



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**EDUARDO VIANA FREIRES**

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE À DEGRADAÇÃO DOS SOLOS DA  
VERTENTE ÚMIDA DO MACIÇO DE URUBURETAMA/CE**

**FORTALEZA**

**2020**

EDUARDO VIANA FREIRES

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE À DEGRADAÇÃO DOS SOLOS DA VERTENTE  
ÚMIDA DO MACIÇO DE URUBURETAMA/CE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de concentração: Geologia.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cynthia Romariz Duarte

Coorientador: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- F933a Freires, Eduardo Viana.  
Análise da vulnerabilidade à degradação dos solos da vertente úmida do Maciço de Uruburetama/CE /  
Eduardo Viana Freires. – 2020.  
277 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em  
Geologia, Fortaleza, 2020.  
Orientação: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte.  
Coorientação: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo.
1. Geoprocessamento. 2. Geotecnia. 3. Intervenções Antrópicas. 4. Erosão. 5. Movimento de Massa. I.  
Título.

CDD 551

---

EDUARDO VIANA FREIRES

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE À DEGRADAÇÃO DOS SOLOS DA VERTENTE  
ÚMIDA DO MACIÇO DE URUBURETAMA/CE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de concentração: Geologia.

Aprovada em 10/07/2020

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Cynthia Romariz Duarte (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Daniel Dantas Moreira Gomes  
Universidade de Pernambuco (UPE)

---

Prof. Dr. Emanuel Lindemberg Silva Albuquerque  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

---

Prof. Dr. Eder Mileno Silva de Paula  
Universidade Federal do Pará (UFPA)

---

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Barison  
Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL)



*A todos aqueles que contribuíram para minha  
formação acadêmica, profissional e pessoal.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, pela oportunidade e por contribuir para o meu crescimento profissional;

A Secretaria de Educação do Estado (SEDUC) e a Secretaria Municipal de Educação (SME) de Maracanaú, por minha liberação das atividades docentes para dedicação exclusiva aos estudos pós-graduados.

À minha Orientadora, Professora Dr.<sup>a</sup> Cynthia Romariz Duarte, pela confiança e estímulo dado ao desenvolvimento da pesquisa, à participação em eventos científicos e às publicações. E, também, pela sua capacidade de gerenciamento tanto no Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE), como também, no Programa de Pós-Graduação;

Ao meu Coorientador, Professor Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo, pelo diálogo, esclarecimentos, sugestões de leituras e disponibilização de equipamentos;

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro através de bolsa de pesquisa;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela infraestrutura oferecida através dos investimentos realizados no Programa de Pós-Graduação;

À professora Dr.<sup>a</sup> Rita Salgueiro, pela ajuda no processamento e espacialização dos dados de erodibilidade através de Geoestatística e pela dedicação ao Laboratório (GEOCE) e aos alunos;

Ao Professor Dr. Michael Vandesteem Silva Souto pela disponibilidade e sugestões no desenvolvimento da pesquisa;

Ao Professor Dr., e amigo, Daniel Dantas Moreira Gomes, pelo companheirismo, sugestões, participação nas atividades de campo e no processamento de imagens orbitais;

Ao Professor Dr. Emanuel Lindemberg Silva Albuquerque, pelas considerações e sugestões que muito contribuíra para melhoria desta pesquisa;

Aos Professores Dr. Eder Mileno Silva de Paula e Dr. Marcelo Ribeiro Barison, pelas considerações e contribuições a esta pesquisa;

À toda a turma do Curso de Pós-Graduação, em especial aos alunos do Laboratório de Geoprocessamento do Ceará, pelo companheirismo e conhecimento agregado ao longo da caminhada;

Ao Laboratório de Mecânica de solos do Departamento de Engenharia de Transportes da UFC, nas pessoas de Roberto Silva e Anselmo, por todo acompanhamento e ajuda na realização das análises das amostras de solos;

A todos os amigos que participaram da árdua missão de campo de coletar 184 amostras de solo numa área de 1342,73 km<sup>2</sup>: Daniel Dantas, Cláudio Ângelo Neto, Edilson Souza, Dominick Sávio Cunha, Henrique Castro, Alisson Maia, Leandro e Cláudio Hugo Serafim;

Aos alunos bolsistas e voluntários do Laboratório de Geoprocessamento do Ceará, pela amizade formada e pela ajuda ao longo da pesquisa, sobretudo ao Cláudio Ângelo Neto, fundamental nas atividades de campo e processamento de dados.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001."

### O cântico da terra

Eu sou a terra, eu sou a vida. Do meu barro primeiro veio o homem. De mim veio a mulher e veio o amor. Veio a árvore, veio a fonte. Vem o fruto e vem a flor.

Eu sou a fonte original de toda vida. Sou o chão que se prende à tua casa. Sou a telha da cobertura de teu lar. A mina constante de teu poço. Sou a espiga generosa de teu gado e certeza tranquila ao teu esforço.

Sou a razão de tua vida. De mim vieste pela mão do Criador, e a mim tu voltarás no fim da lida. Só em mim acharás descanso e Paz.

Eu sou a grande Mãe Universal. Tua filha, tua noiva e desposada. A mulher e o ventre que fecundas. Sou a gleba, a gestação, eu sou o amor.

A ti, ó lavrador, tudo quanto é meu. Teu arado, tua foice, teu machado. O berço pequenino de teu filho. O algodão de tua veste e o pão de tua casa.

E um dia bem distante a mim tu voltarás. E no canteiro materno de meu seio tranquilo dormirás.

Plantemos a roça. Lavremos a gleba. Cuidemos do ninho, do gado e da tulha. Fartura teremos e donos de sítio felizes seremos (CORA CORALINA, 1965).

## RESUMO

As diversas intervenções processadas ao longo dos anos no Maciço de Uruburetama/CE comprometem a sustentabilidade ambiental e agrícola. As características físicas da área favorecem os processos erosivos e os movimentos gravitacionais, que são potencializados pelas atividades antrópicas e resultam na degradação dos solos. Perante o exposto, essa pesquisa objetivou avaliar e espacializar a vulnerabilidade à degradação dos solos na vertente úmida do Maciço a partir de técnicas de geoprocessamento e geotecnia, no intuito de subsidiar a gestão e o planejamento ambiental. Como suporte de avaliação foram utilizadas imagens orbitais, 184 amostras de solos, que foram submetidas a análise laboratorial conforme normas da ABNT Solos, registros pluviométricos de postos da FUNCEME e observações em campo. A pesquisa foi organizada nas seguintes etapas: análise socioambiental, em que se buscou compreender o quadro físico e humano, identificando a influência das intervenções para o desencadeamento de movimento de massa e aceleração dos processos erosivos; comparação entre os mapeamentos de cobertura e uso da terra obtidos por classificação supervisionada de imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel 2; análise de vulnerabilidade natural à perda de solos com base nas variáveis geomorfométricas extraídas do MDE ALOS PALSAR; extração automática de lineamentos estruturais a partir da imagem ALOS PALSAR, que permitiu analisar a influência que exercem no desencadeamento dos movimentos gravitacionais; análise de vulnerabilidade ambiental à degradação de solos a partir de análise multicritério, em ambiente SIG, envolvendo as variáveis cobertura e uso da terra, vulnerabilidade natural à perda de solos, densidade de lineamentos, erodibilidade, obtida a partir dos resultados das análises das amostras de solos coletadas (granulometria, estrutura, matéria orgânica, permeabilidade), e erosividade, calculada através dos registros pluviométricos obtidos num intervalo de 10 anos (2010-2019). Os resultados mostram que a ampliação da malha urbana e das áreas de cultivo ocorrem indiscriminadamente em áreas de preservação permanente, desrespeitando as prescrições legais, embora todos os municípios analisados disponham de órgão gestor ambiental, e que alguns possuam leis que disciplinem o uso e ocupação do solo. O mapeamento de cobertura e uso da terra possibilitou compreender o nível de intervenções e alteração da paisagem no maciço e a melhor qualidade do produto gerado a partir da imagem MSI/Sentinel 2 frente a OLI/Landsat-8. O mapa de vulnerabilidade natural indica que as classes de vulnerabilidade alta e muito alta estão dispostas sobretudo nas vertentes orientadas a leste, norte e nordeste do maciço. A distribuição, densidade e orientação predominante dos lineamentos estruturais podem indicar susceptibilidade a ocorrência de movimento de massa, desde que considere as

características físicas dominantes e o grau de intervenção humana nas encostas. O mapa de vulnerabilidade ambiental indica que as classes de menor vulnerabilidade estão associadas a cotas altimétricas entre 600 e 1000m, e a setores da depressão sertaneja. As classes alta e muito alta apresentam ampla disseminação nas encostas da serra e decorrem sobretudo da forte intervenção promovida pela atividade agrícola. Os produtos cartográficos gerados se constituem como instrumentos de suporte à gestão e ao planejamento ambiental, seja para o monitoramento quanto para indicações de uso e ocupação do solo.

**Palavras-chave:** Geoprocessamento. Geotecnia. Intervenções Antrópicas. Erosão. Movimento de Massa.

## ABSTRACT

The various interventions processed over the years in the Massif of Uruburetama / CE compromise environmental and agricultural sustainability. The physical characteristics of the area favor erosive processes and gravitational movements, which are enhanced by human activities and result in soil degradation. In view of the above, this research aimed to assess and spatialize the vulnerability to soil degradation in the wet slope of the Massif using geoprocessing and geotechnical techniques, in order to support environmental management and planning. As an evaluation support, orbital images were used, 184 soil samples, which were subjected to laboratory analysis according to ABNT Solos norms, pluviometric records of FUNCEME stations and field observations. The research was organized in the following stages: socio-environmental analysis, in which we sought to understand the physical and human condition, identifying the influence of interventions to trigger mass movement and accelerate erosion processes; comparison between cover and land use mapping obtained by supervised classification of OLI / Landsat-8 and MSI / Sentinel 2 images; analysis of natural vulnerability to soil degradation based on geomorphometric variables extracted from MDE ALOS PALSAR; automatic extraction of structural lineaments from the ALOS PALSAR image, which allowed analyzing the influence they exert on the triggering of gravitational movements; Environmental vulnerability analysis to soil degradation based on multicriteria analysis, in a GIS environment, involving the variables coverage and land use, natural vulnerability to soil degradation, lineament density, erodibility, obtained from the results of the analysis of the samples of collected soils (granulometry, structure, organic matter, permeability), and erosivity, calculated through rainfall records obtained over a 10-year interval (2010-2019). The results show that the expansion of the urban network and the cultivation areas occur indiscriminately in areas of permanent preservation, disregarding the legal requirements, although all the municipalities analyzed have an environmental management body, and that some have laws that regulate the use and occupation of the land. ground. The mapping of land cover and use made it possible to understand the level of interventions and alteration of the landscape in the massif and the better quality of the product generated from the MSI / Sentinel 2 image compared to OLI / Landsat-8. The natural vulnerability map indicates that the classes of high and very high vulnerability are mainly located on the eastern, northern and northeastern slopes of the massif. The predominant distribution, density and orientation of structural lineaments may indicate susceptibility to the occurrence of mass movement, provided that it considers the dominant physical characteristics and the degree of human intervention on the slopes. The environmental

vulnerability map indicates that the classes of least vulnerability are associated with altimetric levels between 600 and 1000m, and with sectors of the hinterland depression. The upper and very upper classes are widely disseminated on the slopes of the mountains and are due mainly to the strong intervention promoted by agricultural activity. The generated cartographic products are instruments to support environmental management and planning, both for monitoring and for indications of land use and occupation.

**Keywords:** Geoprocessing. Geotechnics. Anthropic Interventions. Erosion. Mass Movement.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Área de Proteção Ambiental
APP	Área de Preservação Permanente
ASF	Alaska Satellite Facility
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
ARS/USDA	Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
ESA	European Space Agency
GIS	Geographic Information System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SR	Sensoriamento Remoto
SRH/CE	Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversa de Mercator
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>18</b>
<i>1.1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>18</i>
<i>1.1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>18</i>
<b>1.2</b>	<b>Fundamentação teórica .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.1</b>	<b><i>A Análise Geossistêmica e a Ecodinâmica nos estudos de vulnerabilidade</i></b>	<b>20</b>
<b>1.2.2</b>	<b><i>Processos erosivos e movimentos de massa</i> .....</b>	<b>26</b>
<i>1.2.2.1</i>	<i>Processos erosivos em encostas.....</i>	<i>26</i>
<i>1.2.2.1.1</i>	<i>Erosividade.....</i>	<i>27</i>
<i>1.2.2.1.2</i>	<i>Propriedades dos solos.....</i>	<i>27</i>
<i>1.2.2.1.3</i>	<i>Cobertura Vegetal.....</i>	<i>30</i>
<i>1.2.2.1.4</i>	<i>Características das encostas.....</i>	<i>31</i>
<i>1.2.2.2</i>	<i>Erosão laminar.....</i>	<i>33</i>
<i>1.2.2.3</i>	<i>Erosão em sulcos.....</i>	<i>33</i>
<i>1.2.2.4</i>	<i>Movimento de massa.....</i>	<i>35</i>
<b>1.2.3</b>	<b><i>Aplicação de SR e SIGs em processos erosivos e movimentos de massa</i> .....</b>	<b>42</b>
<b>1.2.4</b>	<b><i>Planejamento ambiental e ordenamento territorial</i> .....</b>	<b>46</b>
<b>1.3</b>	<b>Materiais e métodos.....</b>	<b>50</b>
<b>1.3.1</b>	<b><i>Materiais.....</i></b>	<b>50</b>
<b>1.3.2</b>	<b><i>Métodos.....</i></b>	<b>52</b>
<i>1.3.2.1</i>	<i>Trabalho de campo.....</i>	<i>54</i>
<i>1.3.2.1.1</i>	<i>Reconhecimento e caracterização da área de pesquisa.....</i>	<i>54</i>
<i>1.3.2.1.2</i>	<i>Coleta de amostras de solos.....</i>	<i>55</i>
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO II - ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL DA VERTENTE ÚMIDA DO MACIÇO DE URUBURETAMA/CE E ENTORNO.....</b>	<b>59</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>61</b>
<b>2.2</b>	<b>Materiais e métodos.....</b>	<b>62</b>
<b>2.3</b>	<b>Área de estudo.....</b>	<b>64</b>
<b>2.3.1</b>	<b><i>Localização da área de estudo.....</i></b>	<b>64</b>

2.3.2	<i>Características físico-geográficas</i> .....	65
2.3.3	<i>Aspectos socioambientais</i> .....	87
2.4	<b>Conclusões</b> .....	115
3	<b>CAPÍTULO III - COMPARAÇÃO DE IMAGENS OLI/LANDSAT 8 E MSI/SENTINEL-2 NO MAPEAMENTO DE COBERTURA E USO DA TERRA NO MACIÇO DE URUBURETAMA, CEARÁ</b> .....	121
3.1	<b>Introdução</b> .....	123
3.2	<b>Materiais e métodos</b> .....	124
3.3	<b>Resultados e discussão</b> .....	133
3.4	<b>Conclusões</b> .....	143
3.5	<b>Agradecimentos</b> .....	144
4	<b>CAPÍTULO IV - ANÁLISE DA VULNERABILIDADE NATURAL À PERDA DE SOLOS DA VERTENTE ÚMIDA DO MACIÇO DE URUBURETAMA/CE</b> .....	147
4.1	<b>Introdução</b> .....	149
4.2	<b>Materiais e métodos</b> .....	150
4.3	<b>Resultados e discussão</b> .....	155
4.4	<b>Considerações finais</b> .....	167
4.5	<b>Agradecimentos</b> .....	168
5	<b>CAPÍTULO V - INFLUÊNCIA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS NO DESENCADEAMENTO DOS MOVIMENTOS DE MASSA NO MACIÇO DE URUBURETAMA, CEARÁ</b> .....	170
5.1	<b>Introdução</b> .....	172
5.2	<b>Contexto geológico</b> .....	176
5.3	<b>Metodologia</b> .....	177
5.4	<b>Resultados e discussão</b> .....	181
5.5	<b>Considerações finais</b> .....	190
5.6	<b>Agradecimentos</b> .....	191
6	<b>CAPÍTULO VI - ANÁLISE DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL À DEGRADAÇÃO DOS SOLOS NA VERTENTE ÚMIDA DO MACIÇO DE URUBURETAMA/CE</b> .....	195
6.1	<b>Introdução</b> .....	197
6.2	<b>Materiais e métodos</b> .....	199

6.3	<b>Resultados.....</b>	219
6.4	<b>Conclusões.....</b>	236
6.5	<b>Agradecimentos.....</b>	239
7	<b>CONCLUSÃO.....</b>	244
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	250
	<b>APÊNDICE A - LISTAS DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	265
	<b>APÊNDICE B - TABELA COM FATOR K E CLASSES DE ERODIBILIDADE DAS AMOSTRAS DE SOLOS COLETADAS EM CAMPO.....</b>	276

## 1 CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A Tese intitulada “Análise da vulnerabilidade à degradação dos solos na vertente úmida do Maciço de Uruburetama”, configura-se como pré-requisito e etapa final para formação e obtenção de titulação de doutorado em Geologia do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC). A presente pesquisa está organizada em seis capítulos com as seguintes abordagens:

No Capítulo I são apresentados os aspectos introdutórios, onde é discutida a problemática relacionada a degradação dos solos na vertente úmida do Maciço de Uruburetama, bem como, justifica-se a importância de estudos voltados à identificação das variáveis físicas e humanas no intuito compreender os limites impostos pelo meio físico e ressaltar a necessidade de intervenções compatíveis com as características ambientais dominantes, com vistas a garantir a sustentabilidade local. Como forma de embasar a pesquisa são apresentados também a revisão bibliográfica e os materiais e métodos empregados.

Os capítulos II, III, IV, V e VI estão organizados em forma de artigo científico e foram submetidos para análise e publicação em periódicos com classificação Qualis.

No capítulo II buscou-se apresentar o quadro físico e humano da área de pesquisa a partir da caracterização e do mapeamento temático das variáveis Geologia, Geomorfologia, Clima, Hidrografia, Solos e Cobertura e Uso da Terra. Além disso, foram identificadas as principais intervenções e a influência que exercem na degradação dos solos.

No capítulo III foi realizada uma comparação entre os mapeamentos de cobertura e uso do solo processados a partir das imagens orbitais OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2 no intuito de se obter uma representação mais adequada e expressiva das transformações ocorridas no Maciço de Uruburetama e seu entorno, a fim de subsidiar as etapas subsequentes.

No Capítulo IV foi executada uma análise de vulnerabilidade natural à perda de solos na vertente úmida do maciço e seu entorno a partir da integração em ambiente SIG das variáveis geomorfométricas extraídas do MDE ALOS PALSAR.

No capítulo V foi realizada a extração automática de lineamentos com intuito de se analisar a influência que os trends estruturais exercem no desencadeamento de movimentos de massa no Maciço de Uruburetama/CE.

No capítulo VI foi efetuada uma avaliação da vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos a partir da integração de variáveis físicas e humanas. Para isso as variáveis foram submetidas a uma análise multicritério e álgebra de mapas em ambiente SIG, que resultou na espacialização das classes de vulnerabilidade.

## 1.1 Introdução

A intervenção humana sobre o relevo terrestre quer em áreas urbanas ou rurais demanda a ocupação e a transformação da superfície do terreno. Dependendo do tamanho dessa intervenção, das práticas conservacionistas e dos riscos geomorfológicos envolvidos, os impactos ambientais associados poderão causar grandes prejuízos ao meio físico e aos seres humanos (GUERRA, 2011).

No foco dessas transformações os solos vêm sofrendo impactos imediatos, seja pela ampliação das fronteiras agrícolas, seja pelo uso intensivo a que é submetido, levando-o a exaustão e a redução gradativa de sua produtividade. Aliado a tudo isso, observa-se que a expansão desordenada tem provocado interferências em diferentes graus sobre esse recurso, que pode se inferido pelo desmatamento indiscriminado, que reduz a qualidade dos solos, pela exploração mineral, pelo avanço dos prédios sem qualquer monitoramento, ou mesmo, pela expansão de favelas em áreas inadequadas, até mesmo protegidas pela legislação ambiental.

Para Palmieri e Larach (2004) os danos provocados pelo homem sobre os solos e a cobertura vegetal têm sido efetuados a nível mundial, porém são mais proeminentes nas regiões onde ocorrem ocupações desordenadas das terras e/ou onde a necessidade de sobrevivência predomina sobre os fatores econômicos, sociais e ambientais.

Nessa perspectiva, torna-se urgente a elaboração de estudos que identifiquem mudanças na paisagem, permitindo um planejamento que garanta a utilização racional do recurso solo em função da velocidade de ocupação do espaço físico e promova uma adequação de uso desse recurso respeitando sua vocação natural.

Neste sentido, é necessário o levantamento das informações das variáveis ambientais que servem de base para elaboração de um plano de ação. A partir do levantamento e avaliação dos atributos ambientais de uma determinada área, é possível uma adequação entre as potencialidades da terra às possibilidades de uso, conservação e a exploração sustentável.

Para Ross (2004), é cada vez mais necessário que se faça inserções antrópicas absolutamente compatíveis com as potencialidades dos recursos naturais de um lado e com as fragilidades dos sistemas ambientais naturais de outro.

Através de um diagnóstico sobre as condições ambientais do solo que envolva informações como declividade do terreno, cobertura vegetal, escoamento superficial, entre outras, é possível se fazer estimativas de resposta aos impactos antrópicos. Essas informações permitem a elaboração de um planejamento que adeque as atividades humanas às características do solo e, por conseguinte, reduza os conflitos de uso.

Localizado na região norte do estado do Ceará, o Maciço de Uruburetama é um exemplo de espaço marcado por forte intervenção antrópica. Apoiada sobretudo nas atividades do setor primário a população local vem contribuindo para um quadro de degradação dos solos que pode se tornar irreversível. Sem respeitar as características ambientais da área e sem a aplicação de técnicas adequadas de cultivo a sustentabilidade agrícola do maciço está comprometida. Conforme Silva (2007), o Maciço de Uruburetama é o mais desconfigurado ambientalmente do estado do Ceará, principalmente quando se comparara com as serras do Machado, Meruoca, das Matas e de Baturité.

Conforme este autor, no Maciço de Uruburetama se destacam a bananicultura na vertente úmida, a cajucultura no setor norte na vertente subúmida seca, além de lavouras de subsistência espalhadas por toda área. Associadas a essas atividades existem diferentes graus de comprometimento dos solos, seja porque não se leva em consideração as condições edafoclimáticas exigidas para o cultivo (bananicultura); porque algumas culturas (cajucultura) ocupam áreas onde a declividade é superior a 45°, favorecendo o ravinamento e o voçoracamento dos solos; ou devido ao cultivo de culturas temporárias, que após a colheita expõe os solos ao clima semiárido por longos meses.

Assim como os processos erosivos, podem ser observados movimentos de massa nas encostas do maciço que colocam em risco habitantes locais. Muitas vertentes estão expostas a partir da retirada da cobertura vegetal nativa para a prática agrícola, favorecendo a mobilização de material. Além disso, os cortes nas vertentes para construção de estradas intensificam o desencadeamento desses fenômenos. A situação torna-se mais grave quando se observa que muitas habitações foram construídas no sopé da serra e em suas vertentes, que além de desestabiliza-las ainda se encontram em rota de colisão a partir de quedas de blocos e rolamento de matacões.

Conforme Brandão (2003) e Silva (2007), o Maciço de Uruburetama pode ser sub-compartimentado, de acordo com aspecto climático regente, em três grandes unidades geomorfológicas: vertente úmida, vertente subúmida seca e vertente seca.

As porções voltadas para o litoral, a barlavento (vertente úmida), apresentam condições de umidade elevadas, favorecendo o desenvolvimento de solos profundos e, conseqüentemente, uma vegetação mais densa e de maior porte. Nos setores a sotavento (vertente subúmida seca e vertente seca), as condições climáticas são mais agressivas (secas), sendo o intemperismo o principal agente modelador da paisagem. Nessas vertentes, predominam os solos rasos, com frequentes afloramentos rochosos, condicionando a presença de uma vegetação mais seca e menos densa (BRANDÃO, 2003).

Em decorrência do elevado grau de intervenção antrópica, sobretudo a partir das atividades agrícolas e aberturas de estradas, que por sua vez ocasiona graves problemas de erosão e movimento de massa, esta pesquisa se delimita ao estudo da vertente úmida do Maciço de Uruburetama e suas adjacências. Além disso, a maior disponibilidade pluviométrica da área e a ocorrência de solos mais desenvolvidos e profundos nesse setor, associadas as intervenções, contribuí para deflagração dos fenômenos citados com maior frequência.

A área delimitada desta pesquisa está localizada dentro dos limites administrativos de 9 municípios (Irauçuba, Itapajé, Itapipoca, Pentecoste, Tejuçuoca, Trairi, Tururu, Umirim e Uruburetama), que, conforme o IBGE (2018), apresentam em sua totalidade uma população estimada para o ano de 2018 de aproximadamente 374 mil habitantes. Esse fato não só remete a pressão exercida sobre a área como também reflete a dificuldade de implementar o planejamento ambiental no Maciço.

A partir do contexto apresentado, o presente trabalho busca avaliar e espacializar a vulnerabilidade à degradação dos solos na vertente úmida do Maciço de Uruburetama/CE e suas adjacências, a partir de técnicas de geoprocessamento e geotecnia, no intuito de subsidiar a gestão e o planejamento ambiental.

Através do diagnóstico de vulnerabilidade é possível se fazer um planejamento de uso e ocupação do solo que oriente as ações humanas no intuito de minimizar os impactos e garantir a sustentabilidade produtiva do maciço.

### ***1.1.1 Objetivos***

#### ***1.1.1.1 Objetivo Geral***

Avaliar e espacializar a vulnerabilidade à degradação dos solos na vertente úmida do Maciço de Uruburetama/CE, a partir de técnicas de geoprocessamento e geotecnia, no intuito de subsidiar a gestão e o planejamento ambiental.

#### ***1.1.1.2 Objetivos Específicos***

- Realizar uma caracterização do quadro natural e socioeconômico, bem como, o mapeamento, na escala de 1:200.000, dos componentes ambientais e de cobertura e uso da terra do Maciço de Uruburetama;
- Comparar produtos de diferentes sensores na aplicação do mapeamento de cobertura e uso da terra da área de estudo;



- Elaborar um mapa de susceptibilidade natural à ocorrência de processos erosivos e movimentos de massa;
- Analisar a influência dos lineamentos estruturais no desencadeamento de movimento gravitacionais na vertente úmida do maciço;
- Elaborar mapas de erodibilidade dos solos (Fator K) e de erosividade (Fator R) da área de estudo;
- Avaliar a vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos na vertente úmida do Maciço de Uruburetama e seu entorno.

## 1.2 Fundamentação teórica

### 1.2.1 A Análise Geossistêmica e a Ecodinâmica nos estudos de vulnerabilidade

Os geossistemas correspondem a uma classe particular de sistemas dinâmicos abertos e hierarquicamente organizados. A hierarquia de construção é a feição mais importante dos geossistemas, nesse sentido, tanto uma área elementar da superfície da Terra como o geossistema planetário, ou as subdivisões intermediárias do meio natural, representam uma unidade dinâmica, com uma organização geográfica inerente (SOTCHAVA, 1978).

Bertrand (1972) considerando as dificuldades de se estabelecer ou demarcar unidades de paisagens devido impossibilidade de encontrar um sistema geral do espaço que respeite os limites de cada ordem de fenômenos, propôs uma taxonomia para definição de unidades de paisagens em função da escala de tratamento das informações, situando-as dentro da perspectiva de tempo e de espaço.

Assim, Bertrand define o sistema de classificação das paisagens terrestres em seis níveis taxonômicos temporoespaciais, que são divididos em duas grandes unidades:

- Unidades superiores:
  - Zona, representa a primeira ordem de grandeza e é definida principalmente pela zonalidade climática e, secundariamente, pelas megasestruturas geológicas;
  - Domínio, a segunda ordem de grandeza, que representam divisões em uma determinada zona, como o domínio da caatinga na zona tropical;
  - Região natural, corresponde a uma área bem delimitada no interior de um domínio.
- Unidades Inferiores:
  - Geossistema, que corresponde a um espaço de interação entre potencial ecológico (resultado da combinação de fatores geomorfológicos, climáticos e hidrológicos) e a exploração biológica (vegetação, solo e fauna), que juntas dão suporte as atividades humanas (Figura 01).
  - Geofácies, é definida pela fisionomia da paisagem. São setores homogêneos, em que se desenvolveram uma mesma fase de evolução geral do geossistema.
  - Geótopo, corresponde a menor unidade identificável no contexto da hierarquia estabelecida. Ou seja, é a menor unidade homogênea de um geossistema.

Segundo Bertrand (1972), o geossistema corresponde a uma paisagem nítida e bem circunscrita que pode ser identificada instantaneamente nas fotografias aéreas.

Como pode ser observado na Figura 01, o geossistema se configura num espaço de interação entre o potencial ecológico e a exploração biológica, que dão suporte a atividade humana e, por sua vez, sofrem influência de suas ações.



Fonte: Bertrand (1972)

Contudo, diante da dificuldade de delimitar um geossistema e diferenciá-lo dos demais táxons, Bertrand (*op. cit.*) propõe que seja usada a vegetação correspondente do local para identificá-lo, por ser a melhor síntese do meio. Assim lançando mão dos conceitos de bioestasia e resistasia, da teoria biorresistásica de H. Erhart (1996) sobre o papel da vegetação no equilíbrio da paisagem, define dois tipos básicos de geossistemas:

- Geossistema em bioestasia, que são aqueles mais ou menos estáveis. Onde o sistema de evolução é dominado pelos agentes e processos bioquímicos.
- Geossistemas em resistasia, são ambientes instáveis, onde prevalece as atividades erosivas com a destruição da vegetação e do solo.

Tricart (1977), no livro *Ecodinâmica*, reconhece a vegetação como o principal agente biológico contra a erosão pluvial e eólica, preferindo usar o termo fitoestasia (ao invés de bioestasia) devido a estabilização que exerce sobre o solo ao reduzir a força cinética das gotas da chuva; e efeito rugosidade, devido a atenuação da força do vento sobre o solo.

Tricart (*op. cit.*) analisa a natureza e a sociedade de forma integrada, ou os efeitos das intervenções humanas no meio. Conforme o autor, geralmente essas intervenções afetam a cobertura vegetal, promovendo alterações na dinâmica local, que repercutem sobre:

- A energia da radiação que alcança o solo e, por sua vez, as temperaturas do solo, com efeitos sobre a respectiva flora e fauna, a mineralização dos húmus, a nitrificação, etc., que interferem na a fertilidade do solo;

- A queda de detritos vegetais na superfície do solo e, em consequência, a nutrição dos organismos redutores, a estrutura do solo e sua resistência à erosão do pluvial, e, por seguinte, o regime o regime hídrico e a reciclagem dos elementos minerais pelas plantas;
- A interceptação das precipitações, ou seu tempo de concentração, e a energia de impacto das gotas, que determinam a possibilidade de erosão pluvial.
- A proteção do solo contra as ações eólicas, capazes de intensa degradação das terras.

Tricart (1977), estabeleceu uma classificação para unidades de paisagens que foram denominadas de unidades ecodinâmicas ou unidades morfodinâmicas. O conceito dessas unidades está integrado ao conceito de ecossistemas, no qual ocorrem relações mútuas entre os diversos componentes da dinâmica e os fluxos de energia e matéria no meio ambiente. O homem, por sua vez, intervém nos ecossistemas, modificando-os e ao mesmo tempo sendo submetido as consequências dessas intervenções, que impõem algumas adaptações para sua permanência nesses ambientes.

Tricart (*op. cit.*) classificou as unidades ecodinâmicas em três grandes categorias:

- Meios estáveis – o modelado evolui lentamente, de forma quase imperceptível. Os processos mecânicos atuam pouco e sempre de modo lento. Somente medidas precisas podem evidenciá-los. A característica essencial desse tipo de meio é a lenta evolução, a constância dessa evolução, que resultam da permanência no tempo de combinações de fatores. As condições se aproximam daquelas que os fito ecologistas qualificam com o termo clímax. São áreas com cobertura vegetal densa, dissecação moderada e ausência de manifestações vulcânicas.
- Meios intergrades – estes representam a passagem gradual dos meios estáveis para os meios instáveis. São caracterizados pela interferência permanente de morfogênese e pedogênese, que concorrem num mesmo espaço.
- Meios fortemente instáveis – A morfogênese é o elemento predominante da dinâmica natural, e fator determinante do sistema natural, ao qual outros elementos estão subordinados. Um cenário pode ter diferentes origens, que podem combinarem entre si. A geodinâmica interna da terra interfere em numerosos casos, em particular no vulcanismo, cujos efeitos são mais imediatos do que os das deformações tectônicas. A cobertura vegetal intervém

introduzindo uma influência indireta do clima, sendo a maior instabilidade realizada onde há forte instabilidade climática. A ausência de cobertura vegetal densa também contribui para o desencadeamento dos processos. As intervenções antrópicas provocam ativação morfodinâmicas brusca que gera o desencadeamento de processos erosivos e a rápida degradação dos solos.

A partir da Ecodinâmica de Tricart (1977), Souza *et al.* (1994) e Souza (2000) realizaram uma análise dos geossistemas e geofácies do Ceará, com adaptações às características naturais do estado. Foram definidas as unidades ecodinâmicas: ambientes estáveis, ambientes de transição e ambientes fortemente instáveis.

Souza (2000) realizou ainda a avaliação de vulnerabilidade ambiental com a seguinte tipologia: (1) nula a baixa, (2) moderada e (3) alta. Além disso, foi realizada uma análise de sustentabilidade das unidades geoambientais com base em 4 categorias: sustentabilidade muito baixa, sustentabilidade baixa, sustentabilidade moderada, sustentabilidade alta. Essas categorias foram estabelecidas sob um aspecto essencialmente qualitativo, em conformidade com o potencial geoambiental e limitações de uso dos recursos naturais disponíveis; condições ecodinâmicas e vulnerabilidade ambiental e indicadores quanto ao uso compatível do solo de cada unidade.

Souza (*op. cit.*), tendo por base o potencial atual dos recursos naturais, suas limitações de uso e o seu estado de conservação, estabeleceu as categorias de vulnerabilidade Baixa, Moderada e Alta, como podem ser observadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Categorias de vulnerabilidade

<b>Vulnerabilidade baixa</b>	Áreas que apresentam características contidas nos setores de sustentabilidade alta.
<b>Vulnerabilidade Moderada</b>	Áreas que apresentam características contidas nos ambientes de sustentabilidade moderada.
<b>Vulnerabilidade Alta</b>	Áreas cujas condições se enquadram nas categorias de sustentabilidade baixa e muito baixa.

Fonte: adaptado de Souza (2000).

Crepani *et al.* (1996), elaboraram, a partir da Ecodinâmica de Tricart, um modelo em que se buscou a avaliação, de forma relativa e empírica, do estágio de evolução morfodinâmica da unidade de paisagem, denominada Unidade Territorial Básica (UTB). Nesse modelo foram atribuídos valores de estabilidade às categorias morfodinâmicas, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas

<b>CATEGORIA MORFODINÂMICA</b>	<b>RELAÇÃO PEDOGÊNESE/MORFOGÊNESE</b>	<b>VALOR</b>
Estável	Prevalece a pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio pedogênese/morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a morfogênese	3,0

Fonte: Crepani *et al.* (1996).

A partir dessa análise, em ambientes onde predominam a morfogênese, prevalecem os processos erosivos, modificadores do relevo. Em situações onde predomina a pedogênese, prevalecem os processos formadores do solo. Já em ambientes em que os processos de morfogênese e pedogênese são concorrentes, há equilíbrio entre os processos.

Conforme Crepani *et al.* (2008), a partir dessa primeira aproximação, os autores procuraram contemplar uma maior variedade de categorias morfodinâmicas, de forma a construir uma escala de vulnerabilidade à perda de solo para situações que ocorressem naturalmente. Assim, foi elaborado o modelo apresentado na Figura 2, que estabelece 21 classes de vulnerabilidade a perda de solo, estando distribuídas entre situações onde há o predomínio dos processos de pedogênese (às quais se atribuem valores próximos de 1,0), passando por quadros intermediários (às quais se atribuem valores próximos de 2,0), até situações de predomínio dos processos de morfogênese (às quais se atribuem valores próximos de 3,0).

“Na escolha das cores, obedeceram-se aos critérios de comunicação visual, que buscam associar às cores ‘quentes’ e seus matizes (vermelho, amarelo e laranja), situações de emergência, e às cores ‘frias’ e seus matizes (azul, verde), situações de tranquilidade” (CREPANI *et al.*, 2008, p.298).

O modelo é aplicado individualmente aos temas (Geologia, Pedologia, Geomorfologia e Vegetação) dentro de cada unidade territorial básica, que recebe posteriormente um valor final, resultante da média aritmética dos valores individuais de cada tema segundo uma equação empírica (equação 01), que busca representar a posição desta unidade de paisagem dentro da escala de vulnerabilidade à perda de solos (CREPANI, 2001).

Figura 2 – Escala de vulnerabilidade das Unidades Territoriais Básicas

Unidades de Paisagem	Média		Grau de Vulnerabilidade	Grau de saturação				
				Verm.	Verde	Azul	Cores	
U1		3,0	Vulnerável	255	0	0		
U2		2,9		255	51	0		
U3		2,8		255	102	0		
U4	V	2,7		255	153	0		
U5	U	2,6	Moderadamente Vulnerável	255	204	0		
U6	L	2,5		E	255	255	0	
U7	N	2,4		S	204	255	0	
U8	E	2,3		T	153	255	0	
U9	R	2,2	A	Medianamente Estável/ Vulnerável	102	255	0	
U10	A	2,1	B		51	255	0	
U11	B	2,0	I		0	255	0	
U12	I	1,9	L		0	255	51	
U13	L	1,8	I	Moderadamente Estável	0	255	102	
U14	I	1,7	D		0	255	153	
U15	D	1,6	A		0	255	204	
U16	A	1,5	D		0	255	255	
U17	D	1,4	E	Estável	0	204	255	
U18	E	1,3			0	153	255	
U19		1,2			0	102	255	
U20		1,1			0	51	255	
U21		1,0		0	0	255		

Fonte: Crepani *et al.* (1996); Crepani *et al.* (2001); Crepani *et al.* (2008).

$$V = \frac{(G+R+S+Vg+C)}{5} \quad (1)$$

Onde:

**V** - Vulnerabilidade

**G** - Vulnerabilidade para o tema Geologia

**R** - Vulnerabilidade para o tema Geomorfologia

**S** - Vulnerabilidade para o tema Solos

**Vg** - Vulnerabilidade para o tema Vegetação / Uso da terra

**C** - Vulnerabilidade para o tema Clima

Em agosto de 2008 foi lançado pelo INPE o Projeto TOPODATA, que disponibilizou as variáveis morfométricas locais de todo território brasileiro e que foram extraídas a partir de imagens SRTM, que tiveram a resolução espacial convertida de 90m para 30m, através de métodos de interpolação por Krigagem.

