; Bromeliaceae), o xique-xique (*Pilosocereus gounellei*) e o cabeça-de-frade (diferentes espécies de *Melocactus*, Cactaceae) (FERNANDES; QUEIROZ, 2018; QUEIROZ *et al.*, 2017).

A ocorrência de corpos aquáticos relacionados a rios e lagos temporários compõe outro ambiente de notória importância para a diversidade de plantas na Caatinga. A alternância entre períodos secos e úmidos provavelmente selecionou espécies que podem sobreviver a longos períodos sem água. Famílias como Pontederiaceae, Nymphaeaceae, Hydrocharitaceae, Cyperaceae, Poaceae e Cabombaceae estão entre as linhagens mais importantes (FERNANDES; QUEIROZ, 2018; QUEIROZ *et al.*, 2017).

O volume das precipitações pluviométricas, da qualidade dos solos, da rede hidrográfica e da ação antrópica justificam a heterogeneidade da composição florística desse bioma que

corroborar significativamente para a fauna diversificada e rica em endemismo, com animais adaptados às condições particulares da região, a exemplo do comportamento migratório e dos hábitos noturnos (SILVA *et al.*, 2010).

Apesar de seu imensurável valor, estima-se que 80% da vegetação da Caatinga já foi alterada por causa da atividade agropecuária e do extrativismo, tornando-a o terceiro bioma mais degradado do Brasil, depois da Mata Atlântica e do Cerrado. O desmatamento de áreas nativas somados aos solos rasos e pouco férteis, característicos da Caatinga, podem levar ao aumento da degradação do bioma (ALVES, 2022; COSTA *et al.*, 2009).

A atividade pecuária em benefício do abastecimento das comunidades humanas é considerada um dos fatores mais significativos para a degradação da Caatinga, pois nessa região é comum o uso de técnicas tradicionais que a utilizam como pastagem. Por exemplo, a vegetação cujo desenvolvimento se inicia no período chuvoso, o que contribui para que os solos estejam desprotegidos no período seco. Nesse contexto, os níveis de produção de biomassa vegetal diminuem e se tornam constantes os riscos de incêndios, de degradação do solo e, por conseguinte, de diminuição da fauna e flora (FIGUEIREDO *et al.*, 2017; QUEIROZ *et al.*, 2021).

Cerca de 70% da região Nordeste do Brasil é ocupado pela Caatinga, entretanto apenas 7,5% deste bioma são protegidos por lei (MORO *et al.*, 2016). Souza, Artigas e Lima (2015) ressaltam ainda que, dentre os biomas brasileiros, a Caatinga é o menos estudado dado que, aproximadamente, 41% de suas áreas preservadas possuem somente 25 campos de monitoramento destinados ao desenvolvimento científico. Isto é considerado pouco, diante de vários impactos provenientes da expansão da agropecuária, segmentação florestal, incêndios e ações ligadas às mudanças climáticas.

É notório que a expansão das atividades agrícolas na região do semiárido brasileiro fomenta a perturbação do solo, a degradação de áreas nativas, as mudanças no ciclo hidrológico e o aumento das emissões de carbono. Esses fatores somados as diversas consequências oriundas das mudanças climáticas no planeta, tais como a redução das chuvas e a intensificação dos eventos de seca, tornam a Caatinga o bioma mais ameaçado e suscetível à desertificação (BARLOW *et al.*, 2016; QUEIROZ *et al.*, 2021).

3.3 DESERTIFICAÇÃO

A degradação da terra em zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, decorrente de fatores diversos, a exemplo de variações climáticas e ações antrópicas, é definida como

desertificação (UNCCD, 2015). Os primeiros registros deste fenômeno foram feitos na década de 1930, quando uma grande tempestade de poeira no Oeste dos Estados Unidos, conhecida mundialmente como “Dust Bowl”, devastou uma área de aproximadamente 380.000 km², com subsequente perda econômica (SILVA, 2012).

Apenas no ano de 1949 o termo desertificação foi utilizado pela primeira vez por Aubréville para descrever processos ecológicos ocorridos na África Tropical, sobretudo no que diz respeito às alterações de florestas tropicais em regiões com pouca vegetação. Todavia, vários fatos ocorreram ao longo dos anos em diversas regiões semiáridas do planeta que corroboraram para a propagação do termo. Exemplo disso foi a perda da capacidade produtiva do solo em regiões africanas na década de 1970, que resultou na fome, seca, guerra e fluxo migratório de Sahel, localizada ao Sul do deserto do Saara. Milhares de pessoas morreram em virtude deste acontecimento, o que alertou a comunidade internacional sobre os impactos econômicos, sociais e ambientais do problema. Desse modo, pesquisadores do mundo inteiro voltaram sua atenção para os processos de degradação da terra que ocorrem, principalmente, nas regiões semiáridas sujeitas à secas periódicas (AUBRÉVILLE, 1949; GLANTZ, 1977).

No Brasil, os estudos pioneiros sobre desertificação foram realizados por João Vasconcelos Sobrinho para a região do Semiárido na década de 1970, culminando na publicação do artigo intitulado “O Deserto Brasileiro”, no qual propôs os “Núcleos de Desertificação” caracterizados pela degradação irreversível da vegetação e do solo, eram eles Gilbués, Piauí; na região do Seridó, Rio Grande do Norte; região dos Cariris Velhos, Paraíba; Sertão Central do estado de Pernambuco; e, no Sertão do São Francisco, Bahia (VASCONCELOS SOBRINHO, 1978). Atualmente não existe um padrão para defini-los, sendo considerados Núcleos de Desertificação no Semiárido brasileiro Gilbués (Piauí), Irauçuba (Ceará), Seridó (Rio Grande do Norte), Cabrobó (Pernambuco), Cariris Velhos (Paraíba) e Sertão do São Francisco (Bahia) (INSA, 2014).

A palavra desertificação deriva da etologia “Deserto”. O deserto é definido como uma formação natural decorrente de solos rasos, drenagem intermitente, cobertura vegetal esparsa e fatores climáticos específicos, combinados ao baixo índice de ocupação humana. Ao conceito de desertificação agrega-se o efeito da ação antrópica, que potencializa os danos ao meio ambiente e ao povo que reside nessas áreas (CONTI, 2008). Sendo assim, a desertificação une a fragilidade dos ecossistemas dos ambientes secos à pressão excessiva das populações humanas, resultando na perda da produtividade do solo e em sua incapacidade de recuperação (VASCONCELOS SOBRINHO, 1978).

Regiões secas são territórios nos quais a precipitação costuma ser menor que a saída potencial de água através de processos como a evaporação e o consumo pelo crescimento das plantas. Nesse contexto, a desertificação faz parte de um processo cíclico, onde as condições ambientais naturais, que propiciam a ocorrência das secas, impactam de maneira significativa as atividades agropecuárias. Em virtude disso, a desertificação e as secas constituem fenômenos naturais associados, cujos efeitos podem ser potencializados pela ação humana. Desse modo, a degradação da terra decorrente das secas que poderia ser revertida durante o período chuvoso por meio de uma boa gestão do solo, é impossibilitada pela exploração abusiva da mesma (SILVA *et al.*, 2010; QUEIROZ *et al.*, 2021).

Fatores de ordem social, econômica, política e cultural podem ser causas de desertificação, a exemplo do manejo inadequado do solo e da ocorrência do desmatamento, das queimadas, da exploração em larga escala de ecossistemas frágeis e do uso demorado de agrotóxicos (FERNANDES; DANTAS, 2021). O sobrepastoreio (perda de 680 milhões de hectares/ano), o desmatamento (perda de 580 milhões de hectares/ano), a prática inadequada da agricultura (perda de 550 milhões de hectares/ano), o consumo de lenha como combustível (perda de 137 milhões de hectares/ano) e a indústria e urbanização (perda de 19,5 milhões de hectares/ano) representam as maiores causas de desertificação em escala mundial (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005).

As áreas propensas à desertificação no Semiárido brasileiro apresentam notória importância no que se refere a criação de caprinos e ovinos, concentrando 87,5% e 53,9% do rebanho nacional, respectivamente. As plantas da Caatinga são a principal fonte de alimentação desses animais e, apesar de serem considerados os mais resistentes e adaptados às condições ambientais e climáticas da região, seus hábitos alimentares ameaçam a reprodução das espécies de plantas nativas, uma vez que consomem especialmente os brotos germinativos das mesmas (CGEE, 2016; ALVES, 2022).

Além de afetarem as espécies vegetais endêmicas da região, a pressão mecânica decorrente do pisoteio dos animais faz com que os espaços entre as partículas do solo sejam reduzidos, provocando danos a sua estrutura físico-química, dificultando a penetração das raízes no solo, a capacidade de armazenamento de água e a atividade biológica (FIGUEIREDO *et al.*, 2017; QUEIROZ *et al.*, 2021). A pecuária, portanto, é considerada uma das principais razões para a desertificação no Nordeste brasileiro.

É evidente que a desertificação é um dos maiores problemas ambientais da atualidade. O fenômeno é responsável por uma perda anual de 12 milhões de hectares, além de provocar

prejuízos nos âmbitos econômicos e sociais (VIEIRA *et al.*, 2020). Por isso, o seu monitoramento é extremamente necessário para a proposição de ações mitigadoras.

Muitas pesquisas têm sugerido metodologias para que seja possível quantificar eficientemente os níveis de desertificação em diferentes regiões do mundo (XIAO *et al.*, 2006; HIGGINBOTTOM; SYMEONAKIS, 2014; ZHAO *et al.*, 2022; YU; WANG; LI, 2022). Ainda que alguns métodos já tenham sido aplicados no Brasil para identificação das áreas em processo de desertificação (ACCIOLY *et al.*, 2002; BEZERRA *et al.*, 2020; JARDIM *et al.*, 2022), mais pesquisas são necessárias para melhor fundamentar seu rigor e execução.

3.4 SENSORIAMENTO REMOTO

A percepção de desertificação está geralmente associada à perda dos serviços ecossistêmicos, consequência do impacto das ações humanas. Em razão disso, informações provenientes de pesquisas utilizando o sensoriamento remoto têm-se intensificado (FERREIRA JÚNIOR; DANTAS, 2018; PATRÍCIO, 2017).

O sensoriamento remoto é a ciência que se dedica ao estudo da medição quantitativa das diferentes respostas de interação dos alvos (sensores remotos) com a radiação eletromagnética para coletar energia do objeto, convertê-la em sinal passível de ser registrado e, por fim, apresentá-lo em forma adequada à extração de informações (QUARTAROLI; VICENTE; ARAÚJO, 2014). É bastante eficaz no monitoramento de processos que ocorrem na superfície terrestre, principalmente no que diz respeito aos estudos referentes à desertificação, dado que o uso desta técnica permite a obtenção de dados de maneira rápida e a custos relativamente baixos, possibilitando o monitoramento contínuo de áreas extensas, inclusive daquelas susceptíveis ao processo de desertificação (QI *et al.*, 2012).

Os objetos que estão na superfície da Terra apresentam propriedades físico-químicas específicas, desse modo, quando o fluxo de radiação eletromagnética (REM) incide sobre eles, o comportamento espectral é diversificado. Portanto, enquanto alguns alvos apresentam maior facilidade de reflexão, outros podem absorver ou transmitir a energia (BRASIL, 2021). A representação contínua do fluxo de REM constitui o espectro eletromagnético, em termos de frequência, comprimento de onda ou energia, onde a diversidade de bandas espectrais são fundamentais aos mecanismos de sensoriamento remoto (BARBOSA; BURI, 2022).

O uso de softwares de processamento de imagens permite inferir as mudanças no uso e cobertura do solo ao longo dos anos, uma vez que dados frequentes da superfície terrestre são

fornecidos pelas imagens de satélites ao longo do tempo (multitemporal), através de sensores multiespectral ou hiperespectral, cuja qualidade depende essencialmente da interação entre as resoluções temporal, espacial, espectral e radiométrica (QI *et al.*, 2012; COLLADO *et al.*, 2002).

A resolução temporal refere-se ao tempo de cobertura, em dias, que o sensor precisa para imagear novamente um mesmo território, fundamental para as análises multitemporais. A resolução espacial, por sua vez, considera o tamanho do pixel em metros, sendo que quanto menor a sua área, melhor será a definição dos alvos. Já a região de origem da imagem no espectro eletromagnético, isto é, o tipo de onda registrada, é indicada pela resolução espectral, enquanto que o número de níveis de cinza usados para expressar as variações na intensidade da energia define a resolução radiométrica cuja qualidade visual da imagem gerada é proporcional a quantidade de níveis (BARBOSA; BURI, 2022).

O imageamento periódico e sistemático da superfície terrestre realizado pelo sensoriamento remoto aliado às ferramentas do Sistema de Informações Geográficas (SIG) é de suma importância para o desenvolvimento de pesquisas em diversas áreas do conhecimento. No tocante a desertificação, sua relevância é evidenciada pelo fato de que o mesmo tem sido amplamente difundido a fim de monitorar aspectos relacionados a degradação da terra, bem como mitigar ou inibir a devastação, especialmente nas regiões semiáridas do planeta (SILVA, 2018; BEZERRA *et al.*, 2020). Ademais, o uso de diversas ferramentas tem demonstrado grande eficácia no monitoramento de áreas desertificáveis, sendo seu uso recomendado pela Organização das Nações Unidas (ONU) (ACCIOLY *et al.*, 2002).

Diversas pesquisas certificaram o potencial e a viabilidade da utilização de imagens de satélites, como o Landsat TM, na avaliação da vulnerabilidade de áreas degradadas ao processo de desertificação através de índices relacionados às mudanças na textura do solo e a qualidade da vegetação. A redução progressiva do bioma Caatinga em função do aumento significativo das áreas agrícolas foi verificado por Jardim *et al.* (2022), por meio da modelagem espaço-temporal de índices de vegetação. Tendências de esverdeamento da vegetação foram observadas em todo o mundo por Li, Qu e Xiao (2022), através da análise do albedo da superfície terrestre, demonstrando a necessidade da adoção de políticas de proteção da vegetação e florestamento. Imagens multiespectrais do sensor Landsat TM foram usadas para a análise dinâmica nos campos de fluxo de calor no solo, albedo e temperatura da superfície para a região de Ilha Solteira (GOMES *et al.*, 2017). Índices de vegetação e de declividade,

além de observações em campo, atestaram a vulnerabilidade das terras da bacia hidrográfica do rio Taperoá, Paraíba (FRANCISCO *et al.*, 2013).

3.4.1 Indicadores de desertificação

Buscando integrar a maior quantidade de fatores que compõem o ambiente, a combinação de diversos índices é frequentemente utilizada em pesquisas de áreas desertificáveis, uma vez que a desertificação é caracterizada não apenas pela condição na qual o solo se encontra, mas por uma série de condições climáticas, biológicas e sociais que afetam todo o ecossistema (CONTI, 2008).

Em 1978, Reining listou 34 indicadores para identificação da desertificação e os dividiu em seis categorias: físicos (8 indicadores), biológicos agrícolas (8), uso da terra (6), assentamento das populações (4), biológicos humanos (3) e processo social (5). Apesar de sua pesquisa não ter mencionado os aspectos climáticos, a mesma inspirou diversos trabalhos que, inclusive, classificam atualmente os indicadores de desertificação em físicos, biológicos, espectrais e socioeconômicos (MATALLO JUNIOR, 2001).

Ao considerar as características proveniente da degradação da terra, estudos pioneiros datados da década de 1970 demonstraram ainda que o manejo do solo pode acelerar ou não esse fenômeno em diferentes regiões (GLANTZ, 1977; VASCONCELOS SOBRINHO, 1978). Nesse contexto, a vegetação é considerada um fator relevante para a identificação da desertificação, pois ela amortece o impacto das gotas de chuvas sobre o solo diminuindo a velocidade da água e proporcionando mais tempo para sua infiltração. A erosão hídrica é também mais acentuada em áreas sem cobertura vegetal, porque a retirada da vegetação reduz a infiltração de água no solo e aumenta o escoamento superficial, carreando sedimentos e propiciando a remoção líquida de nutrientes, deixando-o empobrecido. Remover a cobertura vegetal implica ainda em um solo mais vulnerável a ação do vento, onde a perda de suas partículas mais finas para outros lugares é intensificada (GUTIÉRREZ; SQUEO, 2004; BEZERRA *et al.*, 2020).

A retirada da vegetação, portanto, contribui para o aumento da arenosidade do solo ao alterar o diâmetro médio de suas partículas, sua composição estrutural superficial e, conseqüentemente, sua textura, tornando-o mais vulnerável ao processo de desertificação (LAMCHIN *et al.*, 2017).

Destarte, os índices de vegetação têm sido propostos na literatura para mensurar propriedades espectrais referentes à vegetação, através de operações envolvendo as bandas do

visível (400 nm – 720 nm) e infravermelho próximo (720 nm – 1100 nm), pois ambas são fundamentais na resposta de reflectância da vegetação. Quanto maior a densidade de cobertura vegetal maior será a absorção na região do visível devido aos pigmentos fotossintetizantes no mesófilo das folhas. Por outro lado, verifica-se maior reflectância na região do infravermelho por causa do retroespalhamento da radiação eletromagnética nas estruturas foliares das plantas (MOREIRA, 2012; QUARTAROLI; VICENTE; ARAÚJO, 2014).

Obtidos a partir de imagens de satélites, esses índices contribuem de modo eficaz para a obtenção de parâmetros biofísicos da vegetação, sobretudo em áreas extensas. Sua performance é ainda mais interessante em regiões de clima semiárido, pois estão constantemente sob o efeito da radiação solar intensa (FRAMPTON *et al.*, 2013; PRIESS e HAUCK, 2014).

3.4.1.1 Normalized difference vegetation index – NDVI

Desenvolvido por Rouse *et al.* (1974), o Normalized difference vegetation index (NDVI) fornece informações acerca do vigor e caracterização da vegetação cujo cálculo é realizado através da diferença das refletividades entre as bandas do vermelho (636 nm – 673 nm) e do infravermelho próximo (851 nm – 879 nm) dividido pela soma das mesmas (Equação 1). Apresenta valores entre -1 e +1, sendo que quanto mais próximos de 1 maior a densidade de cobertura vegetal. Solos sem cobertura vegetal ou rochas apresentam valores próximos a 0. Já em superfícies que contêm corpos hídricos e na presença de nuvens a variação tende ser entre 0 e -1 (FRANCISCO, 2013).

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

O NDVI proporciona um melhor contraste entre o solo e a vegetação, além de compensar efeitos de declividade da superfície, iluminação e geometria de visada do sensor. O mesmo se destaca ao permitir a construção de perfis temporais e sazonais, além de comparações do comportamento da vegetação em diferentes períodos. Fases de senescência, período de crescimento, níveis de clorofila e atividades fisiológicas da vegetação em análise também podem ser verificadas por meio desse índice (PONZONI *et al.*, 2012).

O uso contínuo do NDVI em pesquisas de monitoramento da cobertura vegetal demonstra a importância desse índice, sobretudo para estudos de desertificação. Entretanto, é preciso estar atento a sua elevada correlação com a precipitação pluviométrica, pois a alta

capacidade de resiliência de alguns tipos de vegetação, como a da Caatinga, que pode interferir nos resultados obtidos (BARBOSA *et al.*, 2006).