Valeriano (2008), apresentou o TOPODATA: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais. A partir daí foram desenvolvidas várias pesquisas sobre vulnerabilidade, erosão e movimento de massa e que tiveram como suporte de avaliação as variáveis morfométricas: declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal e orientação das vertentes.

Neto (2013), por exemplo, utilizou as variáveis geomorfométricas para avaliação de vulnerabilidade a perda de solos na bacia do rio Salobras em Mato Grosso do Sul. Para isso estabeleceu a relação entre geometria de vertente e os processos de pedogênese e morfogênese, conforme a Ecodinâmica de Tricart (1977).

Bispo *et al.* (2011), utilizaram as variáveis geomorfométricas (declividade, curvaturas vertical e horizontal), obtidas do TOPODATA, para análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião/SP com o uso de métodos de inferência espacial. Os autores compararam os métodos de inferência booleano, o *fuzzy* gama e o bayesiano na geração de cenários de susceptibilidade a movimentos de massa, tendo como suporte de avaliação as variáveis de uso da terra, geomorfologia, geologia, pedologia e declividade. Numa segunda etapa, foram inseridas nos três casos as variáveis curvatura vertical e horizontal.

### ***1.2.2 Processos erosivos e movimentos de massa***

De acordo com Loureiro e Ferreira (2013), o conhecimento da dinâmica dos processos erosivos e dos fatores condicionantes dos movimentos de massa é de extrema relevância para um planejamento e gestão ambiental eficaz, já que a compreensão da gênese e abrangência desses fenômenos se faz essencial para mitigar as perdas materiais e humanas que eles geram.

Nesta pesquisa, seguindo a metodologia de Loureiro e Ferreira (2013), a expressão degradação dos solos se refere tanto aos processos erosivos quanto aos movimentos de massa.

#### ***1.2.2.1 Processos erosivos em encostas***

Conforme Jorge e Guerra (2013), a erosão dos solos é um fenômeno natural e todas as paisagens que possuem algum tipo de declividade, geralmente superior a 3°, podem sofrer erosão. Os problemas ocorrem quando as taxas de perda de solo ultrapassam níveis naturais, geralmente por falta de práticas conservacionistas.



De acordo com Guerra (2005), as variações nas taxas de erosão são determinadas pela interação dos seguintes fatores controladores: erosividade da chuva, propriedades do solo, cobertura vegetal e características das encostas. As intervenções humanas podem alterar esses fatores, contribuindo para acelerar ou retardar os processos erosivos.

#### 1.2.2.1.1 Erosividade

A erosividade da chuva é representada por um índice numérico que expressa a sua capacidade de causar erosão em uma área sem proteção (AMORIM; SILVA; PRUSKI, 2009).

Os parâmetros utilizados para medir a erosividade da chuva são: o total de precipitação, a intensidade da chuva, o momento e a energia cinética (GUERRA 2005; 2015).

De acordo com Guerra (2015), cada um desses parâmetros tem vantagens e desvantagens, mas a maioria dos autores têm utilizado a energia cinética por concluírem ser o melhor para prever a perda de solo (WISHMEIER e SMITH, 1985; HUDSON, 1961; YOUNG e WIERSMA, 1973; EVANS, 1980; MORGAN *et al.*, 1987, entre outros).

Na física, a energia é definida como proporcional ao peso (ou massa) do que se move (água com as partículas do solo) e ao quadrado de sua velocidade. As gotas de chuva atingem a superfície com uma velocidade de 5 a 15 km/h, enquanto a água das enxurradas tem velocidade que na maioria das vezes não ultrapassam 1 km/h (LEPSCH, 2010).

Os danos provocados pelas gotas de água da chuva, a uma alta velocidade sobre o solo, constituem o primeiro passo no processo da erosão. Uma gota golpeando um solo úmido forma uma cratera, compactando a área imediatamente sob o centro da gota, ao movimentar as partículas soltas para fora em um círculo em volta de sua área. Considerando o comprimento e o gradiente do declive, a força das gotas da chuva é capaz de movimentar morro abaixo mais da metade das partículas que foram desprendidas; a força de milhões de gotas durante uma chuva intensa em um terreno cultivado resulta em apreciável movimento do solo nas áreas morro abaixo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012).

Quanto maior a gota, maior o choque e, portanto, maior o volume de partículas minerais e orgânicas soltas. A natureza do solo (textura, estrutura, cultivo, etc.) e a cobertura (quantidade e tipo) influem na intensidade da desagregação (GALETI, 1973).

#### 1.2.2.1.2 Propriedades dos solos

“A erodibilidade expressa a resistência do solo à erosão hídrica. Sendo dependente, entre outros fatores, dos atributos mineralógicos, químicos, morfológicos e físicos desse” (AMORIM; SILVA; PRUSKI, 2009, p. 82).

Conforme Salomão (2015, p.235), “as características do solo, conjuntamente analisadas, determinam a sua maior ou menor capacidade de propiciar a erosão laminar, isto é, a sua erodibilidade”.

De acordo com Guerra (2005), as propriedades que afetam a erosão dos solos são: textura, densidade aparente, porosidade, teor de matéria orgânica, teor e estabilidade dos agregados e o pH do solo.

A textura corresponde a distribuição quantitativa das classes de tamanho de partículas de que se compõe o solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012, p.155). O tamanho das partículas influi na capacidade de infiltração e de absorção da água de chuva, interferindo no potencial de enxurradas, e em relação a maior ou menor coesão entre as partículas. Portanto, solos de textura arenosa são normalmente mais porosos, permitindo rápida infiltração e de absorção de água de chuva, dificultando o escoamento superficial. Todavia, como possuem baixa proporção de partículas argilosas que atuam como uma ligação entre as partículas maiores, apresenta maior facilidade para remoção de partículas, que se verifica mesmo em pequenas enxurradas (SALOMÃO, 2015).

Embora seja reconhecida a importância da textura na erodibilidade dos solos, as percentagens de areia, silte e argila devem ser analisadas em conjunto com outras propriedades, pois a agregação dessas frações granulométricas é afetada por outros elementos, como teor de matéria orgânica (GUERRA 2005).

A matéria orgânica mantém forte influência na resistência dos solos aos processos erosivos (SEIXAS, 1984). Certas substâncias derivadas da decomposição da matéria orgânica servem de “cola” para formação dos agregados do solo, melhorando suas características físicas, como a permeabilidade, porosidade e a retenção de água (LEPSCH, 2010).

A matéria orgânica é formada por organismos mortos e por resíduos de seres vivos, misturados aos solos (SEIXAS, 1984). Condições topográficas favoráveis associadas a solos de alta erodibilidade, submetidos a uso e manejo inadequados, podem acelerar os processos erosivos, implicando na remoção dos horizontes superficiais, subsuperficiais e de seus conteúdos orgânicos (TORRES; MARQUES NETO; MENEZES, 2012).

O teor de matéria orgânica tem maior influência sobre os solos com maiores teores de silte, por apresentarem maior erodibilidade. Já nos solos com maior teor de argila, esta

poderá atuar no sentido de aumentar a resistência dos agregados aos impactos das gotas de chuva (GUERRA 2015).

Solos com alto teor de silte, submetidos a atividade agrícola, sem cuidado de manejo, passam a se tornar mais erodíveis, à medida que perdem matéria orgânica ao longo dos anos. Tal fato aumenta a ruptura dos agregados que pode ser considerada um dos primeiros fatores no processo de erosão dos solos, pois é partir dessa ruptura, que outros processos de desencadeiam no topo do solo, no sentido de desestabilizá-lo e, conseqüentemente, iniciar o processo erosivo (GUERRA, 2015).

De acordo com Guerra (2005), a estabilidade dos agregados é influenciada pela matéria orgânica que, ao mesmo tempo, age sobre a estrutura do solo. As taxas de erodibilidade vão depender do teor de matéria orgânica, e conseqüentemente da estabilidade dos agregados. Uma vez havendo a ruptura dos agregados, poderão ser formadas crostas no solo, dificultando a infiltração e aumentando o escoamento. A alta estabilidade de agregados no solo reduz a sua erodibilidade, pois possibilita a existência de elevado índice de porosidade, aumentando as taxas de infiltração, e proporciona maior resistência aos impactos das gotas de chuva, reduzindo a erosão por *splash*.

A porosidade refere-se à proporção de espaços ocupados pelos líquidos e gases em relação a massa de solo. Em geral, os solos com textura mais fina têm maior porosidade, enquanto os solos arenosos apresentam menor porcentagem de porosidade. A perda de porosidade pode estar relacionada à redução do teor de matéria orgânica, a compactação e ao efeito dos impactos das gotas da chuva, que reduzem o tamanho dos agregados maiores e em conseqüência o tamanho dos poros (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012).

A densidade aparente dos solos [...] “se refere a maior ou menor compactação dos solos” (GUERRA 2005, p.159). Conforme este autor, a densidade aparente pode aumentar sob várias circunstâncias, mas a agricultura é a atividade que mais afeta esta propriedade do solo, devido à redução de matéria orgânica e ao uso de máquinas agrícolas.

A densidade do solo é a relação entre a sua massa total e volume, sendo inversamente proporcional à porosidade e permeabilidade. Ao se promover a compactação do solo, observa-se um aumento de densidade a partir da diminuição dos macroporos; Como conseqüência, o solo torna-se mais erodível (SALOMÃO, 2015).

A permeabilidade consiste na maior ou menor capacidade que um solo apresenta em deixar passar água e ar, e está diretamente ligada à textura e estrutura. Nos solos arenosos, em que predominam as partículas de areia, com grande quantidade de poros grandes, a

permeabilidade é grande, ou seja, rápida, ao passo que é lenta nos solos argilosos e compactos (GALETI, 1973).

Os valores de pH do solo revelam sua acidez ou alcalinidade. Segundo Guerra (2005), os solos ácidos apresentam deficiência em cálcio, um elemento conhecido em contribuir na retenção do carbono, através da formação de agregados, que combinam húmus e cálcio. O solo com alto teor de silte tendem a ter maior erodibilidade à medida que o pH aumenta”.

#### 1.2.2.1.3 Cobertura vegetal

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (2012), “cobertura vegetal é a presença de culturas, árvores, gramíneas, raízes e herbáceas que podem ser utilizadas pelo homem”.

De acordo com Santos (2004), a vegetação é um elemento do meio natural muito sensível às condições e tendências da paisagem, reagindo distinta e rapidamente às variações, podendo mudar abruptamente em curtos períodos de tempo e dentro de pequenas distâncias. Assim, o estudo da vegetação permite conhecer as condições naturais do território e as influências antrópicas do meio, ou seja, permite descrever seu estado e, ao mesmo tempo, deduzir os vetores de pressão que a produzem.

A cobertura vegetal desempenha uma defesa natural contra erosão dos solos, sendo responsável pelos seguintes efeitos: (1) proteção direta contra os impactos das gotas da chuva; (2) dispersão das águas, interceptando-a e evaporando-a antes que atinja o solo; (3) decomposição das raízes das plantas, formando canalículos no solo, aumentando a infiltração da água; (4) melhoramento da estrutura do solo pela adição de matéria orgânica, aumentando sua capacidade de retenção de água; (5) diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada pelo aumento do atrito na superfície (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012).

As taxas de erosão laminar ou concentrada são reduzidas pela presença de vegetação, à medida que a cobertura imposta favorece a difusão do escoamento superficial da água que atinge a superfície (TORRES; MARQUES NETO; MENEZES, 2012).

Em áreas com alta densidade de cobertura vegetal, o *runoff* e a erosão apresentam baixas taxas, sobretudo se houver uma cobertura de serrapilheira (*litter*) no solo, que intercepta as gotas de chuva que caem através dos galhos e folhas (EVANS, 1980).

A cobertura vegetal exerce extrema importância na proteção do solo e no equilíbrio do meio ambiente. De acordo com Tricart (1977), a vegetação tem um papel destacado contra a erosão pluvial e eólica, o que o mesmo batizou de fitoestasia pelo efeito estabilizador dessa

cobertura sobre o solo ao reduzir a força cinética das gotas da chuva; e a ação do vento no que ele denominou de efeito rugosidade.

Conforme Carvalho (2006), os diversos estratos de copa diminuem o impacto das gotas de chuva no solo, favorecendo uma maior infiltração, retenção e conservação da água. A cobertura das copas é responsável pela redução da temperatura do solo diminuindo assim a evaporação e, conseqüentemente, a perda de água. A ocorrência de vários estratos de copa e a deposição de resíduos orgânicos são fatores que contribuem para reduzir o processo erosivo.

“A vegetação, a copa das árvores e, principalmente, a serrapilheira de uma floresta funcionam como amortecedores da energia cinética na gota d’água; esta, quando em contato direto com as partículas do solo, impede o primeiro passo do processo erosivo por salpicamento” (SOBRINHO; FALCÃO, 2006).

De acordo com Guerra (2005) a cobertura vegetal atua de forma direta, na produção de matéria orgânica, que por sua vez, atua na agregação das partículas constituintes do solo. Além disso, as raízes podem ramificar-se no solo e, assim, ajudar na formação de agregados. Essas raízes atuam mecanicamente e, ao se decompor, fornecem húmus, aumentando a estabilidade dos agregados do solo.

#### 1.2.2.1.4 Características das encostas

O relevo terrestre é constituído por uma grande variedade de tipos de encostas, que vão desde superfícies retilíneas quase verticais, os penhascos, até vertentes tão suavemente inclinadas que quase se aproximam da horizontalidade (PENTEADO, 1983).

Salvo os fundos de vales e topos de chapadas, praticamente todas as terras emersas são constituídas por encostas. A encosta se constitui numa forma tridimensional, produzida por intemperismo e erosão, com elementos basais, os quais podem ser de origem deposicional ou erosiva (GUERRA, 2011).

Uma encosta pode ser compreendida como toda superfície natural inclinada (declive) que une duas outras superfícies caracterizadas por diferentes energias potenciais gravitacionais (IPT, 1991).

O comportamento de uma encosta pode ser analisado a partir da identificação de suas características geométricas e do ambiente fisiográfico global: geologia, pedologia, geomorfologia, clima e cobertura vegetal (IPT, 1991).

As principais características geométricas de uma encosta, que podem afetar a erodibilidade dos solos de diferentes maneiras, são: declividade, comprimento (amplitude) e forma da encosta (perfil) (IPT, 1991; GUERRA, 2005).

De acordo com Guerra (2011), as taxas erosivas estão bastante relacionadas às características das encostas, o que pode ser facilmente observado se levarmos em conta que, à medida que as encostas se tornam mais longas, maior é o volume de água que se acumula durante o escoamento superficial. A declividade pode ser um fator importante, porém não há necessariamente uma correlação positiva à medida que a declividade aumenta, pois a literatura mostra, por meio de vários exemplos, que em encostas muito íngremes a erosão pode diminuir, devido ao decréscimo de material disponível (MORGAN, 1986; FULLEN E CATT, 2004; GUERRA E MARÇAL, 2006).

“A forma das encostas possui um papel altamente relevante para compreensão dos processos erosivos” (GUERRA, 2011, p.33). Conforme Hadley *et al.* (1985), a forma das encostas pode ser até mais importante que a declividade na erosão dos solos.

A maior parte das encostas apresentam formas convexas-côncavas, com ou sem segmentos retilíneos intercalados (PENTEADO, 1983).

Conforme Bloom (2000), a superfície superior convexa do perfil é comumente controlada pelos escorregamentos, especialmente rastejamento. Enquanto nas partes inferiores das encostas o transporte por água predomina sobre o rastejamento do solo, fazendo que o perfil da encosta se inflete, de convexo, próximo ao topo, para côncavo próximo a base.

Cristas longas, que apresentam encostas curtas convexo-côncavas, possuem característica morfológicas que propiciam a erosão dos solos, destacam que encostas convexas onde o topo das elevações é plano, favorece o armazenamento de água, podendo gerar a formação de ravinas e voçorocas quando a água é liberada (GUERRA, 2005).

A partir da ação e interação dos fatores citados anteriormente, ocorrem os mecanismos de infiltração de água no solo, armazenamento e escoamento em superfície e subsuperfície. Conseqüentemente a ação da água, como agente erosivo, dever ser compreendida, levando-se em conta a complexidade desses fatores (GUERRA, 2005).

A chuva se constitui no principal agente responsável para a ocorrência da erosão hídrica, seja pelo impacto direto das gotas sobre a superfície do solo, ou devido a sua capacidade de produzir o escoamento superficial. Os totais anuais precipitados têm pouca relevância no processo de ocorrência da erosão hídrica, tendo mais importância a consideração da distribuição do tamanho, a velocidade de queda, o número, momento e a energia cinética das gotas, bem como intensidade, duração e frequência da chuva (PRUSKI, 2009).

De acordo com Salomão (2015), destacam-se dois eventos iniciais relacionados a dinâmica de funcionamento hídrico sobre o terreno: o primeiro envolve o impacto das gotas de chuva no solo, sobretudo quando estão desprotegidos da vegetação, promovendo a desagregação e liberação de suas partículas, e o segundo é o escoamento superficial das águas, permitindo o transporte das partículas liberadas.

Segundo Salomão (2015, p.229), “dependendo da forma em que se dá o escoamento superficial ao longo da vertente, podem-se desenvolver dois tipos de erosão: erosão laminar, ou em lençol, [...] e erosão em sulcos[...]”.

#### *1.2.2.2 Erosão laminar*

Processo erosivo causado por escoamento difuso das águas da chuva, que resulta na remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais do solo (SALOMÃO, 2015).

“Ao colidirem com a superfície do solo desnudo, as gotas de chuva rompem os agregados, reduzindo-os a partículas menores, passíveis de serem arrastadas pela energia da enxurrada” (LEPSCH, 2010, p.192).

#### *1.2.2.3 Erosão em sulcos*

Erosão causada por concentração das linhas de fluxo das águas de escoamento superficial, gerando pequenas incisões na superfície do terreno, que podem evoluir por aprofundamento a ravinas (SALOMÃO, 2015). “Em algumas encostas, a água que escorre de pequenos sulcos converge para outros, mais acentuados. Ao se concentrar, ano após anos, nos mesmos sulcos, eles vão se ampliar, até formarem grandes cavidades ramificadas” (LEPSCH, 2010, p.193).

Se desde o início a enxurrada não for controlada, poderá haver o aprofundamento dos sulcos. O escoamento da água superficial e da subterrânea, que também pode arrastar os horizontes subsuperficiais, poderá transformá-los em voçorocas, que são as formas mais espetaculares de erosão, apresentando-se como rasgos disseminados nas encostas, podendo atingir profundidades de vários metros, até o horizonte C dos solos, com paredes quase verticais (LEPSCH, 2010).

De acordo com Wild (1993), a pressão exercida pelo homem sobre os solos é uma das principais causas da erosão, ao promover intervenções que são preponderantes para o desencadeamento do processo, que são citadas a seguir:

- Desmatamento, deixando os solos desprotegidos;
- Agricultura e pecuária, sem adoção de práticas conservacionistas;
- Cultivo e pecuária em encostas de elevada declividade, às vezes, superior a 45°, sem adoção de práticas conservacionistas;
- Trilhas abertas por animais e por homens, compactando os solos, por onde a água se escoia com facilidade;
- Construção de rodovias sem cuidados especiais, o que faz aumentar o escoamento superficial, causando ravinas que podem evoluir para voçorocas;
- Mineração e outras atividades econômicas, que deixam os solos desprotegidos, sem recuperação, sem recuperação dessas áreas, durante e após o término dessas atividades.

Conforme Jorge e Guerra (2013), os principais problemas resultantes da erosão dos solos são:

- Remoção dos nutrientes existentes no topo dos solos;
- Redução da penetração das raízes e do armazenamento de água;
- Diminuição das áreas a serem utilizadas para agricultura e pecuária;
- Aumento do assoreamento de rios, lagos, reservatórios e açudes, levando muitas vezes a grandes enchentes em várias partes do mundo;
- Poluição de corpos líquidos, em especial pelo transporte de defensivos agrícolas, junto com os sedimentos erodidos.

Conforme Toledo, Oliveira e Melfi (2003), o solo é o recurso natural mais importante de um país, pois dele derivam os produtos para alimentar sua população. Nas regiões intertropicais, essa importância é maior ainda, por duas razões: primeiro, pelo fato dessa zona abrigar a maior parte dos países em desenvolvimento, cuja economia depende da exploração de seus recursos naturais, especialmente os agrícolas; segundo, porque os processos que levam à formação dos solos podem, na zona intertropical, levar também à formação de importantes recursos minerais.

Os solos das regiões tropicais são desenvolvidos em áreas tectonicamente estáveis e sobre superfícies de aplainamento esculpidas a partir do final do Mesozóico. São, por sua vez,



solos velhos, frágeis, empobrecidos quimicamente e que se encontram em contínua evolução. De tal forma que existem em situação de equilíbrio precário, em que os impactos provocados por causas naturais ou antrópicas podem desestabilizar o sistema. Desmatamento, cultivo de terras, uso de agroquímicos e exploração mineral são atividades que, se não forem bem conduzidas, através de técnicas desenvolvidas com criteriosa base científica, podem levar à erosão e à contaminação dos solos (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2003).

De acordo com Jorge e Guerra (2013, p.10), “[...]os solos se formam, em média, a uma taxa de 1t/ha/ano, e, na África, Ásia e América do Sul, as perdas chegam a 30t/ha/ano [...]”.

#### *1.2.2.4 Movimentos de massa*

Os movimentos de massa resultam da força de cisalhamento nas encostas, causada pela gravidade, peso do material e água no solo, que consegue sobrepor a resistência dos materiais, determinada por propriedades de coesão dos solos nas encostas (HART, 1986).

De acordo com Penteado (1980), “os movimentos de massa, lentos ou rápidos, são provocados por atividade biológica ou por processos físicos resultantes de condições climáticas, mas a ação da gravidade é o fator principal”.

Os vários tipos de movimentos de massa dependem de fatores, como: estrutura geológica, tipo dos materiais, declividade, orientação e forma das vertentes, área de contribuição, intensidade e distribuição das precipitações. Diferentes metodologias vêm sendo desenvolvidas tendo em vista a previsão dos movimentos de massa, a qual pode subsidiar os administradores públicos em atividades, como: elaboração de planos de evacuação, elaboração de mapas e susceptibilidade, planejamento urbano e planejamento de traçado de rodovias entres outros (GUIMARÃES *et al.*, 2008)

Além da frequência elevada dos movimentos de massa em razão das condições naturais, ocorre também um grande número de acidentes associados às intervenções antrópicas nas vertentes. Dentre as intervenções em áreas urbanas, a que mais preocupa é ocupação irregular das encostas, com o consequente desmatamento e o corte de taludes, propiciando uma maior susceptibilidade à ocorrência dos movimentos de massa (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Conforme Jorge e Guerra (2013), o que pode ser observado nas últimas décadas, no Brasil e em vários outros países, é aceleração dos movimentos de massa, não apenas causados pelas variáveis do meio físico, mas principalmente, pela maneira como as construções são feitas, sem levar em conta os riscos naturais inerentes daqueles ambientes.

A classificação dos movimentos de massa envolve uma grande variedade de materiais, processos e fatores condicionantes (FERNANDES; AMARAL, 2004). Conforme Selby (1993), os critérios utilizados para diferenciar os movimentos de massa são: o tipo de material, a velocidade e o mecanismo do movimento, o modo de deformação, a geometria da massa movimentada e o conteúdo de água.

Entre as várias classificações de movimentos de massas em âmbito internacional, se destacam as de Sharpe (1983), Varnes (1950 e 1978), Hutchinson (1988) e Sassa (1989). No Brasil, as classificações de Guidicini e Nieble (1984) e IPT (1991) são as principais referências e classificam os movimentos de massa em: escoamento (rastejo e corridas), subsidências, escorregamentos (translacionais e rotacionais), quedas de blocos, e movimentos complexos, como pode ser observado no Quadro 2 e que são descritos logo em seguida.

Quadro 2 - Classificação dos movimentos de Massa

<b>Guidicini e Nieble (1984)</b>	<b>IPT (1991)</b>
<b>Escoamentos:</b> Rastejos Corridas	<b>Rastejos</b>
<b>Escorregamentos:</b> Rotacionais Translacionais Quedas de blocos e Quedas de Detritos	<b>Corridas de Massa</b> <b>Escorregamentos</b>
<b>Subsidências:</b> Subsidências Recalques Desabamentos	<b>Quedas/Tombamentos</b>
<b>Formas de transição</b> <b>Movimentos Complexos</b>	

Fonte: adaptado de Fernandes e Amaral (2004).

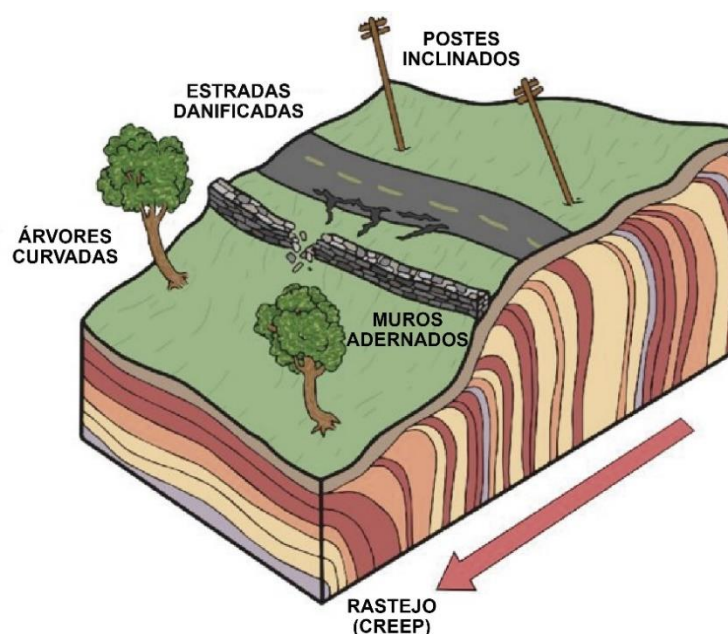
De acordo com Guimarães *et al.* (2008, p.162), “os Escoamentos são movimentos contínuos e não apresentam necessariamente uma superfície definida. Eles podem ser divididos, de acordo com sua velocidade, em lentos (Rastejo) e rápidos (Corridas de Massa)”.

Conforme Massad (2010, p.87), “o *creep* ou Rastejo, é um movimento lento de camadas superficiais de solo, encosta abaixo, com velocidades muito pequenas, de alguns

milímetros por ano, que se acelera por ocasião das chuvas e se desacelera em épocas de seca[...]”.

A sua ocorrência pode envolver grandes massas de solo, cuja movimentação é provocada pela ação da gravidade. Todavia, há influência dos efeitos das variações de umidade e sobretudo de temperatura, contribuindo para o fenômeno de expansão e contração da massa de material, que se traduz em movimento encosta abaixo. A Figura 3 ilustra os efeitos provocados por esse tipo de movimento e que podem ser utilizados na sua identificação (GUIDICINE; NIEBLE,1983).

Figura 3 - Esquema ilustrativo de Rastejo



Fonte: Adaptado de Lyons e Ross (2015).

De acordo com o IPT (1991), o Rastejo pode anteceder movimentos de massa mais rápidos, como os escorregamentos.

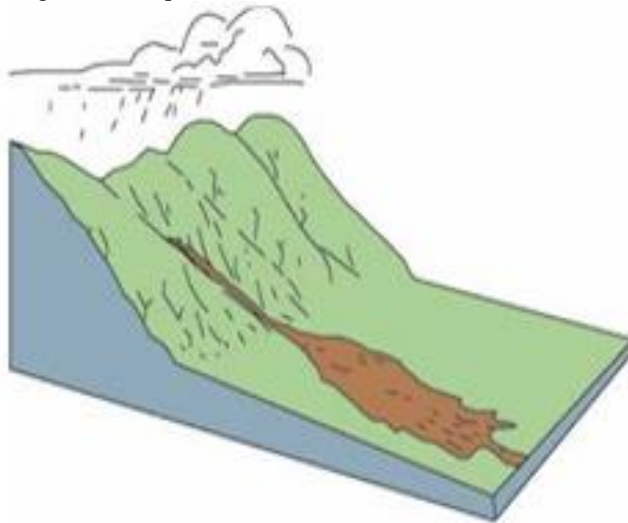
O Rastejo geralmente é separado dos outros tipos de movimentos de massa devido à grande área que ele ocupa numa encosta, à pequena velocidade do movimento e porque alguns eventos dependem muito mais das variações climáticas ao longo do ano do que da gravidade (GUERRA, 2011).

As Corridas de Massa, por sua vez, são causadas por índices pluviométricos excepcionais e são responsáveis por elevadas consequências destrutivas (IPT, 1991).

São eventos marcados por movimentos rápidos no quais os materiais se comportam como fluídos altamente viscosos. Estes estão geralmente associadas a concentração excessiva

dos fluxos d'água superficiais em algum ponto da encosta e deflagração de um processo de fluxo contínuo de material terroso, como pode ser observado na Figura 4 (FERNANDES; AMARAL, 2004). As Corridas de Massa ocorrem, em geral, em locais onde há uma abundância de material facilmente mobilizável por meio da adição de água. Possuem alto poder de destruição, podendo atingir áreas de menor declividade, normalmente consideradas de baixo risco (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

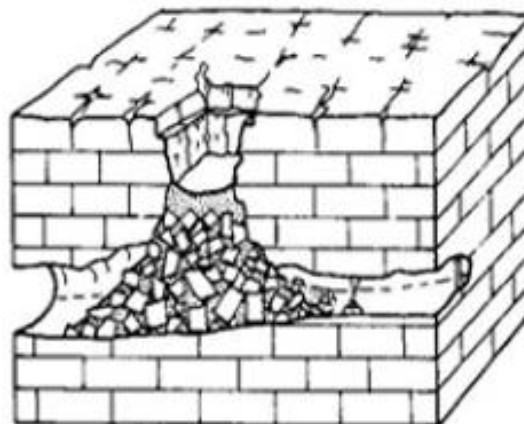
Figura 4 – Esquema ilustrativo de Corridas de Massa



Fonte: Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN (2017).

De acordo com Guidicini e Nieble (1983, p.45), “Subsidências são a expressão, em superfície, do efeito de adensamento ou afundamento de camadas, consequências da remoção de alguma fase sólida, líquida ou gasosa do substrato”. Como pode ser observado no esquema ilustrativo da Figura 5.

Figura 5 – Esquema ilustrativo de Subsidiência



Fonte: CEMADEN (2017).

“Esse fenômeno pode ter origem natural (epirogenia e falhamentos) ou antrópica, pela retirada de material subterrâneo, como: água, petróleo, gás e minério” (GUIMARÃES *et al.*, 2008, p.161).

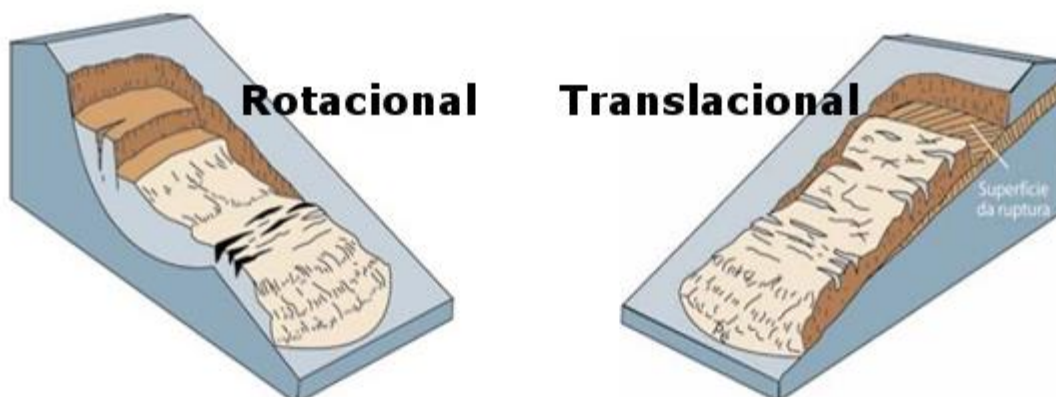
Os Escorregamentos se caracterizam como movimentos rápidos, de curta duração, com plano de ruptura bem definido, permitindo a distinção entre o material deslizado e aquele não movimentado. São geralmente divididos com base na forma do plano de ruptura e no tipo de material movimentado. Quanto à forma do plano de ruptura, os escorregamentos subdividem-se em rotacionais e translacionais (FERNANDES; AMARAL, 2004).

Conforme o IPT (1991, p.19), “os escorregamentos podem movimentar solo, solo e rocha ou apenas rocha”.

Os Escorregamentos Rotacionais (*slumps*) apresentam uma superfície de ruptura curva, côncava para cima, ao longo da qual se dá um movimento rotacional da massa de solo (Figura 6). Dentre os fatores que mais favorecem à deflagração desses movimentos destaca-se a existência de solos espessos e homogêneos, sendo comuns em encostas compostas por material de alteração originado de rochas argilosas como argilitos e folhelhos. A ocorrência do movimento está muitas vezes associada a cortes na base desses materiais, sejam para implantação de uma estrada, ou mesmo originado, pela erosão fluvial no sopé da encosta (TORRES; MARQUES NETO; MENEZES, 2012).

Os Escorregamentos Translacionais representam a forma mais frequente entre todos os tipos de movimento de massa. Apresentam superfície de ruptura com forma planar (FIGURA 6) que acompanha, de modo geral, descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existentes no interior do material. As ocorrências desses planos de fraqueza podem ser resultantes da atividade de processos geológicos (acamamentos, fraturas, entre outros) geomorfológicos (depósitos de encostas) ou pedológicos (contatos entre horizontes, contato solum-saprolito). Esses escorregamentos são, em geral, compridos e rasos, onde o plano de ruptura encontra-se, na grande maioria das vezes, em profundidades que variam entre 0,5m e 5,0m. Tais eventos ocorrem na maioria das vezes nos períodos de intensa precipitação (FERNANDES; AMARAL, 2004). O seu desencadeamento se dá quando é elevada a poropressão em uma superfície de descontinuidade. A poropressão positiva da água no plano de ruptura altera a estabilidade da encosta, reduzindo a tensão cisalhante do solo e a tensão normal. A ruptura ou a instabilidade da encosta vão depender do equilíbrio entre as forças estabilizadoras e desestabilizadoras (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Figura 6– Esquema ilustrativo dos Escorregamentos Rotacional e Translacional



Fonte: CEMADEN (2017).

De acordo com IPT (1991), o escorregamento pode ser induzido, ou seja, sua deflagração pode ser potencializada pela ação antrópica e que, muitas vezes, mobiliza materiais produzidos pela própria ocupação, como aterro, entulho, lixo etc.

Conforme Guidicini e Nieble (1983), Queda de Blocos são movimentos rápidos de blocos de rocha, com ausência de uma superfície de deslizamento, que ocorrem pela ação da gravidade, após serem deslocados por processos intempéricos (Figura 7).

Figura 7 – Esquema ilustrativo de Queda de Blocos



Fonte: CEMADEN (2017).

“A Queda pode ser combinada com outros movimentos, quais saltos, rotação de blocos, ações de impactos no substrato, disso resultando uma fragmentação e uma diminuição de dimensão com o progresso da movimentação” (GUIDICINI; NIEBLE, 1983, p.42).

Esses movimentos se dão nas encostas íngremes de paredes rochosas e contribuem decisivamente para formação dos depósitos de tálus. A sua ocorrência é favorecida pela presença de descontinuidade na rocha, tais como fraturas e bandamentos composicionais, assim como pelo avanço dos processos de intemperismo físico e químico (FERNANDES; AMARAL, 2004).

“Os Movimentos complexos resultam de uma combinação das formas vistas anteriormente e se caracterizam por movimentos múltiplos, ou complexos, e pela ação de vários agentes simultâneos ou sucessivos” (GUIDICINI; NIEBLE, 1983, p.48).

De acordo com Guidicini e Nieble (1983), essa classe de Movimento abrange todos os fenômenos onde, durante sua manifestação, ocorra uma mudança de características morfológicas, mecânicas ou causais. É o caso, por exemplo, de rastejos de detritos de tálus, que, com o aumento do teor de água, passam a avalanche de detritos, ou de corridas, que por diminuição do teor de água, passam a rastejos, ou ainda de rastejos, que, por variação de inclinação da encosta, passam a escorregamento e assim por diante.

De acordo com Petley (1984), os principais objetivos do estudo dos movimentos de massa são:

- Compreender o desenvolvimento das encostas naturais e os processos que têm contribuído para a formação de diferentes feições;
- Tornar possível a estabilidade das encostas, sob diferentes condições;
- Estabelecer o risco de deslizamento, ou outras formas de movimentos de massa, envolvendo encostas naturais ou artificiais;
- Facilitar a recuperação de encostas que sofreram movimento de massa, bem como o planejamento, com medidas preventivas, para que tais processos não venham a ocorrer;
- Analisar os vários tipos de movimento de massa que já ocorreram numa encosta e definir as causas desses processos;
- Saber lidar com o risco de fatores externos na estabilidade das encostas, como por exemplo, os terremotos.

Segundo Hart (1986), as ações preventivas para ocorrência de movimentos de massa podem se dá de duas maneiras:

- Ao se analisar áreas com riscos de deslizamento, deve-se levar em conta as variáveis ligadas à geomorfologia, geologia e geotecnia, que podem ser as responsáveis pela ocorrência de tais processos;
- Levar-se em conta as variáveis nas quais o ser humano é o responsável pelos movimentos de massa, como cortes dos depósitos de tálus, ausência de redes de esgoto e galerias pluviais, construção de ruas não calçadas, desmatamento etc.

### ***1.2.3 A aplicação de Sensoriamento Remoto (SR) e Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) em processos erosivos e movimentos de massa***

Segundo Florenzano (2002) sensoriamento remoto é o termo usado para descrever a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados, da superfície da Terra, por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. O termo sensoriamento é utilizado para se referir à obtenção dos dados, enquanto o remoto significa distante, ou seja, é a obtenção de dados sem o contato físico entre o sensor e a superfície ou alvos imageados.

As imagens de satélite fornecem uma visão sinóptica (de conjunto) e multitemporal (de dinâmica) de extensas áreas da superfície terrestre. Elas mostram os ambientes e as suas transformações, destacam os impactos causados por fenômenos naturais e antrópicos através do uso e da ocupação do espaço (FLORENZANO, 2002).

As imagens orbitais, obtidas a partir do sensoriamento remoto, quando integradas aos sistemas computacionais, conhecidos como Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), apresentam sua dimensão de análise ampliada a partir das diversas ferramentas disponíveis nestes ambientes computacionais. Os SIGs permitem ao analista operar sobre imagens de satélites, no levantamento de informações de interesse, possibilitando manipulações que garantem ganho de conhecimento.

De acordo com Silva (2001) um SIG é um sistema que tem capacidade de operar sobre dados – que são apenas registros de ocorrência de fenômenos identificados – reestruturando-os para que se possa obter conhecimento sobre posições, extensões e relacionamentos taxonômicos, espaciais e temporais contidos em suas bases de dados. Além das possibilidades de atualização de seus dados, um SIG precisa dispor de mecanismos que permitam a transformação desses registros de ocorrência em ganho de conhecimento e facilite a verdadeira comunicação. Deve trazer, da forma mais direta e clara possível, o significado das transformações executadas sobre os dados, e assim propiciando o partilhamento da informação entre os usuários.

Tão importante quanto manipular os dados é gerar novas informações a partir destes. Assim, a utilização de um Sistema de Informações Geográficas constitui-se em ferramenta poderosa capaz de não somente armazenar e manipular dados georreferenciados, mas sobretudo permitir a inclusão, exclusão, substituição e cruzamento de várias informações (COSTA; SILVA, 2012).

Segundo Loureiro e Ferreira (2013), o sensoriamento remoto possibilita uma rápida e confiável aquisição de dados, com diferentes faixas espectrais e escalas, e o SIG, por sua vez,



permite a ligação dessas informações com outros tipos de produtos, tornando essas duas tecnologias complementares.

As técnicas ligadas ao geoprocessamento apresentam bastante êxito enquanto ferramentas para avaliação de perda dos solos por erosão e de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos de terra. O mapeamento de áreas afetadas por deflagração de movimentos de massa e processos erosivos é um dos principais instrumentos na avaliação de danos ocorridos e população afetada. Os SIGs e as imagens de sensores remotos, quando integrados, fornecem informações de síntese para avaliação de riscos, tomada de decisões e compreensão das causas e consequências desses eventos (SOUZA *et al.*, 2011; MARINHO *et al.*, 2011).

A utilização de dados de sensores remotos, como imagens de radar ou satélite e fotografias aéreas, vinculados ao um conjunto de procedimentos e ferramentas de análise espaciais existentes dentro de um ambiente SIG, permitem importantes avanços nos estudos de movimentos de massa e dos processos erosivos (LOUREIRO; FERREIRA, 2013).

De acordo com Guerra e Jorge (2013), para se realizar um prognóstico adequado tanto de erosão quanto de movimento de massa, a adoção de técnicas de geoprocessamento pode permitir grande precisão na detecção desses processos e, conseqüentemente, impedir sua ocorrência.

De acordo com Silva (2001), o geoprocessamento é um conjunto de técnicas computacionais que opera sobre bases de dados (que são registros de ocorrências) georreferenciados, para transformá-los em informação (que é um acréscimo de conhecimento) relevante.

Vários são os estudos que integram os dados do sensoriamento remoto às ferramentas operacionais dos Sistemas de Informações Geográficas. A partir dessa interação é possível realizar levantamentos, análise e relacionamentos em determinada situação ambiental e gerar conseqüentemente informações relevantes que poderão orientar tomadas de decisão sobre a realidade analisada.

Costa e Silva (2012), utilizaram ferramentas do geoprocessamento para estabelecer unidades territoriais de manejo, voltadas ao uso ecoturístico controlado e à proteção ambiental, no Parque Estadual Pedra Branca, no Rio de Janeiro. Para tanto utilizaram o *software* SAGA (Sistema de Análise Geoambiental) na geração de mapas temáticos, que subsidiaram a caracterização, diagnóstico e análise ambiental, base para definição de unidades de manejo do local. No intuito de analisar a expansão urbana desordenada e seus impactos nas áreas riscos de deslizamento e desmoronamento no parque, foram identificadas as áreas mais vulneráveis a movimentos de massa a partir da geração de dois mapas: o primeiro foi obtido a partir do

cruzamento entre os mapas de potencial de expansão urbana desordenada e risco de deslizamentos e desmoronamento, que gerou 35 classes de potenciais de riscos; e o segundo obtido a partir da integração destas 35 classes em três unidades de áreas que deverão ser manejadas de forma diferenciada. São elas, áreas de uso intensivo controlado; áreas de uso limitado e em processo de recuperação natural da cobertura vegetal e áreas de proteção das encostas.

Batista (2012), utilizou técnicas de geoprocessamento no mapeamento geotécnico do Maciço de Baturité. Como parte do processo elaborou documentos cartográficos, que subsidiaram a avaliação de processos erosivos e movimentos de massa, e deram suporte aos ensaios geotécnicos de laboratório e métodos indiretos de investigação. Para elaboração do mapeamento básico e temáticos foram utilizadas as imagens do satélite ETM/ Landsat-7 de 2002 e a do radar interferométrico da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), bem como os *softwares* ENVI 4.5 e o ArcGIS® 9.3. Com o suporte de cartas topográficas da Sudene, produtos do TOPODATA (INPE) e shapes de diversos órgãos governamentais, foi elaborado os documentos cartográficos básicos: Mapas de lineamentos estruturais, substrato rochoso, hipsômetro, declividade, curvatura vertical, e horizontal das vertentes, orientação das vertentes, feições do terreno, pluviometria e pedologia. Posteriormente, a partir de técnicas de álgebra de mapas, foi elaborado o Mapa de susceptibilidade a movimento de massa, obtido a partir da sobreposição dos mapas de declividade, densidade de lineamentos estruturais e litologias; o Mapa de riscos ao sistema viário, a partir do mapa de orientação de vertentes, declividade e dados de foliação como direção e mergulho; e o Mapa de zoneamento geotécnico geral, obtido a partir de sobreposição controlada a partir dos documentos cartográficos básicos e ainda de cartas derivadas e interpretativas de erosividade e erodibilidade. Esses mapas delimitam as zonas onde a abertura de rodovias implicaria em maior risco e os trechos das estradas mais susceptíveis a movimentos de massas, o que permite gerenciar a tomada de decisões e a alocação de recursos no aumento de segurança viária e geotécnica da região. Conforme o autor, esses mapas estabelecem zonas e setores de maior ou menor risco geotécnico numa linguagem cartográfica clara que podem ser usados por não especialistas, incluindo gestores públicos.

Zaidan e Silva (2012), realizaram o zoneamento de áreas com necessidade de proteção ambiental no Parque Estadual de Ibitipoca, Minas Gerais, a partir de técnicas de geoprocessamento com o uso do *software* SAGA. Para isso, elaboraram planos de Informações das áreas com potencial ambiental para o ecoturismo: Potencial para locais de mirante, Potencial para locais de banho e Potencial para locais de gruta; e para as áreas com riscos ambientais: Riscos de interferência antrópica na cobertura vegetal, Riscos de movimentos de

massa e Riscos de erosão dos solos. Posteriormente, todos os Planos de informações de potencial ambiental foram cruzados originando um outro PI do Potencial do turístico do parque. Da mesma forma, os Planos de informações dos riscos ambientais foram cruzados, resultando num único PI com a mesma denominação. A partir do cruzamento dos planos de Informação de Potencial Turístico e de Riscos ambientais, foi gerado o zoneamento de áreas com necessidade de proteção ambiental do parque. Em seguida foi realizada uma avaliação ambiental com a finalidade de criar um espaço classificatório pertinente às áreas com necessidade de proteção ambiental. Assim, foi elaborado um cartograma classificatório com 8 classes, representado em escala ordinal de 1 a 8, que permitiu classificar o potencial turístico e os riscos ambientais do Parque.

Bastos (2012), elaborou um mapa de susceptibilidade a movimentos de massas no Maciço de Baturité, tendo como suporte de avaliação as imagens dos satélites *Spot* (2004) e do radar interferométrico da missão SRTM (2001), bem como, o SIG ArcGIS® 9.3.1. Através da extensão deste programa, chamada *spatial analyst tools*, foi realizada a interpolação de dados cartografados (obtidos a partir das imagens e dados vetoriais) que apresentavam diferentes graus de influência no fenômeno analisado (declividades, pluviosidade, vegetação/uso e ocupação, geomorfologia, pedologia e geologia). Na elaboração do mapa de susceptibilidade foi utilizada a técnica de média ponderada que permite a estimativa da importância relativa de cada variável cartografada no processo. Para isso foram estabelecidos pesos, em percentual, para cada variável, e notas, em valores inteiros (1 a 5), para as suas respectivas classes mapeadas. Tais valores foram estabelecidos conforme a importância de cada uma delas (variável ou classe) na deflagração do movimento de massa no maciço. Os resultados apresentados mostraram que as áreas com susceptibilidade elevada a ocorrência de movimento de massa se encontram, quase que integralmente, abaixo da cota de 600m, marco utilizado na delimitação da Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra, e, portanto, fora de sua área de abrangência.

Carmo *et al.* (2015), realizaram uma análise de risco a erosão do terreno na porção sul do Maciço Central do Estado do Ceará, tendo como base de avaliação as variáveis morfométricas (declividade, orientação de vertentes, curvaturas vertical e horizontal), obtidas a partir de imagens TOPODATA/INPE, e dados superficiais do terreno (água, solo exposto, vegetação fechada, vegetação aberta e áreas de cultivos) gerados a partir de classificação da imagem OLI/Landsat -8, com resolução espacial de 30m. Essas imagens foram processadas respectivamente nos softwares ArcGIS® e Envi, resultando no mapeamento das variáveis que posteriormente foram submetidos a técnica de álgebra de mapas, onde todas elas receberam

pesos (0 a 10) e influências (em percentual) para cada uma de suas feições, conforme a probabilidade de desencadear processos erosivos no terreno. A partir da metodologia aplicada foi obtida a Carta de Avaliação do Risco Ambiental à Erosão do terreno (CARAER), com cinco classes que representam os níveis de risco de erosão no terreno, que são: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. Com base no produto gerado, foi verificado que a maior quantidade de área com níveis de risco mais alto está localizada nas encostas Leste das serras; no entanto esses riscos mais elevados também podem estar localizados em alguns pontos das vertentes Oeste dessas mesmas serras, onde as declividades são mais acentuadas, e nas áreas de relevo suave, principalmente onde existe a predominância de solo exposto e áreas de cultivo.

Hoje com a maior aquisição de imagens da Terra por diferentes sensores orbitais, e com o aperfeiçoamento e desenvolvimento de novos SIGs, verifica-se uma maior difusão de estudos ambientais que abordam erosão e movimento de massa. A oferta de imagens orbitais com variadas resoluções espaciais e espectrais, que são em muitos casos disponibilizadas de forma gratuita por *sites* nacionais (INPE, EMBRAPA, etc.) ou estrangeiros (USGS, ASF, etc.), tem propiciado não só o aumento das pesquisas, mas também da qualidade dos dados gerados e conseqüentemente dos diagnósticos e prognósticos.

#### ***1.2.4 Planejamento ambiental e ordenamento territorial***

De acordo com Santos (2004), o planejamento ambiental consiste na adequação de ações à potencialidade, vocação local e a sua capacidade de suporte, buscando o desenvolvimento harmônico da região e a manutenção da qualidade do ambiente físico, biológico e social. Deve prever e indicar mudanças no uso da terra e na exploração de fontes aceitáveis para as comunidades locais e regionais, ao mesmo tempo em que contemple medidas de proteção aos ecossistemas com pouca interferência humana. Trabalha, enfaticamente, sob a lógica da potencialidade e fragilidade do meio, definindo e especializando ocupações, ações e atividades, de acordo com essas características. As demandas sociais devem ter prioridade sobre as demandas econômicas que, por sua vez, são consideradas, mas dificilmente surgem como um elemento norteador dos planos. Por sua vez, as restrições do meio devem ter prioridade sobre as demandas sociais ou econômicas, ou seja, reconhecem-se as demandas, mas não se avilta o meio, para que elas possam ser atendidas.

Segundo Rodriguez e Silva (2016), o planejamento ambiental é um ponto de partida para que se tomem decisões relativas à forma e intensidade que devem usar um território e cada uma de suas partes, incluindo os assentamentos humanos e as organizações sociais e produtivas.

Conforme Santos (2004), o planejamento ambiental fundamenta-se na interação e integração dos sistemas que compõem o ambiente. Tem o papel de estabelecer as relações entre os sistemas ecológicos e os processos da sociedade, das necessidades socioculturais a atividades e interesses econômicos, a fim de manter a máxima integridade possível dos seus elementos componentes.

O planejamento ambiental, constitui um processo organizado de coleta de informação, análise e reflexão acerca das potencialidades e limitações dos sistemas ambientais de um território. Esses procedimentos servirão de base para definir as metas, os objetivos, as estratégias de uso, os projetos, as atividades e as ações uma síntese da organização das atividades sociais e econômicas no espaço. Deve-se incluir a definição do sistema de monitoramento e a avaliação que deverá retroalimentar o processo (RODRIGUEZ; SILVA, 2016).

De acordo com Serrano (1991), o planejamento e a gestão ambiental podem ser entendidos a partir de três perspectivas:

- Política-administrativa: representa uma ferramenta e um conjunto de procedimentos administrativos e de tomada de decisão que leva a forma como é utilizado ou transforma-se os recursos e serviços ambientais em um determinado território.
- Técnica: é um processo que conduz a garantir os estudos técnicos necessários para implementar vários procedimentos administrativos e de informação para a tomada de decisão em relação ao planejamento ambiental.
- Científica: constitui um processo sistemático que deverá assegurar o conhecimento necessário sobre a propriedade do meio e em particular dos sistemas ambientais, que se formam na sua articulação para realizar estudos técnicos necessários para a tomada de decisões e a implementação de vários procedimentos administrativos.

De acordo com Rodriguez (1997), o planejamento ambiental é um instrumento da política ambiental, que deve orientar a gestão ambiental e esta, por sua vez, deve ser analisada sob duas dimensões:

- Como uma categoria operativa: sendo responsável pela condução, direção, controle e administração do uso dos recursos, através de determinados instrumentos, medidas econômicas, regulamentos, normalização, financiamentos e disposição institucional e jurídicas.

- Como uma categoria política: por meio de um processo de mediação de interesses e conflitos entre atores sociais que atuam sobre o meio ambiente. O Estado, é geralmente o mediador principal na gestão ambiental.

Segundo Rodriguez e Silva (2016), o planejamento e o ordenamento territorial consistem num nível superior de planejamento, que busca especializar as políticas econômicas, sociais e culturais de um território e articular as mesmas com a espacialização das políticas ambientais.

Conforme Moraes (2005), o ordenamento territorial remete a uma visão macro do espaço, que dá ênfase em grandes conjuntos espaciais (biomas, regiões, redes de cidades) e espaços de interesse estratégicos ou usos especiais (unidades de conservação, reservas indígenas, zona de fronteira, etc.). Refere-se a uma escala de planejamento que aborda o território em seu conjunto, atentando para:

- A densidade de ocupação;
- As redes instaladas e os sistemas existentes;
- As grandes aglomerações populacionais, com suas demandas e impactos;
- Os fundos territoriais com suas potencialidades e a vulnerabilidades.

O ordenamento territorial procura, portanto, captar:

- Os grandes padrões de ocupação;
- As formas predominantes de valorização do espaço;
- O eixo de penetração do povoamento e das inovações técnicas e econômicas;
- A direção predominante dos fluxos demográficos e de produtos.

“Visa estabelecer o diagnóstico geográfico do território, indicando tendências e aferindo demandas e potencialidades, de modo a compor o quadro no qual devem atuar de forma articulada as políticas públicas, com vistas aos objetivos estratégicos do governo” (RODRIGUEZ; SILVA, 2016, p.271).

O planejamento e a gestão ambiental podem propor de forma ideal como deve ser organizado o território, conforme as características das paisagens, como unidades ambientais homogêneas. Ainda pode oferecer a forma de organização territorial, de acordo com vários cenários de utilização das paisagens, que irão resultar em diferentes tipos e graus de utilização

da paisagem, diversos níveis de uso dos potenciais de recursos, e vários graus de estado, isto é, diferentes tipos e intensidades de processos degradantes (RODRIGUEZ; SILVA, 2016).

Segundo Botelho (2015), os termos ordenamento territorial e gestão ambiental, embora muitas vezes sejam utilizados como sinônimos de planejamento ambiental, envolvem, respectivamente, as etapas de estabelecimento e promulgação das normas de uso e suas aplicações e, como tais, deveriam ser utilizados nos casos em que o processo de planejamento atinge de fato essas esferas. Considera-se que os termos gestão e manejo estejam condicionados à execução das propostas de uso, seu acompanhamento e controle.

A meta do ordenamento territorial é compatibilizar as políticas em seus rebatimentos no espaço, evitando conflitos de objetivos e contraposição de diretrizes. O estado é pensado como agente regulatório e harmonizador, e não como gerador de impactos negativos (sociais, ambientais e econômicos). Assim, o ordenamento territorial é um instrumento de articulação trans-setorial e interinstitucional que objetiva um planejamento integrado especializado da ação do poder público (MORAES, 2005).

O elevado grau de alteração da paisagem e de degradação ambiental observado no Maciço de Uruburetama sugere uma ausência de qualquer planejamento que oriente as atividades humanas. O fato do maciço abrigar os limites administrativos de muitos municípios dificulta a implementação de um planejamento que garanta o disciplinamento de uso do espaço.

A necessidade de um planejamento ambiental integrado entre os municípios do Maciço de Uruburetama é premente, uma vez que em toda sua extensão são observadas formas de intervenções similares, como nas atividades agrícolas, marcadas por técnicas inadequadas de cultivo, que não levam em consideração as características de solos, clima e declividade da área, ou devido à expansão urbana, onde é possível observar casas construídas em área inapropriadas e submetidas aos riscos geológicos. Em muitos casos são realizados cortes em taludes para construir casas ou para ampliar a área edificável de outras residências.

Ao mesmo tempo, o poder público contribui para ampliar o quadro de degradação ao abrir estradas através dos cortes de vertentes, o que favorece os processos erosivos e movimento de massa, já que nenhuma medida de estabilização dos taludes é realizada.

O quadro apresentado se torna mais grave quando se observa que tais intervenções ocorrem, inclusive, em áreas protegidas pela legislação ambiental, ignorando as restrições em encostas com declividade superior a 45° e em topos da serra que apresentam altura mínima de 100 metros e inclinação média superior a 25°, contrariando assim o Código Florestal (Lei Federal nº 12.651/2012).

### 1.3 Material e métodos

Nessa seção são apresentados os recursos e os procedimentos metodológicos empregados no desenvolvimento da pesquisa.

#### 1.3.1 Materiais

Os recursos que subsidiaram os procedimentos metodológicos aplicados ao longo da pesquisa estão listados abaixo:

- Imagem do satélite OLI/Landsat-8, datada de 30/09/2017, com resolução espacial de 30 metros, obtida no *site* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2018). A imagem pode ser visualizada em composição RGB (321) na Figura 8, e as informações sobre os sensores disponíveis no Landsat 8 se encontram na Tabela 2.

Figura 8 – Composição 321 (RBG) da Imagem Orbital OLI/Landsat-8 (órbita 217, ponto 63), com delimitação da área de estudo



Fonte: USGS (2018).



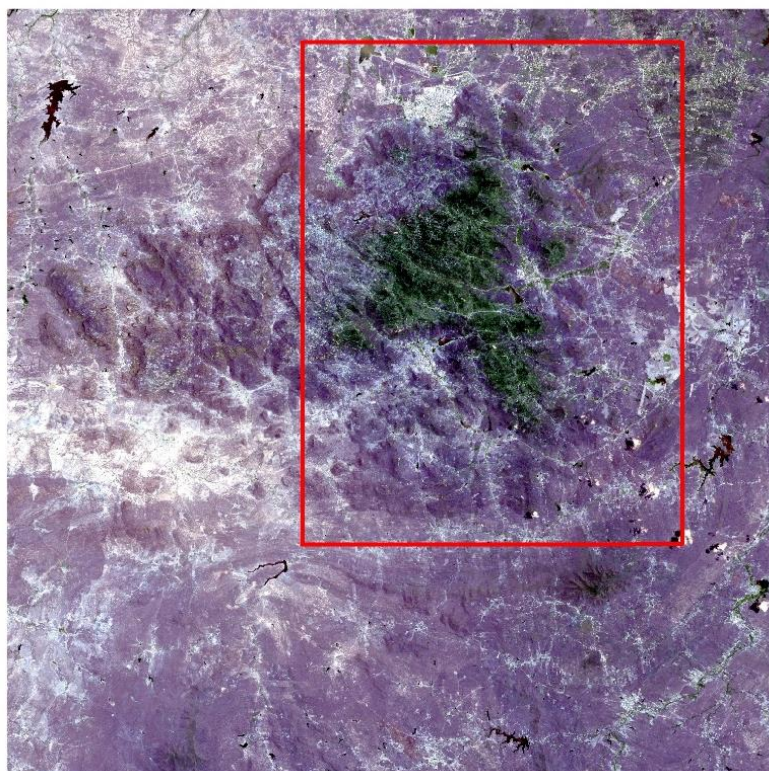
Tabela 2 - Características dos instrumentos imageadores OLI e TIRS do Landsat-8

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Res. Radiométrica
<b>OLI (Operational Land Imager)</b>	(B1) Costal	0.433 - 0.453 $\mu\text{m}$	30 m	16 dias	185 km	16 bits
	(B2) Azul	0.450 - 0.515 $\mu\text{m}$				
	(B3) Verde	0.525 - 0.600 $\mu\text{m}$				
	(B4) Vermelho	0.630 - 0.680 $\mu\text{m}$				
	(B5) Infravermelho próximo	0.845 - 0.885 $\mu\text{m}$				
	(B6) Infravermelho médio	1.560 - 1.660 $\mu\text{m}$				
	(B7) Infravermelho médio	2.100 - 2.300 $\mu\text{m}$				
	(B8) Pancromático	0.500 - 0.680 $\mu\text{m}$	15 m			
	(B9) Cirrus	1.360 - 1.390 $\mu\text{m}$	30 m			
<b>TIRS(Thermal Infrared Sensor)</b>	(B10) LWIR - 1	10.30 - 11.30 $\mu\text{m}$	100 m			
	(B11) LWIR - 2	11.50 - 12.50 $\mu\text{m}$				

Fonte: adaptado de EMBRAPA, 2018.

- Imagem do satélite MSI/sentinel-2 datada de 26/09/2017, com resolução espacial de 10 metros, obtida no *site* do USGS (2018). A imagem pode ser visualizada em composição RGB (432) na Figura 9, e as informações sobre os sensores se encontram na Tabela 3.

Figura 9 – Composição 432(RBG) da Imagem Orbital MSI/Sentinel 2 com delimitação da área de estudo



Fonte: USGS (2018).

Tabela 3- Parâmetros do sensor MSI do satélite Sentinel-2

Banda	Comprimento de Onda Central ( $\mu\text{m}$ )	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Res. Radiométrica
1 - Aerosol	0,443	60 m	5 dias	290 Km	12 Bits
2 - Azul	0,490	10 m			
3 - Verde	0,560	10 m			
4 - Vermelho	0,665	10 m			
5 - Red Edge 1	0,705	20 m			
6 - Red Edge 2	0,740	20 m			
7 - Red Edge 3	0,783	20 m			
8A - Red Edge 4	0,865	20 m			
8 - NIR	0,842	10 m			
9 - Vapor D'água	0,940	60 m			
10 - Cirrus	1,375	60 m			
11 - SWIR 1	1,610	20 m			
12 - SWIR 2	2,190	20 m			

Fonte: adaptado da ESA (2018).

- Modelo Digital de Elevação (MDE) da imagem ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5m, de 8 de março de 2011, disponível no sítio eletrônico *Alaska Satellite Facility*;
- *Softwares*: ArcGIS® 10.5, ENVI 5.0, SPRING 5.5.3 (BRASIL, 2018) e Global Mapper 18, Geomática 2018, GeoMS;
- Arquivos Vetoriais: rodovias, drenagem, limites municipais, sedes municipais, geologia, solos, etc., obtidos em sites oficiais da CPRM, IBGE e IPECE;
- Aeronave remotamente pilotada (ARP) *Phantom 4*;
- GPS de navegação;
- Câmera fotográfica;
- Material para coleta de amostras de solos: bate-estaca, amostradores ou cilindros de cravação com 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura, picareta, sacos plásticos, plástico bolha, pá de jardineiro, balança, fita adesiva e etiquetas de identificação.

### 1.3.2 Métodos

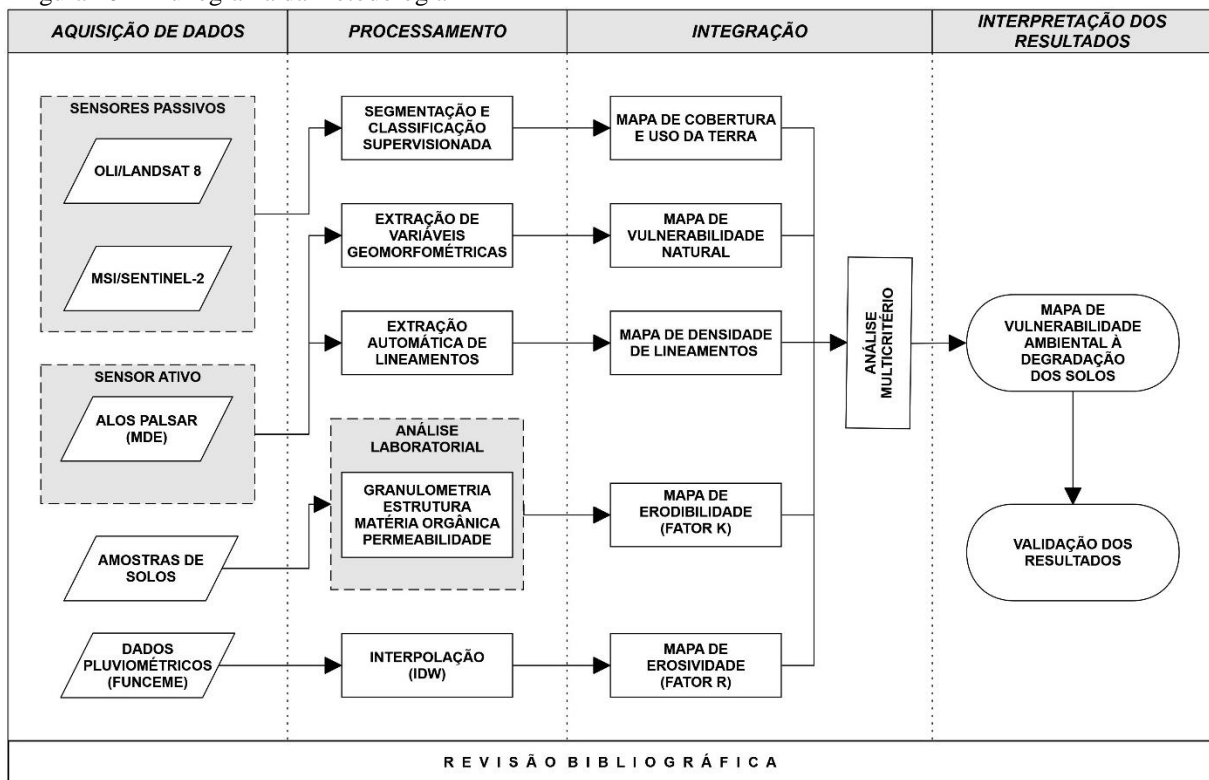
A metodologia da pesquisa está sintetizada no fluxograma da Figura 10.

Como pode ser observado, na primeira etapa houve a obtenção de dados que subsidiaram a elaboração da pesquisa. Foram adquiridas imagens orbitais dos satélites OLI/Landsat 8, MSI/Sentinel-2 e ALOS PALSAR. Além disso, foram obtidas amostras de solos deformadas e indeformadas a partir das atividades de campo, bem como, os dados

pluviométricos da área de estudo, gerados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) através de suas estações de monitoramento.

Na segunda etapa os dados mencionados foram submetidos a processamentos e análises visando espacializar variáveis de interesse. Assim, no *software* SPRING 5.5.3, as imagens OLI/Landsat 8 e MSI/Sentinel foram submetidas ao processo de segmentação e classificação supervisionada, voltado para geração do mapa de cobertura e uso da terra. A utilização das duas imagens serviu para comparar os sensores e identificar qual a melhor resposta para tal aplicação.

Figura 10 – Fluxograma da metodologia



Fonte: elaborado pelo autor.

A imagem ALOS PALSAR, através de seu modelo digital de elevação (MDE), foi utilizada para extração das variáveis geomorfométricas (declividade, curvatura horizontal, curvatura vertical e orientação das vertentes) no *software* ArcGIS® 10.5. Em seguida as variáveis geomorfométricas obtidas foram submetidas a uma análise multicritério e álgebra de mapas que permitiram espacializar a vulnerabilidade natural a perda de solo na área de pesquisa. O MDE também foi utilizado para extração automática de lineamentos no *software* Geomatica 2018, por meio do algoritmo *LINE*. Posteriormente foi gerado o mapa de densidade de lineamentos no *software* ArcGIS® 10.5. e o diagrama de rosetas no *software* Sterionet.

As amostras de solos coletadas em campo, num total de 184, sendo 92 amostras deformadas e 92 indeformadas, foram submetidas a análise laboratorial conforme as normas da ABNT solos. As amostras deformadas foram utilizadas para análise de granulometria, estrutura e matéria orgânica, enquanto que as amostras indeformadas foram submetidas ao cálculo de permeabilidade. Os quatro parâmetros analisados subsidiaram a determinação do fator K, ou a erodibilidade dos solos, em conformidade a metodologia de Wischmeier *et al.* (1971). Num segundo momento, os valores obtidos a partir da determinação do fator K foram submetidos a uma análise Geoestatística no *software* GeoMS, onde foi possível gerar e identificar o variograma que melhor representasse a natureza dos dados, e, que por sua vez, permitiu inferir os parâmetros que seriam utilizados na interpolação por *Krigagem* ordinária e consequentemente na geração do mapa de erodibilidade.

Os dados pluviométricos utilizados, que correspondem a um período de 10 anos (2010-2019), subsidiaram a determinação do fator R, ou erosividade da chuva. Com base na metodologia de Carvalho (1994), foi calculada a erosividade a partir dos dados das estações de monitoramento selecionadas. Posteriormente os resultados obtidos foram submetidos a uma interpolação pela Ponderação do Inverso da distância (IDW), no *software* ArcGIS® 10.5., que resultou no mapa de erosividade.

A terceira etapa consistiu na integração dos mapas gerados na etapa anterior por meio de uma análise multicritério e álgebra de mapas no *software* ArcGIS® 10.5. Para cada variável analisada, foram estabelecidos pesos em percentuais conforme a importância assumida no evento analisado. Da mesma forma, para cada uma das classes presentes nas variáveis mapeada foram estabelecidas notas de 0 a 10 de acordo com a sua relevância nos eventos deflagrados. O resultado desse procedimento foi o mapa de vulnerabilidade ambiental a perda de solos.

Na última etapa foi realizada a análise e a interpretação dos produtos gerados, bem como a elaboração da Tese.

### *1.3.2.1 Trabalho de campo*

#### *1.3.2.1.1 Reconhecimento e caracterização da área de pesquisa*

As atividades de campo subsidiaram a caracterização dos aspectos fisiográficos e antrópicos da área de pesquisa. O reconhecimento da verdade terrestre orientou no processo de elaboração do mapeamento temático a partir de imagens orbitais e, posteriormente, na validação

dos dados gerados, permitindo assim, identificar e corrigir qualquer incongruência ou incompatibilidade entre os alvos interpretados e a realidade apresentada.

Ao todo foram 8 incursões a campo, que juntas totalizaram 19 dias, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Datas das atividades de campo realizadas

ANO	DIAS E MESES
2017	20 e 21 de Maio
	9 e 10 de Setembro
	9, 10 e 11 de outubro
2018	8 e 9 de janeiro
	19, 20 e 21 de Fevereiro
	17 de março
	23, 24 e 25 de julho
2020	1, 2 e 3 de julho

Fonte: elaborada pelo autor.

Devido a extensão da área de estudo e as limitações de acesso impostas pelo relevo, ou pelas propriedades privadas, foi utilizada a aeronave remotamente pilotada (ARP), *Phantom 4*, como pode ser visualizado na Figura 11. Os voos foram realizados com altitude de 200 e 300 metros em diferentes setores do Maciço de Uruburetama. As imagens permitiram potencializar o tempo durante as atividades de campo e facilitaram o reconhecimento e a caracterização local.

Figura 11 – Voo de ARP *Phantom 4* no município de Uruburetama/CE

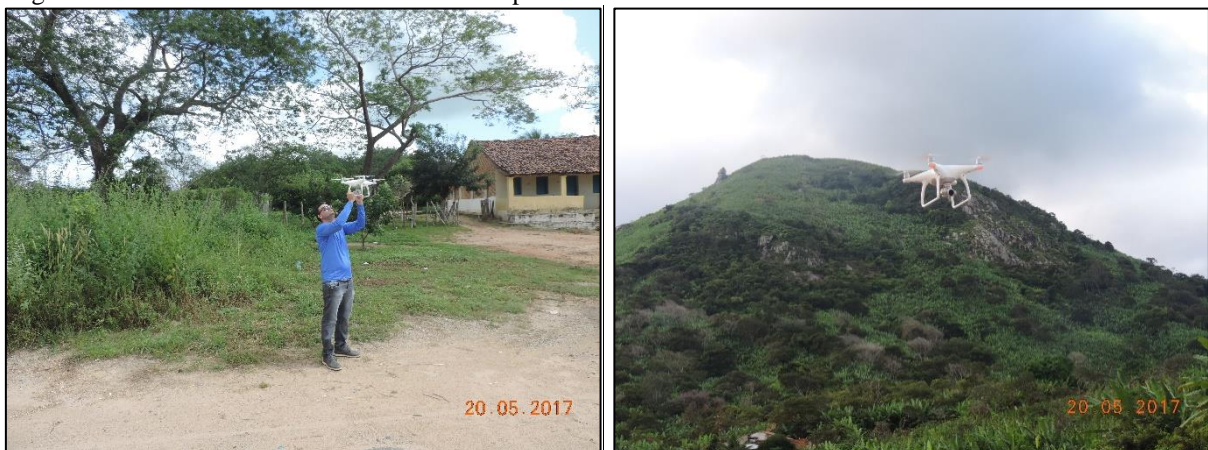


Foto: Henrique Castro (20/05/2017)

#### 1.3.2.1.2 Coleta de amostras de solos



Vinculado ao processo de reconhecimento da área foi realizado o procedimento de coleta de solos, que consistiu no recolhimento de 184 amostras, sendo 92 deformadas e 92 indeformadas. Para as amostras deformadas foram retirados aproximadamente 2kg de solo e acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados. Para as amostras indeformadas a aquisição se deu a partir de um equipamento chamado bate-estaca, como pode ser observado na Figura 12.

Este equipamento é composto por uma haste, um peso de bater, um disco e um cilindro (amostrador) com 10 cm de altura e 10 cm de diâmetro. O cilindro é cravado no chão a partir da força empreendida pelo peso, guiado pela haste, sobre o disco sob a ação da gravidade. Após o cilindro ser totalmente cravado no solo é retirado o material de seu entorno para que se proceda o corte na base da amostra com a espátula. Após esses procedimentos a amostra é acondicionada em saco plástico, posteriormente embrulhada em plástico bolha, para evitar mobilidade do material extraído, e identificada com numeração e coordenadas projetadas, obtidas a partir de GPS de navegação.

Figura 12 – Bate estaca e procedimentos de coleta no município de Itapajé/CE



Fotos: Eduardo Freires e Edilson Souza (20/05/2017 e 23/02/2018).

As amostras deformadas foram submetidas a ensaios laboratoriais para determinação de granulometria, teor de matéria orgânica e estrutura do solo. Enquanto as amostras indeformadas foram utilizadas para a determinação da permeabilidade dos solos.

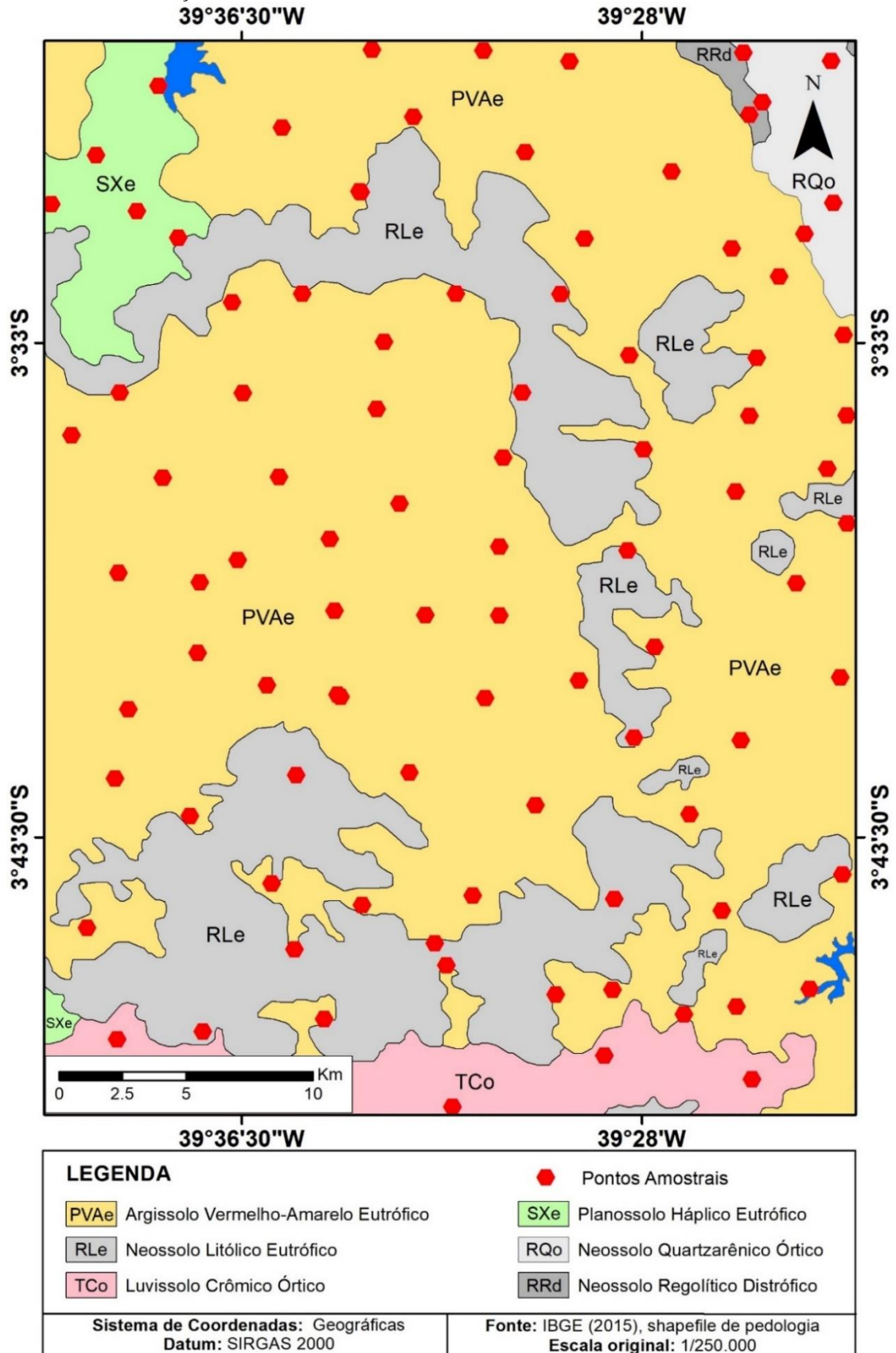
As localizações dos pontos de coleta encontram-se na Tabela 5 e podem ser visualizadas na Figura 13.