3.4.1.2 Soil-adjusted vegetation index – SAVI

Regiões onde existem alternâncias de brilho no solo por causa de variações de rugosidade, diferença de umidade, sombra e matéria orgânica presentes no substrato de dosséis com vegetações esparsas sofrem a influência do solo e, por conseguinte, sua interferência no cálculo dos Índices de Vegetação (HUETE, 1988). Considerando o brilho do solo, sobretudo naqueles escuros, Ponzoni e Shimabukuro (2007) ressaltam que diversos estudos demonstram aumento no valor de Índices de Vegetação. Nesse contexto, o Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) mostra-se mais preciso e eficiente para representar o ambiente.

Almejando minimizar os efeitos do solo na caracterização do dossel das plantas, o SAVI é utilizado para corrigir as interferências do mesmo no NDVI quando a superfície não está totalmente coberta por vegetação (RIBEIRO; SILVA; SILVA, 2016). Criado por Huete (1988), o índice pode ser expresso pela seguinte equação:

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

Onde L trata-se de uma constante denominada fator de ajuste para o substrato do dossel. O valor para L de 0,25 é indicado para altas densidades de vegetação, enquanto valores de 0,5 e 1,0 correspondem, respectivamente, a coberturas vegetais intermediárias e muito baixas. O índice SAVI será equivalente ao NDVI quando L for igual a 0.

O uso do SAVI em pesquisas realizadas no bioma Caatinga mostra-se mais apropriado que os demais índices ao corrigir os efeitos do solo na resposta espectral. Tomando como referência o valor de 0,5 para o fator de ajuste, uma vez que a vegetação desse bioma é pouco densa, resultados satisfatórios têm sido obtidos em diversos trabalhos (OLIVEIRA; COSTA, 2020; SILVEIRA *et al.*, 2019; ALVES; AZEVEDO, 2015).

3.4.1.3 Topsoil grain size index – TGSi

A textura está intrinsecamente relacionada à retirada da cobertura vegetal que amplia a vulnerabilidade do solo aos processos erosivos causados pela ação da água e do vento. O manejo inadequado do solo e o sobrepastoreio também corroboram para a instauração da desertificação

no ambiente, pois aceleram a diminuição da vegetação e a erosão do solo, resultando em um solo arenoso cuja distribuição do tamanho das partículas presentes em sua superfície é alterada (REN *et al.*, 2015).

A textura é uma importante propriedade do solo determinada pelas proporções das frações de areia, silte e argila. Quanto mais alto o teor de areia em um solo, menor a sua qualidade. Assim, solos arenosos costumam ser mais susceptíveis à seca quando comparado aos solos argilosos em virtude de sua menor capacidade de retenção de água e pouca quantidade de nutrientes e matéria orgânica (HADEEL *et al.*, 2011).

Logo, o engrossamento da camada superficial do solo é um sinal visível da degradação da terra causada pelas ações antrópicas; destarte, a composição granulométrica do solo pode ser utilizada como um potencial indicador no monitoramento do processo de desertificação pela mudança na textura do solo superficial (LAMCHIN *et al.*, 2016).

O Topsoil Grain Size Index (TGSI) foi proposto por Xiao *et al.* (2006) para demonstrar a magnitude do tamanho das partículas presentes na superfície do solo em ambientes com pouca ou nenhuma cobertura vegetal. Por estar relacionado diretamente com a textura do solo, o TGSI não é afetado pela precipitação ou fenologia da vegetação, sendo mais indicado para o monitoramento da desertificação quando comparado com o NDVI (LAMCHIM *et al.*, 2016).

A equação 3 expressa como o índice pode ser calculado. As diferenças de reflectâncias entre as bandas do vermelho e do azul realçam a vegetação e água, enquanto que as somas das reflectâncias das bandas vermelho, azul e verde evidenciam a fração de areia presente na superfície do solo (XIAO *et al.*, 2006).

$$\text{TGSI} = \frac{\text{Red-Blue}}{\text{Red+Blue+Green}} \quad (3)$$

O TGSI funciona como um índice numérico, fornecendo dados relevantes acerca das propriedades físicas do solo que são afetadas pelas variações da textura. O mesmo compreende intervalos que vão de números negativos a valores positivos, onde números negativos ou valores próximos a zero indicam presença de água ou vegetação, enquanto números positivos indicam a presença de areia em relação ao silte e argila (XIAO *et al.*, 2006).

3.4.1.4 Albedo

A vegetação dispõe de um importante papel nos fluxos de troca de massa e calor entre a atmosfera e as superfícies, sua remoção afeta significativamente a distribuição de água e

energia no solo, interferindo nos valores de albedo. A correlação entre redução da cobertura vegetal e degradação do solo, tende a aumentar os valores de albedo da superfície terrestre (SILVA *et al.*, 2010).

O albedo de superfície é um parâmetro biofísico que corresponde a capacidade de determinada superfície refletir radiação eletromagnética, sendo definido pela razão entre a radiação solar refletida com a radiação solar incidente sobre uma superfície em múltiplos ângulos (WANG *et al.*, 2017; RANSON *et al.*, 1991). Pode ser expresso por valores que variam de 0,0 a 1,0 ou em forma de porcentagem, onde 0,0 indica um corpo negro que, por sua vez, absorve toda a luz incidente; valores de 0,1 a 0,2 referem-se a superfícies de textura áspera e coloração escura e valores de 0,4 a 0,5 correspondem a solos com superfície lisa e coloração clara (HE *et al.*, 2014).

De maneira geral, quanto menor o ângulo do sol menor será o albedo. Mas existem outros parâmetros que podem alterar valores de albedo, como tipo e a condição da vegetação, a umidade do solo, teor de matéria orgânica, tamanho das partículas e composição mineralógica. Vale salientar que os efeitos da atmosfera, características da superfície do solo e rugosidade, intervalo espectral da banda do sensor e a geometria relacionada à posição do sol e do satélite em relação ao terreno, também interferem na estimativa adequada da reflectância da superfície terrestre (ANGELINI, 2018; SILVA *et al.*, 2010; BREST; GOWARD, 1987).

Elevados valores de albedo costumam estar associados ao solo exposto, enquanto valores mais baixos são resultantes de áreas nas quais há o aumento da umidade do solo seguido pelo aumento da densidade vegetal (ROBINOVE *et al.*, 1981). Todavia, a redução da vegetação eleva os valores de albedo ao afetar as condições de balanço de radiação na superfície ocasionando mudanças em outros aspectos físicos do solo, a exemplo da redução da precipitação local, da temperatura e das alterações na umidade do solo. Tais fatores acarretam na intensificação dos processos de desertificação. Sendo assim, a vegetação é um fator de notória relevância em estudos de desertificação, uma vez que a redução da cobertura vegetal torna o solo mais vulnerável a este tipo de degradação. Quando instaurada, a desertificação impede a regeneração da vegetação (MA *et al.*, 2011).

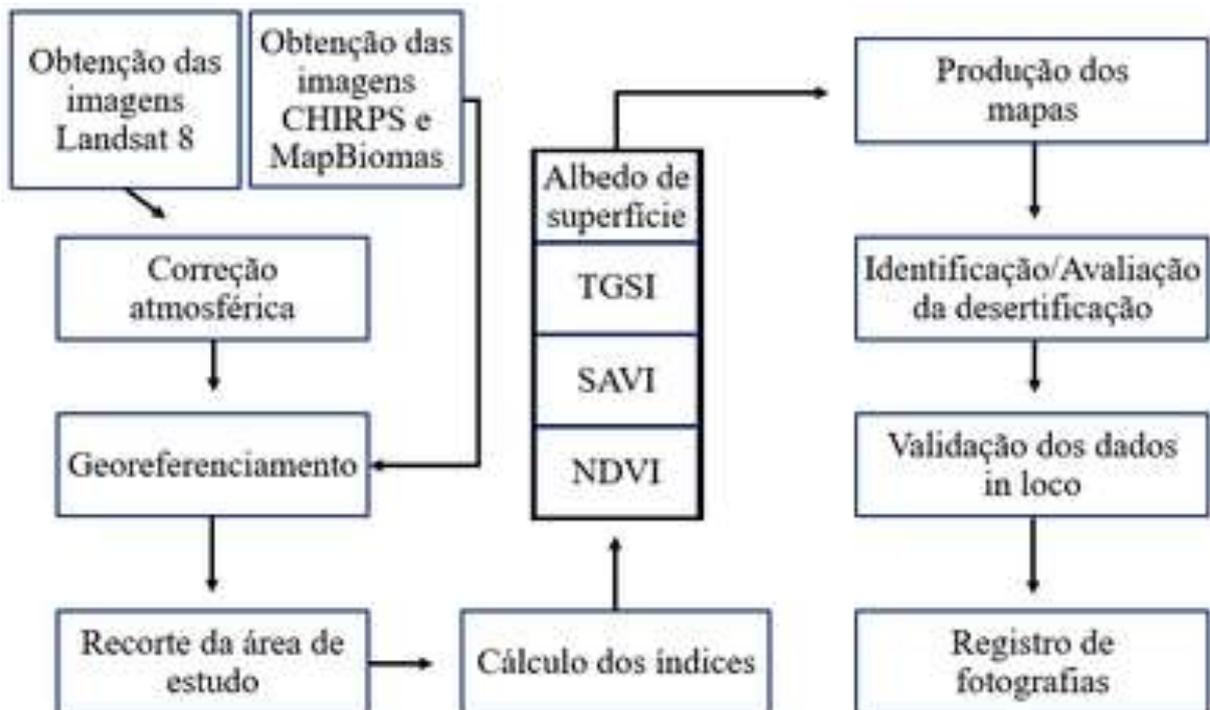
O albedo constitui importante parâmetro para avaliar as mudanças de cobertura do solo ao gerar o saldo de radiação em superfície. Dessa forma, análises das variações de albedo através de sensores orbitais contribuem efetivamente para a avaliação da densidade vegetal em determinado território e, portanto, para a identificação de áreas susceptíveis ao processo de desertificação (ROBINOVE *et al.*, 1981; SILVA *et al.*, 2010).

4 METODOLOGIA

4.1 FLUXOGRAMA DA PESQUISA

As etapas do desenvolvimento do trabalho, as quais, com exceção das obtenções das imagens Landsat 8, CHIRPS e MapBiomas, foram executadas por meio do software *Quantum gis* (Qgis). Inicialmente foram adquiridas Landsat 8 através da plataforma United States Geological Survey (USGS) e, logo após, feita a correção atmosférica para minimizar os efeitos da atmosfera no produto obtido. Em seguida foram selecionadas as imagens referentes aos dados de precipitação (CHIRPS) e de uso e cobertura da terra (MapBiomas). Realizou-se a correção geométrica para ajustamento da cena em relação a um alvo georreferenciado e o recorte correspondente à área de interesse da pesquisa. Após isso, foram calculados NDVI, SAVI, TGSi e Albedo de superfície (Figura 1). Os mapas foram então elaborados e os valores obtidos de cada um dos índices foram comparados com os valores da literatura para a identificação de regiões desertificadas. Considerando esses dados, foram realizadas visitas em campo para a validação dos mesmos e o registro de fotografias para melhor análise da vegetação local.

Figura 1 - Fluxograma do trabalho.

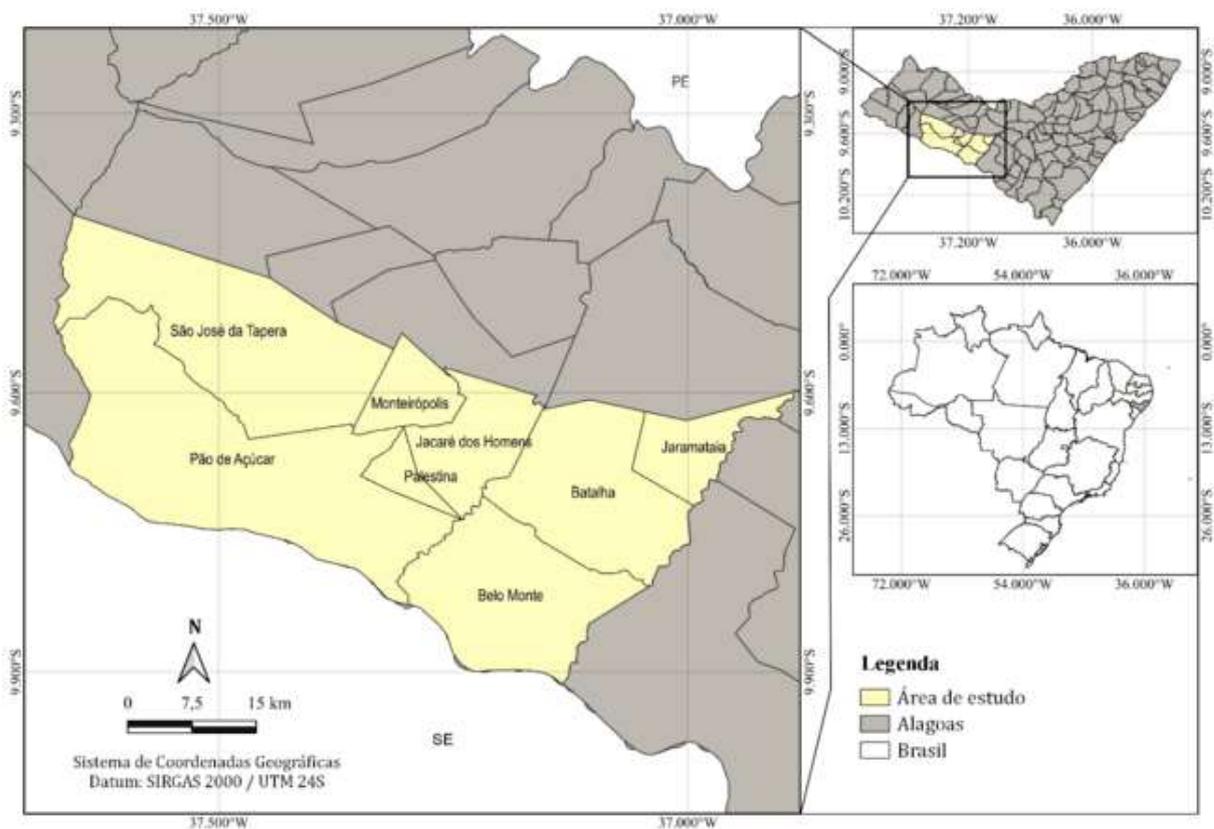


Fonte: A autora (2023).

4.2 ÁREA DO ESTUDO

Localizada no Estado de Alagoas, Nordeste do Brasil, a área de estudo (Figura 2) compreende os municípios de São José da Tapera (490,879 km²), Pão de Açúcar (688,870 km²), Monteirópolis (86,604 km²), Palestina (38,189 km²), Jacaré dos Homens (148,992 km²), Belo Monte (334,136 km²), Batalha (315,870 km²) e Jaramataia (105,416 km²), possuindo 2.208,956 km² de extensão territorial (IBGE, 2011).

Figura 2 - Localização dos municípios do estado de Alagoas que correspondem à área de estudo.



Fonte: A autora (2023).

A área apresenta clima do tipo BSh, isto é, seco e quente, sendo abastecida por um regime pluviométrico que varia entre 600 e 700 mm (BARROS *et al.*, 2012). Está inserida nas Regiões Hidrográficas de Ipanema, Traipu e Riacho Grande. Seus rios intermitentes secam na época de baixa pluviosidade e produzem grandes torrentes durante o período de chuvas, o que os tornam sensíveis a problemas como assoreamento (SEPLAG, 2020).

Os municípios em análise representam uma fração da ampliação dos territórios susceptíveis à desertificação do estado, dentre elas áreas de clima semiárido, subúmido seco e

Áreas em Processo de Degradação resultante da ação antrópica – APD. Esse fato tem ampliado os problemas ambientais, econômicos e sociais no sertão alagoano (ALAGOAS, 2011; IMA, 2018). Além disso, os municípios integram a Bacia Leiteira de Alagoas cuja atividade predominante, a pecuária, é considerada um dos principais fatores da degradação do solo e da Caatinga, vegetação nativa da região (SEPLAG, 2015; FIGUEIREDO *et al.*, 2017).

A pecuária ultraextensiva e, posteriormente, a pecuária em cercados (extensiva), sustentaram o desenvolvimento das forças produtivas do Sertão durante a consolidação de seu território enquanto região geográfica, sendo considerada a primeira atividade na exploração colonial das terras alagoanas ainda no século XVI, além de ser responsável pela incorporação das relações capitalistas no estado no século XIX (ANDRADE, 1963; ANDRADE, 1988).

Apesar de ser a segunda maior atividade agroindustrial de Alagoas, ficando atrás somente do setor sucroalcooleiro, a pecuária conta com uma limitada e deficiente assistência técnica agroindustrial, colaborando para o atraso socioeconômico nos municípios que compõe a Bacia Leiteira. Os mesmos apresentam os piores resultados comparados com as médias para Alagoas, Nordeste e Brasil, no que diz respeito ao Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), renda per capita, vulnerabilidade à pobreza, escolaridade, mortalidade infantil, ocupação informal, população urbana e expectativa de vida. A desinformação associada à baixa qualidade de vida dos moradores locais coopera para a prática inadequada da pecuária e, por isso, para a degradação do solo, aumentando sua susceptibilidade ao processo de desertificação na região onde a atividade é desenvolvida (ANDRADE, 1988; VASCONCELOS JÚNIOR, 2017).

4.3 DADOS ESPACIAIS

Utilizando a USGS, foram coletadas imagens entre os anos de 2013 a 2022 das séries temporais do Land Remote Sensing Satellite (LANDSAT), provenientes do sensor Operational Land Imager (OLI) a bordo do Landsat 8 (Tabela 1). Em operação desde 2013, o sensor OLI apresenta imagens formadas por 9 bandas, com resoluções espaciais de 30 metros para as bandas 1-7 e 9, e de 15 metros para a banda 8 (pancromática). Sua resolução temporal é de 16 dias e sua resolução radiométrica é equivalente a 16 bits (VERMOTE *et al.*, 2016).

Tabela 1 - Especificações do Landsat 8/OLI.

Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (metros)	Resolução Radiométrica (bits)	Resolução Temporal (dias)
Azul Costeiro (B1)	0.43-0.45			
Azul (B2)	0.45-0.51			
Verde (B3)	0.53-0.59			
Vermelho (B4)	0.64-0.67	30		
Infravermelho próximo (B5)	0.85-0.88		16	16
Infravermelho médio (B6)	1.57-1.65			
Infravermelho médio (B7)	2.11-2.29			
Pancromática (B8)	0.50-0.68	15		
Cirrus (B9)	1.36-1.38	30		

Fonte: USGS (2018).

Alguns critérios foram adotados para a escolha das imagens neste estudo: i) disponibilidade das mesmas; ii) cobertura de nuvens e; iii) período seco, dado que esse tem sido definido como a melhor época para a avaliação do bioma Caatinga (BISPO, VALERIANO e DUPLICI, 2010). Desse modo, cinco imagens do ponto 67 da órbita 215 foram selecionadas (Tabela 2). É importante salientar que devido a presença de algumas nuvens nas imagens correspondentes aos anos de 2013 e 2022, foi necessária a aplicação de uma máscara de nuvens para não haver equívocos durante a análise das mesmas.

Tabela 2 - Caracterização das imagens selecionadas para o estudo.

Data	Satélite/Sensor	Órbita/Ponto	Distância (dr)	Ângulo zênite (θ)	Ângulo de elevação
10/12/2013			0.98	120.40	61.86
14/11/2015			0.99	111.61	64.99
08/12/2018	Landsat 8/OLI	215/67	0.98	119.88	61.82
26/10/2020			0.99	98.53	66.08
01/11/2022			0.99	103.02	66.03

Fonte: A autora (2023).

O processamento de dados das imagens, a análise sobre o *shapefile* da área de estudo e a produção dos mapas foram executados no software livre Qgis versão 3.22. 14., um Sistema

de Informação Geográfica (SIG) que apresenta inúmeras funcionalidades próprias e complementos para trabalhar com dados provenientes do Sensoriamento Remoto.

Através dos produtos espaciais coletados foram avaliados aspectos do comportamento e cobertura vegetal, além das condições de solo na região em estudo. Dados de precipitação e de uso e cobertura do solo, provenientes do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS Daily) e MapBiomas Brasil, respectivamente, também foram utilizados.

4.4 PRECIPITAÇÃO

Para análise da dinâmica da vegetação entre os anos de 2013 à 2022 foram utilizados dados de precipitação obtidos do CHIRPS Daily. Sua série temporal abrange uma área de 50 graus norte e sul (e todas as longitudes), desde 1981 até o presente, com uma resolução espacial de 0,05 graus, equivalente a cinco quilômetros (CHG, 2015).

Considerando a resiliência da vegetação do bioma Caatinga em resposta à ocorrência das chuvas (ALMEIDA; CARVALHO; ARAÚJO, 2019), foi avaliado o histórico de precipitação dos últimos 90 dias que antecedem as datas das imagens Landsat 8/OLI para a região selecionada (Tabela 1).

O conjunto de dados de precipitação CHIRPS Daily foi obtido por meio do aplicativo *Climate Engine* (GOOGLE, 2023), totalizando cinco imagens. As mesmas foram processadas, classificadas e utilizadas para a confecção de mapas através do *software* Qgis.

4.5 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

As ações humanas interferem significativamente na cobertura da terra em relação à estrutura e funcionamento dos ecossistemas, afetando não só a sustentabilidade ambiental, mas o sustento das pessoas. O Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomas) é uma iniciativa de monitoramento aberto e colaborativo, criada em 2015, para o fornecimento de informações atualizadas e temporais sobre o uso e cobertura da terra, a fim de auxiliar no planejamento e tomada de decisões para reduzir os impactos no meio ambiente (ROSA; SHIMBO; AZEVEDO, 2019).

Utilizando a coleção 7 de classificação da cobertura e uso da terra disponibilizada na plataforma MapBiomas Brasil (MAPBIOMAS, 2022) foram adquiridos arquivos referentes aos anos de 2013 e 2021, dividindo o período de estudo em duas fases, uma inicial e outra final. Os

mesmos foram processados e analisados, segundo a área de interesse, no Qgis. Posteriormente foram gerados mapas com os resultados.

Vale ressaltar que para avaliar as mudanças ocorridas no uso do solo durante o período observado (2013 e 2021) e atentando-se ao histórico da região e a disponibilidade das mesmas, foram consideradas as classes floresta, formação natural não florestal, pastagem, agricultura, mosaico de usos, área não vegetada e corpos d'água e reagrupadas segundo as alterações observadas (Tabela 3).

Tabela 3 - Grupos de classes do MapBiomas Brasil segundo as alterações ocorridas entre os anos de 2013 e 2021.

Classes	Grupo	Alterações	Novo Grupo
Floresta	Natural	Natural - Natural	Natural
Formação natural não florestal			
Pastagem	Antrópico	Antrópico → Antrópico	Antrópico
Agricultura		Água → Antrópico	
Mosaico de usos		Natural → Antrópico	
Área não vegetada			
Corpo d'água	Água	Antrópico → Água	Água
		Natural → Água	
-	-	Água → Natural	Regeneração da vegetação
		Antrópico → Natural	

Fonte: A autora (2023).

O grupo natural corresponde a transição entre áreas de floresta e formação natural não florestal. O grupo antrópico, por sua vez, refere-se a quaisquer mudanças dentro de qualquer uma das classes que resultem em ações de caráter antrópico. O grupo água é resultado da mudança dos grupos natural e antrópico para água e o grupo regeneração da vegetação é composto por áreas de pastagem, agricultura, mosaico de usos, água e não vegetada que no ano de 2021 passaram a ser de uma das classes naturais. Por fim, o grupo inalterado diz respeito as áreas que se mantiveram nas mesmas classes do MapBiomas Brasil durante o período analisado.

4.6 INDICADORES DE DESERTIFICAÇÃO

Os índices utilizados para a identificação de áreas desertificadas na pesquisa foram processados, classificados e analisados por meio do Qgis. A elaboração de mapas também foi feita através do *software*.

Por causa de suas relações com o processo de desertificação, o NDVI, SAVI, TGSi e Albedo Superficial foram aplicados para a área de estudo. O cálculo dos três primeiros foi realizado por meio das equações 1, 2 e 3, respectivamente. Enquanto o albedo foi obtido usando as etapas do algoritmo SEBAL determinado por Bastiaanssen *et al.* (1998).

A primeira dessas etapas consiste no cálculo da calibração radiométrica, conforme a equação 4, proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda} = a + \left(\frac{b_i - a_i}{255} \right) \times ND \quad (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}) \quad (4)$$

Onde L_{λ} é a radiância em ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$); a e b são, respectivamente, as radiâncias espectrais mínimas e máximas; ND é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255); e i corresponde às bandas (1, 2, ..., 7) do satélite Landsat 8/OLI.

O passo seguinte foi calcular a reflectância no topo da atmosfera (TOA) usando a Equação 05 proposta por Chander e Markham (2003):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \times L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \times \cos Z \times D_r} \quad (5)$$

Onde $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda, $K_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera, Z é o ângulo zenital solar, $\pi = 3,14$ e D_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (em unidade astronômica – UA), determinado pela equação 06:

$$d_r = 1 + 0,033 \times \cos \left(DJ \frac{2\pi}{365} \right) \quad (6)$$

Onde DJ é o dia Juliano e o argumento da função cosseno está em radianos. O ângulo zenital solar foi obtido através do arquivo de texto (MTL) das imagens adquiridas.

Determinado por meio da combinação linear das reflectâncias monocromáticas, o albedo planetário α_{TOA} é obtido através da combinação linear das reflectâncias monocromáticas, conforme a equação 7:

$$\alpha_{toa} = \sum (\rho_{\lambda i} \times \omega_{\lambda i}) \quad (7)$$

Posteriormente foi calculada a transmissividade atmosférica através da equação 8 (ALLEN *et al.*, 2002):

$$\tau_{sw}=0,75+2.10^{-5}z \quad (8)$$

Onde z é a altitude em metros de cada pixel cuja obtenção foi realizada através da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que atua desde o ano 2000 na produção de um Modelo Digital de Elevação (MDE) das terras continentais para todo o planeta.

Corrigindo os efeitos atmosféricos, foi calculado o albedo da superfície, segundo a equação 9:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (9)$$

Onde α_p é a radiação solar refletida pela atmosfera, recomendada para o SEBAL como 0,03 (BASTIAANSSEN, 2000).

Por fim, sabendo que a emissão solar máxima acontece em 0,475, aproximadamente, os resultados foram ajustados para albedo de superfície menor que esse valor, de acordo com a equação 10:

$$alb = (\alpha \geq 0,0 \text{ AND } \alpha < 0,475) * \alpha + (\alpha > 0,475) * 0,475 \quad (10)$$

4.7 DADOS DE CAMPO

Almejando validar os dados espaciais resultantes do processamento das imagens, visitas in loco foram realizadas nos oito municípios inseridos na área de estudo. A coleta das informações foi feita em 16 pontos previamente georreferenciados durante os dias 15 e 16 de fevereiro de 2023 (Tabela 4).

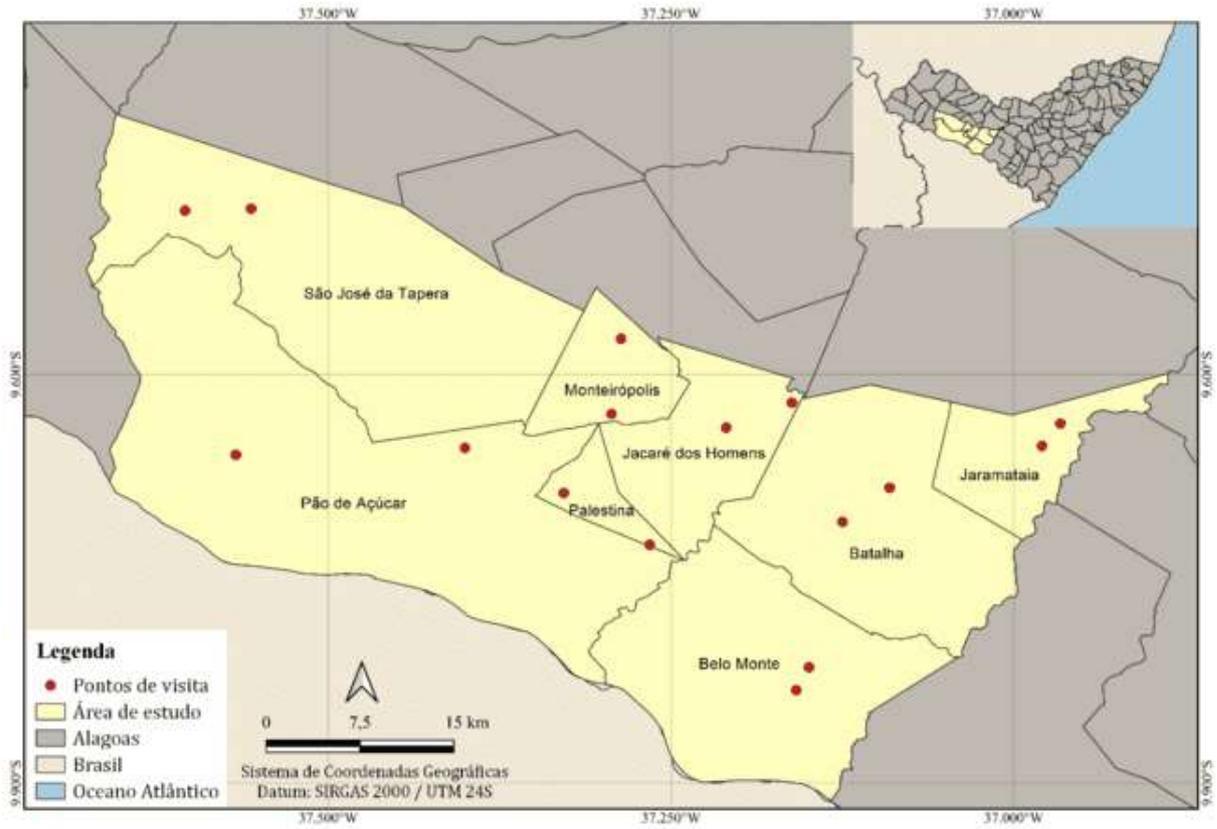
Tabela 4 - Localização dos pontos definidos para a visitação in loco na área de estudo.

Ponto	Coordenada geográfica	Cidade
1	-9.65244767, -36.97946708	Jaramataia
2	-9.63603858, -36.96601729	Jaramataia
3	-9.68314135, -37.09057017	Batalha
4	-9.70821274, -37.12496831	Batalha
5	-9.81498935, -37.14944821	Belo Monte
6	-9.83187016, -37.15877256	Belo Monte
7	-9.62068394, -37.16193192	Jacaré dos Homens
8	-9.63904785, -37.20984401	Jacaré dos Homens
9	-9.61269101, -37.24670504	Monteirópolis
10	-9.58569608, -37.31802699	Monteirópolis
11	-9.47812295, -37.55646850	São José da Tapera
12	-9.47957653, -37.60453541	São José da Tapera
13	-9.65896785, -37.56749878	Pão de Açúcar
14	-9.65385259, -37.40043828	Pão de Açúcar
15	-9.68692976, -37.32837780	Palestina
16	-9.72502783, -37.26568208	Palestina

Fonte: A autora (2023).

Considerou-se em cada município um ponto cujos índices apontavam para a desertificação da área e outro onde os resultados obtidos demonstravam a conservação do solo e da vegetação. Os locais foram georreferenciados com antecedência utilizando o Qgis e, em campo, validados através do Global Positioning System (GPS) (Tabela 3 e Figura 3).

Figura 3 - Localização dos pontos selecionados para a visitação na área de estudo.



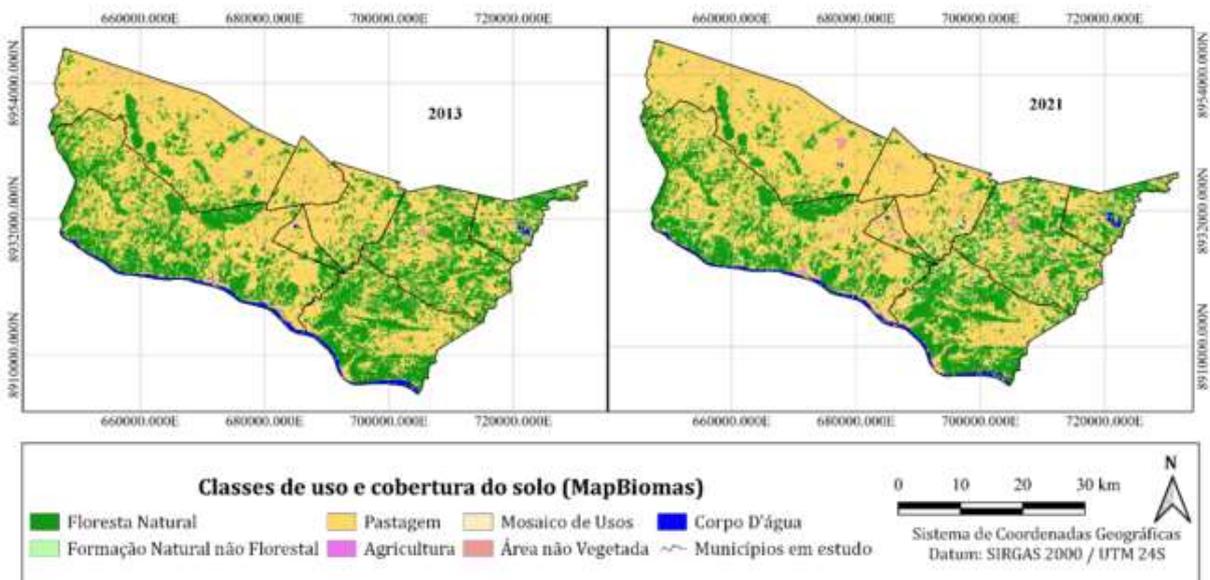
Fonte: A autora (2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 USO E COBERTURA DO SOLO

Através da classificação de uso e cobertura do solo da plataforma MapBiomas (Coleção 7), foram destacados os mapas temáticos referente aos anos de 2013 e 2021, com a representação das principais classes de uso e cobertura do solo (Figura 4).

Figura 4 - Dinâmica de uso e cobertura do solo para municípios do semiárido alagoano.



Fonte: A autora (2023).

Na Bioma Caatinga, áreas de vegetação arbórea e arbustiva são consideradas floresta, enquanto a vegetação herbácea e afloramentos rochosos correspondem a formação natural não florestal. Pastagem, agricultura e mosaico de usos são especificações da classe agropecuária. As regiões urbanas são representadas em área não vegetada e a classe corpo d'água inclui reservatórios construídos e trechos dos rios Ipanema, Traipu e Riacho Grande.

Na área de estudo, a pecuária é predominante, chegando a ocupar quase toda a região correspondente aos municípios de Palestina, Monteirópolis e São José da Tapera (Figura 4; Figura 2). Em seguida apresentam-se com as maiores proporções territoriais as classes floresta, mosaico de usos, formação natural não florestal, corpo d'água, área não vegetada e agricultura, respectivamente, com flutuações de redução ou desenvolvimento ao longo do período (Tabela 5).

Tabela 5 - Distribuição das classes de Uso e Cobertura do Solo para 2013 e 2021.

Classes de uso e cobertura do solo	2013		2021	
	Área (km ²)	Ocupação (%)	Área (km ²)	Ocupação (%)
Floresta	776,95	35,09	716,99	32,38
Formação natural não florestal	31,65	1,43	32,27	1,46
Pastagem	1328,51	60,01	1301,07	58,77
Agricultura	7,80	0,35	17	0,77
Mosaico de Usos	20,79	0,94	96,24	4,35
Área não vegetada	13,83	0,62	20,07	0,91
Corpo d'água	34,45	1,56	30,37	1,37

Fonte: A autora (2023).

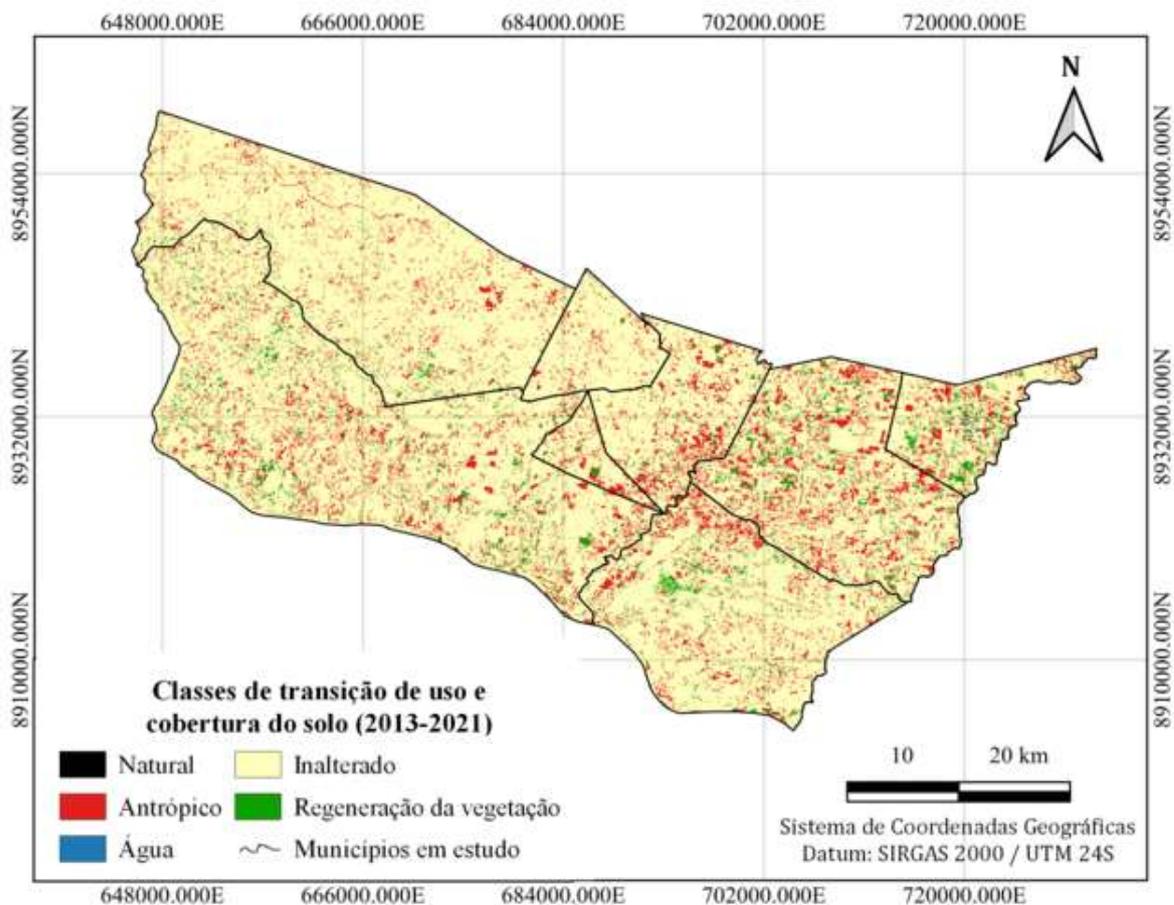
As classes floresta e corpo d'água tiveram seus percentuais de ocupação reduzidos, enquanto avanços na exploração de áreas para mosaico de usos ocorreram principalmente nos municípios de Belo Monte, Batalha, Monteirópolis e Pão de Açúcar. Regiões destinadas ao desenvolvimento da agricultura também cresceram em todo o território. Vale ressaltar que, embora discreto, houve ainda um crescimento das classes formação natural não florestal e área não vegetada. Vários autores relataram a ocorrência de eventos de seca severa no nordeste brasileiro no período de 2013 a 2016, além da intensificação das atividades antrópicas na região de estudo. Esses fatores são responsáveis por mudanças significativas na fitossociologia e composição florística do bioma (GUTIÉRREZ *et al.*, 2014; BARBOSA *et al.*, 2019; FENDRICH *et al.*, 2021).