Tabela 5 – Localização dos pontos de coletas das amostras de solos

<b>Pontos</b>	<b>Northing</b>	<b>Easting</b>	<b>Pontos</b>	<b>Northing</b>	<b>Easting</b>
01	9590907	451908	47	9607914	456098
02	9585371	451312	48	9611865	454545
03	9585964	441515	49	9610197	453555
04	9593733	436319	50	9613075	455683
05	9593812	436205	51	9619065	437550
06	9596940	439664	52	9616435	439168
07	9613514	437065	53	9619034	441925
08	9605616	432476	54	9618603	445313
09	9609525	442368	55	9615053	443572
10	9599466	447603	56	9611682	445909
11	9582314	454774	57	9614294	449323
12	9581616	451887	58	9617013	452895
13	9581320	449830	59	9618635	455600
14	9579706	446707	60	9618951	452154
15	9582277	447023	61	9616534	452392
16	9584093	440039	62	9609496	444963
17	9580323	427559	63	9586794	456058
18	9580633	430927	64	9578770	452501
19	9584683	426362	65	9592150	447858
20	9582111	444796	66	9592044	452067
21	9577686	440731	67	9595695	448668
22	9583237	440496	68	9594386	445694
23	9585590	437178	69	9585837	447095
24	9586423	433621	70	9589497	443989
25	9589064	430402	71	9590663	434579
26	9583856	434515	72	9581128	435698
27	9593247	427990	73	9578457	435782
28	9590539	427468	74	9590770	439042
29	9594194	433437	75	9593690	442010
30	9595442	430709	76	9597106	436085
31	9598209	430794	77	9598585	427590
32	9603969	425736	78	9609515	434818
33	9605637	427636	79	9607626	438032
34	9617635	429161	80	9605006	437746
35	9614932	426694	81	9609171	432047
36	9616014	434012	82	9602300	429337
37	9611704	429942	83	9599095	432276
38	9612746	428303	84	9601290	438640
39	9613017	424949	85	9602336	433907
40	9594511	455965	86	9603425	448230
41	9598198	454245	87	9607120	447662
42	9600676	453131	88	9611295	451697
43	9600526	456228	89	9605642	443461
44	9601771	451847	90	9603108	442714
45	9602666	455447	91	9599612	442573
46	9607009	452680	92	9599909	435905

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 13 – Pontos de obtenção de amostras deformadas e indeformadas de solos na vertente úmida do Maciço de Uruburetama e entorno



Fonte: elaborado pelo autor.



## **2 CAPÍTULO II - ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL DA VERTENTE ÚMIDA DO MACIÇO DE URUBURETAMA/CE E ENTORNO**

O artigo intitulado “Análise socioambiental da vertente úmida do Maciço de Uruburetama/CE e entorno” foi submetido para análise e publicação ao periódico Revista Ciência e Natura, do Centro de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal de Santa Maria, no dia 11 de outubro de 2019. Apresenta versão impressa, ISSN 0100-8307, e versão online, ISSN 2179-460X. O texto apresentado segue a mesma estrutura exigida pelo periódico.

O objetivo desse artigo é apresentar o quadro físico e humano da área de pesquisa, identificando as principais intervenções promovida no Maciço de Uruburetama e a influência que exercem na aceleração dos processos erosivos e no desencadeamento de movimento de massa.

**ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL DA VERTENTE ÚMIDA DO MACIÇO DE  
URUBURETAMA/CE E SEU ENTORNO**  
Social and Environmental Analysis of the Uruburetama Massif Humid Hillside and its  
Surroundings

**Resumo**

As diversas intervenções no Maciço de Uruburetama têm gerado um quadro de degradação que compromete a sustentabilidade econômica e ambiental local. Como forma alertar sobre o agravamento dos problemas ambientais, esta pesquisa objetiva realizar uma análise socioambiental da vertente úmida do Maciço de Uruburetama/CE, com intuito de avaliar a degradação e os impactos gerados a partir das ações antrópicas. A metodologia da pesquisa consistiu na aquisição de dados, em que houve a revisão bibliográfica, a obtenção de imagens orbitais e dados vetoriais; e a realização de atividades de campo para reconhecimento e identificação dos usos da terra e seus impactos. Posteriormente esses dados e ações subsidiaram a caracterização e o mapeamento temático da área de pesquisa. A partir da integração desses dados foi verificado que a vertente úmida do Maciço de Uruburetama apresenta avançado estágio de degradação a partir da expansão urbana e das atividades agrícolas. As intervenções ocorrem inclusive nas áreas de preservação permanente, contrariando o novo Código Florestal. O poder público contribui para o quadro de degradação ao efetuar aberturas de estradas sem os cuidados necessários para estabilização dos taludes e ao não promover medidas efetivas de monitoramento, fiscalização e controle da expansão urbana e das atividades agrícolas.

**Palavras-chave: Intervenções antrópicas. Degradação ambiental. Sustentabilidade.**

**Abstract**

*The various interventions in the Uruburetama Massif have generated a degradation scenario that compromises local economic and environmental sustainability. As a way to warn about the aggravation of environmental problems, this research aims to perform a social and environmental analysis of the humid hillside of the Uruburetama Massif, in order to evaluate the degradation and impacts generated from anthropic actions. The research methodology consisted of data acquisition, in which there was a literature review, orbital images and vector data; and conducting field activities to recognize and identify land uses and their impacts. Later these data and actions subsidized the characterization and thematic mapping of the research area. From the integration of these data it was verified that the humid hillside of the Uruburetama Massif presents an advanced stage of degradation from urban expansion and agricultural activities. Interventions even occur in permanent preservation areas, contrary to the new Forest Code. The government contributes to the degradation situation by constructing roads without the necessary precautions to stabilize the slopes and by not promoting effective measures to monitor, supervise and control urban sprawl and agricultural activities*

**Keywords:** *Anthropic interventions. Ambiental degradation. Sustainability.*

## 2.1 Introdução

O crescimento da população verificado no estado do Ceará nas últimas décadas acarretou em várias intervenções sobre os recursos naturais. As formas de uso e ocupação processadas no meio urbano e rural, promovidas pela população local, estimada em 9.132.078 pessoas (IBGE, 2018), vêm desencadeando problemas de diversas ordens que comprometem o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade ambiental.

Dos 184 municípios cearenses 175 estão inseridos no domínio do clima semiárido, o que representa 98,7% do território estadual (BARBOSA, 2017). Nesse contexto, marcado por temperaturas elevadas e médias pluviométricas anuais inferiores a 800 mm, se sobressaem os municípios que apresentaram, dentro de um contexto histórico, maior dinamismo econômico e que por sua vez atuam como polos de desenvolvimento e atração populacional, como por exemplo: Juazeiro do Norte, Sobral e alguns municípios da região metropolitana de Fortaleza.

Por outro lado, em meio a escassez de recursos hídricos, que limita o desenvolvimento dos sertões cearenses, se destacam os enclaves úmidos e subúmidos, considerados paisagens de exceção no contexto semiárido por apresentarem características distintas em relação ao seu entorno, como as serras de Uruburetama, Baturité, Maranguape, Aratanha e Meruoca; o Planalto da Ibiapaba e a Chapada do Araripe.

Essas áreas se distribuem de modo disperso pelos sertões semiáridos e se configuram como superfícies topograficamente elevadas de relevo serranos, com dimensões variadas e que são submetidos às influências de mesoclimas de altitude. Representam verdadeiras “ilhas verdes” no domínio morfoclimático das caatingas que recobrem as depressões interplanálticas e intermontanas semiáridas (AB’SÁBER, 1974).

Os enclaves úmidos ou brejos de altitude constituem importantes setores de produção agrícola, sendo tradicionalmente considerados como celeiros dos espaços sertanejos. A atividade agrícola tende a se concentrar, preferencialmente, nos topos e nas encostas úmidas, onde o potencial natural permite uma exploração diversificada e contínua do solo (SOUZA; OLIVEIRA, 2006).

Contudo, as diversas intervenções humanas efetuadas nessas áreas têm gerado um quadro de degradação que compromete o equilíbrio ambiental e a sustentabilidade agrícola. Vários setores das serras foram completamente desconfigurado pelas atividades agrícolas e extrativistas, ou pelo crescimento urbano, que em muitos casos esteve associado a exploração turística desses ambientes a partir da construção de pousadas, hotéis e casas de veraneio.

Chama atenção o fato de muitas dessas intervenções ocorrerem em desacordo com as prescrições legais. Assim, é possível observar supressão indiscriminada da vegetação, construções em áreas de preservação permanente, uso do fogo na prática agrícola, inserção de culturas inadequadas as características ambientais das serras, como a banana, e uso descontrolado dos sistemas de irrigação. Associadas a essas ações podem ser observadas a intensificação dos processos erosivos, o desencadeamento de movimento de massa, a ampliação das áreas de riscos, o assoreamento dos corpos d'água e a diminuição ou perda da produtividade agrícola.

A partir do exposto, esta pesquisa objetiva realizar uma análise socioambiental da vertente úmida do Maciço de Uruburetama/CE, e seu entorno, com intuito de avaliar a degradação e os impactos gerados a partir das ações antrópicas ao longo dos anos.

## **2.2 Materiais e métodos**

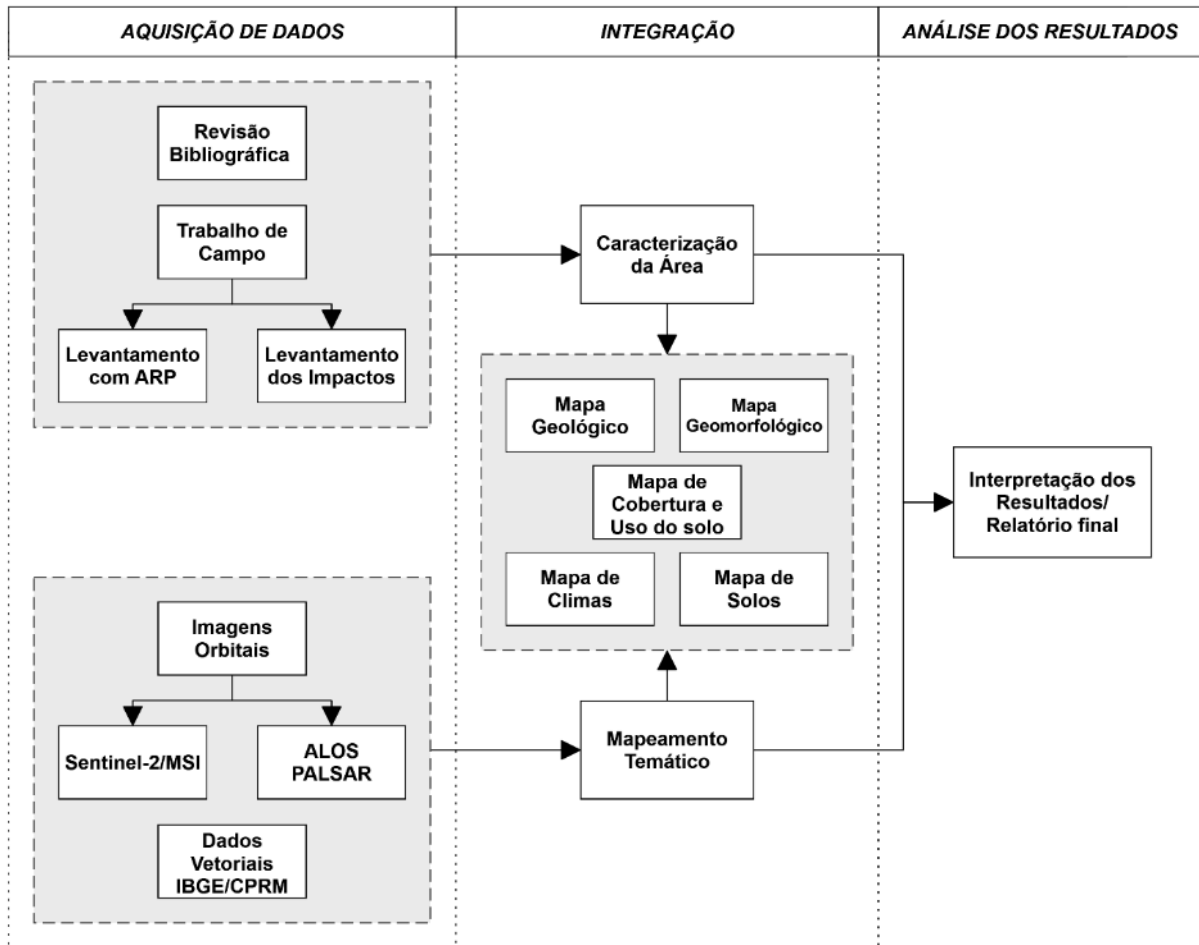
### **2.2.1 Materiais**

- Imagem do satélite MSI/Sentinel-2 datada de 26/09/2017, obtida no *site* do USGS (2018);
- Modelo Digital de Elevação (MDE) da imagem Alos Palsar, com resolução espacial de 12,5m, de 8 de março de 2011, disponível no sítio eletrônico *Alaska Satellite Facility*;
- *Softwares*: ArcGIS® 10.5, ENVI 5.0, SPRING 5.5.3 (BRASIL, 2018);
- *Arquivos vetoriais*: rodovias, drenagem, limites municipais, Sedes municipais, geologia, solos, etc., obtidos em sites oficiais da CPRM, IBGE e IPECE;
- Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) *Phantom 4*;
- Câmera fotográfica.

### **2.2.2 Metodologia**

A metodologia utilizada nessa pesquisa se deu em três etapas, conforme o fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia empregada



Fonte: Elaborada pelo autor.

A primeira etapa consistiu na aquisição dos dados. Neste momento também foram realizadas a revisão bibliográfica que fundamentou a pesquisa e as atividades de campo voltadas para reconhecimento da área de pesquisa e levantamento dos impactos gerados a partir do uso e ocupação do espaço. Para otimizar o levantamento, em virtude da grande extensão da área, e observar áreas de difíceis acesso foi utilizada uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) *Phantom 4*.

Ainda nessa etapa foram obtidas as imagens MSI/Sentinel-2, o MDE ALOS PALSAR e os arquivos vetoriais que subsidiaram o mapeamento temático.

A segunda etapa consistiu na integração dos dados anteriormente obtidos. Foi realizada a caracterização da área de estudo a partir das atividades de campo e das imagens geradas por ARP. O reconhecimento e a caracterização da área deram suporte a elaboração dos mapas temáticos de Geologia, Geomorfologia, de Solos, Tipos Climáticos e Cobertura e Uso do Solo no *software ArcGIS® 10.5*.

Na terceira etapa, a partir da integração dos dados, houve a interpretação dos resultados e foi elaborado o relatório final.

## 2.3 Área de estudo

### 2.3.1 Localização da área de estudo

“A serra de Uruburetama, posicionada a aproximadamente 100 km a oeste de Fortaleza, consiste num maciço montanhoso de formato circular, sendo um pouco alongado na direção E-W” (BRANDÃO; FREITAS, 2014). “Mostra-se intensamente dissecada em colinas e cristas, com vales superimpostos, em forma de V, segundo uma disposição paralela e orientada a NW-SE” (BRANDÃO, 2003).

De acordo com Souza e Oliveira (2006), a serra está situada na porção setentrional do estado do Ceará e trata-se de um maciço residual com cerca de 1000 km<sup>2</sup> de área. Compreende parte dos Municípios de Uruburetama, Irauçuba, Itapipoca, Itapajé e Umirim. A porção úmida/subúmida da serra corresponde às encostas norte-oriental e à superfície de cimeira (platô da serra). O maciço é fortemente tectonizado e intensamente fraturado, em que em muitos casos, a rede de drenagem se adapta a essas estruturas.

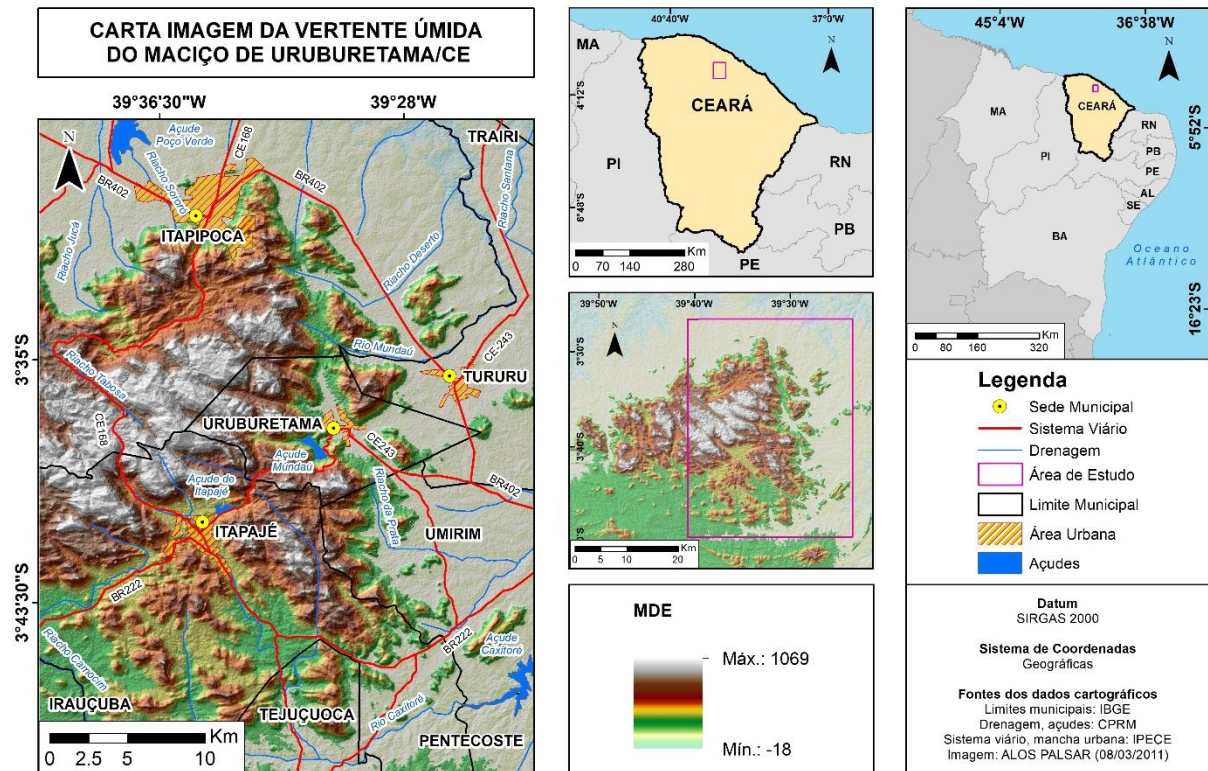
A área de estudo compreende a vertente úmida da serra de Uruburetama e adjacências, totalizando 1.342,73 Km<sup>2</sup>. Localiza-se entre as coordenadas UTM (zona 24 Sul) 9.619.380 m e 9.577.181 m N; 424.667 m e 456.494, m E, e como pode ser observado na Tabela 1 e na Figura 2, está inserida, em diferentes proporções, dentro do limite administrativo de nove municípios do estado do Ceará, que são: Irauçuba, Itapajé, Itapipoca, Pentecoste, Tejuçuoca, Trairi, Tururu, Umirim e Uruburetama.

Tabela 1 – Proporção de abrangência em km<sup>2</sup> e percentual dos municípios na área de pesquisa

Municípios	Área abrangida em Km <sup>2</sup>	Percentual de área
Irauçuba	21,42	1,6%
Itapajé	379,85	28,29%
Itapipoca	503,22	37,48%
Pentecoste	21,55	1,61%
Tejuçuoca	61,30	4,57%
Trairi	2,02	0,15%
Tururu	119,71	8,92%
Umirim	136,66	10,18%
Uruburetama	97,00	7,22%
Total	1342,73	100%

Fonte: IBGE (2018).

Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: elaborada pelo autor.

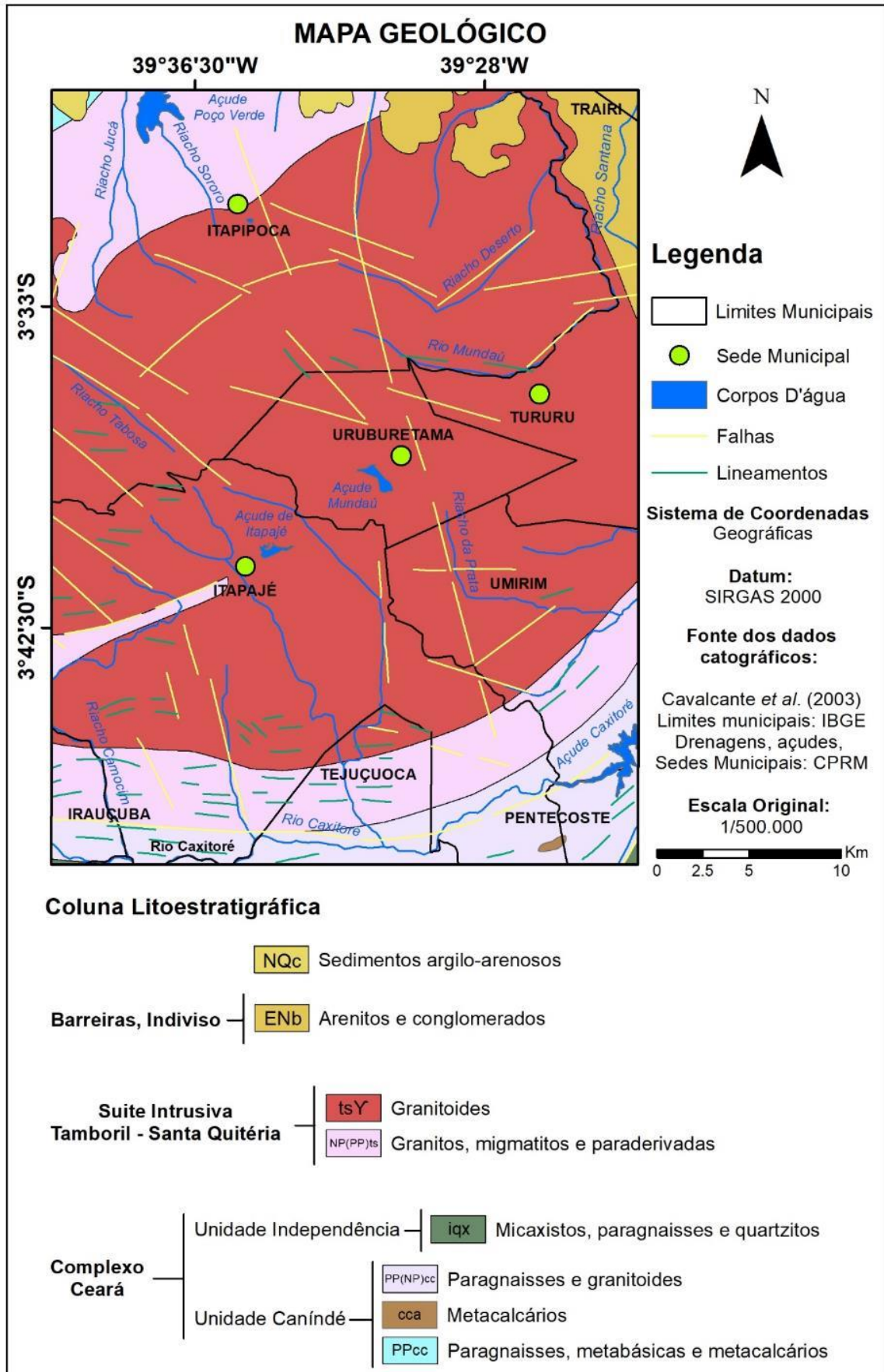
### 2.3.2 Características físico-geográficas

#### 2.3.2.1 Geologia/Geomorfologia

Localizada na província da Borborema, a área de estudo apresenta-se formada em quase sua totalidade por rochas do Complexo Nordestino, formação cronologicamente pertence ao Pré-Cambriano do inferior-médio (OLIVEIRA, 2002). Esta unidade, como pode ser observado na Figura 3, por sua vez, se subdivide em Suíte Intrusiva Tamboril-Santa Quitéria, Complexo Ceará - Unidade Canindé e Complexo Ceará - Unidade Independência. As unidades de menor abrangência são as litologias cenozoicas da Formação Barreiras, encontrada a nordeste do maciço, e os depósitos quaternários de origem aluvial e colúvio-aluvial, que se encontram distribuídos em diferentes setores da área de pesquisa, onde predominam processos de sedimentação.

A Suíte Intrusiva Tamboril-Santa Quitéria é a unidade litoestratigráfica mais representativa da área de estudo, se entendendo de Leste a Oeste e de Norte a quase ao Sul do local. Conforme Schobbenhaus e Neves (2003), essa unidade, formada na Era Neoproterozóica (1,0 Ga – 540 Ma), é composta por rochas plutônica félsicas a intermediárias.

Figura 3 – Mapa Geológico da área de estudo



Fonte: Cavalcante *et al.* (2003).



Conforme Cavalcante (2003), a Suite Intrusiva é formada pela associação granito-migmatítica, envolvendo granitóides neoproterozóicos, cinzentos e rosados, de granulação variável até termos porfíricos, gnaissificados ou não, em jazimentos de geometrias e dimensões diversas; para e ortognaisses migmatíticos, além de rochas calcissilicáticas, anfíbolitos e, localmente, rochas ferríferas e metaultramáficas.

Conforme Schobbenhaus e Neves (2003), as unidades Canindé e Independência do Complexo Ceará, datam do Paleoproterozóico (2,5 - 1,6 Ga), sendo formadas por rochas para e/ou ortoderivadas de grau médio a alto.

A Unidade Canindé ocorre ao sul da área de estudo. É formada por paragnaisses em níveis distintos de metamorfismo-migmatização, incluindo ortognaisses ácidos e rochas metabásicas: metagabros, anfíbolitos com ou sem granada, e gnaisses dioríticos, associados ou não a enderbitos; metagabros e metaultramáficas serpentinizadas e xistificadas, lentes de quartzitos, metacalcários, rochas calcissilicáticas, formações ferríferas e ferro-manganesíferas, além de metaultramáficas; granulitos máficos, enderbitos e leptinitos; anfíbólio gnaisses e/ou anfíbolitos. (CAVALCANTE *et al.*, 2003)

A Unidade Independência, ocorre em porções bem restritas, podendo ser observado no extremo Sudeste e Sudoeste da área de estudo. Segundo Cavalcante (2003), sua litologia é formada por paragnaisses e micaxistos aluminosos (em parte migmatíticos), incluindo quartzitos, metacalcários, rochas calcissilicáticas e, mais raramente, anfíbolitos.

O Grupo Barreira Indiviso, de idade Plio-plestocênica ocorre a Nordeste da área de estudo. É formada por arenitos argilosos de tonalidade variada (amarelada, avermelhada e esverdeada), matriz argilo-caulínica, com cimento argiloso, ferruginoso e, às vezes, silicoso; granulação fina a média, com leitos conglomeráticos e nódulos lateríticos na base. Apresenta sistema fluvial com esporádicas corridas de lamas (CAVALCANTE *et al.*, 2003).

Os Depósitos aluviais (localmente coluviais) são formados por argilas, areias argilosas, quartzosas e quartzofeldspáticas, conglomeráticas ou não, cascalhos e argilas orgânicas / fluvial, em parte com influência marinha (CAVALCANTE *et al.*, 2003).

De acordo com Cavalcante *et al.* (2003), as litologias e/ou associações estão distribuídas na área de pesquisa conforme a Figura 3. Podendo ser observados arenitos e conglomerados; granitos, migmatitos e paraderivadas; granitóides; metacalcários; micaxistos, paragnaisses e quartzitos; paragnaisses e granitóides; paragnaisses, ortognaisses, metabásicas e metalcalcários; e sedimentos argilo-arenosos.

Na Tabela 2 são apresentadas as áreas de abrangência em percentuais das classes litológicas da vertente úmida do Maciço de Uruburetama e entorno.

Tabela 2 – Distribuição das classes de litologia em percentual

<b>Classes de Litologia</b>	<b>Áreas (%)</b>
Sedimentos Argilo-Arenosos	0.43
Arenitos e Conglomerados	3,98
Granitóides	69.08
Granitos, migmatitos e paraderivadas	18.10
Micaxistos, paragnaisses e quartzitos	0.08
Paragnaisses e granitóides	8.18
Metacalcários	0.05
Paragnaisses, metabásicas e metacalcários	0.09
<b>Total</b>	100

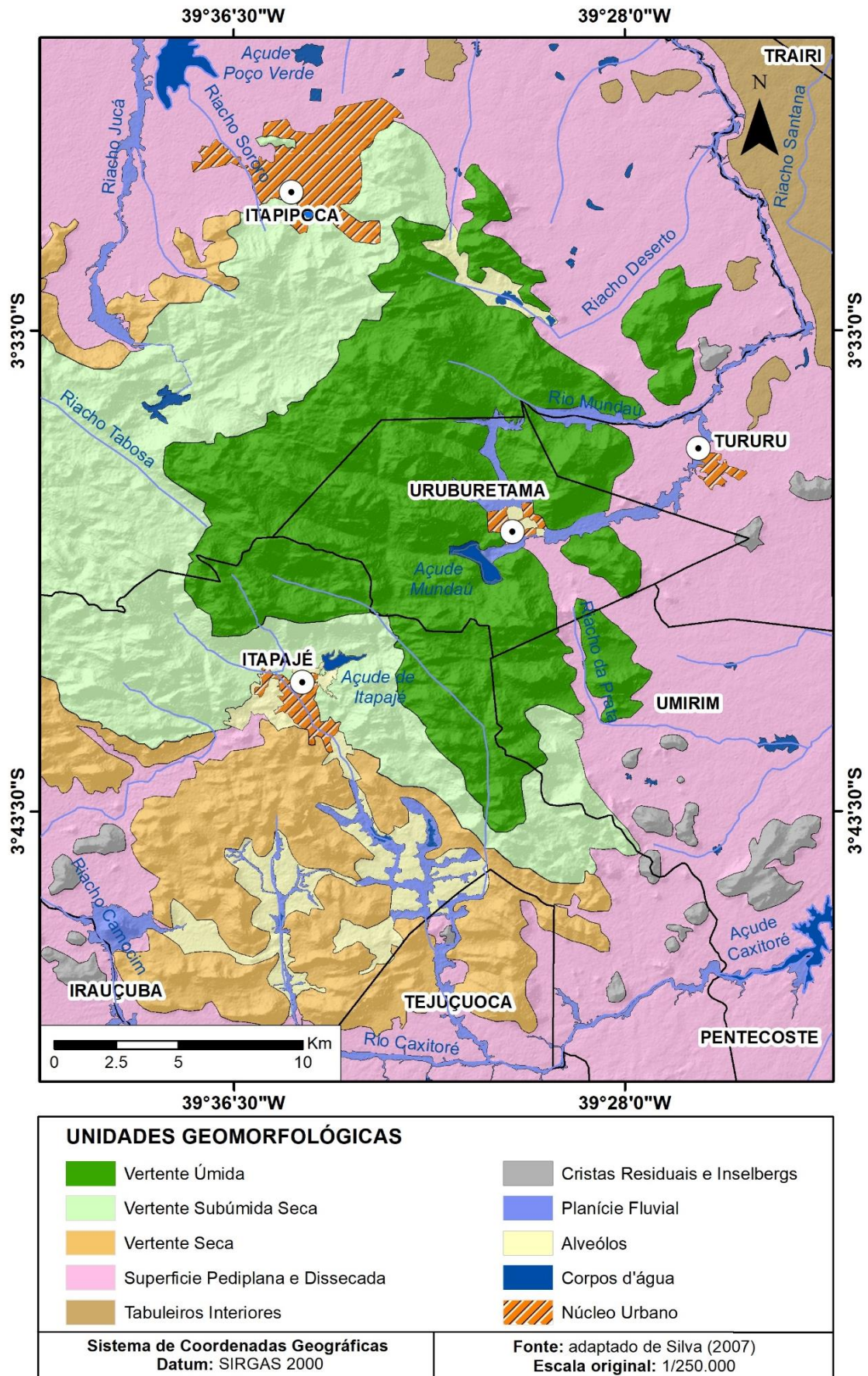
Fonte: Dados da pesquisa.

Morfologicamente a área estudada apresenta as seguintes unidades: Tabuleiro Pré-litorâneo, Superfície Pediplanada (Depressão Sertaneja), Maciço Residual, Cristas Residuais e Inselbergs, Planícies Fluviais e as Planícies Alveolares (Figura 4).

O grupo Barreira corresponde geomorfologicamente aos Glacis de Deposição Pré-litorâneos ou Tabuleiros Pré-litorâneo. Conforme Souza (2000) esse tipo de relevo apresenta inclinação suave em direção ao mar com declives de angulação inferior a 5°, sendo recobertos por sedimentos areno-argilosos fracamente dissecados em interflúvios tabulares.

Segundo Brandão (1995) a Formação Barreiras está distribuída numa faixa de largura variável, disposta paralelamente à linha de costa e à retaguarda dos sedimentos eólicos antigos e atuais. É formada litologicamente por sedimentos areno-argilosos, não ou pouco litificados, de coloração avermelhada, creme ou amarelada, muitas vezes de aspecto mosqueado, com granulação variando de fina a média e contendo intercalações de níveis conglomeráticos. Sua origem é predominantemente continental, onde os sedimentos foram depositados sob condições de um clima semiárido, sujeito a chuvas esporádicas e violentas, formando amplas faixas de leques aluviais coalescentes. Durante esta época, o nível do mar era mais baixo que o atual proporcionando o recobrimento de uma ampla plataforma de deposição.

Figura 4 – Mapa geomorfológico da área de estudo



Fonte: adaptado de Silva (2007).



A drenagem apresenta um fluxo muito lento, limitando a capacidade de incisão linear, no que resulta em baixa amplitude altimétrica, não superior a 15 m, entre o topo dos tabuleiros e os fundos dos vales (SOUZA, 2000).

As encostas com caimento para as planícies fluviais possuem feições retilíneas que expõem, eventualmente, material ferralítico. Grande parte dos tabuleiros é recoberta por espessa cobertura arenosa, da ordem de 1,5-2,0 m. Em porções esparsas, a cobertura superficial apresenta maior percentagem de argila. Isto contribui para uma dissecação incipiente do relevo que contrasta com os topos horizontais das áreas recoberta pelas areias (SOUZA, 2000).

De acordo com Souza (2000, p.22), “Os Tabuleiros Pré-litorâneos ficam situados à retaguarda do cordão de dunas, contactando, sem ruptura topográfica, com depressões sertanejas”.

As Depressões Sertanejas (Figura 5) são marcadas pela primazia de topografias planas ou levemente onduladas, apresentando altitudes médias entre 130 – 150 m. Em altitudes superiores a 300 m a dissecação é mais evidente, isolando interflúvios de feições colinosas, tabuliformes ou lombadas e constituem os níveis elevados desta unidade (SOUZ.A, 2000).

Figura 5 – Depressão sertaneja e inselbergs no município de Tururu



Foto: Daniel Gomes, (obtida por ARP, 21/05/2017).

De acordo com Souza (2000), a morfologia da depressão sertaneja se expõe através dos pedimentos que se inclinam desde a base dos maciços residuais, dos planaltos sedimentares e dos *inselbergs*. O caimento topográfico é feito no sentido dos fundos de vales e do litoral.

Conforme Souza (2000), dentre as características que individualizam o compartimento em análise, podem ser destacadas:

- Acentuadas variações litológicas;
- Truncamento indistinto das litologias por processos de morfogênese mecânica;
- Revestimento generalizado por caatingas que possuem pequena espessura do manto de alteração das rochas; ocorrência frequente de pavimentos e paleopavimentos;
- Deficiente capacidade de erosão linear em face da intermitência sazonal dos cursos d'água, justificando a pequena amplitude altimétrica entre os interflúvios e os fundos dos vales;
- Ocorrência dispersa de *inselbergs* e cristas residuais nos setores de maior resistência litológica;
- Desenvolvimento de áreas de acumulação inundáveis a jusante das rampas pedimentadas.

Apesar da complexidade litológica, as depressões sertanejas compõem superfícies de aplainamento onde o trabalho erosivo truncou indistintamente, os mais variados tipos de rochas. Este trabalho não invalida o trabalho de erosão diferencial, destacando rochas mais resistentes, rebaixando ou dissecando os setores de litologias tenras. Campos de *Inselbergs*, cristas quartzíticas dispersas e maciços rebaixados são exemplos da ação seletiva dos processos degradacionais (SOUZA, 2000).

Conforme Brandão (2003), as cristas e *inselbergs* se formam nos setores de maior resistência litológica e se destacam no contexto aplainado das superfícies de pedimentação.

Assim como as serras de Aratanha e Maranguape, a serra de Uruburetama se constitui em um compartimento de relevo elevado, disposto próximo ao litoral. Por isso, essas formações, são classificadas como Maciços Pré-litorâneos.

A serra de Uruburetama se apresenta como um bloco compacto com quase 1000 km<sup>2</sup> de área formada em rochas do complexo migmatítico. As formas interfluviais com colinas e cristas tem orientação NW-SE com vales superimpostos em disposição transversal. Em

inúmeros setores o padrão de drenagem é retangular, com forte controle estrutural. A regra, no entanto, é o predomínio de padrões dentrícos e subdentrícos na rede hidrográfica. Nas encostas que limitam o maciço é comum observar passagens de pedimentação que se posicionam ao nível das depressões sertanejas, isolando esporões e *inselbergs* (SOUZA, 2000).