Apesar da expansão de outras classes, a prática da pecuária demonstra acentuada relevância para os municípios analisados, pois mesmo a classe pastagem sofrendo uma ligeira redução de ocupação na região, mais da metade da área é destinada a ela. Esse cenário provém do fato de que a área de estudo está inserida na Bacia Leiteira de Alagoas cuja produção atual de leite é a sexta maior da região nordeste (IEL, 2022). Dado o valor da pecuária para a região e o impacto que seu desenvolvimento representa para o meio ambiente, o manejo adequado da área é fundamental para que as necessidades humanas sejam atendidas em concordância com a manutenção da qualidade ambiental (FIGUEIREDO *et al.*, 2017; QUEIROZ *et al.*, 2021).

Há uma transição espacial de uso e cobertura do solo entre as classes ao longo da série temporal, indicando o comportamento de um grupo em relação a outro (Figura 5). Apesar de indicar singela regeneração da vegetação em determinadas regiões na área de estudo, a

dinamicidade do uso e cobertura da terra ao longo do tempo exibe o crescimento de áreas destinadas ao setor agropecuário, fator que geralmente resulta em aumento da degradação dos recursos naturais e, conseqüentemente, intensifica a vulnerabilidade da área a problemas ambientais. Tal cenário reforça a necessidade do monitoramento deste território para que seja assegurada sua qualidade ambiental, prevenindo prejuízos e minimizando perdas já instauradas.

Figura 5 - Reclassificação de uso e cobertura do solo na área de estudo entre 2013 e 2021.

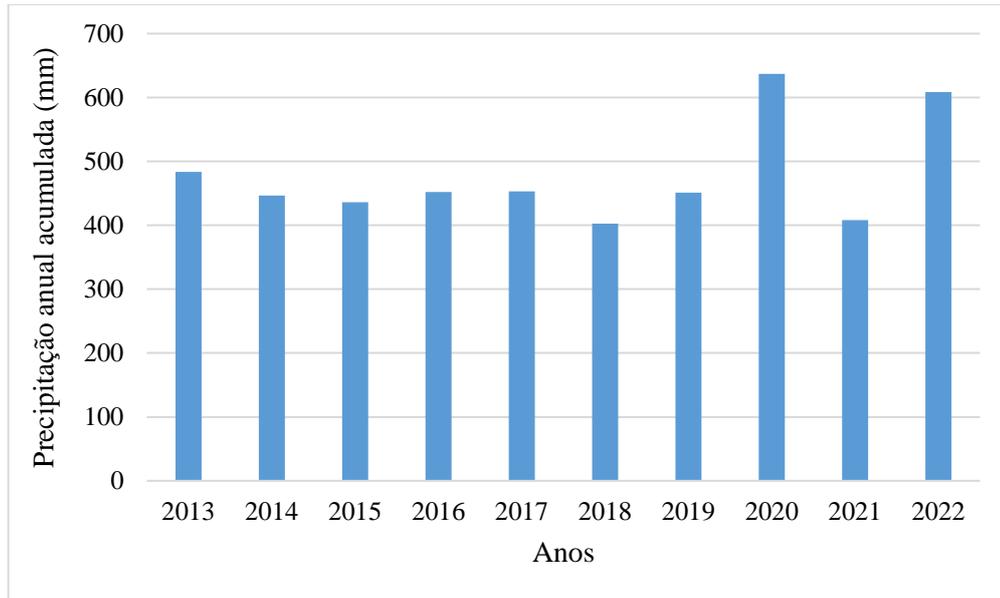


Fonte: A autora (2023).

5.2 PRECIPITAÇÃO

Os baixos índices de chuva foram registrados na maioria dos anos ao longo do período estudado, uma característica marcante da região semiárida do Estado de Alagoas (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2022). Na última década, a área correspondente aos municípios de São José da Tapera, Pão de Açúcar, Monteirópolis, Palestina, Jacaré dos Homens, Belo Monte, Batalha e Jaramataia apresentou uma média de precipitação equivalente a 477,92 mm. Registrando valores superiores a 600 mm, os anos de 2020 e 2022 destacam-se como os mais chuvosos do período, enquanto os 402,60 mm observados em 2018 fazem desse o ano mais seco (Figura 6).

Figura 6 - Precipitação anual acumulada (mm) para a área de estudo de 2013 a 2022.

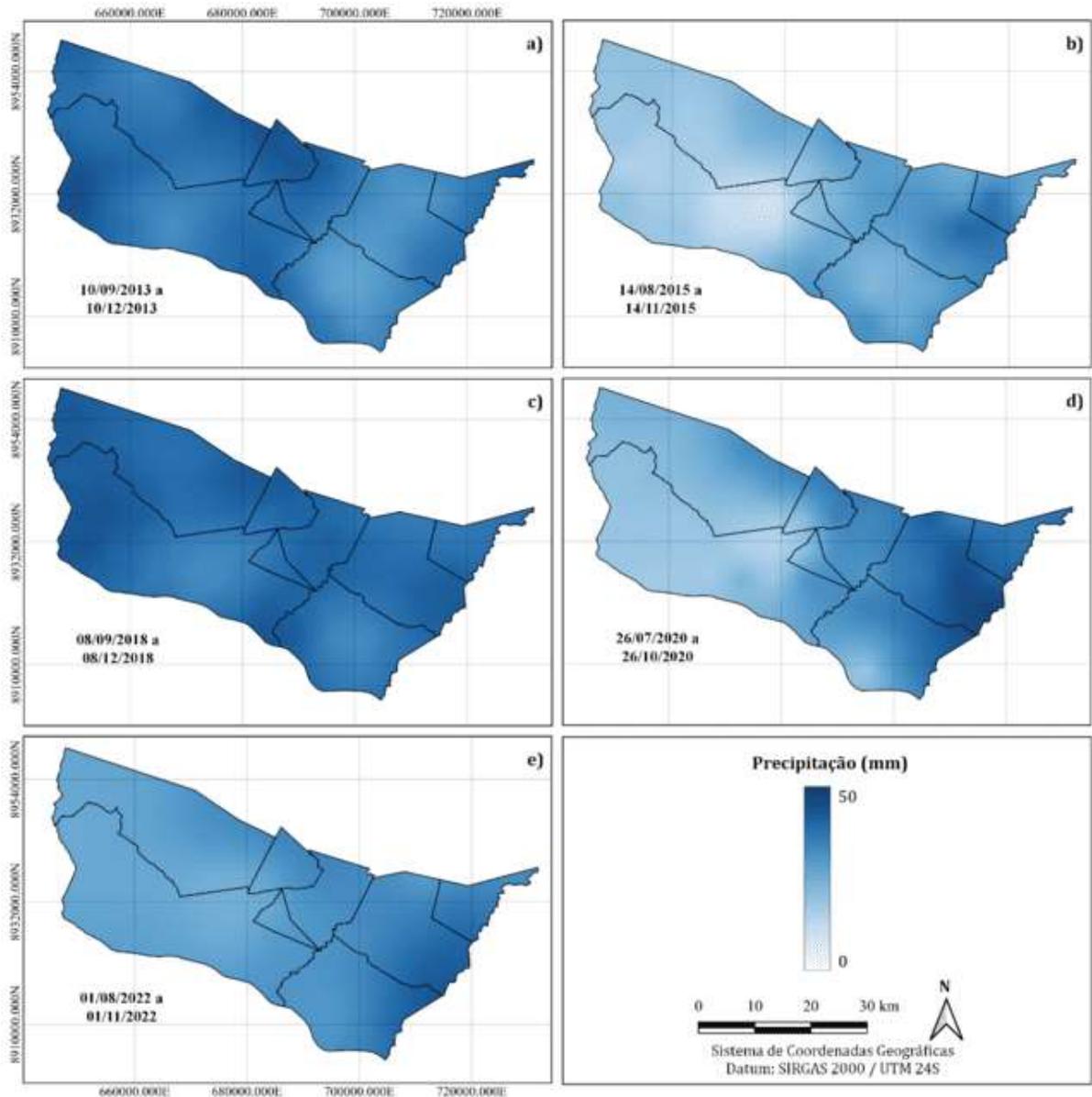


Fonte: A autora (2023).

Ao se avaliar o acumulado de chuva para o período de 90 dias que antecede as imagens selecionadas do satélite Landsat 8, verifica-se que os maiores níveis de precipitação são constatados nos anos de 2013 e 2018 (Figuras 7a e 7c) cujos valores médios são, respectivamente, 19,72 e 20,98 mm. O menor acumulado de chuva é registrado em 2015 (Figura 7b) com uma média de 12,71 mm. Apesar de 2018 ser o ano mais seco do período observado (Figura 6), a quantidade de chuva na área de estudo nos últimos 90 dias é superior aos outros anos, evidenciando a má distribuição de chuvas na região do semiárido brasileiro (JARDIM *et al.*, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2020, VIEIRA *et al.*, 2022), concentrada nos meses de novembro, dezembro e janeiro (BARROS *et al.*, 2012).

Confrontando a área de estudo (Figura 2) com a precipitação especializada (Figura 7), é perceptível que os municípios de Jaramataia, Batalha e Belo Monte costumam apresentar maior precipitação quando comparado aos demais, uma vez que o posicionamento geográfico dos mesmos os aproxima da mesorregião do agreste alagoano, moderadamente mais úmido que o sertão (BARROS *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2021).

Figura 7 - Precipitação espacializada de 90 dias para a área de estudo.



Fonte: A autora (2023).

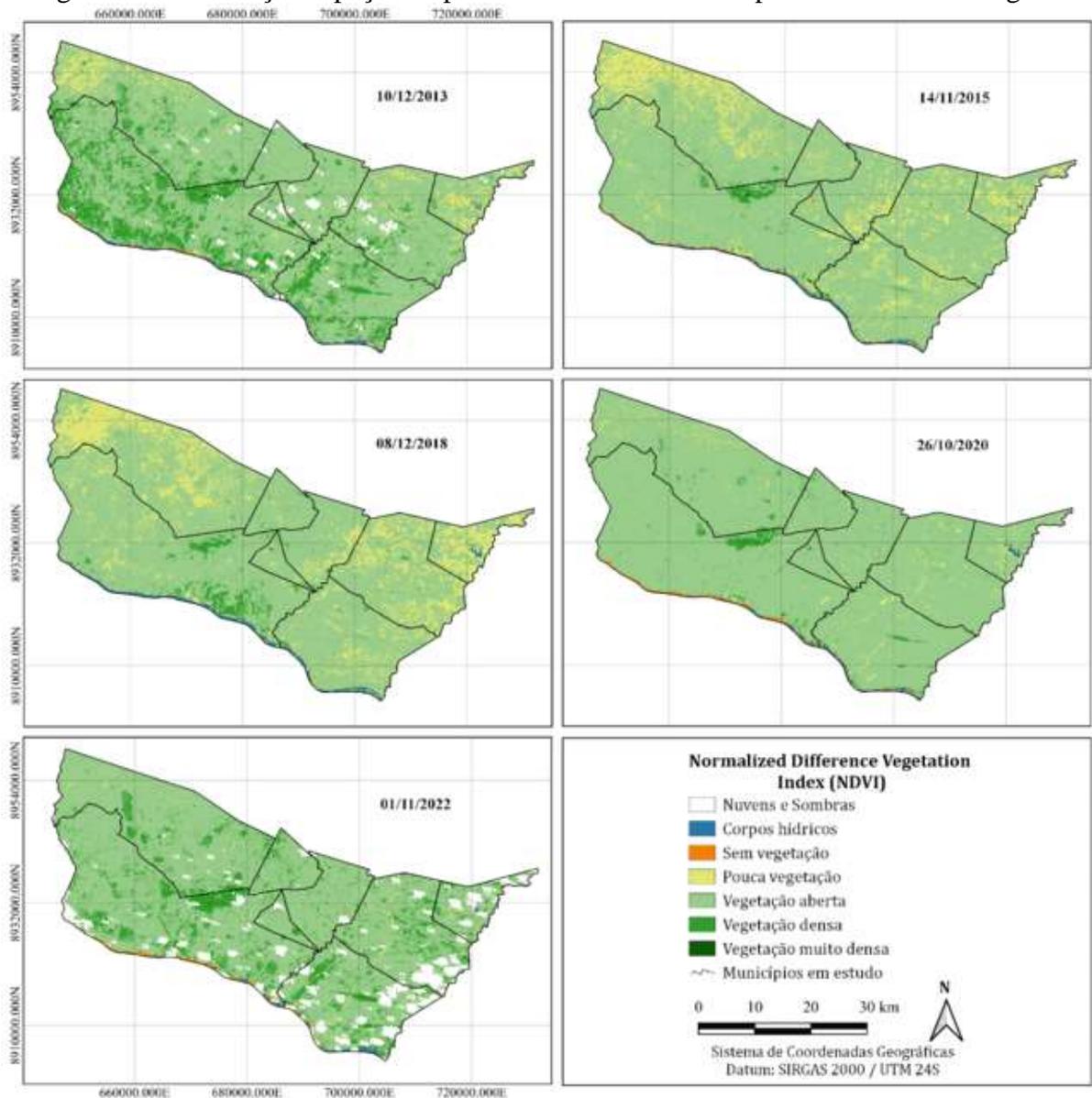
5.3 INDICADORES DE DESERTIFICAÇÃO

5.3.1 Normalized difference vegetation index – NDVI

A densidade de vegetação expressa pelo NDVI a partir da intensidade de verde resalta as modificações ocorridas ao longo da série temporal (Figura 8). A classe “vegetação aberta” é predominante em todas os mapas da figura, chegando a atingir 2.064,84 km² na imagem referente a 26/10/2020, o que corresponde a 93,26% de sua área total. Em 10/12/2013 e 01/11/2022 há uma expressiva manifestação da classe “vegetação densa”, ocupando 351,53

km² e 301,09 km² do território, respectivamente. Já em 14/11/2015 e 08/12/2018 a classe “pouca vegetação” apresenta-se de forma significativa, compreendendo uma área equivalente a 343,78 km² e 397,33 km², respectivamente. As classes “sem vegetação” e “vegetação muito densa” foram as áreas menos observadas ao longo da série temporal, porém mais presentes em 01/11/2022, a primeira ocupando cerca de 29,86 km² do território e a segunda 1,44 km² (Tabela 6).

Figura 8 - Distribuição espaço-temporal do NDVI em municípios do semiárido alagoano.



Fonte: A autora (2023).

Tabela 6 - Distribuição das classes do NDVI para a área analisada.

NDVI	10/12/2013		14/11/2015		08/12/2018		26/10/2020		01/11/2022	
	Área (km ²)	Ocupação (%)								
Corpos hídricos (-1,00 a 0,00)	18,81	0,85	16,97	0,77	26,55	1,20	14,77	0,67	11,06	0,50
Sem vegetação (0,00 a 0,10)	8,07	0,36	11,91	0,54	5,33	0,24	17,69	0,80	29,86	1,35
Pouca vegetação (0,10 a 0,20)	131,88	5,96	343,78	15,53	397,33	17,95	59,15	2,67	50,14	2,26
Vegetação aberta (0,20 a 0,40)	1653,28	74,67	1805,91	81,57	1721,28	77,74	2064,84	93,26	1632,49	73,72
Vegetação densa (0,40 a 0,60)	351,53	15,88	34,61	1,56	62,99	2,85	56,76	2,56	301,09	13,60
Vegetação muito densa (0,60 a 0,75)	1,29	0,06	0,88	0,04	0,62	0,03	0,83	0,04	1,44	0,07

Fonte: A autora (2023).

Os municípios da área de estudo com menor densidade de vegetação (Figura 8) foram São José da Tapera, Jacaré dos Homens, Batalha, Belo Monte e Jaramataia (Figura 2), nos quais a pecuária, principal atividade econômica desenvolvida na região, apresenta notória produtividade. A realização desta atividade explica ainda o porquê a classe “vegetação aberta” ser mais expressiva no território, dado que a criação de animais é realizada sobretudo de maneira extensiva (ALAGOAS, 2017; IEL, 2022).

Ao verificar a precipitação espacializada dos últimos 90 dias que antecedem a captura das imagens pelo satélite é possível verificar os efeitos dos altos volumes de chuva em 10/12/2013, onde é considerável a distribuição da vegetação densa (Figuras 7 e 8). Todavia, a mesma é reduzida significativamente nos anos seguintes, voltando a manifestar-se com mais vigor somente em 01/11/2022, um dos anos mais chuvosos da série (Figura 6). Apesar de 2018 ter sido o ano mais seco do período analisado, o aumento da precipitação nos 90 dias anteriores à coleta da imagem foi suficiente para elevar a densidade da vegetação, mesmo que de modo discreto, revelando os efeitos diretos dos baixos volumes de chuva no período seco na vegetação da Caatinga (BARBOSA *et al.*, 2019, JARDIM *et al.*, 2022).

Mesmo acometido pela seca, o NDVI do ano de 2018 destaca o aumento sutil de corpos hídricos na região (Tabela 6). A imagem 08/12/2018 revela uma área de aproximadamente 26,55 km² ocupada por água, distribuída em trechos de curso dos rios e riachos e em reservatórios. Esse aumento deve estar associado à ocorrência de chuva nos meses anteriores a coleta da imagem e ao aumento da vegetação nas proximidades do rio no município de Pão de Açúcar (Figuras 7 e 8).

A prática agrícola na área de estudo pode, por vezes, elevar os valores de NDVI, visto que o desenvolvimento de algumas culturas pode confundir os sensores dos satélites devido aos seus comportamentos espectrais assemelharem-se a vegetação nativa (JARDIM *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2021a). Vale ressaltar ainda que restrições das condições da superfície da terra podem ser provocadas em regiões com intensas tonalidades de verde (BARBOSA *et al.*, 2019).

5.3.2 Soil-adjusted vegetation index – SAVI

Para melhor interpretação dos dados provenientes do SAVI, foi adotada a seguinte classificação: -1,0 a 0,0 para corpos hídricos, 0,0 a 0,1 para solo exposto, 0,1 a 0,2 para pouca vegetação, 0,2 a 0,3 para vegetação aberta, 0,3 a 0,4 para vegetação densa e 0,4 a 0,75 para

vegetação muito densa. Uma vez que o SAVI é um subproduto do NDVI, os resultados obtidos tendem a ser semelhantes, entretanto algumas alterações foram constatadas (Tabela 7).

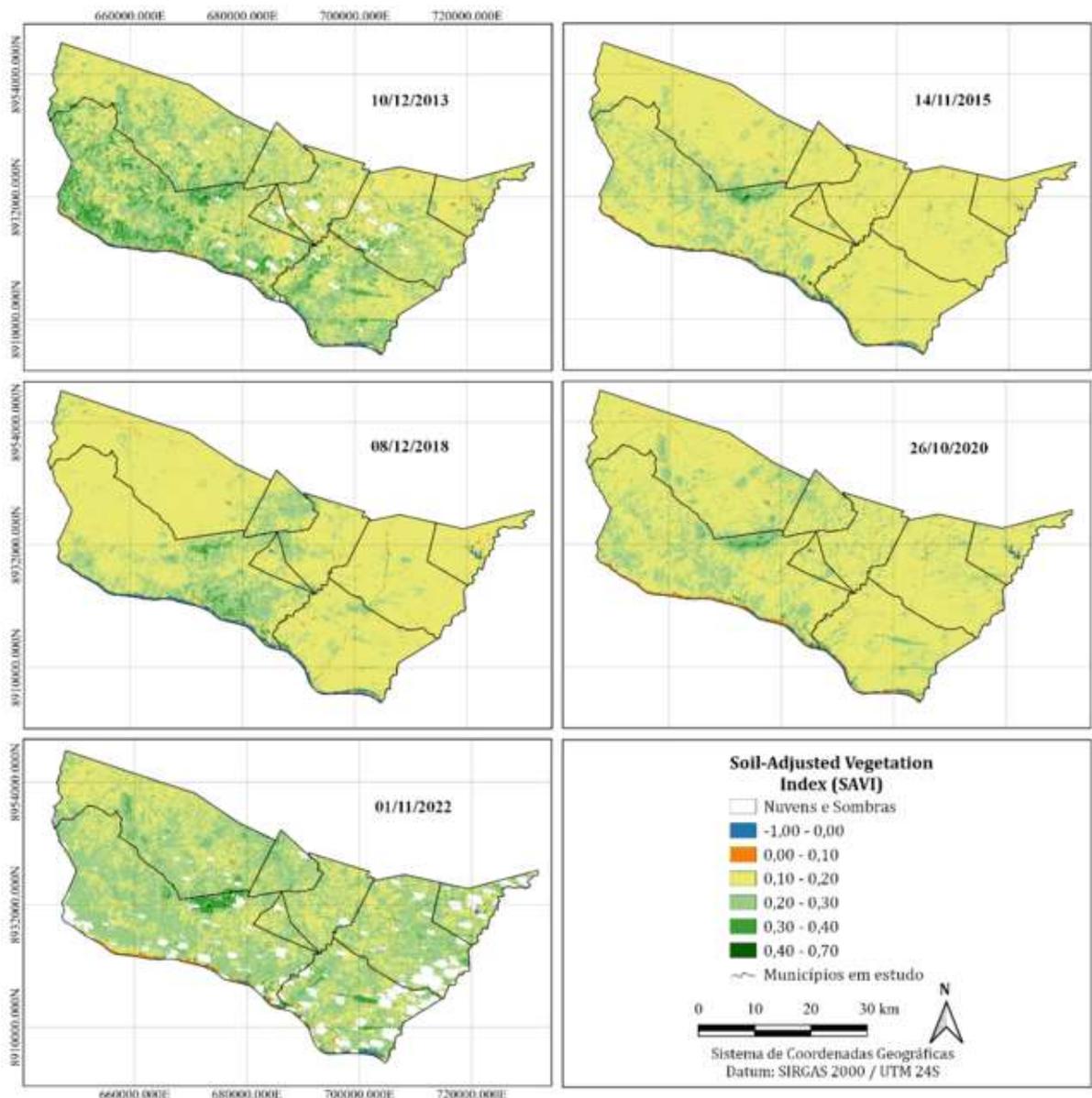
Tabela 7 - Comparação da distribuição territorial (km²) dos Índices SAVI e NDVI na área de estudo.

Imagens	Corpos hídricos		Sem vegetação		Pouca Vegetação		Vegetação aberta		Vegetação densa		Vegetação muito densa	
	SAVI	NDVI	SAVI	NDVI								
	(km ²)	(km ²)										
10/12/2013	18,81	18,81	49,13	8,07	18,81	131,88	33,77	1653,28	1103,94	351,53	3,07	1,29
14/11/2015	16,97	16,97	19,59	11,91	1862,08	343,78	303,14	1805,91	10,77	34,61	1,51	0,88
08/12/2018	26,55	26,55	15,15	5,33	1793,55	397,33	354,91	1721,28	22,64	62,99	1,30	0,62
26/10/2020	14,77	14,77	24,15	17,69	1728,11	59,15	428,45	2064,84	17,14	56,76	1,43	0,83
01/11/2022	11,06	11,06	48,12	29,86	807,68	50,14	1101,63	1632,49	60,95	301,09	1,64	1,44
Média	16,63	16,63	31,23	14,57	1242,05	196,46	444,38	1775,56	243,09	161,40	1,79	1,01

Fonte: A autora (2023).

Nas imagens entre 10/12/2013 e 26/10/2020 destaca-se a classe “pouca vegetação”, enquanto em 01/11/2022 a classe “vegetação aberta” se sobressai. Assim como acusado no NDVI, as imagens 10/12/2013 e 01/11/2022 apresentam vegetação em melhores condições quando comparadas às demais, sendo o município de Pão de Açúcar a região onde sempre são observadas as classes “vegetação densa” e “vegetação muito densa” (Figura 9).

Figura 9 - Distribuição espaço-temporal do SAVI em municípios do semiárido alagoano.



Fonte: A autora (2023).

Enquanto o NDVI declara “vegetação aberta” como classe mais expressiva no território durante a série temporal, SAVI aponta a classe “pouca vegetação” como dominante (Tabela 7; Figura 9). Isso ocorre porque ao não considerar os efeitos do solo na resposta espectral, os

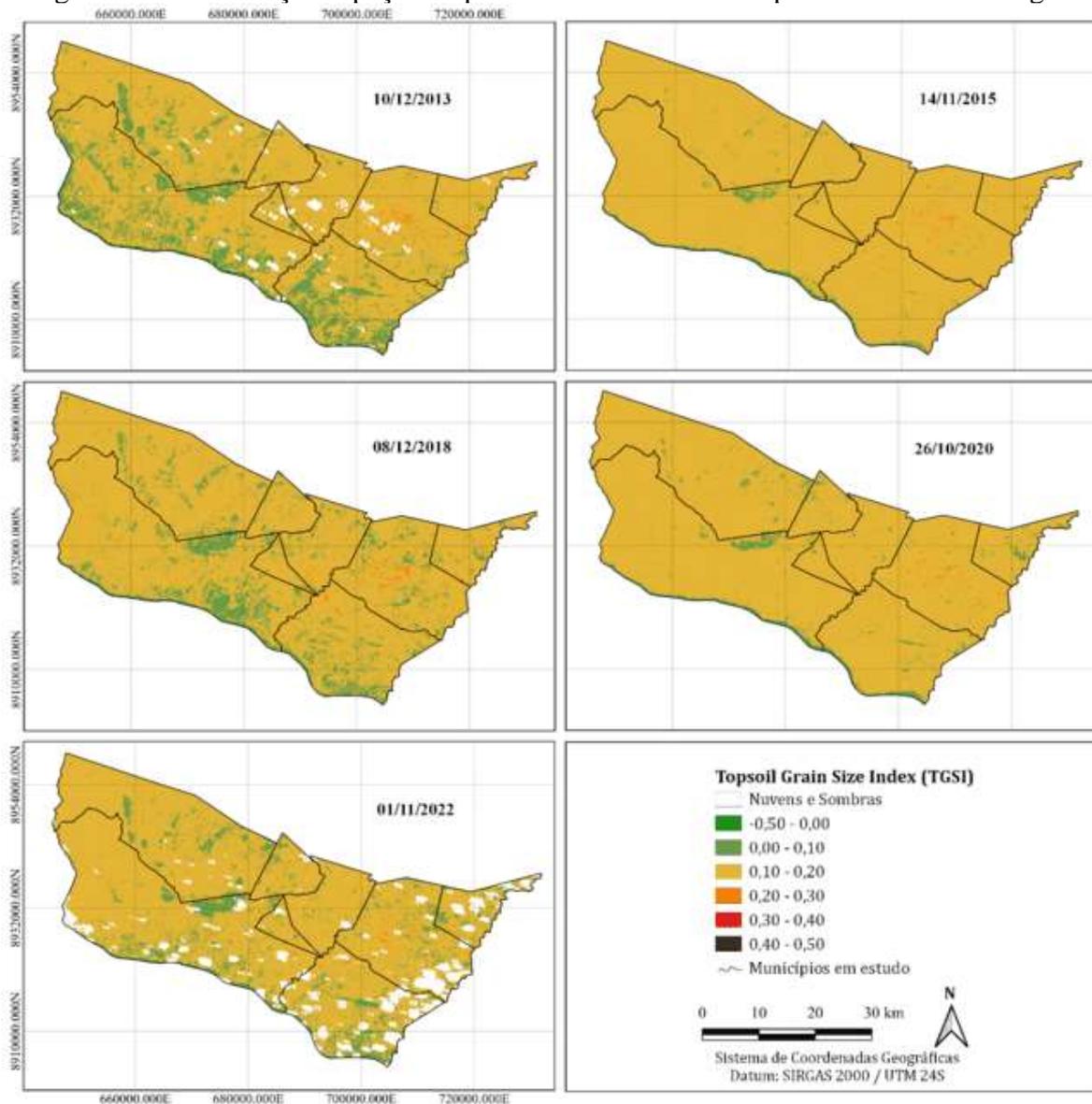
valores de NDVI costumam ser maiores que os de SAVI. Apesar de produzir dados precisos no que concernem as herbáceas e as arbustivas na Caatinga, os melhores resultados obtidos para a realidade da biomassa vegetal provêm do SAVI, pois o NDVI pode confundir áreas degradadas com a vegetação nativa da Caatinga (RIBEIRO; SILVA; SILVA, 2016).

O destaque para as classes de vegetação menos densa na área de estudo ao longo dos anos (Figura 9) pode ser justificado não apenas pelos baixos índices de precipitação, mas também pelas características dos solos, geralmente pouco profundos e com baixa capacidade de armazenamento de água (ALMEIDA; CARVALHO; ARAÚJO, 2019). Fatores como o desmatamento, as queimadas e a intensa pecuária praticada historicamente na região, corroboram ainda mais para a instauração deste cenário, causando um desequilíbrio dos ecossistemas naturais (FIGUEIREDO *et al.*, 2017).

5.3.3 Topsoil grain size index – TGSi

Em 10/12/2013, os dados de TGSi para a área de estudo destaca uma maior zona coberta por valores negativos (Figura 10) que caracterizam presença de argila em relação às demais frações ou áreas não desertificadas (LAMCHIM *et al.*, 2016). Entretanto, a ocorrência desses valores diminui gradativamente no território ao longo da série temporal de modo que para as imagens 14/11/2015, 08/12/2018, 26/10/2020 e 01/11/2022 valores maiores que zero foram predominantes (Tabela 8), sugerindo provável presença de textura grosseira no solo, dado que a existência de material arenoso em sua superfície é representada através de valores positivos do TGSi (BECERRIL-PIÑA *et al.*, 2015).

Figura 10 - Distribuição espaço-temporal do TGSi em municípios do semiárido alagoano.



Fonte: A autora (2023).

Tabela 8 - Área (%) correspondente às classes do Topsoil grain size index (TGSi).

TGSi	10/12/2013	14/11/2015	08/12/2018	26/10/2020	01/11/2022
-0,50 - 0,00	0,38	0,14	0,07	0,04	0,00
0,00 - 0,10	15,04	2,41	12,41	4,22	11,34
0,10 - 0,20	81,36	96,51	86,27	95,18	79,52
0,20 - 0,30	1,01	0,94	1,25	0,56	0,64
0,30 - 0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,40 - 0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: A autora (2023).

Valores acima do limiar de 0,2 estabelecido por Xião *et al.* (2006) para áreas vulneráveis a desertificação foram observados nos anos avaliados, sobretudo na região correspondente à Batalha (Figura 10). Por ultrapassarem este limite, esses valores não estão associados a nenhum nível de desertificação. Sua constatação, no entanto, pode estar relacionada à degradação intensa do meio devido ao pisoteio excessivo de animais, desenvolvimento de práticas rudimentares na pecuária e a devastação da floresta nativa, fatos comumente observados no município (ALAGOAS, 2017; IEL, 2022). Tais atitudes podem culminar no empobrecimento do solo e redução da cobertura vegetal, colaborando para o aumento de zonas de solos expostos e ocorrência dos processos erosivos cuja atuação frequente e intensa pode retirar material fino do solo, deixando somente o material grosseiro, justificando os valores de TGSI elevados, acima do limiar instituído (PEREIRA *et al.*, 2021; QUEIROZ *et al.*, 2021).

É importante salientar que em 10/12/2013, os índices NDVI e SAVI demonstram boa cobertura vegetal em parte significativa da área de estudo (Figuras 8 e 9), fator imprescindível para proteger o solo da ação dos processos erosivos, reduzindo a perda de material fino para outras regiões. Além disso, a maior umidade em 10/12/2013, 08/12/2018 e 01/11/2022 (Figura 6 e 7) demonstram que a precipitação, principalmente quando bem distribuída, melhora a resposta da vegetação que atua protegendo o solo da ação da água e do vento. Contudo, em 14/11/2015 e 26/10/2020, períodos mais secos (Figura 7) é notório o aumento de áreas representadas por maiores valores de TGSI, pois o solo torna-se mais susceptível a erosão eólica, aumentando, por conseguinte, sua fração de partículas mais grosseiras (REN *et al.*, 2015).

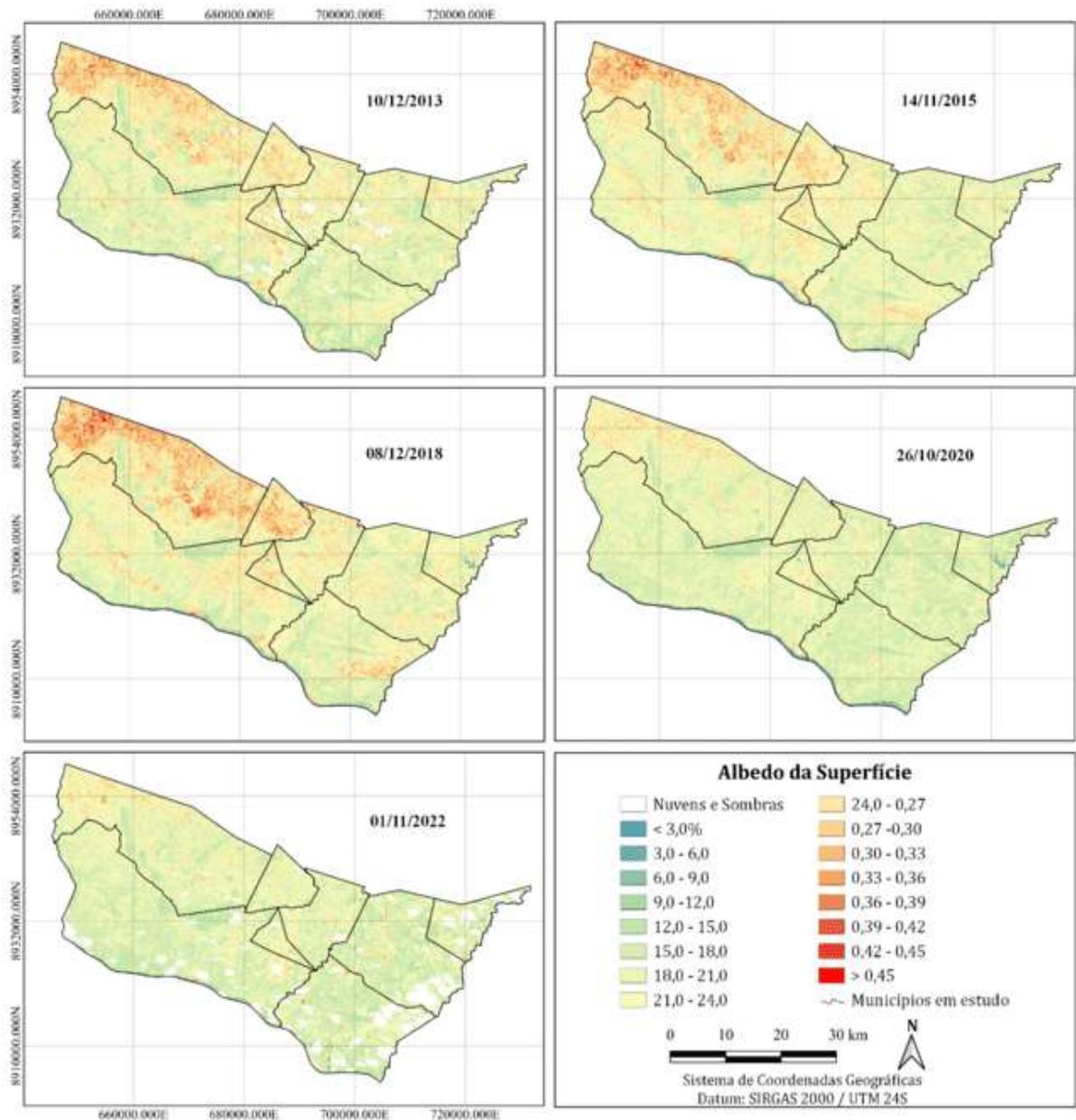
A variação do TGSI em relação a quantidade de areia ocorre de maneira linear. No tocante aos estudos de desertificação a erosão é frequentemente observada nestas áreas. Destarte, o aumento da intensidade de erosão advindo da pouca cobertura de vegetação e a distribuição irregular de precipitação engendram maiores valores de TGSI.

5.3.4 Albedo

A razão da energia refletida pela incidente expressa pelo albedo evidencia as modificações ocorridas no espaço ao longo da série temporal. Tons mais azulados e esverdeados indicam superfícies mais ásperas e de coloração mais escura, logo não desertificadas. No entanto, tons mais amarelados e avermelhados representam superfícies lisas e de coloração mais clara, portanto, mais vulneráveis ao processo de desertificação (DOBOS, 2003; LAMCHIN *et al.*, 2016). Em 10/12/2013, 14/11/2015 e 08/12/2018 destacam-se tons de vermelho, ocupando

parte expressiva dos municípios de São José da Tapera, Monteirópolis e Palestina (Figura 11), regiões onde valores mais baixos dos índices NDVI e SAVI foram observados.

Figura 11 - Distribuição espaço-temporal do albedo em municípios do semiárido alagoano.



Fonte: A autora (2023).