De acordo com Souza e Oliveira (2006) a altimetria média no Maciço de Uruburetama é de aproximadamente 750 m. Seu relevo é dissecado em cristas, colinas e lombas alongadas, que se alternam com vales em forma de V e planícies alveolares (Figura 6). Em áreas de maior umidade prevalecem as formas de topos convexos, com vertentes curtas e declives que variam de 10% a 30%. As cristas apresentam feições simétricas, com vertentes retilíneas e compridas. Os declives são mais íngremes e maiores do que 30%. Conforme Brandão e Freitas (2014) as cristas mais elevadas atingem 800 a 900 metros de altitude.

Figura 6 – Relevo dissecado no município de Uruburetama



Foto: Daniel Gomes (obtida por ARP, 21/05/2017)

De acordo com Christofolletti (1981), os vales com perfil em forma de V indicam uma relação equilibrada entre o entalhamento e o alargamento. E geralmente são esculpidos em material homogêneo e as vertentes são simétricas.

Conforme Brandão (2003) e Silva (2007), o Maciço de Uruburetama tem suas vertentes subdivididas em vertente seca, subúmida seca e úmida. Essa compartimentação se dá

a partir de parâmetros como: simetria, profundidade do vale, distância entre os interflúvios, declividade e principalmente pelo aspecto climático regente.

Os vales são entalhados por uma rede de drenagem que exibe um forte controle estrutural. Nas áreas onde ocorre suavização topográfica, a diminuição do gradiente implica no predomínio dos processos de sedimentação. Que por sua vez, favorecem o desenvolvimento das planícies alveolares que são recobertas por sedimentos aluviais e coluviais (SOUZA; OLIVEIRA 2006).

De acordo com Guerra e Guerra (1997), os alvéolos são planícies intermontanas, formadas por secções alargadas de um vale, geralmente entulhada de sedimentos a partir do recuo das vertentes.

As planícies fluviais estão distribuídas de forma dispersa nos setores de superfície aplainada, formando depósitos aluvionares que bordejam o leito dos principais rios, como Mundaú, Caxitoré e Jucá.

As unidades geomorfológicas encontram-se sumarizadas na Tabela 3 com suas respectivas áreas de abrangência em percentual.

Tabela 3 – Unidades Geoambientais com abrangência de áreas em percentuais

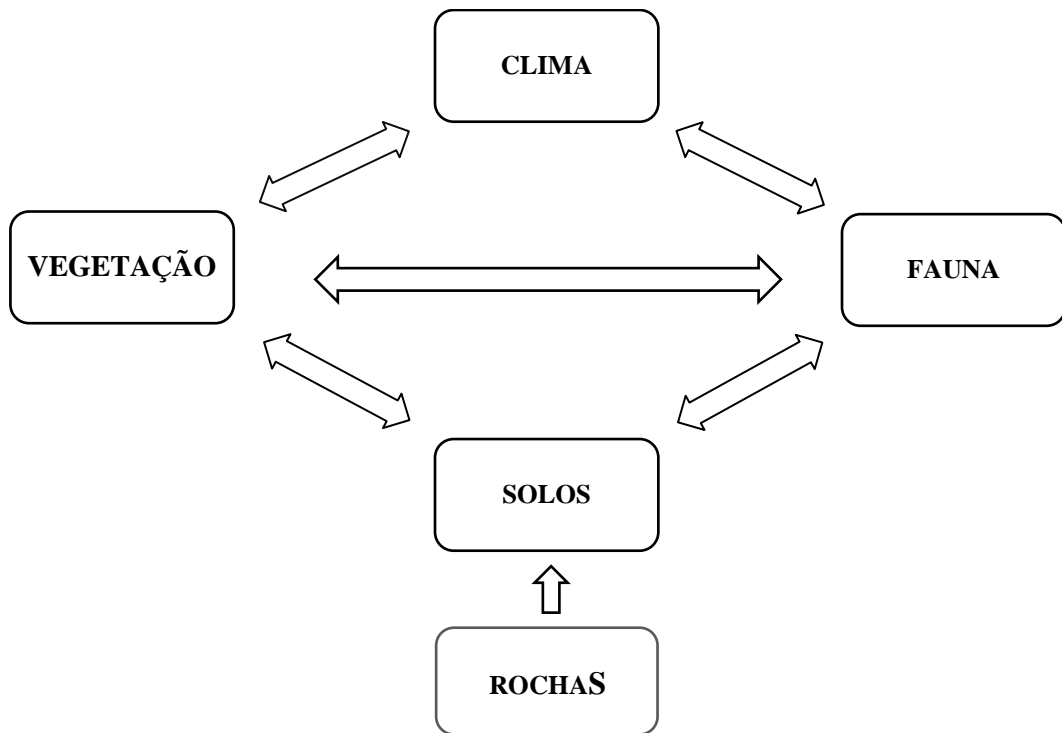
<b>Unidades Geoambientais</b>	<b>Unidades Geomorfológicas</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Depressão Sertaneja</b>	Superfície Pediplanada	42.54
	Cristas Residuais e Inselbergs	1.92
<b>Maciço Residual</b>	Vertente úmida	18.47
	Vertente Subúmida Seca	16.30
	Vertente Seca	11
<b>Tabuleiros</b>	Tabuleiros Interiores	3.64
<b>Depósitos Quaternários</b>	Alvéolos	2.75
	Planícies Fluviais	3.39
<b>Total</b>		100

Fonte: adaptado de Silva (2007).

### 2.3.2.2 Aspectos Hidroclimáticos

Como pode ser observado na Figura 7, o clima influencia diretamente as plantas, os animais, entre eles o homem, e o solo. Influencia também as rochas através do intemperismo, enquanto as forças externas que modelam a superfície da Terra são basicamente controladas pelas condições climáticas. Por outro lado, o clima, particularmente perto da superfície, é influenciado pelos elementos da paisagem, da vegetação e do homem, através de suas várias atividades. Os processos geomorfológicos, pedológicos e ecológicos, e as formas que eles originam, só podem ser devidamente compreendidos com referência ao clima predominante na atualidade e no passado (AYOADE, 2015).

Figura 7 - Influência do clima nos elementos da paisagem



Fonte: Adaptado de Ayoade (2015).

O clima influencia a maior parte dos processos naturais que ocorrem na superfície terrestre. Os condicionantes atmosféricos e climáticos promovem ajustamentos nos diversos elementos da paisagem: relevo, solo, vegetação, recursos hídricos e, principalmente, na vida humana. O conhecimento dos eventos atmosféricos e de suas implicações é de suma importância para o planejamento territorial e para implementação de medidas que contemplem o homem e o meio ambiente (BRANDÃO, 1995).



O estado do Ceará está inserido no domínio do clima semiárido, predominante na região Nordeste do país. Esse clima caracteriza-se pelo baixo índice pluviométrico e pela sua má distribuição espacial e temporal. Pode ser identificado por dois períodos: um úmido, com chuvas irregularmente distribuídas no espaço ao longo de um curto período, e outro seco e longo, marcado pela ausência de chuvas, podendo se prolongar por mais de um ano e provocar o fenômeno da seca.

Conforme Fernandes (2003; 2006), a região nordeste aparece como uma área de convergência das terminações de quatro fluxos de correntes atmosféricas perturbadas: correntes perturbadas do sul, correntes perturbadas do norte, correntes perturbadas do leste e correntes perturbadas do oeste. Contudo as correntes perturbadas do norte apresentam maior significado, sendo representadas pelos deslocamentos da Convergência Intertropical (CIT).

De acordo com Brandão (1995) e Morais (2000), existem três sistemas geradores de precipitações no estado do Ceará: A zona de convergência Intertropical (ZCIT), as frentes frias originárias do pólo sul, e um Centro de Vorticidade Ciclônica, cujo tempo de atuação varia de acordo com o período chuvoso. Podem ser apontados ainda, sistemas de menor escala que atuam na área: as linhas de instabilidade formadas ao longo da costa, e os efeitos da brisa marítima e terrestre que ocorrem com frequência na zona litorânea.

“A zona de Convergência Intertropical (ZCIT) forma-se na área de baixas latitudes, onde o encontro dos ventos alísios provenientes de sudeste com os de nordeste cria uma ascendência das massas de ar, que são normalmente úmidas” (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007, P.90). “Ela se movimenta para o norte durante o verão, no hemisfério setentrional, e para o sul durante o verão no hemisfério meridional, estando sua posição média pouco acima do Equador” (AYOADE, 2015, P.125).

Segundo Morais (2000), entre os sistemas que controlam o regime pluvial no litoral do Estado do Ceará, a frente geradora de chuvas de maior importância é a ZCIT. Ao se movimentar para o hemisfério sul, até atingir seu ponto máximo no equinócio outonal (21 de março), é responsável pela ocorrência de chuvas de janeiro a abril. A partir de maio, quando a ZCIT começa seu retorno em direção ao hemisfério norte, as chuvas entram em declínio, tornando-se cada vez mais raras.

De acordo com Silva (2007), a precipitação na Serra de Uruburetama engloba características típicas de regime tropical com a máxima no outono e a mínima no inverno. No setor sul/oeste, a precipitação média anual é de 460 mm (sede municipal de Irauçuba). Apresenta geralmente três meses chuvosos concentrados no final do verão, começo do outono, entre os meses de fevereiro, março e abril. No setor norte/leste, a precipitação média anual é de

1.056 mm (sede de Uruburetama). Apresenta geralmente de seis a sete meses chuvosos, concentrados no primeiro semestre do ano. A temperatura média situa-se em torno de 21° a 23°C nos platôs e na depressão circunjacente em torno de 26°.

“As condições climáticas permitem enquadrar o clima serrano como do tipo Aw’ da classificação de Köppen. Trata-se de clima quente e úmido com chuvas de verão e precipitação máxima de outono” (SOUZA E OLIVEIRA, 2006).

Conforme o mapa de clima do Brasil elaborado pelo IBGE (2002), a serra de Uruburetama está inserida numa área de Clima Tropical de Zona Equatorial. Conforme Mendonça e Danni-Oliveira (2007), esse tipo climático se distribui por parte das regiões Norte e Nordeste e engloba todo estado do Ceará.

“Esse clima se caracteriza por uma considerável variabilidade pluviométrica e térmica. A temperatura apresenta expressiva variabilidade espacial e temporal, mesmo que toda área esteja enquadrada no âmbito dos climas quentes” (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007, P.90). Assim, conforme o IBGE (2002), o Clima Tropical de Zona Equatorial pode ser dividido em subtipos climáticos.

De acordo com Silva (2007), os subtipos climáticos que ocorrem na serra de Uruburetama, consoante a classificação do IBGE (2002), são: tropical quente semiárido de seis meses secos, tropical quente semiárido de sete a oito meses secos, tropical quente semiárido de nove a dez meses secos (este não está inserido no recorte da área de estudo) e tropical quente semiúmido de cinco meses secos.

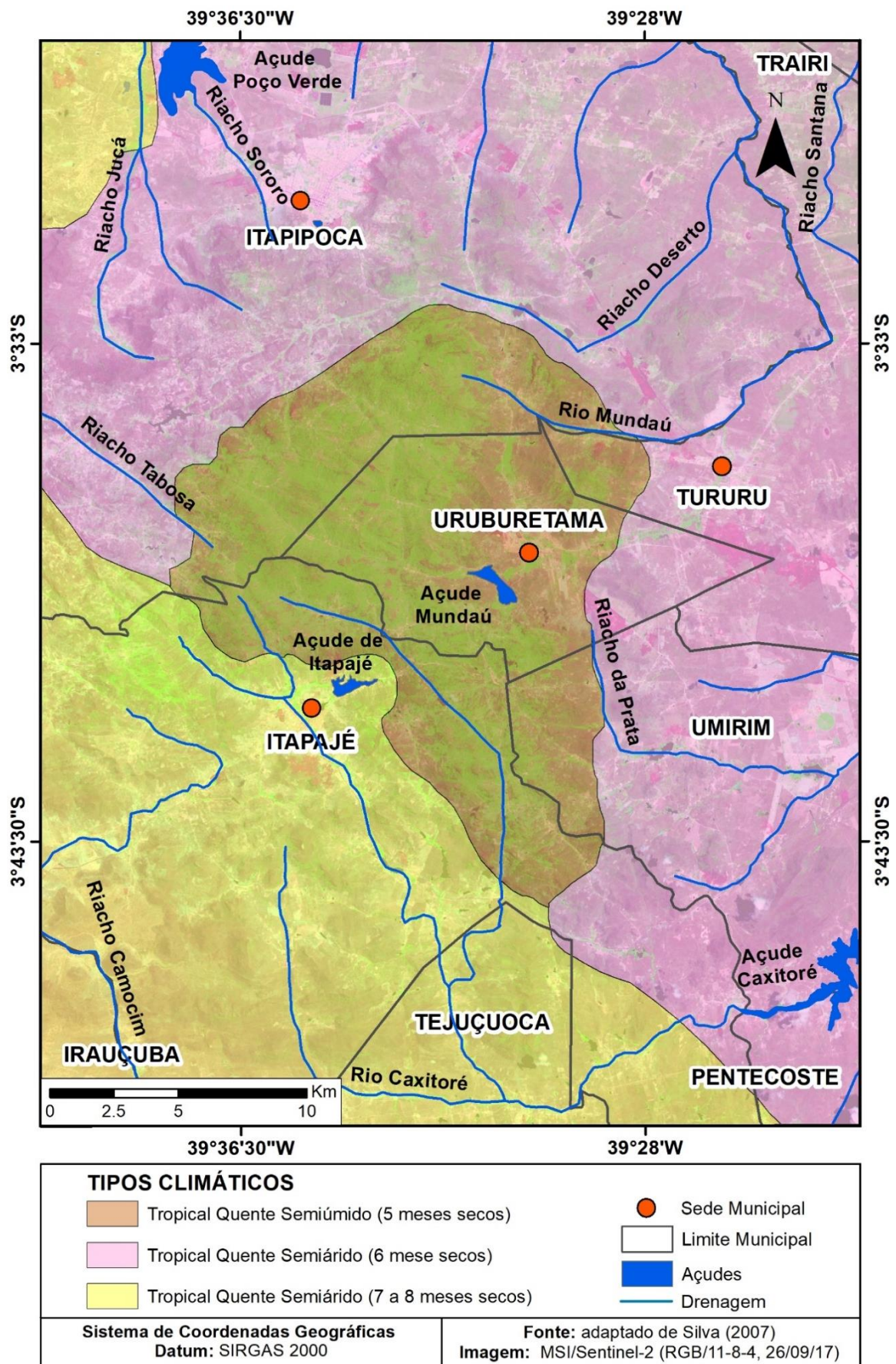
Os subtipos climáticos e suas distribuições espaciais, encontram-se respectivamente na Tabela 4 e na Figura 8.

Tabela 4 – Subdomínios do Clima Tropical de Zona Equatorial

<b>Autores</b>	<b>IBGE (2002); Silva (2007)</b>	<b>Meses secos</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Subtipos climáticos</b>	<b>Variedades climáticas</b>		
Semiúmido (subúmido)	Tropical Quente Semiúmido	4 a 5	9.35
Semiárido	Tropical Quente Semiárido	6	39.69
	Tropical Quente Semiárido	7 a 8	50.96
	Tropical Quente Semiárido	9 a 10	---
Total			100

Fonte: adaptado de Silva (2007).

Figura 8 – Mapa de Tipos Climáticos da área de estudo.



Fonte: adaptado de Silva (2007).

“Sob o aspecto hidrológico, o Maciço de Uruburetama compõe o mais importante centro dispersor de drenagem da área centro-norte do Ceará. Três sistemas fluviais de caráter exorréico têm origem na área serrana: os sistemas dos rios Curu, Aracatiaçu e Mundaú” (SOUZA; OLIVEIRA, 2006).

Conforme Silva (2007) a serra de Uruburetama é um importante dispersor de drenagem de rios, como o Mundaú, e possui afluentes diretos (1ª e 2ª ordem) dos rios Caxitoré, Aracatiaçu, Missi, entre outros. A configuração da drenagem está disposta em duas bacias hidrográficas, ambas exorreicas: a do Curu e a do Litoral.

Os rios apresentam regimes sazonais e têm dependência direta da distribuição pluviométrica. Exceção aos rios cujas nascentes encontram-se na vertente úmida do maciço, que dispõe de maiores médias pluviométricas e, conseqüentemente, apresentam o regime perene, com redução do volume de água nos períodos de estiagem. Assim, a vertente úmida apresenta uma rede fluvial densa, com vales profundos e baixo potencial de águas subterrâneas, ao não ser nas áreas fortemente fraturadas.

De acordo com Silva (2007), os rios e riachos da bacia hidrográfica do Curu, dispostos na região serrana (parte norte do Município de Itapajé) são classificados em subsequentes.

Conforme Suguio e Bigarela (1979), estes rios apresentam sentido de fluxo controlado pela estrutura rochosa, sempre acompanhando zonas de fraqueza, tais como falhas, diaclasamento, rochas menos resistentes, etc. Enquanto na área da superfície pediplanada desta bacia, os rios são classificados como insequentes, ou seja, segundo Suguio e Bigarela (*op. cit.*), são rios que não apresentam controle estrutural visível na disposição espacial da drenagem e que tendem a se desenvolver sobre rochas homogêneas representadas por sedimentos horizontais e por rochas ígneas.

De acordo com Silva (*op. cit.*) a bacia hidrográfica do rio Curu apresenta um padrão de drenagem que poder ser classificado em dois tipos: subparalelo, que ocorre dentro da área serrana, e dentrítico, observado na área pediplanada.

Conforme Silva (*op. cit.*), os rios da bacia hidrográfica do Litoral podem ser classificados em consequentes, quando a drenagem ocorre na região serrana e os rios correm praticamente retilíneos em direção à baixada; e insequente, na superfície pediplanada. Quanto ao padrão de drenagem, a área serrana apresenta a forma dentrítico-retangular, enquanto a área pediplanada a drenagem é do tipo dentrítico.

Dentro das vertentes da serra de Uruburetama existem cerca de 50 nascentes que contribuem para alta densidade da drenagem. E esta, por sua vez, reflete a impermeabilidade

do substrato rochoso, favorecendo a construção de barragens e açudes ao longo dos rios (SILVA, 2007)

Os principais açudes da região serrana são o Mundaú e o de Itapajé, também conhecido como Ipuzinho. Conforme o Departamento Nacional de Obras Contra a Seca/DNOCS (2018), o Açude Mundaú, cuja tomada de água se dá no rio de mesmo nome, no município de Uruburetama, tem capacidade para 21.308.000 m<sup>3</sup> de água. De acordo com a Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (2018) o Açude Ipu tem sua barragem construída no leito do riacho Escorado, no município de Itapajé, e apresenta capacidade para 4.850.000 m<sup>3</sup>.

Na depressão sertaneja o principal açude é o Caxitoré, localizado no município de Pentecoste. Segundo o DNOCS (2018), a barragem erguida no rio Caxitoré, afluente do rio Curu, forma um lago com uma superfície de cerca 4.574 ha e um volume de acumulação de 202.000.000 m<sup>3</sup>.

Na Bacia do Litoral se destaca o açude Poço Verde, no município de Itapipoca. De acordo com a SRH/CE (2018), o Poço Verde tem capacidade para 13.650.000 m<sup>3</sup> e uma extensão de 410 ha.

De acordo com Souza e Oliveira (2006) as águas subterrâneas, de modo genérico, apresentam baixas condições potenciais e de utilização. Tal fato decorre da preponderância de rochas do embasamento cristalino, que em função de sua impermeabilidade, não favorece a formação de bons aquíferos. Em áreas mais fortemente fraturadas há melhoria de disponibilidade hidrogeológica.

Segundo Souza e Oliveira (*op.cit.*), a rede de fraturas é normalmente preenchida por sedimentos que são carreados pelas ações das chuvas e enxurradas. Consequentemente, as fraturas ficam seladas e, as águas que nelas circulam não atingem as eventuais reservas de águas subterrâneas, exceto em quantidade insignificante.

“Nos setores de planícies alveolares e das pequenas depressões com coberturas colúvio-aluvionares há maior disponibilidade das águas subterrâneas em função da maior porosidade e permeabilidade dos terrenos” (SOUZA; OLIVEIRA, 2006).

### 2.3.2.3 Solos e cobertura vegetal

De acordo com Palmieri e Larach (2004) o solo é constituído por corpos naturais tridimensionais, que resultam da ação integrada do clima e organismos sobre o material de

origem, condicionado pelo relevo em diferentes períodos de tempo, o qual apresenta características associadas aos processos e mecanismos dominantes na sua formação.

Na área de estudo, conforme o IBGE (2017), são identificados os seguintes tipos de solos: Argissolo Vermelho – Amarelo Eutrófico, Neossolo Litólico Eutrófico, Neossolo Quartzarênico Órtico, Neossolos Regolítico Distrófico, Planossolo Háptico Eutrófico e Luvissoilo Crômico Órtico. A abrangência em percentual e a distribuição espacial de cada classe de solo pode ser observada na Tabela 5 e na Figura 9, respectivamente.

Tabela 5 – Abrangência das classes de solos em percentual

<b>Classes de Litologia</b>	<b>Áreas (%)</b>
Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	63.98
Neossolo Litólico Eutrófico	23.26
Luvissoilo Crômico Órtico	6.44
Planossolo Háptico Eutrófico	3.66
Neossolo Quartzarênico Órtico	2.26
Neossolo Regolítico Distrófico	0.39
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fonte: IBGE, (2018).

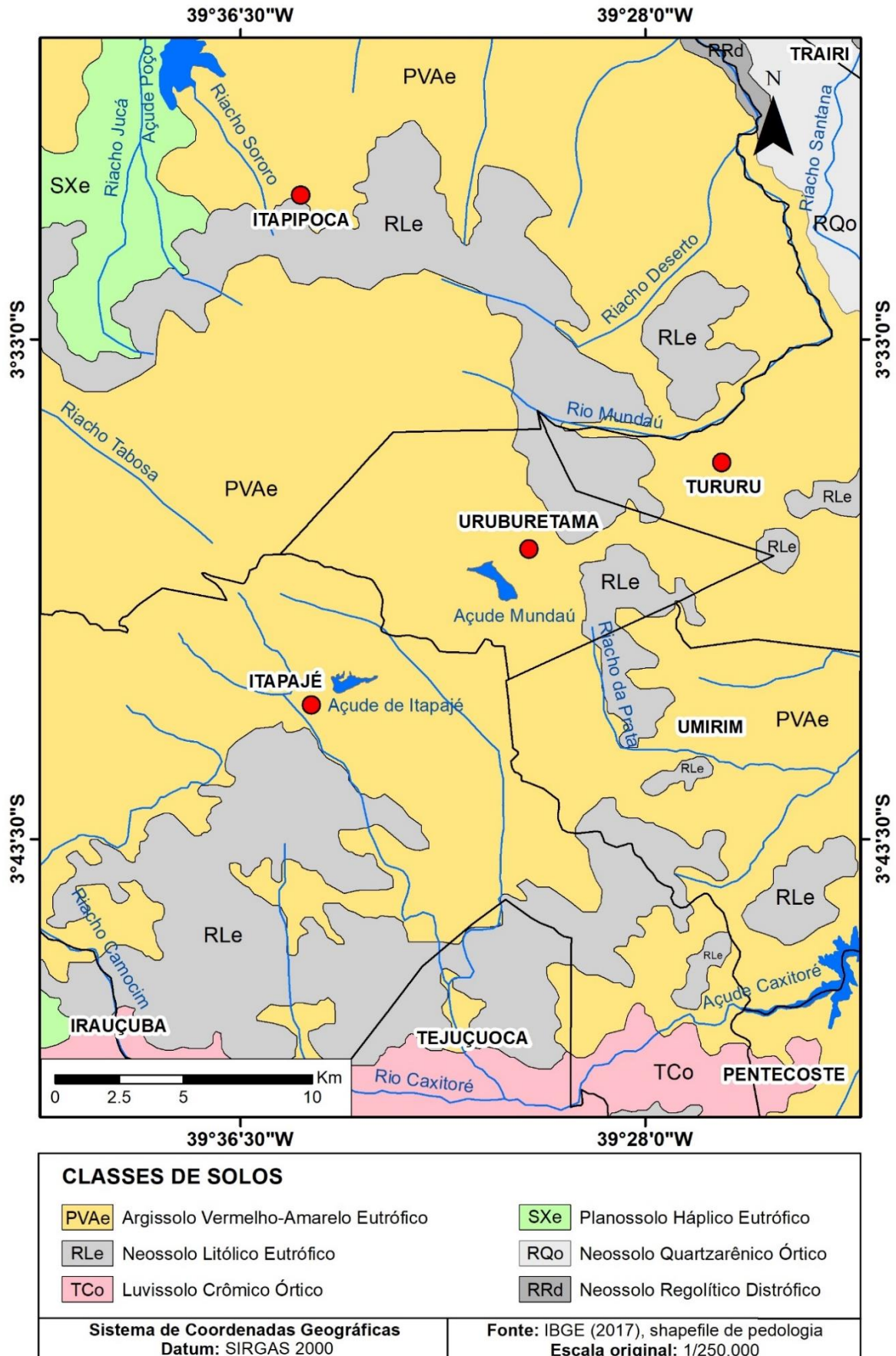
O **Argissolo Vermelho – Amarelo Eutrófico** é o solo de maior abrangência na área. Os argissolos são constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico. O horizonte B textural (Bt) encontra-se imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, exceto o hístico, sem apresentar, contudo, os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes dos Luvissoilos, Planossolos, Plintossolos ou Gleissolos (EMBRAPA, 2009).

“As cores do horizonte Bt variam de acinzentadas a avermelhadas e as do horizonte A, são sempre mais escurecidas. A profundidade dos solos é variável, mas em geral são pouco profundos e profundos” (IBGE, 2007).

Os Argissolos Vermelho – Amarelo Eutróficos apresentam saturação por bases  $\geq$  50% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, inclusive BA (EMBRAPA,2009).



Figura 9 – Mapa de distribuição de solos da área de estudo



Fonte: IBGE (2017).

Os **Neossolos** representam a segunda maior abrangência na área. Estes solos são constituídos por material mineral, ou por material orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações significativas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, seja em razão de características inerentes ao próprio material de origem, como maior resistência ao intemperismo ou composição química, ou dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), que podem impedir ou limitar a evolução dos solos. (EMBRAPA, 2009). Os neossolos são representados pelas seguintes variações na área de estudo: Neossolos Litólicos Eutróficos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Regolíticos.

O **Neossolo Litólico Eutrófico** pode ser encontrado, sobretudo, nos inselbergs no entorno do maciço. São Solos com horizonte A ou hístico, assentes diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr ou sobre material com 90% (por volume), ou mais de sua massa constituída por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2mm (cascalhos, calhaus e matacões) e que apresentam um contato lítico típico ou fragmentário dentro de 50cm da superfície do solo. Admite um horizonte B em início de formação, cuja espessura não satisfaz a qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Esse tipo de solo apresenta saturação por bases alta, com  $V \geq 50\%$  (EMBRAPA, 2009).

O **Neossolo Quartzarênico Órtico**, é observado na porção nordeste da área de pesquisa sobre o Tabuleiro Pré-litorâneo. O Neossolo Quartzarênico é um solo sem contato lítico dentro de 50cm de profundidade, com sequência de horizontes A-C, porém apresentando textura areia ou areia franca em todos os horizontes até, no mínimo, a profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo ou até contato lítico; são essencialmente quartzosos, tendo nas frações areia grossa e areia fina 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala e, praticamente, ausência de minerais primários alteráveis (EMBRAPA, 2009).

Conforme Souza *et al*, (2009) os Neossolos Quartzarênicos têm textura arenosa, são na maioria das vezes profundos, pouco desenvolvidos, excessivamente drenados e seu uso agrícola é limitado devido a sua baixa fertilidade natural.

O **Neossolo Regolítico Distrófico** ocorre na porção nordeste da área de estudo, a noroeste do Neossolo Quartzarênico. É um Solo com contato lítico a uma profundidade maior que 50 cm e horizonte A sobrejacente a horizonte C ou Cr, admitindo horizonte Bi com menos de 10 cm de espessura. Deve apresentar pelo menos um dos seguintes requisitos: 4% ou mais de minerais primários alteráveis (menos resistentes ao intemperismo) na fração areia total e/ou no cascalho, porém referidos a 100g de TFSA em algum horizonte dentro de 150 cm da superfície do solo; e/ou 5% ou mais do volume da massa do horizonte C ou Cr, dentro de 150cm de profundidade, apresentando fragmentos de rocha semi-intemperizada, saprolito ou



fragmentos formados por restos da estrutura orientada da rocha (pseudomorfos) que deu origem ao solo. Estes solos apresentam saturação por bases baixas, com  $V < 50\%$  (EMBRAPA, 2009).

**O Planossolo Háptico Eutrófico** ocorre na região noroeste da área de pesquisa. O planossolo corresponde a solos minerais com horizonte B plânico, subjacente a qualquer tipo de horizonte A, podendo ou não apresentar horizonte E, alábico ou não (EMBRAPA, 2009).

Os planossolos são representados por solos minerais imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B imediatamente subjacente, adensado, geralmente de acentuada concentração de argila, permeabilidade lenta ou muito lenta, constituindo, por vezes, um horizonte pã, responsável pela formação de lençol d'água sobreposto (suspensão), de existência periódica e presença variável durante o ano (EMBRAPA, 2009).

“Além da textura, outras características como estrutura, porosidade, permeabilidade e muitas vezes cores, são também bastante contrastantes entre o A e/ou E e o B” (IBGE, 2007). Os Planossolos Hápticos Eutróficos apresentam alta saturação por bases na maior parte do horizonte B (EMBRAPA, 2009).

**O Luvisolo Crômico Órtico** é encontrado ao sul da área de pesquisa ao longo do Rio Caxitoré. Os Luvisolos são solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural com argila de atividade alta e saturação por bases alta, imediatamente abaixo de horizonte A ou horizonte E (EMBRAPA, 2009).

Estes solos variam de bem a imperfeitamente drenados, sendo normalmente pouco profundos, com espessura do solum ( $A + B$ , exceto BC)  $\leq 80$  cm., com sequência de horizontes A, Bt e C, e nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt, devido ao contraste de textura, cor e/ou estrutura entre eles. A transição para o horizonte B textural é clara ou abrupta, e grande parte dos solos desta classe apresenta mudança textural abrupta. Podem ou não apresentar pedregosidade na parte superficial e o caráter solódico ou sódico, na parte subsuperficial (EMBRAPA, 2009).

Apresentam cores desde vermelhas a acinzentadas, horizonte B textural ou nítico abaixo de horizonte A fraco, moderado ou horizonte E, argila de atividade alta e alta saturação por bases. A mineralogia das argilas condiciona certo fendilhamento em alguns perfis nos períodos secos (IBGE, 2007). Os luvisolos crômicos tem caráter crômico na maior parte do horizonte B, inclusive BA (EMBRAPA, 2009).

As formações vegetais do Estado têm uma distribuição que obedece a uma zonalidade. As influências físicas sobre a vegetação se manifestam em função de fenômenos associados com a proximidade do mar, com a direção e o deslocamento dos ventos que dirigem

as condições de pluviosidade da costa para as depressões sertanejas. E também, a própria conformação e/ou disposição do continente em relação aos deslocamentos dos ventos tendem a interferir, assim como as diferenças altimétricas. Nos Maciços pré-litorâneos, o relevo é condicionador de diminuições térmicas ou participa como efeito barreira. As diferenças litológicas e edáficas condicionam também as características dos meios fitogeográficos. No entanto, as atividades antrópicas agem no sentido de degradar a cobertura vegetal primária e os solos. Desta forma, modificam-se as condições dos meios fitoecológicos, afetando toda a ecodinâmica das paisagens (SOUZA, 2000).

A distribuição espacial das formações vegetais descritas e o uso do solo podem ser visualizados no mapa de cobertura e uso da terra, adaptado de Freires *et al.* (2019), na Figura 10. Os percentuais das classes encontram-se na Tabela 6.

Conforme o mapa fitoecológico do IPECE (2007), ocorrem as seguintes formações vegetais na área de pesquisa: Complexo vegetacional da zona litorânea (Tabuleiro), Caatinga arbustiva densa, Caatinga arbustiva aberta; Floresta subperenifólia tropical plúvionebular (matas úmidas, serranas) e Floresta subcaducifólia tropical pluvial (mata seca).

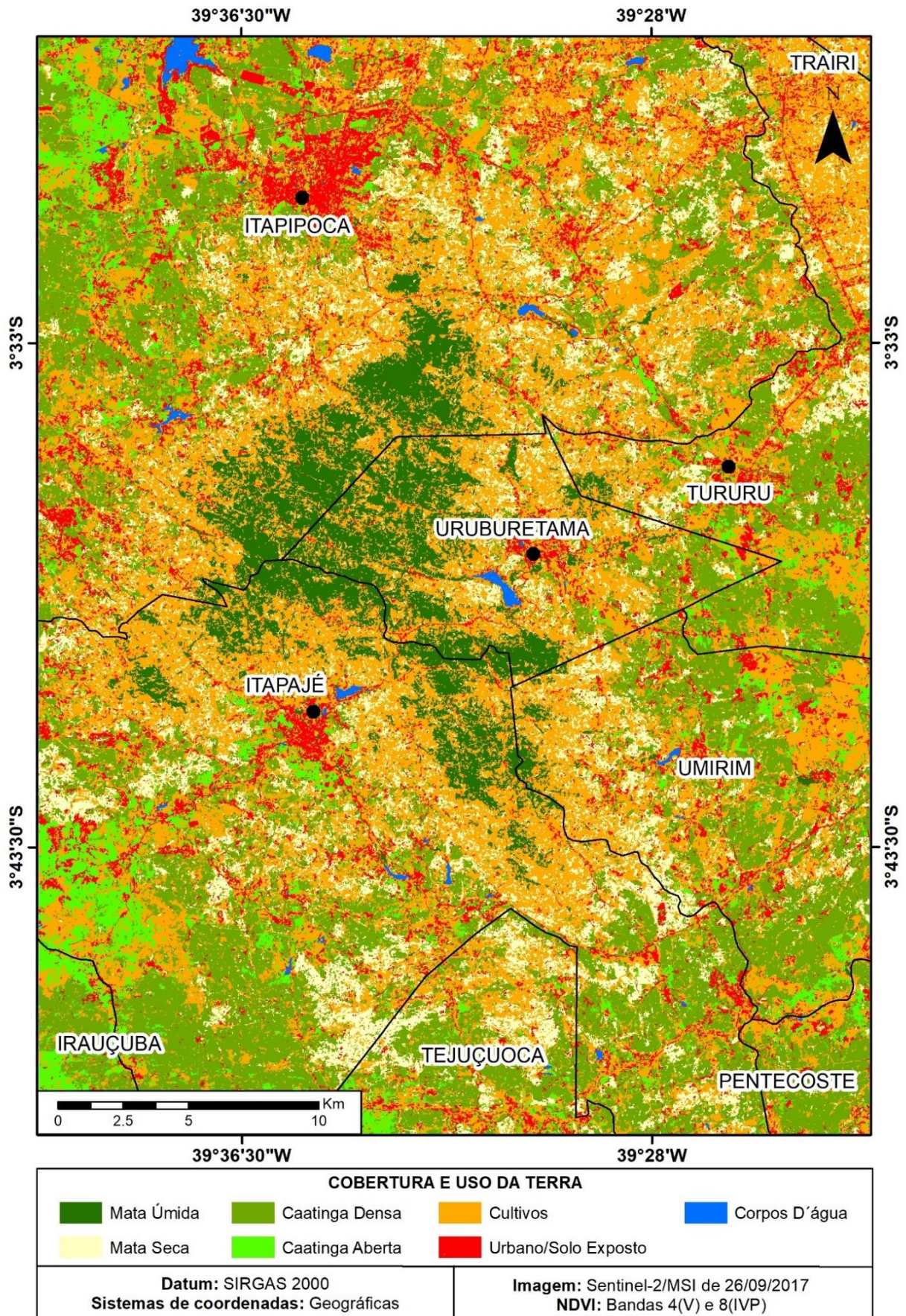
A **vegetação de tabuleiro** encontra-se bastante descaracterizada em relação às condições originais. É típica dos Glacis Pré-litorâneos da Formação Barreiras, deficientemente dissecados pela drenagem que demanda a costa (SOUZA 2000). Essa formação pode ser encontrada na porção nordeste da área de pesquisa sobre os tabuleiros pré-litorâneos, porém bastante alterada devido às práticas agrícolas.

De acordo com Fernandes (1990 *apud* Souza, 2000), o conjunto vegetacional dos tabuleiros não se apresenta homogêneo, sobretudo quando é analisado por meio do quadro fisionômico. Considerando as plantas lenhosas, podem ser destacadas duas feições distintas: vegetação subperenifólia e vegetação caducifólia.

A vegetação subperenifólia tem, comumente, porte arbustivo e arbóreo/arbustivo e situa-se principalmente nas áreas próximas ao litoral recoberto por Argissolos Vermelho-amarelos e Neossolos quartzarênicos. À medida que os sedimentos da Formação Barreiras assumem menor espessura no contato com os solos das depressões sertanejas, passa a haver o predomínio de espécies caducifólias com as condições fisionômicas e florísticas que mais se aproximam das caatingas sertanejas (SOUZA, 2000).



Figura 10 – Mapa de cobertura e uso da terra



Fonte: Adaptado de Freires *et al.* (2019).

Tabela 6 – Distribuição das classes de cobertura e uso da terra em percentual

Classes de Cobertura e Uso da Terra	Áreas (%)
Mata Úmida	6,94%
Mata Seca	12,37%
Caatinga Densa	26,19%
Caatinga Aberta	5,67%
Urbano/solo exposto	9,4%
Corpos D'água	0,42%
Cultivos	38,9%
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

De acordo com Rizzini (1997), **Caatinga** é o termo genérico que designa um complexo de vegetação decídua e xerófila formado por vegetais lenhosos e mais ou menos rico em cactáceas e bromeliáceas rígidas. Ora dominam os primeiros, ora as segundas, exibindo misturas em proporção muito variada, conforme a natureza do substrato e a secura do clima.

Conforme Souza (2000), as caatingas apresentam variados padrões fisionômicos e florísticos e tendem a prevalecer onde as condições dos sertões se estabelecem. Essa formação vegetal ocorre a partir do contato geológico entre os sedimentos da Formação Barreiras e as rochas do embasamento cristalino. Estendendo-se para o interior onde as deficiências hídricas se agudizam.

Segundo Fernandes (2003), a caatinga caracteriza-se por formações florísticas afilas, em regra, desenvolvidas sobre um patamar cristalino, configurando-se em duas fisionomias: uma arbórea (caatinga alta), outra arbustiva (caatinga baixa).

A caatinga apresenta um padrão fisionômico arbóreo apenas onde as condições semiáridas são mais moderadas e onde os solos têm melhores condições de fertilidade natural (SOUZA, 2000). De acordo com Fernandes (2006), a caatinga arbórea apresenta-se em três estratos: um arbóreo, com representantes de 8-12 m de altura, outro arbustivo/sub-arbustivo com indivíduos de 2-5 m e um herbáceo que apresenta um caráter anual ou efêmero, sendo pobre em espécies.