Em 26/10/2020 e 01/11/2022 há uma redução nos valores de albedo na área de estudo, sobretudo quando comparados a 08/12/2018 (Figura 11; Tabela 9), uma vez que 2020 e 2022 foram os anos com maiores níveis de precipitação anual acumulada (Figura 6), fato que colaborou para a melhoria da cobertura vegetal. Em regiões semiáridas a quantidade de chuva afeta diretamente a resposta da vegetação, alterando os balanços de radiação na superfície

terrestre, pois regiões com maior cobertura vegetal apresentam menores reflectâncias do solo, o que contribui para menores valores de albedo (GODINHO *et al.*, 2016).

Tabela 9 - Área correspondente à distribuição do Albedo de superfície, em porcentagem (%).

Albedo da superfície	10/12/2013	14/11/2015	08/12/2018	26/10/2020	01/11/2022
< 3,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,0 - 6,0	0,06	0,23	0,20	0,80	0,03
6,0 - 9,0	1,23	0,81	0,82	0,70	1,29
9,0 - 12,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12,0 - 15,0	5,76	2,58	2,58	5,66	8,42
15,0 - 18,0	21,68	18,05	18,68	33,26	32,63
18,0 - 21,0	21,71	26,36	22,67	32,76	25,72
21,0 - 24,0	21,16	24,53	22,20	17,16	14,74
24,0 - 27,0	15,08	16,00	16,94	6,82	6,16
27,0 - 30,0	6,86	7,09	8,60	2,03	1,54
30,0 - 33,0	2,81	2,83	4,42	0,58	0,61
33,0 - 36,0	1,19	1,19	2,34	0,20	0,31
36,0 - 39,0	0,20	0,26	0,48	0,02	0,13

Fonte: A autora (2023).

A classe 18,0 - 21,0 ocupou maior proporção da área de estudo em todos os mapas (Figura 11), indicando quão esparsa e reduzida é a vegetação predominante no território, como já demonstrado pelos índices NDVI e SAVI, além da prevalecente fração grosseira no solo, como apontado pelo TGSI, fatores decorrentes do sobrepastejo, prática comum em municípios da Bacia Leiteira de Alagoas (VASCONCELOS JÚNIOR, 2017).

Influenciado pelo fluxo de energia e calor de determinada área, o albedo é fundamental para a identificação de áreas desertificáveis, pois altos valores de radiação na superfície expressam redução da umidade que, por sua vez, interfere negativamente no desenvolvimento da vegetação, o que dificulta o estabelecimento da cobertura vegetal e, por conseguinte, torna o solo mais propenso aos processos erosivos e ao fenômeno de desertificação (LIU *et al.*, 2017).

A ocorrência de elevados valores de albedo na área de estudo é um reflexo do estado crítico da cobertura vegetal e do solo na região. Tais aspectos corroboram para a susceptibilidade do território desses municípios ao processo de desertificação, intensificado a

cada ano pelas práticas insustentáveis desenvolvidas nos mesmos, reflexo da gestão equivocada associada a falta de conhecimento da população (COSTA, 2021; SILVA, 2015).

5.4 DADOS DE CAMPO

A visitação nos oito municípios correspondentes a área de estudo efetuou-se em 24 pontos, dos quais 16 foram previamente georreferenciados. Os outros oito pontos serviram para complementar as informações adquiridas ao longo da visita *in loco*. Os dados registrados foram confrontados com aqueles oriundos dos índices de desertificação, bem como os do MapBiomias.

O primeiro ponto corresponde a uma área de pastagem localizada no município de Jaramataia (Figura 12 A). Em meio a vegetação herbácea, onde predominava vassourinha-de-botão (*Spermacoce verticillata*), haviam espécimes jovens de algaroba (*Prosopis juliflora*) e jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*), evidências de degradação, visto que o expressivo potencial alelopático da *M. tenuiflora* concebe, em ambientes desequilibrados, predomínio de sua espécie em relação a outras plantas nativas da Caatinga, enquanto *P. juliflora* é uma espécie invasora no semiárido nordestino e, portanto, compete pelos recursos disponíveis com as plantas características da região (ALVES *et al.*, 2020; NOGUEIRA *et al.*, 2019).

Ainda em Jaramataia, o ponto 2 constitui-se de uma área classificada como Floresta pelo MapBiomias (Figura 12 B). No entanto verificou-se apenas um fragmento de vegetação nativa remanescente de extrato subarbóreo, no qual foram encontradas catingueiras (*Caesalpinia pyramidalis*), madacarus (*Cereus jamacaru*), marmeleiros (*Croton sonderianus*), angicos (*Anadenanthera colubrina*), juazeiros (*Ziziphus joazeiro*), braúnas (*Melanoxylon brauna*) e juremas-preta. Apesar das espécies nativas foram também encontradas palma forrageira (*Opuntia cochenillifera*), capim panasco (*Aristida adscensionis*) e velame (*Croton heliotropiifolius*), evidenciando o manejo do território. A introdução de plantas forrageiras em área de vegetação nativa intensifica a prática do desmatamento e amplia o contingente de potenciais espécies invasoras, pois o estabelecimento das mesmas é facilitado em ambientes perturbados (ALMEIDA *et al.*, 2014).

Figura 12 - Áreas visitadas no município de Jaramataia, em 15/02/2023, correspondentes aos pontos 1 (A) e 2 (B).



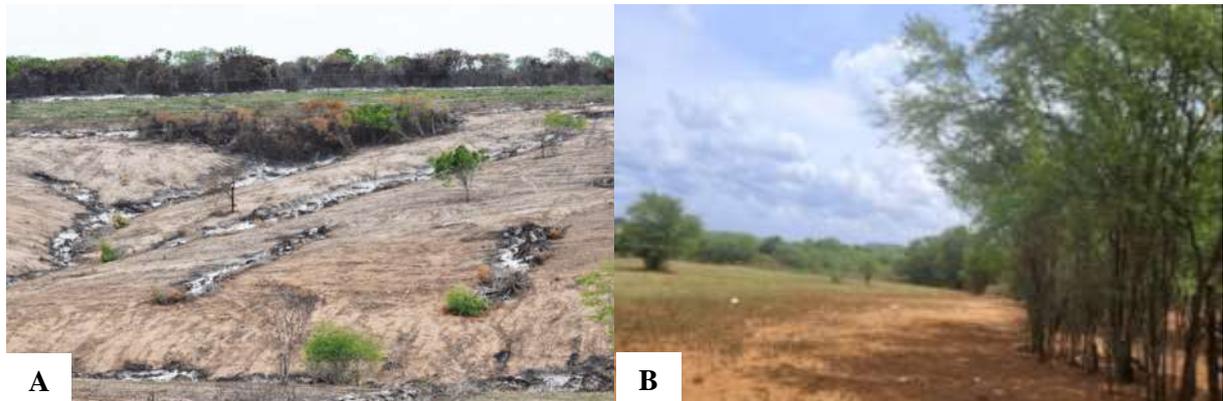
Fonte: A autora (2023).

Desmatamento expressivo, fumaça decorrente de queimadas, solo desnudo e marcas de trator de esteira foram encontradas em área de floresta no ponto 3, localizado no município de Batalha, caracterizando perda de vegetação natural (Figura 13 A). Em meio a devastação encontrada, alguns exemplares de catingueira, marmeleiro e jurema-preta foram identificados. Batalha é uma das principais cidades da bacia leiteira de Alagoas, apresentando produção significativa de leite e derivados. Porém, vegetação nativa é incomum em seu território. Nesse contexto, é evidente a vulnerabilidade do solo ao fenômeno de desertificação na região, fazendo-se necessária a implantação de práticas que conservem e restaurem os ecossistemas naturais e a melhoria dos sistemas alimentares, como sugerido pelo último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022).

O ponto 4 corresponde a uma área de pastagem em uma propriedade de Batalha, onde foi observada a criação de bovinos e grande quantidade de algaroba (Figura 13 B). A dispersão dessa espécie é comumente realizada por meio das fezes de bovinos e caprinos. Apesar de sua madeira ser utilizada como fonte de lenha e em construção de cercas e de suas vagens servirem de alimento para o homem e para o gado, sua presença prejudica o desenvolvimento da vegetação da Caatinga, a fauna a ela associada e a disponibilidade de água. Desse modo, a presença de *P. juliflora* não é interessante no semiárido nordestino (NOGUEIRA *et al.*, 2019).

O solo na propriedade encontrava-se arado, prática que fragiliza sua estrutura e constituição, uma vez que o torna mais susceptível às consequências da erosão hídrica e eólica, pois além da discreta cobertura vegetal não proteger efetivamente o solo, sua natureza rasa e suas partículas soltas corroboram para a degradação do mesmo (OLIVEIRA, 2021b).

Figura 13 - Áreas visitadas no município de Batalha, em 15/02/2023, correspondentes aos pontos 3 (A) e 4 (B).



Fonte: A autora (2023).

Entre os pontos 3 e 4, foi verificado um trecho do rio Ipanema no município de Batalha (-37.1246519923389, -9.68992802174929). O baixo volume de água, apesar de característico dos rios do sertão alagoano, desperta preocupações, pois evidências de assoreamento, tais como a presença de vegetação em rochas no curso do rio, foram constatadas, além do uso de suas margens para a criação animal (Figura 14). Além disso, as mudanças climáticas têm impactado os recursos hídricos da região, agravando suas condições (SILVEIRA *et al.*, 2016). Tais fatores contribuem para a compreensão dos dados obtidos através do MapBiomas, NDVI e SAVI os quais ressaltam a diminuição dos corpos d'água na região (Tabela 5), sobretudo nas proximidades dos rios (Figuras 5, 8 e 9).

Figura 14 - Registro *in loco* de trecho do rio Ipanema, em Batalha.



Fonte: A autora (2023).

Em Belo Monte, o quinto ponto corresponde a um fragmento de vegetação nativa bastante degradada. Mesmo situado em uma serra, foram observadas muitas áreas desmatadas e marcas de queimadas no solo e na vegetação ainda presente, representada por espécimes de Ouricuri (*Syagrus coronata*), Braúna, Catingueira, Ipê-amarelo (*Handroanthus albus*), jurema-preta e velame (Figura 15 A). O cultivo de palma forrageira destinada a alimentação animal é predominante no local, mesmo nas partes mais íngremes do relevo, caracterizando o uso da área para a atividade agropecuária, expressiva no município (Figura 15 B).

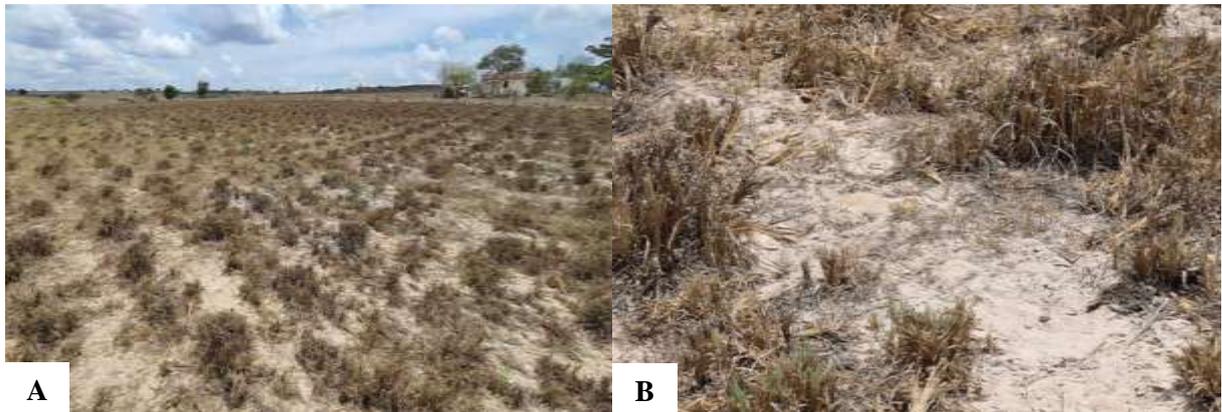
Figura 15 - Área visitada no município de Belo Monte, em 15/02/2023, correspondente aos pontos 5 (A e B).



Fonte: A autora (2023).

Uma plantação de capim foi encontrada no ponto 6, ainda em Belo Monte, área direcionada a criação de animais (Figura 16 A). O solo bastante seco apresentava uma tonalidade clara e suas partículas grosseiras estavam nitidamente soltas (Figura 16 B). Isto pode indicar um constante revolvimento e uso do solo, justificando assim os maiores valores apresentados pelo TGSI e albedo (Figura 10 e 11). Praticamente não existia vegetação na propriedade, havendo poucos exemplares plantados de Leucena (*Leucaena leucocephala*) e cajueiro (*Anacardium occidentale*). O conjunto desses aspectos manifestam quão vulnerável essa região está no que diz respeito a ocorrência da desertificação. O crescimento das áreas de pastagens provenientes da crescente demanda por alimentos favorece as mudanças no uso e ocupação do solo e, por isso, reduz drasticamente a vegetação do bioma Caatinga, engendrando impactos significativos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, podendo torná-lo inútil (RIBEIRO *et al.*, 2016; PRESTON *et al.*, 2017).

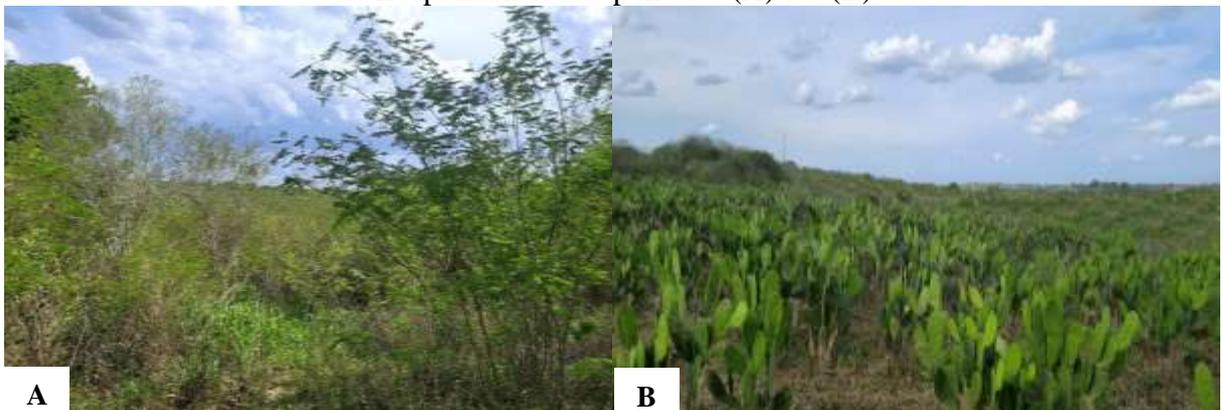
Figura 16 - Área visitada no município de Belo Monte, em 15/02/2023, correspondente ao ponto 6 (A e B).



Fonte: A autora (2023).

Em Jacaré dos Homens, são registrados os pontos 7 e 8. O primeiro refere-se a um fragmento de floresta de extrato subarbóreo composto por diversas espécies nativas, como catingueira, angico, mandacaru (*Cereus jamacaru*), mofumbo (*Combretum leprosum*), marmeleiro, pau ferro (*Libidibia ferrea*), jurema-branca (*Piptadenia stipulacea*), braúna, juazeiro e pata de vaca (*Bauhinia forficata*). Apesar da diversidade vegetal, a área não pode ser considerada natural dada a existência de clareiras no meio da mata para o plantio de espécies forrageiras, tornando-a antropizada (Figura 17 A). O ponto 8, por sua vez, está localizado às margens do Riacho Jacaré (Figura 17 B). A plantação de palma presente na área e a criação de animais explicam o assoreamento deste corpo hídrico, justificando os valores mais críticos dos índices de desertificação encontrados para esse ponto. Vale ressaltar que espécies vegetais pioneiras foram observadas no local, a exemplo da jurema-preta, catingueira e da invasora algaroba.

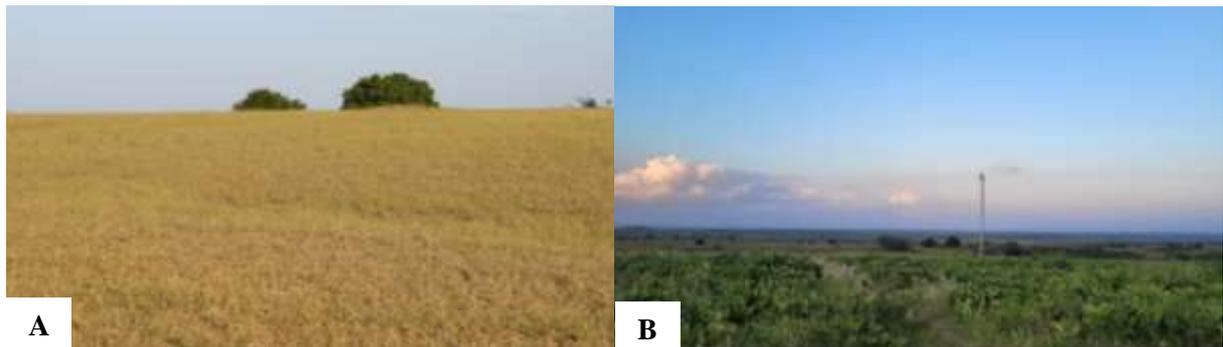
Figura 17 - Áreas visitadas no município de Jacaré dos Homens, em 15/02/2023, correspondentes aos pontos 7 (A) e 8 (B).



Fonte: A autora (2023).

Em Monteirópolis todo o percurso realizado compreendia áreas destinadas a criação animal, sobretudo bovinos. O nono ponto afirma este cenário ao estar inserido numa extensa área de pastagem, com alguns espécimes de juazeiro e umburana (*Amburana cearenses*) plantados (Figura 18 A). Ao lado dessa havia ainda um cultivo de palma, provavelmente utilizado para alimentação animal (Figura 18 B).

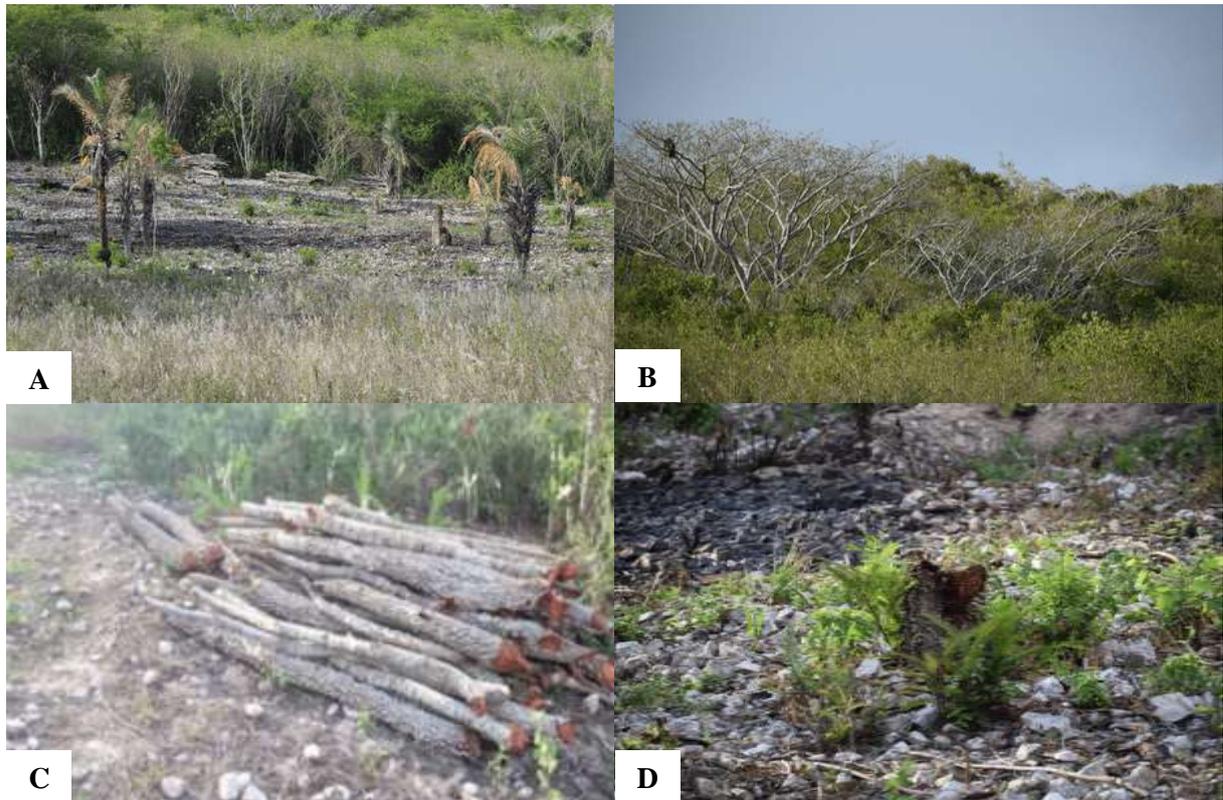
Figura 18 - Área visitada no município de Monteirópolis, em 15/02/2023, correspondente ao ponto 9 (A e B).



Fonte: A autora (2023).

Nas proximidades do limite municipal de Monteirópolis, está o ponto 10, uma área declivosa de solo coberto por fragmentos rochosos com vegetação nativa, mas manejada (Figura 19 A). Dentre as plantas encontradas destacam-se jurema-preta, angico, ouricuri, ipê-amarelo, pata de vaca e cajarana (*Spondias venulosa*) cujo nascimento espontâneo é incomum, ocorrendo comumente em regiões mais conservadas (Figura 19 B) (ALVARENGA; ARAÚJO-SANTOS; BENCHIMOL, 2020). Apesar de antropizada, nota-se que a retirada da madeira do angico é feita de modo que a planta rebrote e seu uso é destinado a preparação de alimentos no fogão à lenha (Figura 19 C e D). Há ainda o plantio de palma para a alimentação animal e uma área destinada ao plantio de culturas como o milho e o feijão, onde são mantidos os ouricuris devido a importância de sua palha e seus frutos para os moradores locais.

Figura 19 - Área visitada no município de Monteirópolis, em 15/02/2023, correspondente ao ponto 10 (A, B, C e D).



Fonte: A autora (2023).

O ponto 11 está situado em São José da Tapera e corresponde a uma área de pastagem direcionada, sobretudo, a criação de bovinos e caprinos. Umburana, angico, ipê-amarelo, catingueira e macambira (*Bromelia laciniosa*) foram identificadas na área, porém a disposição das mesmas demonstra que não surgiram naturalmente no ambiente. A presença de pequenos arbustos esparsos, com destaque para jurema-preta e algaroba, e o cultivo de plantas forrageiras reforçam a existência de uma área degradada.

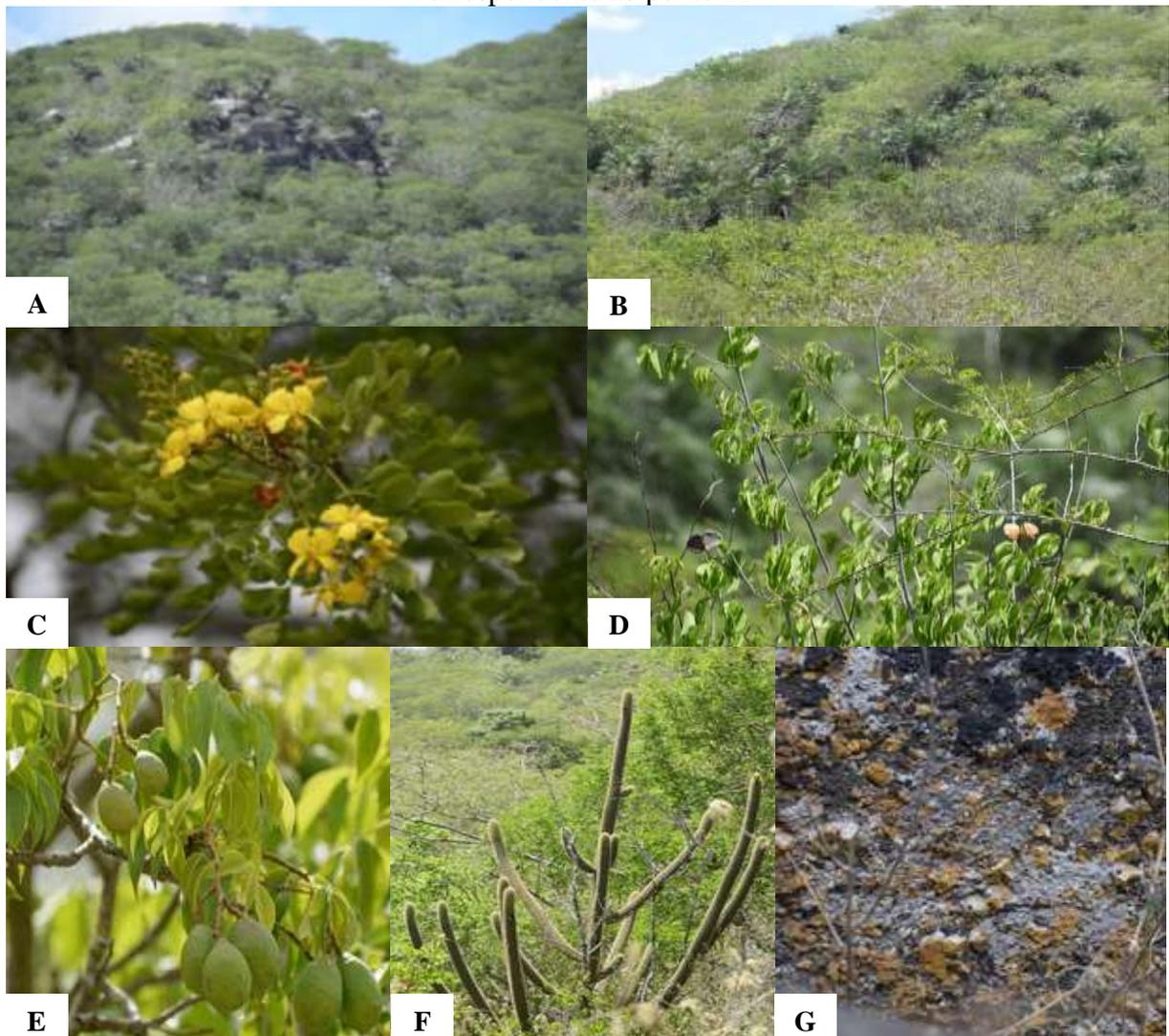
Figura 20 - Área visitada no município de São José da Tapera, em 16/02/2023, correspondente ao ponto 11.



Fonte: A autora (2023).

Uma região de mata foi encontrada em São José da Tapera, sendo o décimo segundo ponto (Figura 21 A). A diversidade vegetal é representada por espécies de Ouricuri (Figura 21 B), angico, jurema-branca, jurema-preta, catingueira (Figura 21 C), pereiro (Figura 21 E) (*Aspidosperma pyriformium*), umbuzeiro (Figura 21 D), pinhão manso (*Jatropha curcas*), bromélias (família *Bromeliaceae*), ipês (*Tabebuia sp.*), pau ferro, espirradeira (*Nerium oleander*), cactáceas (Figura 21 E) e variedades de pata de vaca (*Bauhinia sp.*). Foi observada também a existência de muitos fungos associados à vegetação (Figura 21 F), demonstrando quão equilibrado é o ambiente visto que quando sujeito a mudanças drásticas o desenvolvimento desses organismos é afetado (OLIVEIRA *et al.*, 2022). Mesmo assim, foram verificados índicos de manejo da área, dentre eles pegadas de animais no solo, fezes bovinas e clareiras, nas quais haviam inclusive algaroba.

Figura 21 - Área visitada no município de São José da Tapera, em 16/02/2023, correspondente ao ponto 12.



Fonte: A autora (2023).

Os pontos 13 e 14 estão situados em Pão de Açúcar. No primeiro foi observada a presença de gado e o predomínio de algarobas e jurema-preta, evidenciando o uso da área para a atividade pecuária (Figura 22 A). Circundando a área, haviam braúnas, cactáceas e catingueiras. O fato de haver muita vegetação em sucessão no ambiente e da presença de palhada sobre o solo aumenta a qualidade do mesmo. Já o último ponto está localizado em um território de difícil acesso, há 300m de altitude (Figura 22 B). Neste ambiente foram encontradas as espécies juazeiro, marmeleiro, catingueira, barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*), ipê, pata de vaca e embaúba (*Cecropia pachystachya*). Entretanto, mesmo diante o acentuado declive do terreno, a plantação de capim e palma forrageira (Figura 22 C) bem como pegadas e fezes de animais ruminantes (Figura 22 D) foram identificadas no local em meio a vegetação nativa.

Figura 22 - Áreas visitadas no município de Pão de Açúcar, em 16/02/2023, correspondentes aos pontos 13 (A) e 14 (B, C e D).



D

Fonte: A autora (2023).

Em Palestina estão localizados os dois últimos pontos. Assim como em Monteirópolis, a maior parte de seu território é ocupada por áreas de pastagem, todavia em Palestina o solo apresenta, geralmente, aspecto mais grosseiro e coloração mais clara, indicando maior degradação. O ponto de número 15 é uma área de pasto cujo solo é desnudo, havendo apenas alguns trechos de capoeira (Figura 23 A). Algumas espécies plantadas foram encontradas, tais como braúna, catingueira e facheiro (*Pilosocereus pachycladus*). Já o ponto 16, um dos poucos locais do município classificados como floresta pelo MapBiomas (Figura 4), apresenta um fragmento de mata bastante antropizado, com extensas clareiras e indícios de retirada de madeira, principalmente do angico (Figura 23 B). Além da *A. colubrina*, espécimes de catingueira, macambira, marmeleiro e cactáceas foram observadas no local.

Figura 23 - Áreas visitadas no município de Palestina, em 16/02/2023, correspondentes aos pontos 15 (A) e 16 (B).



Fonte: A autora (2023).

Durante a realização das visitas aos pontos mencionados foram registradas as temperaturas referentes à superfície do solo, vegetação e ar (Tabela 10). Mesmo em ambientes de pastagem, onde a quantidade de espécies vegetais é consideravelmente reduzida, nota-se que a temperatura se torna mais amena em sua presença, reforçando o importante papel da cobertura vegetal para a manutenção da qualidade ambiental (LUCENA; FERRER; GUILHERMINO, 2021). Altas temperaturas foram observadas em solo exposto, com valores que atingem até 62,2°C, o que pode ocasionar a descolonização de microrganismos na área, aumentando a infertilidade e contribuindo para a instauração do processo de desertificação (ARAÚJO *et al.*, 2021).

Tabela 10 - Temperatura (°C) registrada no decorrer das visitas aos pontos na área de estudo.

Município	Ponto georreferenciado	Uso e ocupação do solo (MapBiomias)	Horário	Temperatura (°C)		
				Solo exposto	Vegetação	Ar
Jaramataia	1	Pastagem	8h28min	39,2	34,5	31,0
	2	Floresta	8h50min	39,1	31,0	30,2
Batalha	3	Floresta	9h22min	43,4	33,3	32,1
	4	Pastagem	10h05min	50,4	40,9	32,6
Belo Monte	5	Floresta	11h30min	58,2	36,9	34,8
	6	Pastagem	12h28min	62,2	38,2	42,2
Jacaré dos Homens	7	Floresta	14h50min	54,3	41,6	35,2
Monteirópolis	8	Pastagem	15h28min	47,0	38,3	28,8
	9	Pastagem	16h15min	49,7	37,5	34,5
	10	Floresta	17h20min	36,4	35,0	28,0
São José da Tapera	11	Pastagem	8h40min	47,1	33,7	30,0
Pão de Açúcar	12	Floresta	9h35min	47,5	33,4	31,3
	13	Pastagem	12h00min	59,9	43,9	37,8
Palestina	14	Floresta	13h10min	61,0	47,4	39,9
	15	Pastagem	15h45min	50,1	37,2	33,8
	16	Floresta	16h30min	40,2	35,2	34,6

Fonte: A autora (2023).

A existência de uma exploração desenfreada do solo nos municípios que integram a área de estudo é inegável. Apesar do desenvolvimento econômico ser algo interessante para a

sociedade, a forma como se está tentando obtê-lo pode inclusive impedi-lo, visto que os danos ambientais provocados levam ao desgaste do solo que prejudica a sobrevivência de plantas e animais, pilares da economia da Bacia Leiteira.

A qualidade de vida da população e a ocupação de territórios rurais, associados às mudanças de uso e cobertura da terra, além da prática de atividades que impactam o meio ambiente, como o desmatamento e as queimadas, não afetam apenas os ecossistemas ou os padrões climáticos, mas a sociedade e a economia, reduzindo a produtividade agropecuária e, portanto, prejudicando a dinâmica de sobrevivência da população (RIEIRO *et al.*, 2016; PRESTON *et al.*, 2017). Prevenir a desertificação no semiárido alagoano é garantir a possibilidade de seu progresso.

6 CONCLUSÃO

No decorrer dos anos, o avanço da degradação do solo nos municípios de São José da Tapera, Pão de Açúcar, Monteirópolis, Palestina, Jacaré dos Homens, Belo Monte, Batalha e Jaramataia tem corroborando para a susceptibilidade da área ao processo de desertificação. O manejo inadequado do solo, sobretudo para o desenvolvimento da pecuária, bem como a exploração demasiada da vegetação representam fatores essenciais na instauração desse cenário.

O sensoriamento remoto mostrou-se uma ferramenta eficaz para a constatação da degradação existente no território, facilitando a compreensão da relação existente entre diversos fatores ambientais. Entretanto, a presença de nuvens nas imagens referentes aos anos 2013 e 2022 impediram a avaliação de determinadas áreas em alguns municípios, evidenciando a necessidade de um estudo adicional. Além disso, notou-se limitações dos sensores para distinguir solos desnudos daqueles com pouca e esparsa vegetação.

A dinâmica espaço-temporal da vegetação é influenciada pelos níveis de precipitação na Caatinga. Os últimos anos avaliados, 2020 e 2022, apresentaram os maiores saldos de precipitação, colaborando para a recomposição vegetal na área de estudo, revelada principalmente 01/11/2022. No entanto, percebe-se que muitas regiões permaneceram com níveis críticos para os índices de NDVI, SAVI, TGSÍ e albedo, reforçando quão vulneráveis estão esses ambientes a desertificação.

Dados do MapBiomas afirmam que a classe floresta ocupa grande parte dos municípios analisados, ficando através somente da classe pecuária. Porém, através das visitas *in loco*, notou-se que apesar da presença de espécies nativas da Caatinga, boa parte da vegetação era predominantemente representada por jurema-preta, catingueiras, velames e espécies invasoras como a algaroba, indicando a antropização da área e, conseqüentemente, sua degradação. Portanto, apesar da eficácia do sensoriamento remoto para a obtenção de dados, a realização de visitas aos municípios proporcionou a aquisição de informações mais íntegras e precisas.

O desenvolvimento de estudo complementares para a avaliação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo podem contribuir para a descrição do nível de sua deterioração, contribuindo para a implantação de estratégias a fim de impedir ou mitigar os efeitos da desertificação no semiárido alagoano.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A.N. Os sertões: a originalidade da terra. **Ciência Hoje**, v.3, n.1, p. 42–47, 1985.

ACCIOLY, L. JO. *et al.* Phytomass mapping of the Seridó Caatinga vegetation by the plant área and the normalized difference vegetation indices. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n.4, p. 707-715, 2002.

ALAGOAS. Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio. **Bacia leiteira e pólo leiteiro alagoano (Mapa)**. Maceió, AL: SEPLAG, 2015. Disponível em: <https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/0305ed10-fdf6-45b9-bedf-c91d553f50d4/resource/222ffe76-29b0-47aa-933f-224652df68df/download/baciaepololeiteiralagoano2015.png>. Acesso em jun. 2022.

ALAGOAS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. **Plano de Ação Estadual de Alagoas para o Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – PAE-AL**. Maceió, AL: SEMARH, 2011. Disponível em: https://www.mma.gov.br/images/arquivos/gestao_territorial/desertificacao/programas_estaduais/pae_al_versao_final.pdf. Acesso em: abr. 2020.

ALAGOAS. Secretaria de Estado do Planejamento Gestão e Patrimônio. **Estudo sobre pecuária leiteira de Alagoas**. Maceió: SEPLAG, 2017.

ALAGOAS. Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio. **Bacias hidrográficas e regiões hidrográficas de Alagoas (Mapa)**. Maceió, AL: SEPLAG, 2020. Disponível em: <https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/3b2b1cf6-da0c-4f68-98cc-f22410914d95/resource/6bdfc666-65cf-4baf-8ca1-492c50131690/download/bacianovoooo.png>. Acesso em abr. 2022.

ALBUQUERQUE, D. S. *et al.* Cenário da desertificação no território brasileiro e ações de combate à problemática no estado do Ceará, Nordeste do Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 55, n.1, p. 673-696, 2020.

ALLEN, R. *et al.* **Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL): Advanced training and users manual**. Idaho: Idaho Department of Water Resources, 2002.

ALMEIDA, C. L.; CARVALHO, T. R. A.; ARAÚJO, J. C. Leaf area index of Caatinga biome and its relationship with hydrological and spectral variables. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 279, n.7, p.1-9, 2019.

ALMEIDA, W. R. *et al.* The alien flora of Brazilian Caatinga: deliberate introductions expand the contingent of potential invaders. **Biological Invasions**, v. 17, n. 1, p. 51-56, 2014.

ALVARENGA, J. M.; ARAÚJO-SANTOS, I.; BENCHIMOL, M. Influência da cobertura florestal na chegada de sementes em agroflorestas de cacau. **Agrotrópica**, Ilhéus, v. 32, n. 3, p. 207-216, 2020.

ALVES, A. C. N. **Análise espacial integrada da degradação da terra em área do bioma Caatinga**. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2022.

ALVES, R. J. R. *et al.* Allelopathic influence of the aqueous extract of fresh leaflets of *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. on the germination of *Bidens pilosa* L. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. 1-16, 2020.

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V. Análise da variação espacial e temporal do índice de vegetação e sua relação com parâmetros climáticos na Bacia Hidrográfica do alto curso do rio Paraíba, estado da Paraíba, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 35, n.3, p. 530-553, 2015.

ANDRADE, M. C. **A terra e o homem no Nordeste**. São Paulo: Brasiliense, 1963

ANDRADE, M. C. A. **O Nordeste e a questão regional**. São Paulo: Ática, 1988

ANGELINI, L. P. **Parametrização do albedo e correção da temperatura da superfície no balanço de energia por imagens Landsat 8 na transição Cerrado-Pantanal**. 2018. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2018.

ARAÚJO FILHO, J. A. **Manejo pastoril sustentável da Caatinga**. Recife: Projeto Dom Helder Camara, 2013.