À medida que as condições ambientais se tornam mais limitativas, as caatingas assumem um padrão fisionômico de **caatinga arbustiva densa** ou **caatinga arbustiva aberta**.



A caatinga arbustiva densa ao ser degradada, passa a ter o aspecto de caatinga arbustiva aberta (SOUZA, 2000).

De acordo com Fernandes (2006), a caatinga arbustiva compõe-se de um estrato com indivíduos de 3-5 m de altura, com raros exemplares arbóreos; e outro de porte mais reduzido de natureza herbáceo, com componentes naturais de curta duração ou efêmeros.

A caatinga arbustiva densa desenvolve-se sobre solos arenosos com pouca profundidade, enquanto a caatinga arbustiva aberta recobre solos rasos e duros, comumente encharcados durante o período chuvoso (FERNANDES, 2006).

Essas formações ocorrem nas áreas pediplanada da depressão sertaneja, no entorno do Maciço de Uruburetama. A caatinga arbustiva densa pode ser observada, predominantemente, no setor Norte/Leste, enquanto a caatinga arbustiva aberta é encontrada sobretudo no setor Sul/Oeste do maciço.

A **floresta subperenifólia tropical plúvionebular** (mata úmida) ocorre na vertente de barlavento e platôs da Serra de Uruburetama. Conforme Souza (2000), essa unidade fitoecológica comumente se desenvolve a partir da cota de 600m e possui caráter preponderantemente perenifólio. As espécies de porte arbóreo podem atingir até 20 metros. A ocorrência de estrato arbustivo de menor porte não chega a ser genérico. Nesse conjunto vegetacional, pode ser observado uma grande abundância de líquens, epífitas e lianas.

Na serra pode ser encontrada ainda a **Floresta subcaducifólia tropical pluvial** (mata seca). Essa formação está localizada a retaguarda da mata úmida, em cotas altimétricas inferiores que apresentam menor disponibilidade hídrica. É uma vegetação cuja fisionomia é alterada conforme a distribuição pluviométrica sazonal, podendo ser encontrada também em relevos cristalinos de menor porte, como os *inselbergs*.

Tanto a mata úmida como a mata seca se encontram em elevado estágio de degradação, sobretudo, devido as práticas agrícolas, desprovidas de técnicas adequadas de cultivo; e ao fato de introduzirem culturas incompatíveis as características edafoclimáticas do local, como é caso da bananeira.

### **2.3.3 Aspectos socioambientais**

Conforme estimativa do IBGE (2018), os municípios que compõem a área de estudo apresentam uma população de 373.788 habitantes (Tabela 7). O Município de Itapipoca, que ocupa maior extensão da área de estudo, é o único com população superior a 100 mil habitantes.

O Município de Uruburetama, por sua vez, com uma população modesta de 21.725 habitantes, apresenta-se totalmente inserido na área de pesquisa.

Tabela 7 – População estimada dos municípios que compõem a área de estudo

<b>Municípios</b>	<b>População no último Censo (2010)</b>	<b>População estimada para 2018</b>
<b>Irauçuba</b>	22.324	24.003
<b>Itapajé</b>	48.350	52.240
<b>Itapipoca</b>	116.065	128.135
<b>Pentecoste</b>	35.400	37.326
<b>Tejuçuoca</b>	16.827	18.998
<b>Trairi</b>	51.422	55.535
<b>Tururu</b>	14.408	16.015
<b>Umirim</b>	18.802	19.811
<b>Uruburetama</b>	19.765	21.725
<b>Total</b>	343.363	373.788

Fonte: IBGE (2018).

Essa População se distribui de forma equilibrada entre a área urbana e a área rural. Conforme pode ser observado na Tabela 4, 192.823 habitantes residem no perímetro urbano, enquanto 150.540 se distribuem no meio rural. Contudo, apenas três municípios apresentam população predominantemente rural, que são: Tejuçuoca, Trairi e Tururu.

Os municípios com os maiores percentuais de população urbana são: Itapipoca (57,6%), Umirim (59,35%), Pentecoste (60,4%), Irauçuba (64,2%), Itapajé (70,3%) e Uruburetama (74,30%). Com exceção de Irauçuba e Pentecoste, os demais municípios estão inseridos parcialmente na vertente úmida do Maciço de Uruburetama. Fato que remete a pressão exercida por essa população sobre os recursos locais, a partir das diversas intervenções realizadas. A expansão urbana desordenada que vem ocorrendo nessa área tem promovido alterações significativas na paisagem ao longo do tempo.

Ao observar a Tabela 8, verifica-se que as maiores densidades demográficas ocorrem justamente nos municípios que englobam a vertente úmida do Maciço de Uruburetama: Umirim (59,35), Tururu (71,23), Itapipoca (71,90), Itapajé (110,01) e Uruburetama (203,61). A maior oferta de água e a ocorrência de solos mais desenvolvidos favoreceu a ocupação dessa área.

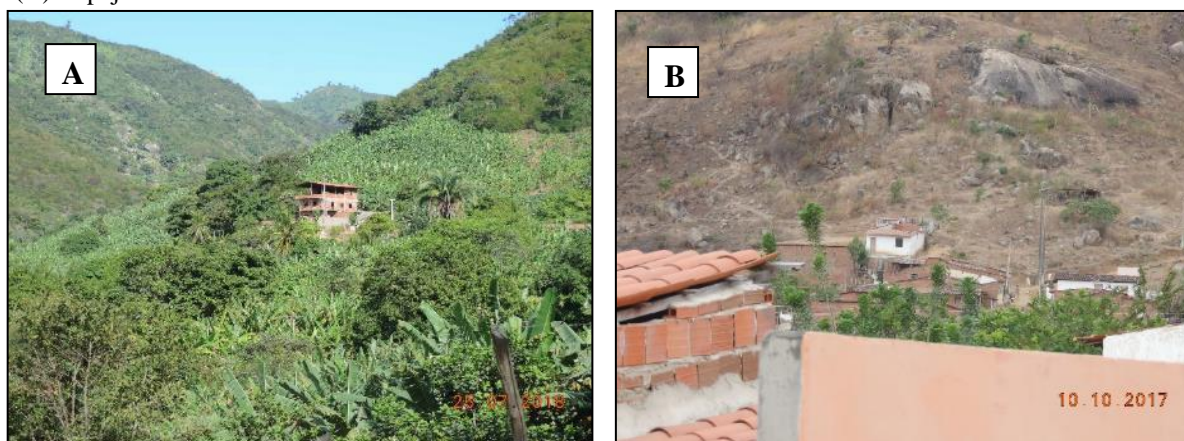
Tabela 8 - População urbana e rural dos municípios que compõem a área de estudo

Municípios	População Urbana	(%)	População Rural	(%)	hab./Km <sup>2</sup>
Irauçuba	14.343	64,2	7.981	35,8	15,28
Itapajé	33.990	70,3	14.360	29,7	110,01
Itapipoca	66.909	57,6	49.156	42,4	71,90
Pentecoste	21.394	60,4	14.006	39,6	25,68
Tejuçuoca	6.335	37,7	10.492	62,3	22,42
Tairi	18.784	36,5	32.638	63,5	55,55
Tururu	5.288	36,7	9.120	63,3	71,23
Umirim	11.091	59,0	7.711	41,0	59,35
Uruburetama	14.689	74,3	5.076	25,7	203,61
<b>Total</b>	192.823	---	150.540	---	---

Fonte: IBGE (2018).

O crescimento urbano ocorrido ao longo dos anos nesses municípios se deu sem planejamento e não há o devido monitoramento da expansão da malha urbana no maciço. É possível observar ocupações em áreas de preservação permanentes, com mais 45° de declividade, e habitações erguidas em setores com risco geológicos, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Casas construídas em áreas de preservação permanente e sob risco geológico. (A) Uruburetama; (B) Itapajé



Fotos: Eduardo Freires (A - 25/07/2018, B - 10/10/2017).

Uma prática comum no maciço são os cortes em taludes para construção de habitações ou para ampliação de áreas edificáveis, conforme pode ser constatado na Figura 12.

É possível observar ainda que muitas vezes as encostas são cortadas para exploração do arisco, recurso destinado a construção civil, como verificado na Figura 13.

Figura 12 – Recorte de talude para edificação na localidade de Santa Maria - Uruburetama



Foto: Daniel Dantas (obtida por ARP, 20/05/2017).

Figura 13 – Exploração de arisco no município de Itapipoca

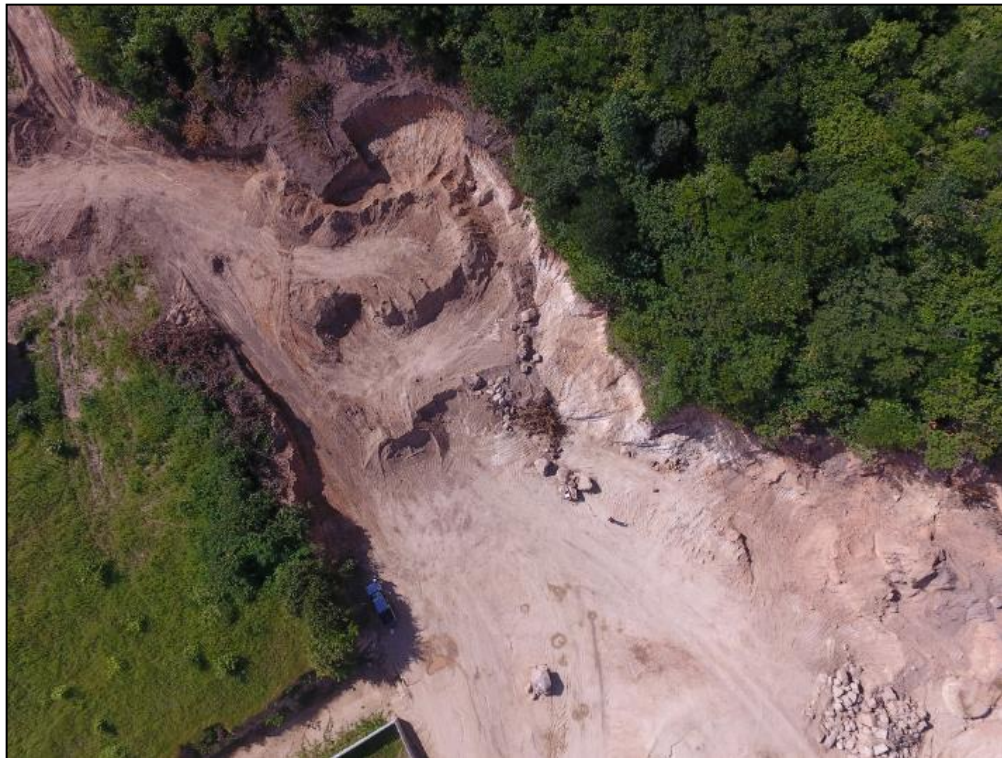


Foto: Daniel Dantas (obtida por ARP, 21/05/2017).

A necessidade de interligar as diversas localidades entre si, e aos centros urbanos, induziu a abertura de estradas, que em sua grande maioria foram edificadas sem os devidos cuidados de engenharia para estabilizar os taludes. Como consequência é comum observar movimentos de massa ao longo dessas estradas (A), potencializados pelas atividades agrícolas que são praticadas de forma inadequada, como pode ser observado na Figura 14. Esse fato demonstra que o próprio poder público contribui decisivamente para agravar o quadro de degradação do maciço. As estradas feitas para integrar, muitas vezes, acabam por isolar as



comunidades, que ficam sem acesso de transporte até que o material movimentado seja retirado do caminho. O que pode demorar semanas, dependendo do volume e material movimentado, dos recursos disponíveis e da acessibilidade das máquinas.

Figura 14 – Movimentos de massa – (A) Queda de bloco em estrada em São Jerônimo/Itapipoca; (B) Escorregamento rotacional em talude de estrada e área cultivada na localidade de Itacolomy, em Uruburetama



Foto: Eduardo Freires e Cláudio Ângelo (A - 21/02/2018, B - 25/07/2018).

O corte de estradas, feito por retroescavadeiras, intensificam os processos erosivos e consequentemente favorecem os movimentos de massa, uma vez que durante o corte são produzidos sulcos verticais na superfície dos taludes que canalizam o fluxo d'água durante as chuvas, tornando-o concentrado, o que acarreta na formação de ravinas, como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Cortes de taludes na CE 243, que liga Itapajé a Uruburetama

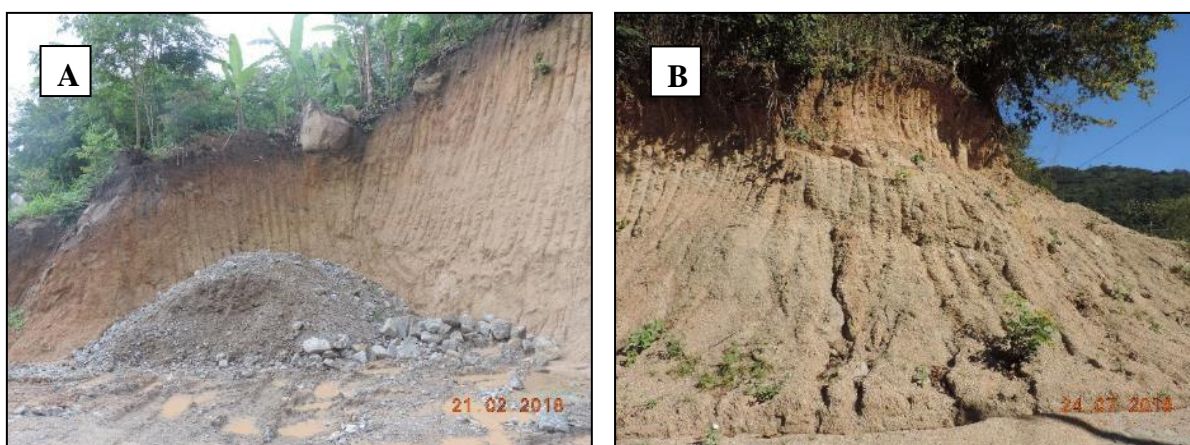


Foto: Eduardo Freires (A – 21/02/2018, B – 24/07/2018).

Todos os municípios da área de estudo que estão na abrangência do Maciço de Uruburetama dispõem de órgão gestor de meio ambiente, como pode ser verificado no Quadro 1. Todavia, observa-se que a maioria dos municípios não adotou medidas legais ou técnicas

para evitar desastres decorrentes de escorregamentos ou deslizamentos. Apenas Irauçuba e Itapipoca dispõem de Lei de Uso e Ocupação e Plano Diretor, respectivamente, que contemple a prevenção de escorregamento ou deslizamentos de encostas. Todos os municípios não dispõem de carta geotécnica de aptidão a urbanização ou cadastro de risco. Apenas o município de Uruburetama alega possuir mecanismos de controle e fiscalização para evitar ocupação em áreas susceptíveis a desastres, embora as atividades de campo demonstrem o contrário.

Quadro 1 – Gerenciamento de riscos de desastres nos municípios do Maciço de Uruburetama

Município	Gerenciamento de Riscos de desastres decorrentes de escorregamento ou deslizamento					
	Órgão Gestor de Meio ambiente	Lei de Uso e Ocupação	Plano Diretor	Carta geotécnica de aptidão a urbanização	Cadastro de risco	Mecanismos de controle e fiscalização para evitar ocupação em áreas susceptíveis a desastres
Irauçuba	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Itapajé	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Itapipoca	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Tejuçuoca	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Tururu	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Umirim	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Uruburetama	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM

Fonte: IBGE (2018).

Chama atenção o fato de no último levantamento de registro de escorregamento ou deslizamento, num período de 4 anos (2013 a 2017), o único município a apresentar ocorrência foi Itapajé, como verificado no Quadro 2.

Quadro 2 – Registros de ocorrências de escorregamentos nos municípios da área de estudo

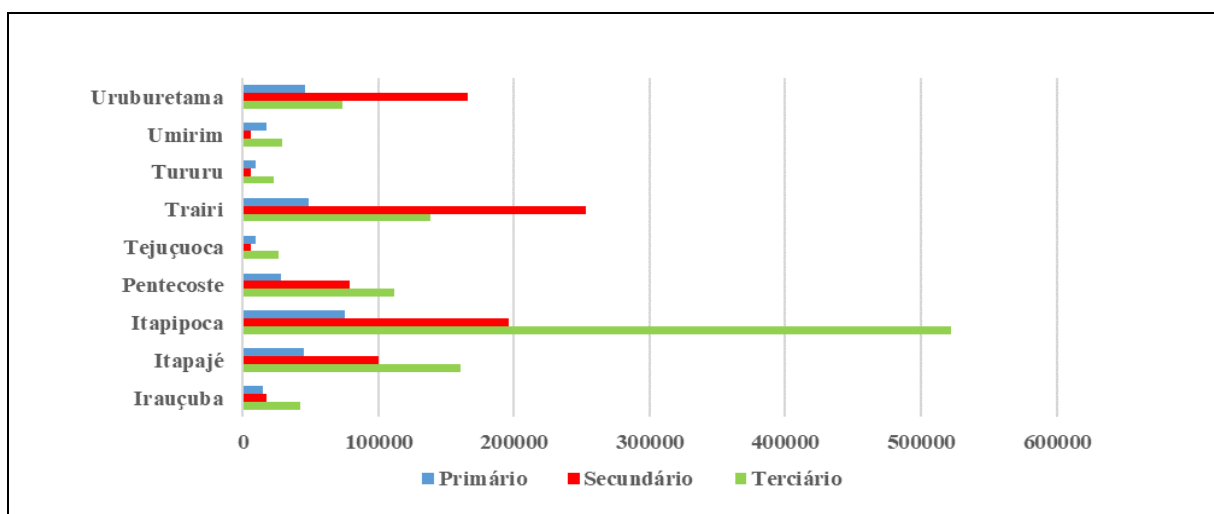
Município	Escorregamento ou deslizamento de encosta entre 2013 e 2017						
	Ocorrência	Taludes e encostas sujeitas a deslizamentos	Áreas urbanas com processos erosivos crônicos	Sem infraestrutura de drenagem	Com ocupações regulares	Com ocupações irregulares	Sem ocupação
Irauçuba	NÃO	---	---	---	---	---	---
Itapajé	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
Itapipoca	NÃO	---	---	---	---	---	---
Pentecoste	NÃO	---	---	---	---	---	---
Tejuçuoca	NÃO	---	---	---	---	---	---
Trairi	NÃO	---	---	---	---	---	---
Tururu	NÃO	---	---	---	---	---	---
Umirim	NÃO	---	---	---	---	---	---
Uruburetama	NÃO	---	---	---	---	---	---

Fonte: IBGE (2018).

Constata-se, a partir do exposto, que embora todos os municípios possuam órgãos ambientais gestores, estes não dispõem de recursos financeiros, humanos e técnicos que possam garantir o planejamento e a fiscalização do uso e ocupação do espaço. A maioria desses órgãos de meio ambiente atuam integrados a outros setores da administração, como agropecuária, recursos hídricos, turismo e cultura. Muitas vezes as suas atuações esbarram em interesses conflitantes, tornando mais difíceis as tomadas de decisões. É comum os interesses políticos e econômicos prevalecerem sobre as questões ambientais e sociais.

Assim como a expansão urbana, a atividade agrícola é um dos principais agentes responsáveis pela alteração da paisagem e conseqüentemente pela degradação dos solos no Maciço de Uruburetama. Embora essa atividade econômica, juntamente com a pecuária, seja a terceira em contribuição para o Produto Interno Bruto (PIB) da maioria dos municípios analisados (Gráfico 1), é a que exige maior disponibilidade de terras, sendo responsável pela supressão da vegetação nativa e de todos problemas derivados de práticas inadequadas.

Gráfico 1 – participação dos setores da atividade econômica no Produto Interno Bruto dos Municípios



Fonte: IBGE (2018).

Como pode ser observado na Tabela 9, de 2007 a 2017, a produção agrícola das principais culturas permanentes que são cultivadas na área de pesquisa apresentou declínio. Apesar da queda da produção agrícola, as áreas destinadas aos cultivos praticamente permaneceram as mesmas, apresentando uma pequena variação negativa, como verificado na Tabela 10.

Tabela 9 - Produção agrícola de culturas permanentes nos municípios que compõem a vertente úmida do Maciço de Uruburetama nos anos de 2007 e 2017

Município	Lavoura Permanente (produção em t)							
	Banana		Castanha de Caju		Mamão		Manga	
	2007	2017	2007	2017	2007	2017	2007	2017
Irauçuba	128	5	1	1	---	46	53	14
Itapajé	20.000	13.194	76	66	90	134	417	208
Itapipoca	21.433	17.062	15.342	4.131	1.564	---	553	653
Pentecoste	1.200	62	80	21	570	611	50	47
Tejuçuoca	18	10	7	8	---	113	15	4
Trairi	658	497	672	4.341	---	---	109	96
Tururu	239	83	134	693	---	---	71	200
Umirim	738	646	47	73	912	342	85	77
Uruburetama	26.435	29.568	45	147	132	268	860	866
<b>Total</b>	<b>69.670</b>	<b>61.127</b>	<b>16.404</b>	<b>9.481</b>	<b>3.268</b>	<b>1.514</b>	<b>2.213</b>	<b>2.165</b>

Fonte: IBGE (2018).

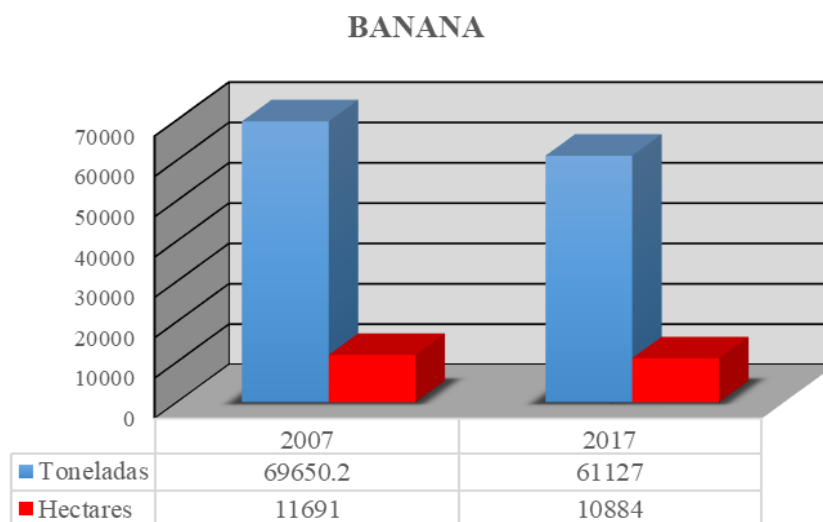
Tabela 10 - Área plantada de culturas permanentes nos municípios que compõem a vertente úmida do Maciço de Uruburetama nos anos de 2007 e 2017

Município	Lavoura Permanente (área destinada ao cultivo em ha)							
	Banana		Castanha de Caju		Mamão		Manga	
	2007	2017	2007	2017	2007	2017	2007	2017
Irauçuba	17	3	15	15	---	3	5	2
Itapajé	5.000	4.712	630	619	3	5	30	26
Itapipoca	3.244	2.752	15.542	15.935	17	--	110	114
Pentecoste	120	15	983	170	15	15	3	5
Tejuçuoca	2	5	67	30	---	3	1	1
Trairi	82	72	11.382	11.882	---	---	16	16
Tururu	34	15	3.108	3012	---	---	10	25
Umirim	82	110	380	376	25	10	9	8
Uruburetama	3.110	3.200	356	352	3	6	86	75
<b>Total</b>	<b>11.691</b>	<b>10.884</b>	<b>32.463</b>	<b>32.391</b>	<b>63</b>	<b>42</b>	<b>270</b>	<b>272</b>

Fonte: IBGE (2018).

Como pode ser observado no Gráfico 2, houve uma redução de 8.523 toneladas de Banana, enquanto a área destinada ao cultivo declinou de 11.691 para 10.884 hectares.

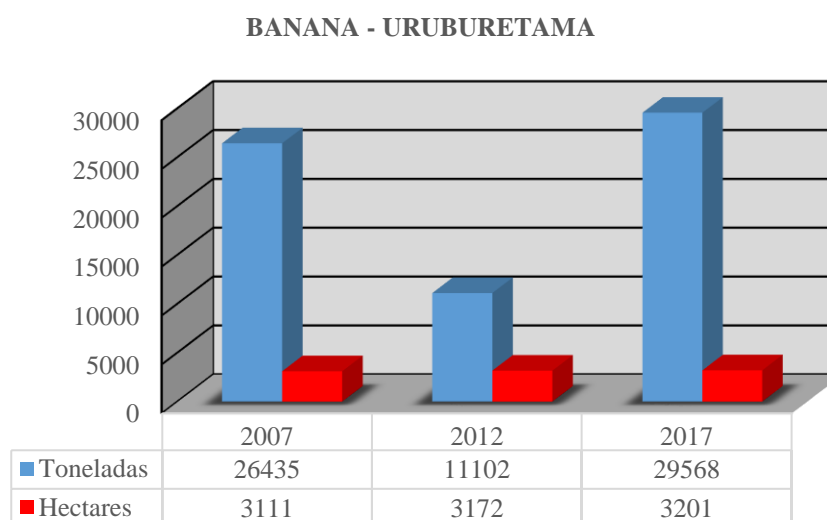
Gráfico 2 – Produção e áreas destinadas a bananicultura na área de estudo nos anos de 2007 e 2017



Fonte: IBGE (2018).

A ampliação da produção da banana foi verificada apenas no município de Uruburetama. Como pode ser observado no Gráfico 3, houve o crescimento da produção, que passou de 26.435 para 29.568 toneladas, ou seja, um incremento de 3.133 toneladas. Da mesma forma foi verificada a ampliação da área destinada ao cultivo dessa cultura, passando de 3.110 para 3.200 hectares, um aumento de 90 hectares.

Gráfico 3 – Evolução da colheita e das áreas destinadas a bananicultura em Uruburetama no período de 2007 a 2017



Fonte: IBGE (2018).



Os demais municípios, apesar de apresentarem quedas na colheita, mantiveram grandes extensões de terras destinadas a esse cultivo. Sem falar nas lavouras abandonadas que não foram contabilizadas.

A bananicultura é a principal atividade agrícola desenvolvida na vertente úmida do Maciço de Uruburetama. Os maiores índices pluviométricos e a maior oferta de água para irrigação favorecem o cultivo dessa cultura na área. Em determinados setores da Serra a vegetação nativa foi completamente suprimida para o seu plantio como pode ser observado na Figura 16.

Essa cultura é completamente inadequada para as características ambientais do maciço. Ao substituir a vegetação natural pela bananeira grandes extensões de solos são expostas aos agentes erosivos. Associa-se a isso o fato dessa planta apresentar raízes rasas que não garantem a estabilidade dos solos e quando cultivada em áreas íngremes, com grandes pluviometrias ou com um sistema de irrigação inadequado, tendem a desencadear movimentos de massa, que podem ser observadas com bastante frequência na vertente úmida do maciço, como verificado na Figura 17.

Figura 16 – Plantio de banana em encosta, Santa Maria/Uruburetama



Foto: Daniel Gomes (obtida por ARP, 20/05/2017).

Figura 17 – Escorregamento rotacional associado a bananicultura, localidade de Itacolomy/Uruburetama



Foto: Cláudio Ângelo (25/07/2018).

A falta de acompanhamento técnico e de fiscalização dessa atividade contribui para aumentar a ocorrência desses eventos. É comum ocorrer o plantio em encostas com declividade superior a  $45^\circ$  ou em topos de serras com alturas superiores a 100 metros e com inclinação média superior a  $25^\circ$ , desrespeitando as determinações da Lei Federal nº 12.651/2012 (Novo Código Florestal) que visa, entre outros objetivos, preservar as paisagens, a estabilidade geológica e proteger o solo.

Os sistemas de irrigação também comprometem os solos, seja pelo excesso de água utilizado ou pelo rompimento das tubulações. O encharcamento do solo provocado por grande volume de água reduz a estabilidade da encosta, ao aumentar a carga, e contribui para o desencadeamento de movimentos gravitacionais. É comum observar na área de pesquisa movimento de massa associado à irrigação, como pode ser observado na Figura 18.

Um artifício, também, utilizado por alguns produtores em áreas com maior umidade é cavar buracos no solo para permitir que a água ali armazenada possa fluir encosta abaixo e promover a irrigação dessa cultura. Ação que descaracteriza completamente o ambiente, tornando o solo lamacento, e contribui para intensificar o transporte sedimentar já que ocorre num processo contínuo.



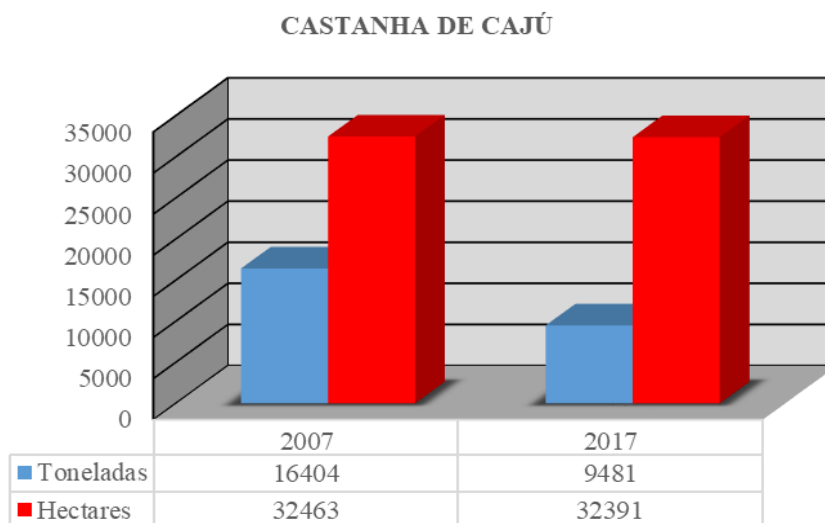
Figura 18 – Escorregamento rotacional (A) associado à irrigação (B), Itacoatiara – Itapipoca



Foto: Eduardo Freires (21/02/2018).

No caso da castanha de caju, como pode ser observado no Gráfico 4, houve uma queda da produção de 6.923 toneladas, enquanto a área destinada ao seu cultivo apresentou uma leve redução, passando de 32.463 para 32.391 hectares.

Gráfico 4 – produção e áreas destinadas a cajucultura na área de estudo nos anos de 2007 e 2017



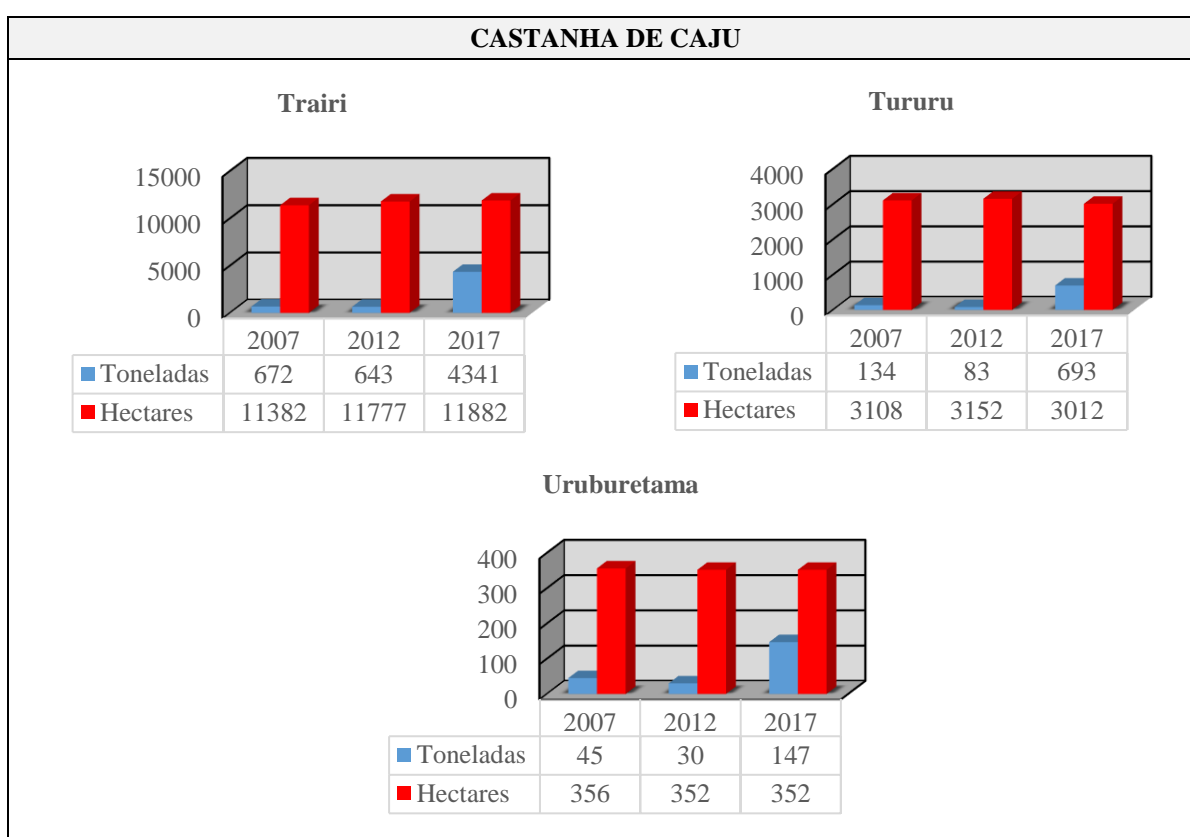
Fonte: IBGE (2018).

A produção da castanha de caju no período analisado aumentou em cinco municípios: Tejuçuoca, Trairi, Tururu, Umirim e Uruburetama. O crescimento mais expressivo ocorreu em Trairi, tendo a colheita passado de 672t para 4.341t, um incremento de mais de seis vezes e com uma pequena ampliação da área plantada, como pode ser verificado no Gráfico 5. Por se tratar de um município litorâneo, Trairi apresenta características naturais que favorecem o cultivo da castanha de caju: solos profundos, desenvolvidos sobre Tabuleiros Pré-litorâneos, e altos índices pluviométricos.



Tururu e Uruburetama também apresentaram crescimento significativo da produção de castanha de caju. Como pode ser observado no Gráfico 5, a colheita em Tururu passou de 134t para 693t, um crescimento em mais de cinco vezes, enquanto em Uruburetama a produção cresceu mais de 3 vezes, saltando de 45t para 147t no período. Vale destacar que as áreas destinadas aos cultivos em ambos os municípios apresentaram redução. Enquanto Tururu diminuiu de 3.108 para 3.012 hectares, Uruburetama apresentou uma redução de 356 para 352 hectares.

Gráfico 5 – Evolução da colheita de castanha de caju e área destinada ao plantio em Trairi, Tururu e Uruburetama no período de 2007 a 2017



Fonte: IBGE (2018).

Um fato que chama a atenção na produção da castanha de caju é o tamanho da área destinada ao seu cultivo. Obter produções expressivas significa destinar grandes extensões de terra para o plantio. Por isso a cajucultura contribui decisivamente para o quadro de degradação verificado na área de estudo, seja pela retirada da cobertura vegetal nativa e exposição do solo aos processos erosivos (Figura 19), ou pelos cultivos em áreas protegidas pela legislação, como encostas com mais de 45° de declividade ou em várzeas de rios.

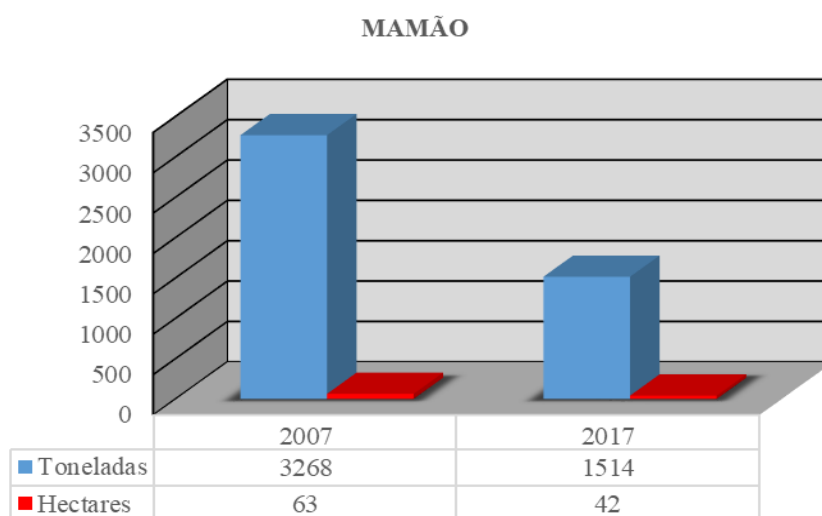
A produção de mamão no período, conforme pode ser observado no Gráfico 6, despencou em mais de 46%, passando de 3.268t para 1.514t. a área destinada ao cultivo por sua vez foi reduzida de 63 para 42 hectares.

Figura 19 – Solo exposto em área de cultivo de caju no município de Itapajé



Foto: Eduardo Freires (09/10/2017).

Gráfico 6 – Produção e áreas destinadas ao cultivo do mamão na área de estudo nos anos de 2007 e 2017



Fonte: IBGE (2018).