AUBRÉVILLE, A. **Climats, forêts et desertification de l'Afrique tropicale**. Paris: Société d'Éditions Géographiques Maritimes et Coloniales, 1949.

BARBOSA, H. A. *et al.* A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, n.2, p. 288-307, 2006.

BARBOSA, H. A. *et al.* Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.148, n.13, p.235-252, 2019.

BARBOSA, H. A.; BURI, C.O. **Como dominar o QGIS: o guia definitivo para mapeamento**. Maceió: Instituto Letras Ambientais, 2022.

BARLOW, J. *et al.* Anthropogenic disturbance in tropical forests can affect biodiversity loss from deforestation. **Nature**. v. 535, n.1, p. 144–147, 2016.

BARROS, A. H. C. *et al.* **Climatologia do Estado de Alagoas**. Recife: Embrapa Solos, 2012.

BASTIAANSEN, WG. *et al.* Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, p.395 - 406, 2007.

BECERRIL-PIÑA, R. *et al.* Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. **Journal of Arid Environments**, v. 120, n.15, p. 4-13, 2015.

BEZERRA, F.G.S. *et al.* Analysis of areas undergoing desertification, using EVI2 multi-temporal data based on MODIS imagery as indicator. **Ecological Indicators**, v. 117, n. 1, p. 1-15, 2020.

BISPO, P. C.; VALERIANO, M. M.; DUPLICI, T. M. Relação da vegetação de caatinga com a condição geomorfométrica local. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.5, p.523-530. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Caatinga**: contexto, características e estratégias de conservação. Brasília, DF: MMA, 2020. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biomas/caatinga/item/191-departamento-de-conserva%C3%A7%C3%A3o-da-biodiversidade-minist%C3%A9rio-do-meio-ambiente.html>. Acesso em: 10 dez. 2022.

BREST, C. L.; GOWARD S. N. Deriving surface albedo measurements from narrow band satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 351-367, 1987.

CGEE. **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil**. Brasília, DF: Funceme, 2016.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v, 41, n. 11, p. 2674 – 2677, 2003.

COLLADO, A. D. *et al.* Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina. **Journal of Arid Environments**, v. 52, n.1, p. 121–133, 2002.

CONTI, J. B. O conceito de desertificação. **Climatologia e estudos da paisagem**, Rio Claro, v.3, n.2 p. 39-52, 2008.

COSTA, L. E. dos S. **Avaliação do processo de desertificação nos municípios de Ouro Branco e Senador Rui Palmeira, no semiárido alagoano, a partir de sensoriamento remoto**. 2021. 79 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.

COSTA, T. C. C. *et al.* Análise da degradação da Caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n.1, p. 961-974, 2009.

CUNHA, T. J. F. *et al.* **Solos do submédio do Vale do São Francisco**: potencialidades e limitações para uso agrícola. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2008.

DOBOS, E. **Albedo**. Hungria: Universidade de Miskolc, 2003.

FENDRICH, A.N. *et al.* Disclosing contrasting scenarios for future land cover in Brazil: Results from a high-resolution spatiotemporal model. **Science of The Total Environment**, v.742, n.39, p. 1-37, 2020.

FERNANDES, J. D., DANTAS, A. J. Desertificação no Nordeste: uma aproximação sobre o fenômeno do Rio Grande Norte. **Holos**, v. 3, n.1, p. 147-161, 2021.

FERNANDES, M. F.; QUEIROZ, L. P. Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e Cultura**, v. 70, n. 4, p. 51-56, 2018.

FERREIRA JÚNIOR, J. J.; DANTAS, M. J. F. Análise do albedo da superfície e de índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Rio Pacoti/CE. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 39, n.2, 2018.

FERREIRA, T. R. *et al.* Identification of desertification-sensitive areas in the Brazilian northeast through vegetation indices. **Engenharia Agrícola**, v.37, n.1, p.1190–1202, 2017.

FIGUEIREDO, J. M. *et al.* Regeneração herbácea em áreas degradadas de Caatinga enriquecidas com árvores nativas. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1143-1156, 2017.

FRAMPTON, W. J. *et al.* Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 82, n.5, p. 83–92, 2013.

FRANCISCO, P. R. M. *et al.* Mapeamento da vulnerabilidade das terras da bacia hidrográfica do Rio Taperoá. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 2, p. 271-286, 2013.

GLANTZ, M. H. **Desertification, environmental degradation in and around arid lands**. Colorado: Westview Press, 1977.

GODINHO, S. *et al.* Assessing the role of Mediterranean evergreen oaks canopy cover in land surface albedo and temperature using a remote sensing-based approach. **Applied Geography**, v. 74, n.3, p.84-94, 2016.

GOMES, H. B. *et al.* Surface temperature and albedo in the Ilha Solteira region, São Paulo. **Mercator**, v. 16, n. 8, p. 1-16, 2017.

GOOGLE. **Climate Engine**. EUA: Google, 2023. Disponível em: <https://climateengine.com/>. Acesso em: 10 dez. 2022.

GUTIÉRREZ, A. P. A. *et al.* Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, n.1, p. 95–106, 2014.

GUTIÉRREZ, J. R.; SQUEO, F. A. Importancia de los arbustos em los ecosistemas semiáridos de Chile. **Ecosistemas**, v. 13, n.1, p. 36-45, 2004.

HADEEL, A. S.; MUSHTAK, T. J.; CHEN, X. Remote Sensing and GIS Application in the detection of environmental degradation indicators. **Geo-spatial Information Science**, v.14, n.2, p. 39-47, 2011.

HE, T. *et al.* Fusion of satellite land surface albedo products across scales using a multiresolution tree method in the North Central United States. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.52, n. 6, p. 3428-3439, 2014.

HIGGINBOTTOM, T.; SYMEONAKIS, E. Assessing Land Degradation and Desertification Using Vegetation Index Data: current frameworks and future directions. **Remote Sensing**, v. 6, n. 10, p. 9552-9575, 2014.

IBGE. **Base de Informações do Censo Demográfico 2010**: resultados do universo por setor censitário. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

- IBGE. **Alagoas**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/panorama>. Acesso em: 19 maio 2022.
- IEL. **Diagnóstico do setor de laticínios do estado de Alagoas**: análise das empresas vinculadas ao sindicato do leite de alagoas. Maceió: Avança + Indústria, 2022.
- IMA. **Áreas de risco à desertificação, semiárido alagoano (Mapa)**. Maceió, AL: IMA, 2018.
- INSA. **Estudo de caso**: índice de propensão econômica, social e agropecuário no semiárido brasileiro. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2014.
- IPCC. **Climate Change and Land**: an IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. [S.l.]: IPCC. 2019.
- IPCC. The Working Group II contribution was released on 28 February 2022. **Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S.l.]: IPCC, 2022.
- JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 11, n.2, p. 185 - 200, 1991.
- JARDIM, A. M. da R. F. *et al.* Using remote sensing to quantify the joint effects of climate and land use/land cover changes on the Caatinga biome of Northeast Brazilian. **Remote Sensing**, v. 14, n. 8, p. 1911-1938, 2022.
- KARNIELI, A. *et al.* Spatio-temporal dynamics of land-use and land-cover in the Mu Us sandy land, China, using the change vector analysis technique. **Remote Sensing**, v. 6, n.10, p. 9316 - 9339, 2014.
- LAMCHIN, M. *et al.* Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia. **Advances in Space Research**, v. 57, n.1, p. 64–77, 2016.
- LI, X.; QU, Y.; XIAO, Z. Responses of Land Surface Albedo to Global Vegetation Greening: an analysis using glass data. **Atmosphere**, v. 14, n. 1, p. 1-16, 2022.
- LIMA JÚNIOR, C. *et al.* Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 289-298, 2014.
- LIU, F. Albedo indicating land degradation around the Badain Jaran Desert for better land resources utilization. **Science Of The Total Environment**, v. 578, n.5, p.67-73, 2017.
- LUCENA, R. L.; FERRER, E.; GUILHERMINO, M. M. Mitigating dry risks through actions for the recovery and preservation of the caatinga biome in the brazilian semi-arid. **Brazilian Journal Of Development**, v. 7, n. 4, p. 36546-36557, 2021.

MA, Z. *et al.* The Construction and application of an Aledo-NDVI Based Desertification Monitoring Model. **Procedia Environmental Sciences**, v.10, n.1, p. 2029 - 2035, 2011.

MAPBIOMAS. **MapBiomass**: Brasil. 2022. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

MARANGON, G. P. *et al.* Modelagem da distribuição Diamétrica de Espécies Lenhosas Da Caatinga, Semiárido Pernambucano. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 3, p. 863-874, 2016.

MARKHAM, B. L., BARKER, L. L. “Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances”, **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 517 - 523, 1987.

MATALLO JUNIOR, H. **Indicadores de Desertificação**: histórico e perspectivas. Brasília: Unesco, 2001.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis**. Washington: World Resources Institute, 2005.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2012.

MORO, M. F. *et al.* A catalogue of the vascular plants of the Caatinga Phytogeographical domain: a synthesis of floristic and phytosociological surveys". **Phytotaxa**, v. 160, n.1, p.1-118, 2014.

MORO, M.F. *et al.* A Phytogeographical metaanalysis of the Semiarid Caatinga domain in Brazil. **The Botanical**, v. 82, n.2, p. 91–148, 2016.

NOGUEIRA, F. de C. *et al.* The hydrological performance of *Prosopis juliflora* (Sw.) growth as an invasive alien tree species in the semiarid tropics of northeastern Brazil. **Biological Invasions**, v. 21, n. 8, p. 2561-2575, 2019.

OLIVEIRA, A. M.; COSTA, D. F. S. Mapping of Caatinga ecosystems: evaluation of the effectiveness of vegetation indexes (ndvi and savi) and object-oriented mapping. **Raega**, v. 49, n.2, p. 143-163, 2020.

OLIVEIRA, M. K. S. *et al.* Dinâmica espaço-temporal da paisagem semiárida no município de Apodi/RN e seus condicionantes socioeconômicos e ambientais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.4, p. 2446-2464, 2021a.

OLIVEIRA, T. S. *et al.* Avaliação da degradação de pasto nativo embasada em parâmetros de solo. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 2, p. 1871-1885, 2021b.

OLIVEIRA, V. C. *et al.* Atividade microbiana enzimática e população microbiana como bioindicadores da qualidade de solos para o monitoramento ambiental em agroecossistemas do semiárido. In: SOUZA, W. J. O.; GOMES, E.N.; RODRIGUES, J.S. **Desenvolvimento rural e sustentabilidade**: energia, produção e novos mercados. Guarujá: Científica Digital, 2022. p.142-156.

PAN BRASIL. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos, 2004.

PATRÍCIO, Maria da Conceição Marcelino. **O processo de desertificação nos municípios de Cabaceiras e Barra de são Miguel-PB**: uma análise a partir dos índices biofísicos (ndvi, tgsi e albedo) e socioeconômicos no período de 1989 a 2010. 2017. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Programa de Pós- Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

PEREIRA, A. P. A. *et al.* Grazing exclusion regulates bacterial community in highly degraded semiarid soils from the Brazilian Caatinga biome. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 6, p. 2210-2225, 2021.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2007.

PONZONI, F. J. *et al.* **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

PRADO, D. As Caatingas da América do Sul. *In*: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Editora Universitária, 2003. p. 3-74.

PRESTON, W. *et al.* Soil fertility changes in vineyards of a semiarid region in Brazil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n.3, p. 672-685, 2017.

PRIESS, J. A.; HAUCK, J. Integrative scenario development. **Ecology and Society**, v. 19, n.1, p. 1-14. 2014.

QI, Y. *et al.* Variabilidade temporal e espacial da desertificação em uma zona de transição agro-pastoral do norte da província de Shaanxi, China. **Catena**, v. 88, p. 37- 45, 2012.

QUARTAROLLI, C. F.; VICENTE, L. E.; ARAÚJO, L. S. Sensoriamento remoto. *In*: TÔSTO, S. G. *et al.* (ed.). **Geotecnologias e geoinformação**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 61-79. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas)

QUEIROZ, L. P. *et al.* Diversity and evolution of flowering plants of the Caatinga domain. *In*: SILVA, J. C.; LEAL, I.; TABARELLI, M. **Caatinga**: the largest tropical dry forest region in South America. [*S.l.*]: Springer Nature, 2017. p. 23-63.

QUEIROZ, M.G.*et al.* Composition of Caatinga Species Under Anthropic Disturbance and Its Correlation With Rainfall Partitioning. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 1, p. 1-10, 2021.

RANSON, K. J.; IRONS, J. R.; DAUGHTRY, C. S. T. Surface albedo from bidirectional reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, n.2, p. 201-211, 1991.

RÊGO, A.H. do. **Os sertões e os desertos**: o combate à desertificação e a política externa brasileira. Brasília, DF: FUNAG, 2012.

- REINING, P. **Handbook on desertification indicators based on the Science Associations' Nairobi Seminar on desertification**, Washington: American Association for the Advancement of Science, 1978
- REN, H. *et al.* Do sheep grazing patterns affect ecosystem functioning in steppe grassland ecosystems in Inner Mongolia?. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 213, n.1, p. 1-10, 2015.
- RIBEIRO, G. A.; SILVA, J. N. C.; SILVA, J. B da. Índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS): estado da arte e suas potencialidades. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 6, p. 2054 – 2074, 2016.
- RIBEIRO, K. *et al.* Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of the Total Environment**, v. 571, n.11, p.1048-1057, 2016.
- ROBINOVE, C.J. *et al.* Arid land monitoring using landsat albedo difference images. **Remote Sensing of Environment**, v. 11, n. 2, p. 133-156, 1981.
- RODRIGUES, J. A. de M. *et al.* Spatial-temporal dynamics of Caatinga vegetation cover by remote sensing in the Brazilian semiarid region. **Dyna**, v. 87, n. 215, p. 109-117, 2020.
- ROUSE, J.W. *et al.* **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave Effect) of natural vegetation**. Texas: NASA, 1974.
- SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Matéria orgânica do solo no bioma caatinga. *In*: SANTOS, G. S. *et al.* **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.419-441.
- SILVA C. M. De um Dust Bowl paulista à busca de fertilidade no Cerrado: a trajetória do IRI Research Institute e as pesquisas em ciências do solo no Brasil (1951-1963). **Revista Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 146-155, 2012.
- SILVA JUNIOR, R. S. *et al.* Avaliação de eventos extremos de precipitação, associados a desastres naturais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 6, p. 2755-2767, 2022.
- SILVA, A.P. N *et al.* Albedo de superfície estimado a partir de imagens Landsat 5 – TM no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia**, Recife, v. 27, n.1, p. 154-168, 2010.
- SILVA, D. F. *et al.* Identificação das causas climáticas dos eventos extremos e dos impactos dos ENOS Canônico e Modoki nas macrorregiões de Alagoas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 1880-1897, 2021.
- SILVA, F. B. R. *et al.* **Zoneamento Agroecológico do Nordeste: diagnóstico do quadro natural e agrossocioeconômico**. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1993.
- SILVA, J. L. C. *et al.* Aspectos da degradação ambiental no nordeste do Brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 121-133, 2018.

SILVA, J. R. C. Erosão e produtividade do solo no semi-árido. *In: OLIVEIRA, T. S. et al. Agricultura, sustentabilidade e o semiárido*. Fortaleza: UFC, 2000. p. 57-85.

SILVA, L. R. M. da. **Variabilidade e tendência espaço-temporal da Caatinga utilizando o IVDN e precipitação pluvial relacionadas com a degradação ambiental no semiárido brasileiro**. 2015. 73 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

SILVA, P. C. G. *et al.* Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. *In: SA, I. B.; SILVA, P. C. G. da. Semiárido brasileiro*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p.19-48.

SILVEIRA, E. M. O. *et al.* Anthropogenic disturbances affect the relationship between spectral indices and the biometric variables of Brazilian Savannas. **Floresta e Ambiente**, v.26, n.3., p.1-13, 2019.

SILVEIRA, C. *et al.* Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: uma análise para precipitação e temperatura / climate change in the são francisco river basin. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 416-428, 2016.

SOUZA, B.I.; ARTIGAS, R.C.; LIMA, E.R.V. 2015. Caatinga e Desertificação. **Mercator**, v. 14, n.1, p. 131-150, 2015.

SOUZA, D. G. *et al.* Multiple drivers of aboveground biomass in a human-modified landscape of the Caatinga dry forest. **Forest Ecology And Management**, v. 435, n. 1, p. 57-65, 2019.

SUDENE. **Delimitação do Semiárido - 2021 Relatório final**. Recife, PE: SUDENE, 2021.

SUDENE. **Lista de municípios integrantes da região do Semiárido**. Recife, PE: SUDENE, 2017. Disponível em: <http://www.cca.ufpb.br/cca/contents/noticias/ibge-divulga-lista-de-municipios-localizados-na-regiao-semiarida-do-brasil/lista-1262municipios-semiarido-2017.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2022.

TEIXEIRA, A. H. C. *et al.* Water productivity assessments for dwarf coconut by using Landsat 8 images and agrometeorological data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.155, p.150-158, 2019.

TEIXEIRA, M. N. O sertão semiárido: uma relação de sociedade e natureza numa dinâmica de organização social do espaço. **Sociedade e Estado**, v. 31, n. 3, p. 769-797, 2016.

UNCCD. Decision 5/COP.12. Participation and involvement of civil Society organizations in meetings and processes of the United Nations Convention to Combat Desertification. Ancara: UNCCD, 2015.

USGS. **Índices espectrais derivados da refletância da superfície Landsat**. EUA: USGS, 2018. Disponível em: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-surfacerectance-derived-spectral-indices?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_co. Acesso em: 8 jun. 2022.

VASCONCELOS JÚNIOR, N. A. **Organização espacial da bacia leiteira no Semiárido de Alagoas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Metodologia para identificação de processos de desertificação: manual de indicadores**. Recife: SUDENE, 1978.

VERMOTE, E. F.; JUSTICE, C. C., M; FRANCH, B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, n.4, p. 46-56, 2016.

VIEIRA, L. C. de S. *et al.* Sazonalidade do sequestro e estoque de carbono na caatinga, durante as estações seca e chuvosa. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 31, n. 1, p. 541-564, 2022.

VIEIRA, R. M. S. P. *et al.* Characterizing spatiotemporal patterns of social vulnerability to droughts, degradation and desertification in the Brazilian northeast. **Environmental and Sustainability Indicators**, v.5, n.2, p. 1016 – 1046, 2020.

WANG, Z. *et al.* Monitoring land surface albedo and vegetation dynamics using highspatial and temporal resolution synthetic time series from Landsatand the MODIS BRDF/NBAR/albedo product. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 59, n.3, p. 104-117, 2017.

XIAO, J. *et al.* Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n.1, p. 2411-2422, 2006.

YU, F.; WANG, P.; LI, H. Surface Albedo and Snowline Altitude Estimation Using Optical Satellite Imagery and In Situ Measurements in Muz Taw Glacier, Sawir Mountains. **Remote Sensing**, v. 14, n. 24, p. 6405 - 6422, 2022.

ZANELLA, M. E. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, v. 36, n. 1, p. 126-142, 2014.

ZHAO, Y. *et al.* Drought Monitoring and Performance Evaluation Based on Machine Learning Fusion of Multi-Source Remote Sensing Drought Factors. **Remote Sensing**, v. 14, n. 24, p. 6398 - 6419, 2022.