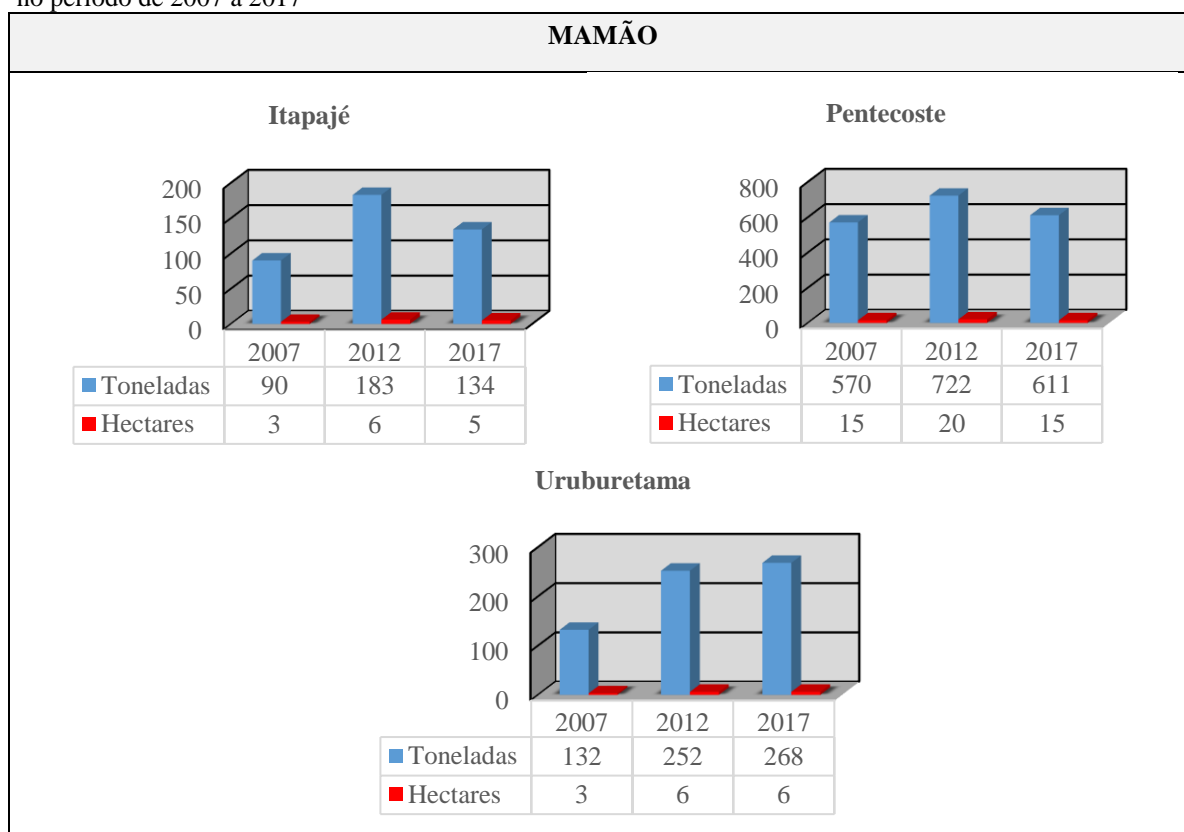
Com relação ao cultivo do mamão, diferente das demais culturas, não houve registro de produção em alguns municípios, como no caso de Trairi e Tururu. Além disso, em Irauçuba e Tejuçuoca só houve registro de produção no ano de 2017, tendo alcançado 46t e 113t respectivamente. Por outro lado, em Itapipoca só houve registro para o ano de 2007, tendo o município gerado uma produção de 1.564t. O município de Umirim apresentou uma queda de produção no período, passando de 912t para 342t.

Os municípios de Itapajé e Pentecoste apresentaram um crescimento da produção entre 2007 e 2012 e um posterior declínio da produção em 2017, todavia os valores mantiveram superiores aos verificados em 2007, como pode ser observado Gráfico 7.

Em Itapajé a produção cresceu de 90t em 2007 para 183t em 2012. Em 2017 a colheita apresentou declínio, atingindo 134 toneladas. Em pentecoste a produção passou de 570t em 2007 para 722t em 2012. Já no ano de 2017 foi observada uma queda para 611 toneladas. A área destinada ao cultivo variou conforme a evolução da produção em ambos os municípios.

Em Uruburetama, como pode ser observado no Gráfico 7, a produção de mamão mais que dobrou, passando de 132t em 2007 para 268t em 2017. A ampliação da área cultivada seguiu essa mesma tendência, subindo de 3 para 6 hectares.

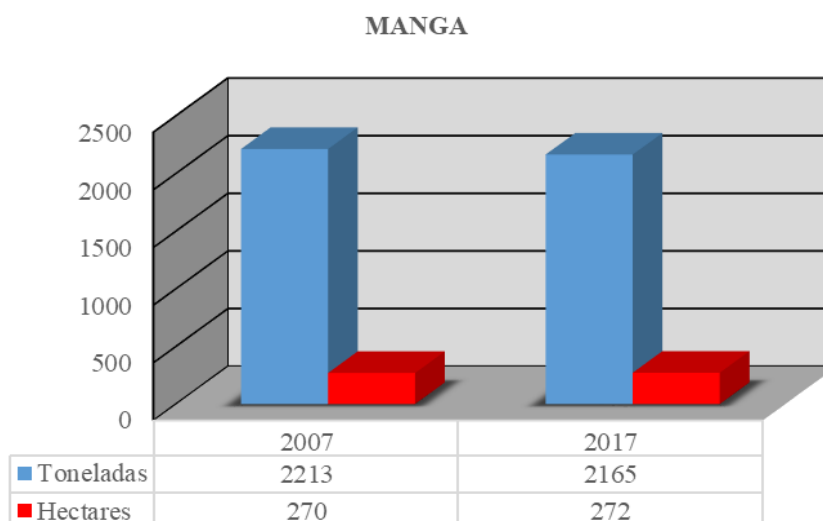
Gráfico 7 – Evolução da colheita de mamão e área destinada ao plantio em Itapajé, Pentecoste e Uruburetama no período de 2007 a 2017



Fonte: IBGE (2018).

A produção de manga apresentou um pequeno declínio ao longo do período analisado. Houve uma queda de 2.213t para 2.165t, porém, diferentemente das demais culturas, a área destinada ao plantio aumentou de 270 para 272 hectares, como pode ser observado no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Produção e áreas destinadas ao cultivo de manga na área de estudo nos anos de 2007 e 2017



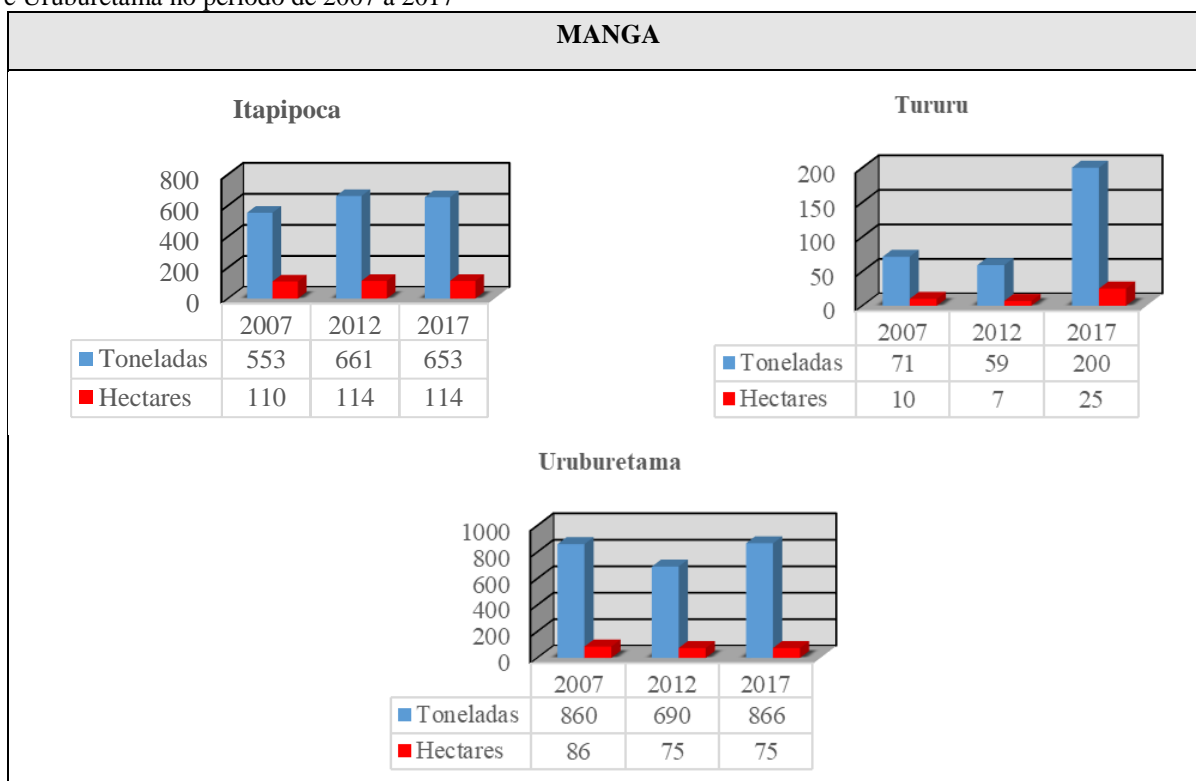
Fonte: IBGE (2018).

Os municípios de Irauçuba, Itapajé, Pentecoste, Tejuçuoca, Trairi e Umirim apresentaram redução na produção dessa cultura. Entre esses municípios o destaque é para Itapajé que apresentou uma queda da produção da manga em mais de 50%, passando de 417t para 208t, enquanto que a área destinada ao cultivo apresentou pequena redução, caindo de 30 para 26 hectares.

Em Itapipoca, Tururu e Uruburetama foi verificada a ampliação da colheita da manga. Em Itapipoca, como pode ser observado no Gráfico 9, a produção subiu de 553t em 2007 para 661 em 2012, e voltou a subir em 2017, atingindo 653 toneladas. A área de cultivo também aumentou de 110 para 114 hectares.

Tururu e Uruburetama, como pode ser observado no Gráfico 9, tiveram a produção reduzida entre 2007 e 2012 e ampliaram a produção no ano de 2017. Tururu teve sua produção de manga aumentada de 71t para 200t e a área destinada ao cultivo apresentou um crescimento de 150%, passando de 10 para 25 hectares. Em Uruburetama foi observado um leve crescimento da produção, que passou de 860t para 866t. A área destinada a produção, por sua vez, diminuiu de 86 para 75 hectares.

Gráfico 9 – Evolução da colheita de Manga e área destinada ao plantio em Itapipoca, Tururu e Uruburetama no período de 2007 a 2017



Fonte: IBGE (2018).

Uruburetama chama atenção pelo fato de ter aumentado a produtividade, uma vez que conseguiu ampliar a produção em 6 toneladas numa área destinada ao cultivo que apresentou queda de 86 para 75 hectares. Normalmente observa-se que o crescimento da produção está atrelado a ampliação da área de cultivo.

De acordo com Souza (2006), o processo produtivo das atividades agropecuárias no semiárido cearense tem sido conquistado mais à custa de incorporações de novas terras do que em função do aumento da produtividade.

Uruburetama, município com seus limites administrativos totalmente inserido no mato, foi o único a apresentar aumento da produção de todas as culturas permanentes analisadas no período. O que demonstra o elevado grau de alteração da paisagem promovido pelas atividades agrícolas no local.

Diferentemente das culturas permanentes, as principais culturas temporárias cultivadas na área de pesquisa apresentaram crescimento de produção, como pode ser observado na Tabela 11. Mandioca, feijão e sobretudo o milho apresentaram crescimento expressivo. Foi observado ainda, crescimento da área destinada ao cultivo de milho e feijão, porém houve redução das áreas de plantio de mandioca e cana-de-açúcar, como verificado na Tabela 12.

Tabela 11 - Produção agrícola de culturas temporárias nos municípios que compõem a vertente úmida do Maciço de Uruburetama nos anos de 2007 e 2017

Município	Lavoura Temporária (produção em t)							
	Milho		Feijão		Mandioca		Cana-de-açúcar	
	2007	2017	2007	2017	2007	2017	2007	2017
Irauçuba	1.236	1.320	676	1.100	65	5	---	--
Itapajé	673	1.387	312	380	240	350	142	97
Itapipoca	2.073	6.093	1.631	2.780	31.298	25.158	1.936	259
Pentecoste	452	3.500	142	1.208	220	149	420	--
Tejuçuoca	1.550	2.550	667	1.562	64	178	---	--
Trairi	763	1.713	815	1.104	19.309	17.611	7.039	5.441
Tururu	415	1.872	250	393	6.310	16.640	178	--
Umirim	290	1.960	255	926	3.330	3.300	603	306
Uruburetama	283	630	142	240	90	170	52	107
<b>Total</b>	<b>7.735</b>	<b>21.025</b>	<b>4.890</b>	<b>9.693</b>	<b>60.926</b>	<b>63.561</b>	<b>10.370</b>	<b>6.210</b>

Fonte: IBGE (2018).

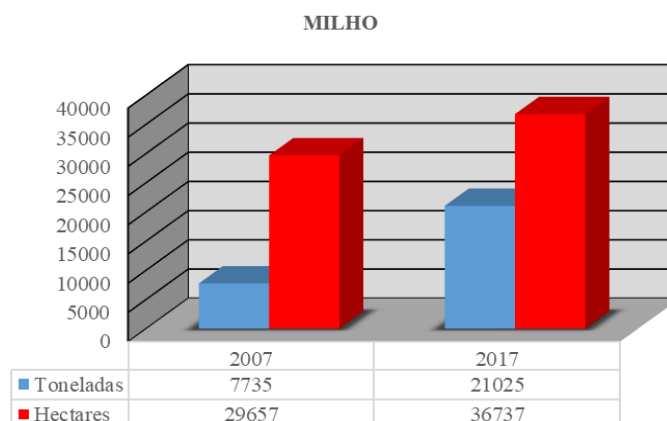
Tabela 12 - Área plantada de culturas temporárias nos municípios que compõem a vertente úmida do Maciço de Uruburetama nos anos de 2007 e 2017

Município	Lavoura Temporária (área destinada ao cultivo em ha)							
	Milho		Feijão		Mandioca		Cana-de-açúcar	
	2007	2017	2007	2017	2007	2017	2007	2017
Irauçuba	4.830	5.500	4.830	5.500	8	1	---	---
Itapajé	2.410	2.150	2.414	2.110	30	45	5	5
Itapipoca	9.900	9.027	10.128	9.250	6.900	3.106	64	10
Pentecoste	1398	5.000	1.330	4.010	20	34	10	---
Tejuçuoca	2.640	5.100	2.270	5.020	8	31	---	---
Trairi	4.740	3.660	4.812	3.720	4.042	3.570	175	176
Tururu	1.715	2.600	1.725	2.605	1.252	2.082	5	--
Umirim	1.524	2.800	1.524	2.620	370	350	20	10
Uruburetama	500	900	500	800	10	23	2	4
<b>Total</b>	<b>29.657</b>	<b>36.737</b>	<b>29.533</b>	<b>35.635</b>	<b>12.640</b>	<b>9.242</b>	<b>281</b>	<b>205</b>

Fonte: IBGE (2018).

O milho foi a cultura que apresentou o crescimento mais expressivo no período analisado, como pode ser observado no Gráfico 10. Com todos os municípios apresentando crescimento, a produção do milho saltou de 7.735t em 2007 para 21.025t, uma ampliação de aproximadamente 200%. A área destinada ao cultivo do milho também foi estendida, passando de 29.657 para 36.737 hectares.

Gráfico 10 – Evolução da colheita de milho e área destinada ao plantio na área de estudo nos anos de 2007 e 2017

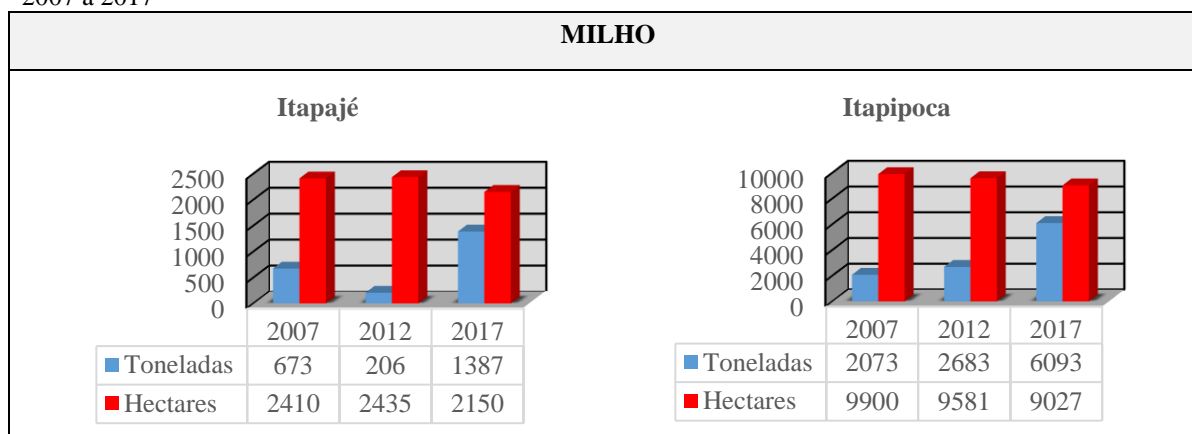


Fonte: IBGE (2018).

O crescimento da produção do milho em alguns municípios é emblemático, seja pelo grande volume alcançado, ou pela sua localização no Maciço de Uruburetama. São os casos de Itapajé, Itapipoca, Tururu, Umirim e Uruburetama, que juntos englobam a vertente úmida do maciço.

Nos municípios de Itapajé e Itapipoca, como pode ser verificado no Gráfico 11, houve um crescimento expressivo da produção do milho no período de 2007 a 2017. Em Itapajé mais do que dobrou a produção. A produção subiu de 673 toneladas em 2007 para 1.387t em 2017, enquanto que a área destinada ao cultivo foi reduzida de 2.410 para 2.150 hectares. Em Itapipoca a produção cresceu quase 200%, passando de 2.073t para 6.093t. Ao passo que a área destinada ao cultivo apresentou um decréscimo de 873 hectares. Esse fato reflete não só a ampliação da colheita, como, também, o aumento da produtividade da cultura do milho nesses municípios.

Gráfico 11 – Evolução da colheita de milho e área destinada ao plantio em Itapajé e Itapipoca no período de 2007 a 2017

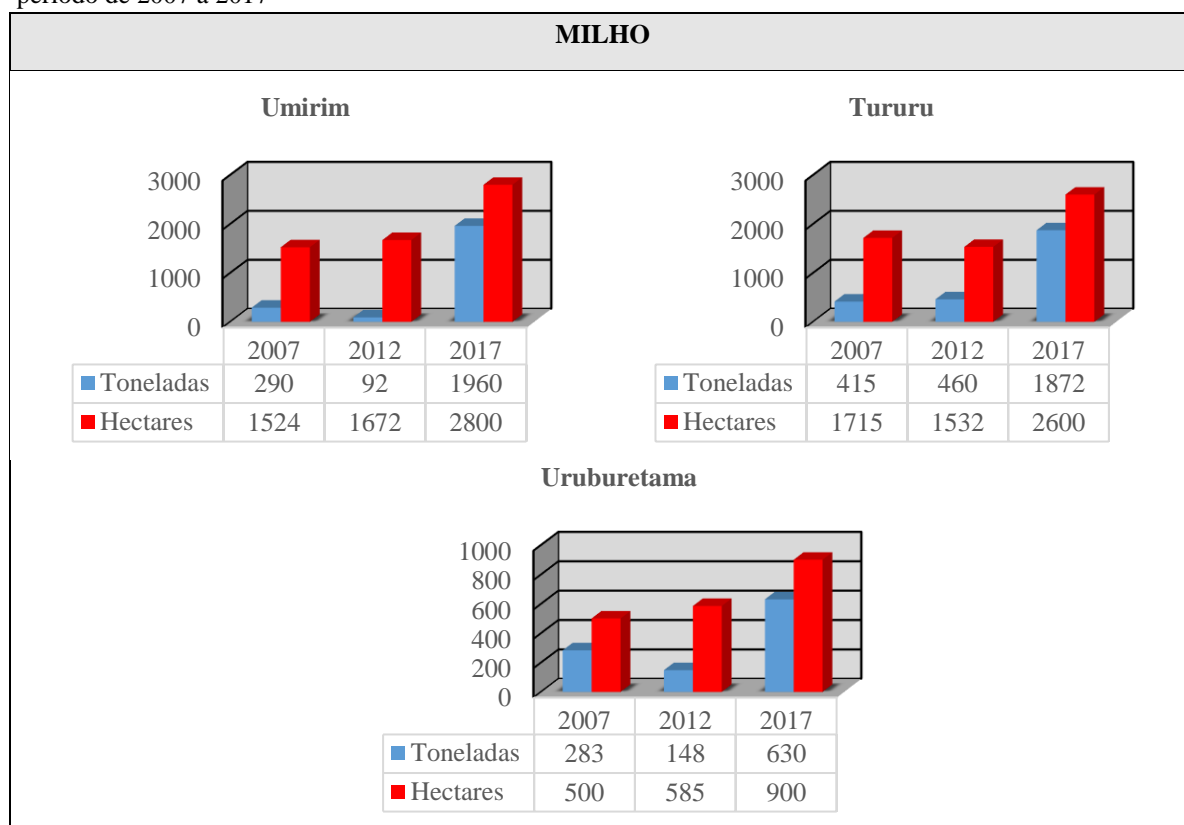


Fonte: IBGE (2018).



Nos Municípios de Umirim, Tururu e Uruburetama, como pode ser observado no Gráfico 12, tanto a colheita quanto a área destinada ao cultivo apresentaram ampliação.

Gráfico 12 – Evolução da colheita de milho e área destinada ao plantio em Umirim, Tururu e Uruburetama no período de 2007 a 2017



Fonte: IBGE (2018).

Em Umirim a produção registrada em 2007 foi 290t, com redução em 2012 para 92t, e crescimento para 1.960t em 2017. A área destinada ao cultivo saltou de 1.524 para 2800 hectares no período.

Tururu e Uruburetama, como pode ser observado no Gráfico 12, apresentaram crescimento expressivo. Em Tururu a produção passou de 415t para 1.872t, um crescimento de mais de 450%. A área destinada ao cultivo cresceu de 1.715 para 2600 hectares. Em Uruburetama a colheita mais que dobrou, passando de 283t para 630t. A área de cultivo por sua vez passou de 500 para 900 hectares.

Pentecoste, Tejuçuoca e Trairi, municípios do entorno do maciço, também apresentaram grande evolução na produção. Em pentecoste a produção saltou de 452t para 3.500t, enquanto a área de plantio cresceu de 1.398 para 5.000 hectares. Em Tejuçuoca houve um crescimento de 1.550t para 2.550t, e uma ampliação da área cultivada de 2.640 para 5.100

hectares. Em Trairi, por sua vez, a produção cresceu de 763t para 1.713t no período. Já a área destinada ao cultivo declinou de 4.740 para 3.660 hectares.

O milho e a banana são as culturas mais difundidas no Maciço de Uruburetama. Assim como a banana, o cultivo do milho se dá sem o emprego de técnicas adequadas, sem respeitar as características do relevo e a legislação ambiental.

Sua ocorrência é maior na área de domínio da mata seca, até 600 metros de altitude, porém pode ser encontrada disseminada em toda a serra como cultura de subsistência.

Geralmente são observados no maciço o chamado cultivo morro abaixo (Figura 20), no qual o plantio é realizado no sentido o fluxo, potencializando as enxurradas e intensificando os processos erosivos e a degradação dos solos.

Figura 20 – Cultivo de milho morro abaixo no município de Itapipoca



Foto: Eduardo Freires (21/02/2018).

O resultado desse tipo de cultivo é a perda gradual da produtividade do solo até a sua completa degradação a partir da formação de ravinas, que por sua vez podem evoluir para voçorocas, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – Cultivo morro abaixo com ocorrência de voçoroca no município de Itapajé



Foto: Eduardo Freires (20/02/2018).

O desconhecimento do agricultor, associado a falta de acompanhamento técnico e de fiscalização ambiental no maciço, implicou num quadro severo de alteração da paisagem que compromete a estabilidade geológica. O plantio do milho se dá em áreas de preservação permanente, com declividade acima de 45° e nos topos de serra, como verificado na Figura 22.

Figura 22 – Cultivo de milho em área de preservação permanente no município de Itapajé

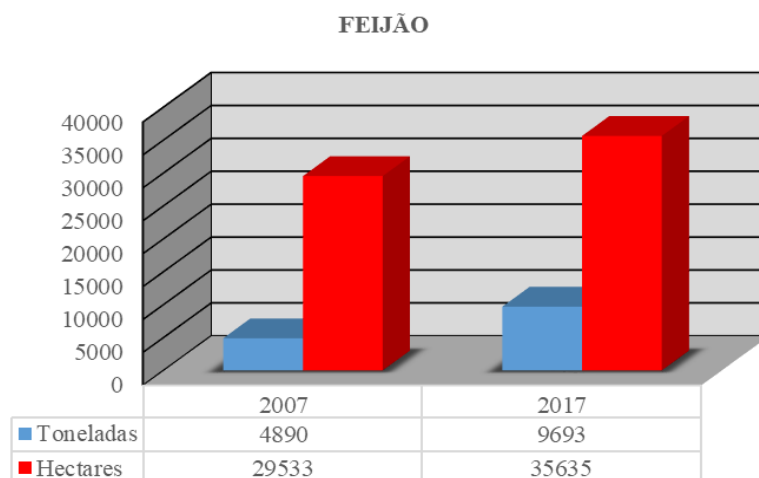


Foto: Daniel Dantas (obtida por ARP, 20/05/2017).

A cultura do feijão geralmente está associada ao cultivo do milho, consequentemente, assim como o milho, se observa no Gráfico 13 que tanto houve uma ampliação da sua produção quanto da área destinada ao seu cultivo. Em todos os municípios da área de estudo observou-se o aumento da colheita no período analisado.

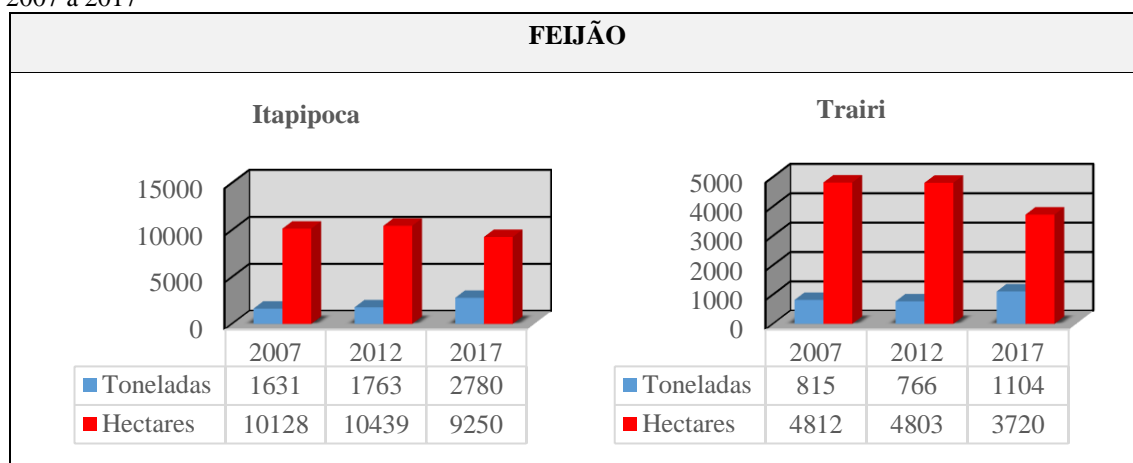
Nos Municípios de Itapipoca e Trairi, conforme pode ser visualizado no Gráfico 14, houve ampliação da colheita do feijão, porém a área destinada ao cultivo apresentou redução ao longo do período. Em Itapipoca a produção passou de 1.631t para 2.780t, ao passo que a área de plantio diminuiu de 10.128 para 9.250 hectares. Da mesma forma em Trairi, observou-se o aumento da colheita de 815t para 1.104t, enquanto que a área destinada ao cultivo reduziu de 4.812 para 3.720 hectares.

Gráfico 13 – Evolução da colheita do feijão e área destinada ao plantio na área de estudo nos anos de 2007 e 2017



Fonte: IBGE (2018).

Gráfico 14 – Evolução da colheita de feijão e área destinada ao plantio em Itapipoca e Trairi no período de 2007 a 2017



Fonte: IBGE (2018).

Em Tejuçuoca, Umirim e Uruburetama, diferentemente, houve aumento da produção e da área de cultivo, como pode ser observado no Gráfico 15.

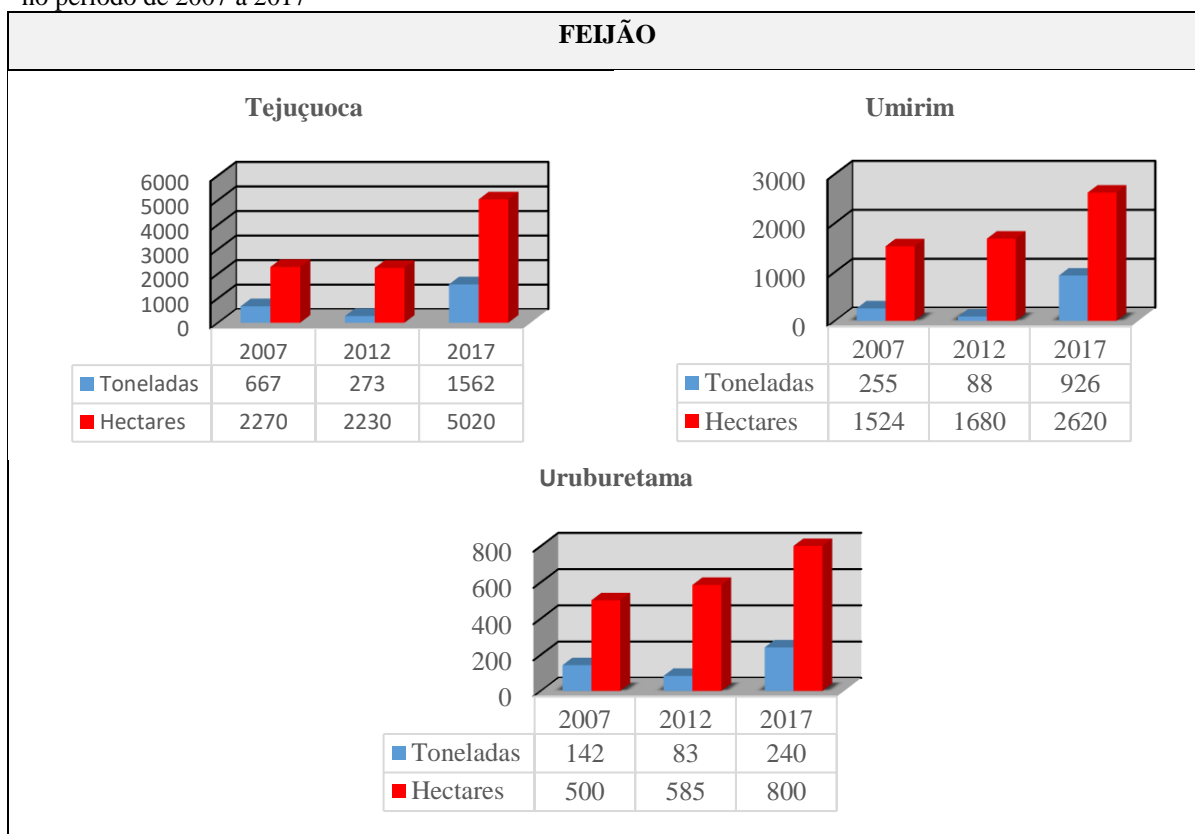
Em Tejuçuoca a produção de feijão cresceu de 667t para 1.565t entre 2007 e 2017. A área destinada ao plantio mais do que dobrou, passando de 2.270 para 5.020 hectares. No município de Umirim a colheita cresceu substancialmente, passando de 255t para 926t. Da mesma forma foi observada a ampliação da área plantada, que subiu de 1.524 para 2.620 hectares. Em Uruburetama, por sua vez, verificou-se que a produção de feijão cresceu de 142t em 2007 para 240t em 2017, enquanto sua área de plantio foi ampliada de 500 para 800 hectares.

A colheita da mandioca seguiu a tendência do milho e do feijão e apresentou crescimento entre os anos de 2007 e 2017. Como pode ser observado no Gráfico 16, a produção



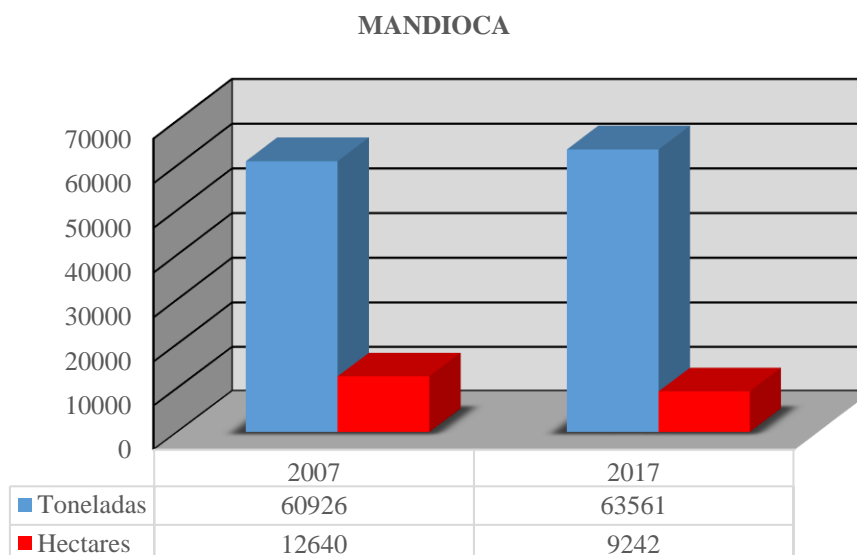
de mandioca passou de 60.926t em 2007 para 63.561t em 2017. Todavia, a área destinada ao cultivo dessa cultura foi reduzida de 12.640 para 9.242 hectares, o que representa um aumento de produtividade.

Gráfico 15 – Evolução da colheita de feijão e área destinada ao plantio em Tejuçuoca, Umirim e Uruburetama no período de 2007 a 2017



Fonte: IBGE (2018).

Gráfico 16 – Evolução da colheita de mandioca e área destinada ao plantio na área de estudo nos anos de 2007 e 2017



Fonte: IBGE (2018).

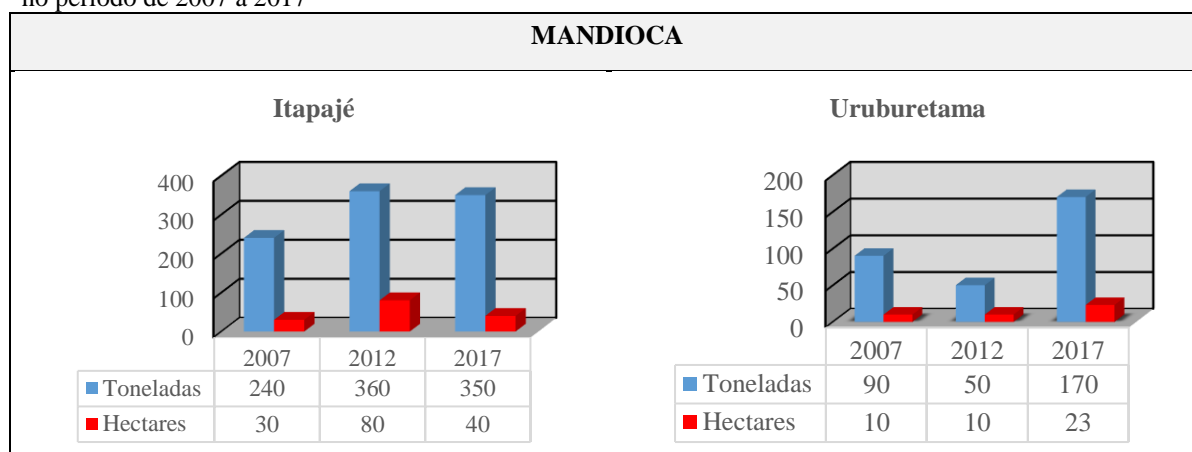
O crescimento observado na produção da mandioca na área de estudo foi alavancado pelos municípios de Itapajé, Uruburetama, Tururu e Tejuçuoca, tendo os demais apresentado recuo.

Em Itapajé e Uruburetama não houve regularidade no crescimento no período, como pode ser observado no Gráfico 17.

Em Itapajé, a produção passou de 240t em 2007 para 360t em 2012, e apresentou um recuo de 10 toneladas em 2017. Contudo, a área destinada ao cultivo em 2017 correspondeu a 40 hectares, a metade da área de plantio em 2012.

Em Uruburetama a colheita apresentou um recuo entre 2007 e 2012, passando de 90t para 50t. Em 2017 a produção apresentou crescimento expressivo, atingindo 170 toneladas. A área de plantio no período aumentou de 10 para 23 hectares.

Gráfico 17 – Evolução da colheita de mandioca e área destinada ao plantio em Itapajé e Uruburetama no período de 2007 a 2017

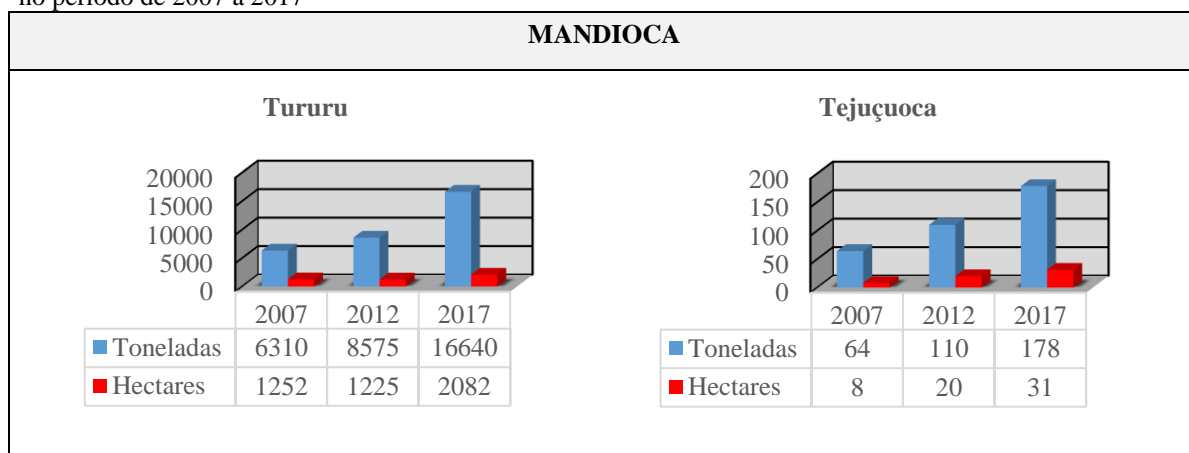


Fonte: IBGE (2018).

Os municípios de Tururu e Tejuçuoca não apresentaram variação negativa da produção da mandioca ou da área destinada ao cultivo no período, como pode ser verificado no Gráfico 18. Em Tururu a colheita subiu de 6.310t em 2007 para 16.640t em 2017, enquanto que a área de plantio passou de 1.252 para 2.082 hectares. Em Uruburetama a produção aumentou de 64t para 178t e a área e cultivo cresceu de 8 para 31 hectares.

Assim como a mandioca, a produção de cana-de-açúcar também apresentou declínio no período. Pentecoste e Tururu não apresentaram registro de produção para o ano de 2017, contribuindo para essa queda.

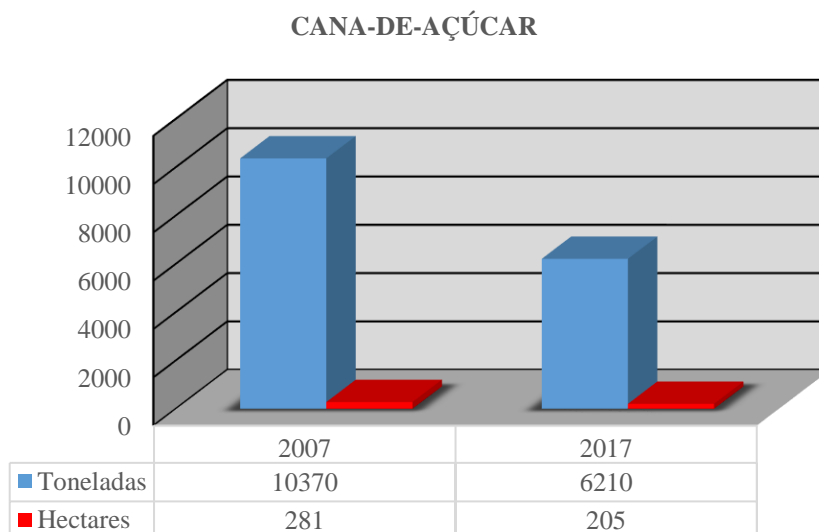
Gráfico 18 – Evolução da colheita de mandioca e área destinada ao plantio em Tururu e Tejuçuoca no período de 2007 a 2017



Fonte: IBGE (2018).

Como pode ser observado no Gráfico 19, a colheita de cana-de-açúcar reduziu de 10.370t, em 2007, para 6.210t em 2017. A área destinada ao cultivo também diminuiu, passando de 281 para 205 hectares.

Gráfico 19 – Evolução da colheita de cana-de-açúcar e área destinada ao plantio na área de estudo nos anos de 2007 e 2017



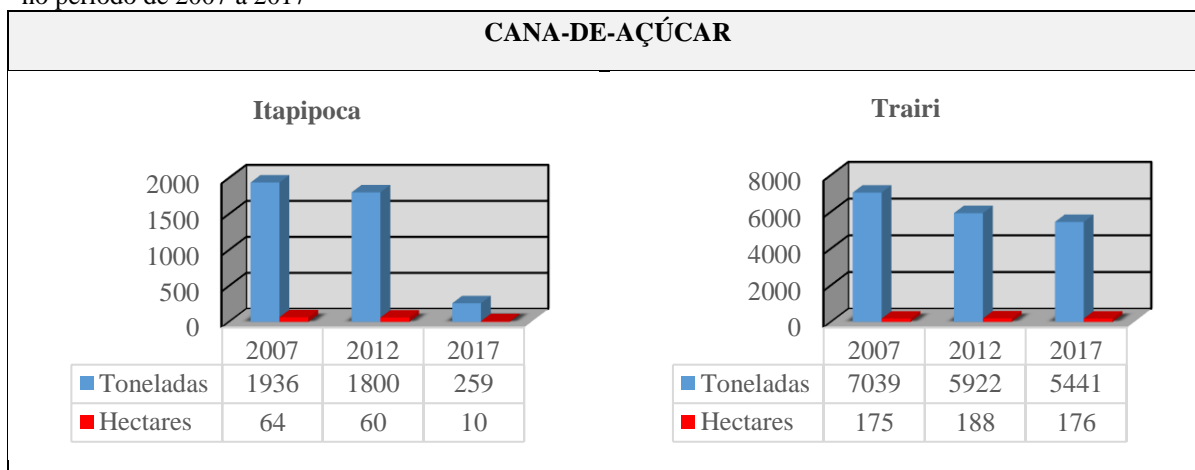
Fonte: IBGE (2018).

Os municípios de Trairi e, principalmente, Itapipoca puxaram a queda dos indicadores, como pode ser observado no Gráfico 20. Em Itapipoca a produção de cana-de-açúcar apresentou um declínio em mais de 7 vezes no período. Entre os anos de 2007 e 2017 foi observada uma queda da colheita de 1936t para 259t, enquanto que a área de cultivo diminuiu de 64 para 10 hectares. Em Trairi observou-se também queda da produção, tendo a



colheita passou de 7.039t em 2007 para 5.441t em 2017. Porém a área destinada ao cultivo apresentou pequena oscilação.

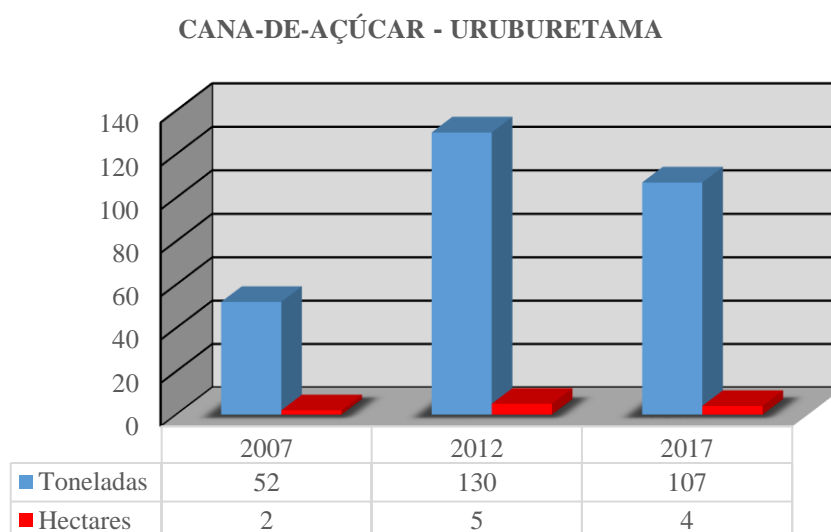
Gráfico 20 – Evolução da colheita de cana-de-açúcar e área destinada ao plantio em Itapipoca e Trairi no período de 2007 a 2017



Fonte: IBGE (2018).

Uruburetama foi o único município a apresentar crescimento da produção da cana-de-açúcar, como verificado no Gráfico 21. Todavia, o crescimento mais expressivo ocorreu entre 2007 e 2012, tendo a colheita aumentado de 52t para 130t. Em 2017 a produção apresentou declínio, atingindo 107t, porém os valores observados representaram mais que o dobro da produção no ano de 2007. A variação da área destinada ao cultivo foi compatível a dinâmica de produção.

Gráfico 21 – Evolução da colheita e das áreas destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar em Uruburetama no período de 2007 a 2017



Fonte: IBGE (2018).

É importante ressaltar que, diferentemente das demais culturas, não houve registro de produção de cana-de-açúcar nos municipais de Irauçuba e Tejuçuoca ao longo do período analisado.

Juntamente com a agricultura, a pecuária e o extrativismo vegetal contribuem também para o quadro de degradação local. Muitos sertanejos de baixa renda ainda tem o carvão vegetal como única fonte de combustível. Para isso suprimem espécies da caatinga para queima e produção do carvão. Ainda hoje essa vegetação também é a principal fonte de combustível na produção de telhas e tijolos em olarias e/ou cerâmicas na área. A pecuária extensiva praticada nos sertões, por sua vez, contribui tanto na supressão da vegetação como também na degradação dos solos, uma vez que o pisoteio do gado promove sua compactação, que diminui a permeabilidade e favorece a erosão laminar.

As alterações produzidas pelas atividades humanas são responsáveis pelo elevado grau de degradação no Maciço de Uruburetama. A agricultura se configura como o principal agente transformador da paisagem e gradativamente vem comprometendo os recursos locais. A marca do antropismo se manifesta através do desmatamento indiscriminado e do manejo inadequado dos solos e dos recursos hídricos, que por sua vez aceleram os processos erosivos, com conseqüente adelgaçamento dos solos, e intensificam o assoreamento de rios e açudes.

A agricultura de subsistência está disseminada por toda área de estudo. A sistemática da lavoura de subsistência consiste na retirada sumária da vegetação primária, seguida pela queima e preparo do solo para plantio. Após alguns anos é deixado em pousio, para recuperação e posterior retomada da prática agrícola. Procedimento que irá ser repetido até o esgotamento do solo, quando então será abandonado e novas áreas serão buscadas para cultivo, o que configura a agricultura itinerante, comum na área de domínio do clima semiárido.

Como conseqüência do manejo inadequado dos solos pode ocorrer os mais variados impactos sociais, como: diminuição da produção e da produtividade agropecuária, perda do dinamismo das atividades ligadas ao setor primário da economia, desemprego crescente, redução da qualidade de vida, concentração de renda e ampliação do processo migratório.

Embora seja observado de forma disseminada práticas agrícolas predatórias por todo o maciço, é possível verificar no Quadro 3 que os municípios de Irauçuba, Itapajé, Itapipoca, Pentecoste e Tejuçuoca dispõem de leis que tratam sobre o parcelamento e zoneamento ou uso e ocupação do solo rural. Uma verdadeira contradição, já que não são observadas quaisquer medidas para garantir a preservação ou sustentabilidade ambiental no maciço.

Quadro 3 – Ocorrência de legislação municipal sobre o solo rural

Municípios	Legislação municipal sobre solo rural	
	Parcelamento	Zoneamento ou Uso e Ocupação
Irauçuba	SIM	SIM
Itapajé	SIM	SIM
Itapipoca	SIM	SIM
Pentecoste	SIM	SIM
Tejuçuoca	SIM	SIM
Trairi	NÃO	NÃO
Tururu	NÃO	NÃO
Umirim	NÃO	NÃO
Uruburetama	NÃO	NÃO

Fonte: IBGE (2018).

Como pode ser observado no Quadro 4, vários municípios assumem a ocorrência de processos erosivos acelerados entre 2013 e 2017, inclusive Irauçuba e Pentecoste, que dispõem de legislação para disciplinar o uso e ocupação do solo. O que reflete a baixa capacidade de gerenciamento dos órgãos competentes.

Quadro 4 – Ocorrência de processos erosivos acelerados nos municípios da área de estudo

Municípios atingidos por processos erosivos acelerados entre 2013 e 2017	
Irauçuba	SIM
Itapajé	NÃO
Itapipoca	NÃO
Pentecoste	SIM
Tejuçuoca	NÃO
Trairi	SIM
Tururu	NÃO
Umirim	NÃO SABE
Uruburetama	SIM

Fonte: IBGE (2017).

## 2.4 Conclusões

As diversas intervenções antrópicas processadas ao longo dos anos no Maciço de Uruburetama têm gerado vários problemas de ordem ambiental, que por sua vez compromete a sustentabilidade local e a manutenção das próximas gerações.

A expansão urbana e a maior demanda de recursos a partir o crescimento populacional, verificado nos municípios que compõem a área de estudo, aliada a falta

orientação técnica e fiscalização das atividades praticadas vem promovendo um quadro de degradação da vertente úmida do Maciço de Uruburetama que pode se tornar irreversível.

A ampliação da malha urbana e das áreas de cultivo ocorrem indiscriminadamente em áreas de preservação permanente, como nas encostas com declividade superior a 45° ou em topos de morros e serras com alturas superiores a 100 metros e com inclinação média superior a 25°, desrespeitando as determinações da Lei Federal nº 12.651/2012 (Novo Código Florestal) que visa, entre outros objetivos, preservar as paisagens, a estabilidade geológica e proteger o solo.

As atividades agrícolas são efetuadas a partir da supressão da cobertura vegetal primária, que por si só já expõe os solos aos agentes erosivos, e em sua grande maioria são realizadas no chamado cultivo morro abaixo, em que as culturas são cultivadas no sentido do fluxo superficial intensificando os processos erosivos e os movimentos de massa. O uso inadequado de irrigação também vem contribuindo para potencializar esses fenômenos. Como consequência observa-se a perda gradativa da produtividade agrícola. É premente que órgãos gestores locais desenvolvam políticas de acompanhamento técnico junto aos produtores rurais no intuito de orientar a prática agrícola no que diz respeito a sistemática de plantio em encostas, ao tipo de irrigação adotado e visando a compatibilização de culturas às características ambientais do maciço, respeitando os limites impostos pelo meio e a legislação.

De 2007 a 2017 foi verificado que as principais culturas permanentes apresentaram um decréscimo na produção, todavia as áreas destinadas ao cultivo dessas culturas tiveram uma pequena redução. Por outro lado, foi observado que as principais culturas temporárias apresentaram crescimento na produção e na área destinada ao cultivo.

Dessas culturas se destacam o cultivo da banana (cultura permanente) e do milho (cultura temporária) pelo grau de alteração imposto a paisagem, e todos os problemas ambientais derivados de suas práticas. É possível observar setores da vertente úmida completamente cultivados com bananeiras, assim como áreas de domínio da mata seca completamente descaracterizadas pelo plantio do milho.

O município de Uruburetama, único localizado completamente na vertente úmida, chama atenção pelo fato de apresentar a maior densidade populacional da área de estudo, com 203,61 hab./km<sup>2</sup>, e pela constatação do crescimento na produção agrícola de todas as culturas no período analisado (2007 - 2017), resultado alcançado, geralmente, à custa da ampliação da área de cultivo, que, por sua vez, reflete na alteração da paisagem dentro dos seus limites administrativos.

O corte de encostas para abertura de estradas, realizado pelo poder público para integrar as localidades, é um dos principais condicionantes para a ocorrência de movimento de massa. Sem a adoção de técnicas de estabilização dos taludes, as vertentes são expostas aos processos erosivos. Em áreas de cultivos cortadas por estradas é possível encontrar com frequência movimento de massa. A ocorrência de estradas em áreas de cultivo da banana é uma associação propícia a deflagração desses fenômenos.

Também é possível observar o corte de encostas para ampliação de áreas edificáveis, sem qualquer medida de estabilização dos taludes, que colocam em risco os moradores locais. Da mesma forma, a diminuição dos espaços passíveis de ocupação e ampliação do valor da terra, tem levado muitas pessoas a ocuparem áreas com risco geológico, que apresentam declividade considerável ou que estão em rota de colisão de blocos de rocha ou matacão.

Embora todos os municípios da área de pesquisa disponham de órgão gestor ambiental, e que alguns possuam leis que disciplinem o uso e ocupação do solo, percebe-se que suas atuações ocorrem de forma deficitária, seja por falta de recursos financeiros, técnicos e humanos. A maioria desses órgãos atuam integrados a outros setores da administração pública, como agricultura, pecuária, recursos hídricos, cultura e turismo. A resolução de determinados problemas de ordem ambiental muitas vezes passa por conflitos de interesse que podem inibir a tomada de decisão dos órgãos gestores.

Sugere-se que todos os municípios da área de pesquisa desenvolvam estudos técnicos (zoneamento, Plano Diretor, cartas geotécnicas de aptidão a urbanização, mapeamento e cadastro de áreas de risco, entre outros) e leis que orientem e disciplinem o uso e ocupação do solo. Compreende-se a necessidade de implementação de uma Área de Proteção Ambiental (APA) na serra por parte da Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará (SEMA), e conseqüentemente uma atuação efetiva da Superintendência Estadual de Meio Ambiente (SEMACE) na fiscalização da expansão urbana e das atividades agrícolas, bem como, na capacitação de recursos humanos junto aos órgãos locais para atuarem em seus municípios. É necessário que sejam efetuados métodos e técnicas de proteção e estabilização dos taludes de corte das estradas construídas pelo poder público, no intuito de diminuir os riscos, a perda de solos e evitar que as comunidades fiquem isoladas em decorrência dos movimentos de massa. Da mesma forma, é de suma importância a recuperação de áreas degradadas visando garantir o desenvolvimento da prática agrícola e a estabilidade das encostas.

## Referências

- B'SABER NA. O domínio morfoclimático semiárido das caatingas brasileiras. *Geomorfologia*. 1974; 43: 1-39.
- AYOADE JO. Introdução à climatologia para os trópicos. 18ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil; 2015.
- BARBOSA H. Ceará possui 175 cidades incluídas no Semiárido. *Diário do Nordeste* [Internet]. 2017 Nov 28 [cited 2019 aug 15]. Região. Available from: <https://diarionordeste.verdesmares.com.br/editorias/regiao/ceara-possui-175-cidades-incluidas-no-semiarido-1.1857199>.
- BRANDÃO RL. Sistema de Informações para a Gestão e administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza - Projeto SINFOR. Diagnóstico Geoambiental e os principais problemas de ocupação do meio físico da Região Metropolitana de Fortaleza. v.1. Fortaleza: CPRM, 1995.
- BRANDÃO RL. Zoneamento Geoambiental da região de Irauçuba/CE. Texto explicativo/ Carta Geoambiental. Fortaleza: CPRM, 2003.
- BRANDÃO RL, FREITAS LCB. Geodiversidade do estado do Ceará. Fortaleza: CPRM, 2014.
- CAVALCANTE J C, VASCONCELOS AM, MEDEIROS MF, PAIVA IG. Mapa Geológico do Estado do Ceará. 1ª edição. Fortaleza: CPRM, 2003. Escala 1:500.000.
- CHRISTOFOLETTI A. Geomorfologia Fluvial. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro (Brasil): EMBRAPA-SPI, 2009.
- FERNANDES A. Conexões florísticas do Brasil. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2003
- FERNANDES A. Fitogeografia Brasileira: províncias Florísticas. 3ª ed. Fortaleza: Realce Editora e Indústria Gráfica, 2006. 202 p.
- FREIRES, EV; SILVA NETO, CA.; CUNHA, DSR.; DUARTE, CR.; VERÍSSIMO, CUV.; GOMES, DDM. Comparação de Imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2 no Mapeamento de Cobertura e Uso da Terra no Maciço de Uruburetama, Ceará. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 42, n. 4, p. 427-442, 2019. DOI: 10.11137/2019\_4\_427\_442.
- SRH, Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará [internet]. Fortaleza: governo do Estado do Ceará (CE) [cited 2018 jan 29]. Available from: [http://atlas.srh.ce.gov.br/infraestrutura/acudes/detalhaCaracteristicasTecnicas.php?cd\\_acude=267&](http://atlas.srh.ce.gov.br/infraestrutura/acudes/detalhaCaracteristicasTecnicas.php?cd_acude=267&).
- DNOCS, Departamento Nacional de Obras Contra A Seca [internet]. Brasília: Ministério da Integração Nacional (BR) [cited 2018 jan 29]. Available from:

<http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/mundau.htm>.

DNOCS, Departamento Nacional de Obras Contra A Seca [internet]. Brasília: Ministério da Integração Nacional (BR) [cited 2018 jan 29]. Available from: <http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/caxitore.htm>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico de pedologia. 2ª ed. Rio de Janeiro (Brasil): IBGE, 2007. 315 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [Internet]. Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (BR) [cited 2018 may.16]. Mapa de climas zonais em escala de 1:5.000.000. Available from: [https://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas\\_brasil/brasil\\_clima.pdf](https://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [Internet]. Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (BR) [cited 2018 feb 15]. Mapa temático de Pedologia em escala de 1:250.000. Available from: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/pedologia/vetores/escala\\_250\\_mil/recorte\\_milionesimo/](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/vetores/escala_250_mil/recorte_milionesimo/).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [Internet]. Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (BR) [cited 2018 oct 28]. Portal das cidades: panorama/população. Available from: <https://cidades.ibge.gov.br>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [Internet]. Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (BR) [cited 2018 oct 30]. Portal das cidades: produção agrícola. Available from: <https://cidades.ibge.gov.br>.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). SPRING 5.5.3. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (BR): [cited 2018 jul 01]. Available from: <http://www.dpi.inpe.br/SPRING/portugues/download.php>.

IPECE, Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Fortaleza: Secretária do Planejamento e Gestão do Estado do Ceará (CE). [cited 2018 jul 02]. Mapa das unidades fitoecológicas do Estado do Ceará. Available from: [http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/pdf/Unidades\\_Fitoecologicas.pdf](http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/pdf/Unidades_Fitoecologicas.pdf).

GUERRA AT, GUERRA AJT. Novo dicionário geológico-geomorfológico. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997.

MENDONÇA F, DANNI-OLIVEIRA IM. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE; Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (Novo Código Florestal) - Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida



Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília (Brasil): Ministério do Meio Ambiente; 2012.

MORAIS JO. Compartimentação territorial evolutiva da zona costeira. In: Lima, L.C; Morais, J.O; Souza, M.J.N. Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará. Fortaleza: FUNECE; 2000. p. 105-184.

OLIVEIRA VPV. Prospección, caracterización y cartografía edafopaisagística em uma região montanhosa del semiárido brasileiro: la Sierra de Uruburetama/Sertão Nordeste-Ceará-Brasil [Tese]. Almeria: Faculdade de Ciencias experimentales/Universidad de Almeria; 2002. 585 p.

PALMIERI F, LARACH JOI. Pedologia e geomorfologia. In: GUERRA AJT, CUNHA SB. Geomorfologia e meio ambiente. 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil; 2004. p. 59 – 122.

RIZZINI CT. Tratado de fitogeografia do Brasil. São Paulo: Âmbito Cultural Edições Ltda, 1997.

SCHOBENHAUS C, NEVES BBB. A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana. In: BIZZI LA, SCHOBENHAUS C, VIDOTTI RM, GONÇALVES JH. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Brasília: CPRM - Serviço Geológico do Brasil; 2003. p. 5 – 86.

SILVA MVC. Análise Geoambiental: subsídios ao planejamento agrícola da Serra de Uruburetama – Ce [Dissertação]. Fortaleza: Mestrado Acadêmico de Geografia/ Universidade Estadual do Ceará 2007. 191 p.

SOUZA MJN. Bases naturais e esboço do zoneamento geoambiental do estado do Ceará. In: Lima, L.C; Morais, J.O; Souza, M.J.N. Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará. Fortaleza: FUNECE; 2000. p. 5 – 104.

SOUZA MJN. Contexto Geoambiental do semiárido do Ceará: problemas e perspectivas. In: SOBRINHO JF, FALCÃO CLC. Semi-Árido: diversidades, fragilidades e potencialidades. Sobral: Sobral Gráfica; 2006. p. 14 – 33.

SOUZA, MJN, NETO JM, SANTOS JO, GONDIM MS. Diagnóstico Geoambiental do Município de Fortaleza: subsídio ao macrozoneamento ambiental e à revisão do Plano Diretor Participativo- PDPFor. Fortaleza: Prefeitura Municipal de Fortaleza, 2009.

SOUZA MJN, OLIVEIRA VPV. Os enclaves úmidos e sub-úmidos do semi-árido do Nordeste brasileiro. Mercator - Revista de Geografia da UFC. 2006; nº 09: 85-102.

SUGUIO K, BIGARELA JJ. Ambiente fluvial. Curitiba: Editora Universidade Federal do Parana , 1979.

### **3 CAPITULO III - COMPARAÇÃO DE IMAGENS OLI/LANDSAT 8 E MSI/SENTINEL-2 NO MAPEAMENTO DE COBERTURA E USO DA TERRA NO MACIÇO DE URUBURETAMA, CEARÁ**

O artigo “Comparação de imagens OLI/Landsat 8 e MSI/Sentinel-2 no mapeamento de cobertura e uso da terra no Maciço de Uruburetama, Ceará” foi submetido para análise e publicação ao periódico Anuário do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, no dia 30 de janeiro de 2019. Apresenta versão impressa, ISSN 0101-9759, e versão online, e-ISSN 1982-3908. O artigo foi publicado em dezembro de 2019 no volume 42, número 4, p. 427-442, DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_4\\_427\\_442](http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_427_442). O texto apresentado segue a mesma estrutura exigida pelo periódico.

O objetivo desse artigo é comparar produtos de diferentes sensores na aplicação do mapeamento de cobertura e uso da terra, com intuito de obter uma representação mais adequada e expressiva das transformações processadas no Maciço de Uruburetama.

## **Comparação de imagens OLI/Landsat 8 e MSI/Sentinel-2 no mapeamento de cobertura e uso da terra no Maciço de Uruburetama, Ceará**

Comparison of OLI/ Landsat 8 and MSI/Sentinel-2 images in cover and land use mapping in the Uruburetama Massif, Ceará

### **Resumo**

Imagens orbitais da série Landsat têm sido sistematicamente empregadas no mapeamento de cobertura e uso da terra. Porém, algumas áreas, devido às características de relevo ou a forte influência antrópica, impõem dificuldades nesta caracterização. O Maciço de Uruburetama, no estado do Ceará, representa uma área com tais particularidades. Na tentativa de gerar melhores resultados na identificação e delimitação das diferentes classes de cobertura e uso da terra no maciço, este trabalho compara imagens dos sensores orbitais OLI/Landsat 8 e MSI/Sentinel-2, a fim de definir qual produto pode ser melhor empregado em estudos desta finalidade. A metodologia partiu da obtenção de imagens orbitais da área, passando por etapas de pré-processamento, geração de NDVI, segmentação por crescimento de regiões, classificação supervisionada, validação da classificação e produção dos mapas temáticos. Os produtos NDVI apresentaram correlação positiva muito forte, evidenciando compatibilidade espectral entre os sensores. Na etapa de segmentação, percebeu-se a influência da melhor resolução espacial do sensor MSI com a criação de quase oito vezes mais polígonos e uma área média correspondente a 12,5% a medida do sensor OLI. A classificação supervisionada utilizando o algoritmo Bhattacharya possibilitou mapear os dois produtos em sete classes temáticas de cobertura e uso da terra do Maciço de Uruburetama: Mata Úmida; Mata Seca; Caatinga Arbustiva Densa; Caatinga Arbustiva Aberta; Urbano/Solo Exposto; Corpos D'água e Cultivos. A validação das classificações atestou a melhor acurácia do produto MSI/Sentinel-2 por meio dos índices Kappa e exatidão global. Os resultados demonstram que a imagem MSI/Sentinel-2, devido a sua melhor resolução espacial, permite um maior detalhamento dos alvos, e maior acurácia na classificação, o que possibilita a sua aplicação em estudos com maiores escalas de análise. Por sua vez, a imagem OLI/Landsat-8, demonstrou ser mais adequada a estudos com menores níveis de detalhes, ou com alvos mais homogêneos.

**Palavras-chave:** cobertura e uso da terra; NDVI; segmentação por regiões; classificação supervisionada

### **Abstract**

Orbital images of the Landsat series have been systematically employed in the mapping of land cover and use. However, some areas, due to the relief characteristics or the strong antropic influence, impose difficulties in this characterization. The Uruburetama massif, in the state of Ceará, represents an area with such peculiarities. This work compares images of the OLI / Landsat 8 and MSI / Sentinel-2 orbital sensors in order to determine which product can best be used studies. The methodology was based on obtaining orbital images of the area, including pre-processing stages, NDVI generation, segmentation by region growth, supervised classification, classification validation and production of thematic maps. The NDVI products had very strong positive correlation, evidencing spectral compatibility among the sensors. In the segmentation stage, we noticed the influence of the best spatial resolution of the MSI sensor with the creation of almost eight times more polygons and a mean area corresponding to 12.5% the measurement of the OLI sensor. The supervised classification using the Bhattacharya algorithm allowed to map the two products in seven thematic classes of coverage and land use of the Uruburetama massif: Mata Humid; Mata Seca; Dense Shrub Caatinga; Open Shrub Caatinga; Urban / Ground Exposure; Water Bodies and Crops. The validation of the classifications attested to the best accuracy of the MSI / Sentinel-2 product through the Kappa indices and global accuracy. The results demonstrate that the MSI / Sentinel-2 image, due to its better spatial resolution, allows a greater detail of the targets, and a better accuracy in the classification, which allows even its application in studies with larger scales of analysis. The OLI / Landsat-8 image, on the other hand, has been shown to be more suitable for studies with lower levels of detail, or with more homogeneous targets.

**Keywords:** coverage and land use; NDVI; segmentation by regions; supervised classification

### 3.1 Introdução

Um dos maiores dilemas no mapeamento de cobertura e uso da terra subsidiada por imagens orbitais é identificar os diferentes extratos da cobertura vegetal e ao mesmo tempo distingui-los de áreas de cultivo e pastagens. Esta avaliação se torna mais difícil quando o foco são áreas com relevo planáltico, fortemente fraturado, com variados graus de intervenções antrópicas em suas encostas e submetidas a um clima semiárido. Todavia, com a diversidade de imagens orbitais disponíveis atualmente, com diferentes resoluções espectrais e espaciais, é possível obter melhores resultados empregando técnicas adequadas.

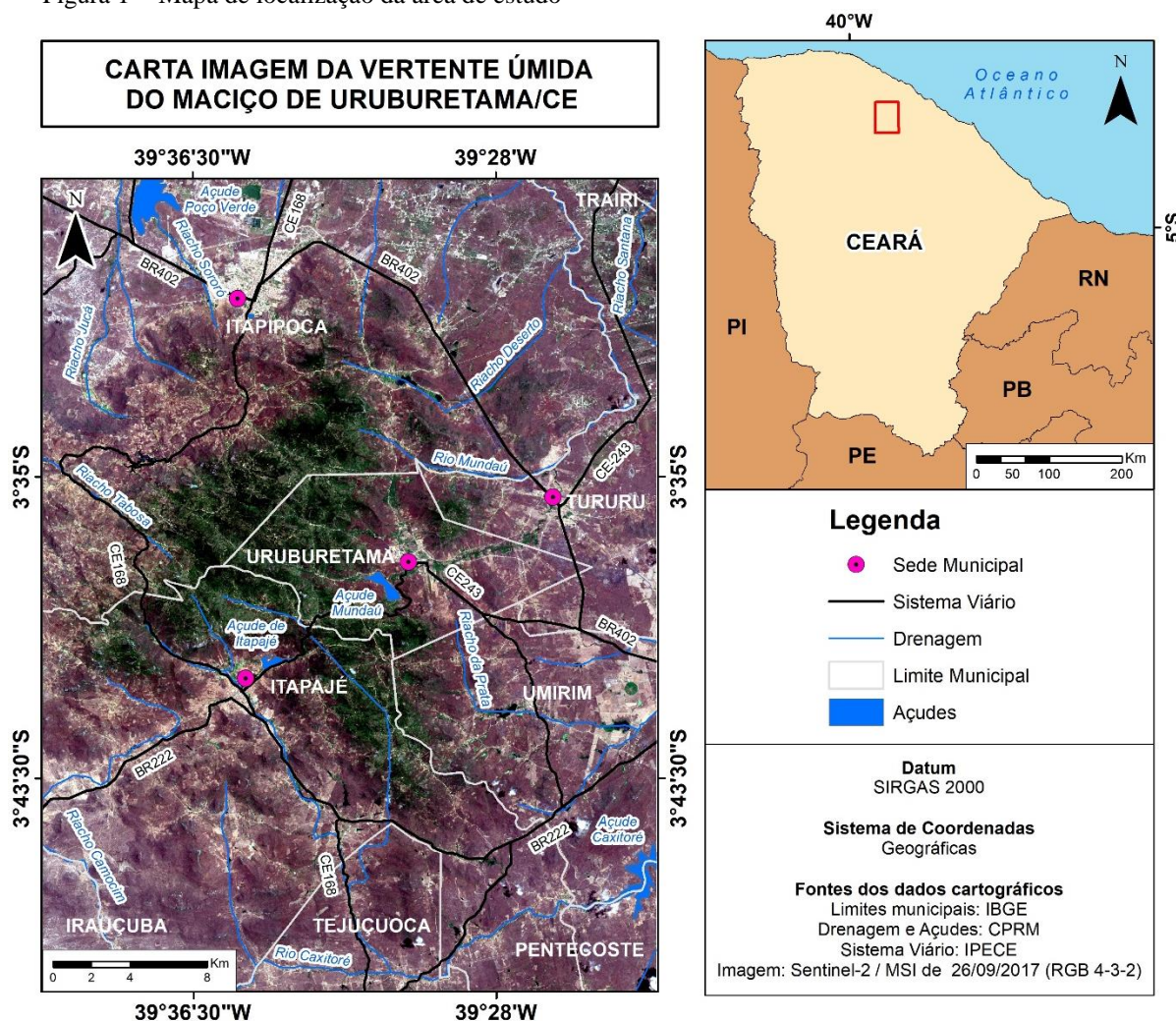
O Maciço de Uruburetama, localizado na porção norte do estado do Ceará (Figura 1), apresenta todos os elementos que dificultam a classificação e o mapeamento a partir de imagens de satélites: (1) está inserido numa área de domínio do clima semiárido, que altera a fisionomia da vegetação ao longo do ano; (2) a diferença de altitude e a disposição do relevo favorecem a ocorrência de diferentes extratos vegetacionais (Mata úmida, Mata Seca, Caatinga Arbustiva Densa, Caatinga Arbustiva Aberta) no maciço e em seu entorno; (3) o relevo fortemente fraturado dificulta a visualização dos alvos devido ao efeito de sombra; (4) além disto, é marcado por forte intervenção antrópica, a partir do crescimento urbano e sobretudo das atividades agrícolas, com destaque para o cultivo de milho no sopé da serra e seu entorno e de banana nas áreas úmidas.

Conforme Silva (2007), em decorrência dessas intervenções, o Maciço de Uruburetama é o mais desconfigurado ambientalmente do estado do Ceará, principalmente quando comparado às serras do Machado, Meruoca, das Matas e de Baturité. Fato este que denota a dificuldade imposta para identificação e/ou diferenciação dos alvos terrestres e conseqüentemente para o mapeamento de cobertura e uso da terra desta área.

A partir da problemática exposta e em busca de melhores técnicas para identificação e delimitação das diferentes classes de cobertura e uso da terra do Maciço de Uruburetama e adjacências, este trabalho teve como objetivo comparar a resposta das imagens provenientes dos sensores orbitais OLI/Landsat 8 e MSI/Sentinel-2, a fim de definir qual dos produtos pode ser melhor empregado em estudos ambientais desta finalidade.

A área de estudo apresenta uma extensão de 1.344,963 km<sup>2</sup> e localiza-se entre as coordenadas UTM (zona 24 Sul) 9.619.380-9.577.181 m N; e 424.667-456.494 m E. Como pode ser observado na Figura 1, a área está inserida, em diferentes proporções, dentro do limite administrativo de nove municípios do estado do Ceará, que são: Irauçuba, Itapajé, Itapipoca, Pentecoste, Tejuçuoca, Trairi, Tururu, Umirim e Uruburetama.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Materiais e métodos

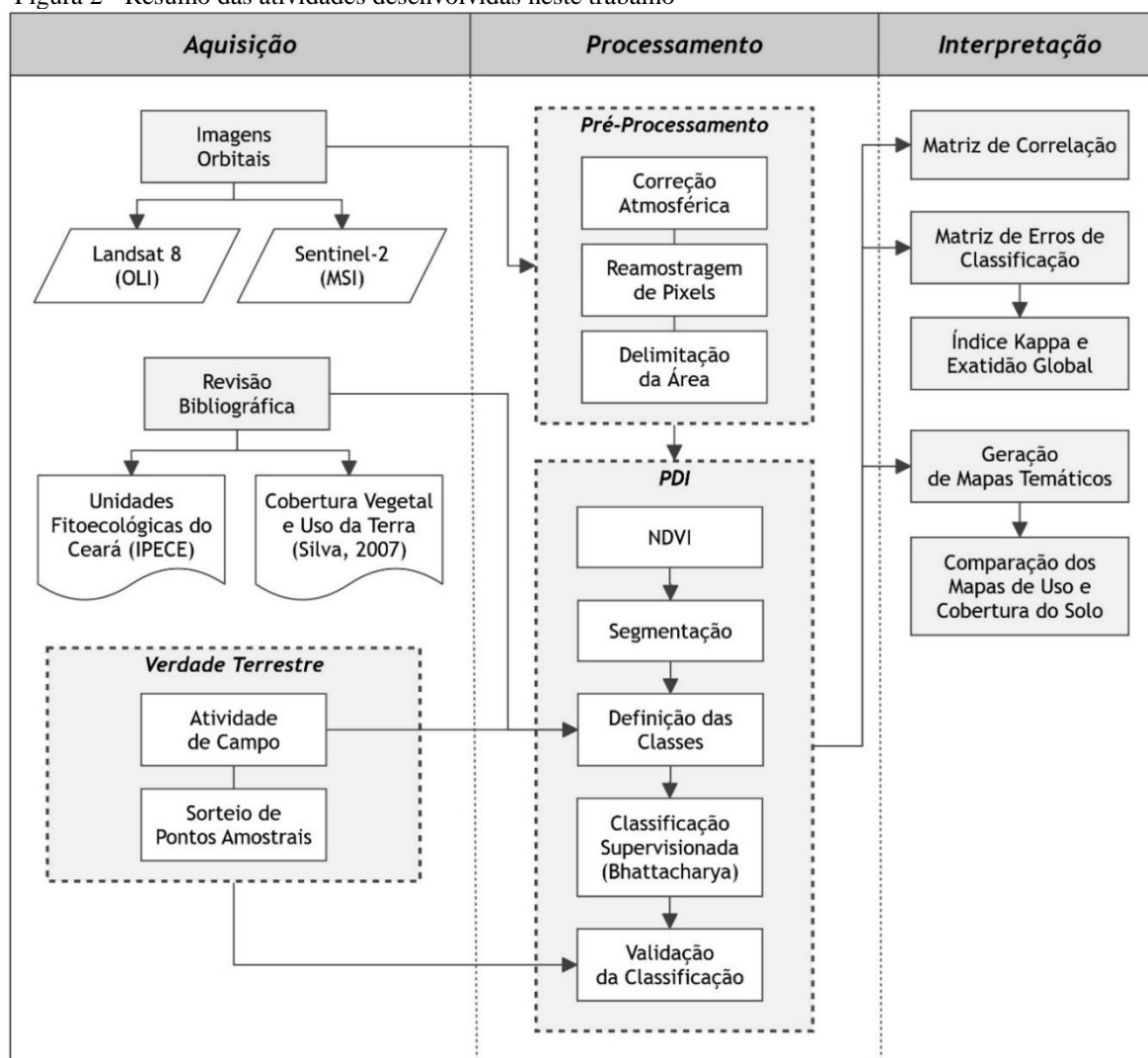
A metodologia desta pesquisa foi desenvolvida em três etapas complementares e encontra-se esquematizada no fluxograma da Figura 2.

A primeira etapa correspondeu à aquisição dos dados, em que houve a revisão bibliográfica, para embasar a pesquisa, e a obtenção das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2 no *site* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2018). Nessa etapa também ocorreram atividades de campo voltadas para o reconhecimento terrestre no intuito de definir as unidades de cobertura e uso da terra utilizadas na classificação supervisionada das imagens. As incursões à área de pesquisa foram realizadas antes e durante o processo de classificação no intuito de eliminar quaisquer dúvidas sobre os alvos das imagens, ou seja,

verificar a compatibilidade entre o que era observado na imagem e o que de fato existia na área de estudo.

Na segunda etapa foi realizado o processamento das imagens orbitais, submetendo-as inicialmente à correção radiométrica através do método de Subtração do Pixel Escuro (DOS, do inglês *Dark Object Subtraction*). Após a correção radiométrica a imagem OLI/Landsat-8 teve seus *pixels* reamostrados de 30 m para 10 m, sem alterar os valores de DN, compatibilizando sua resolução espacial com a do sensor MSI/Sentinel-2 e, assim, permitindo o cálculo de correlação entre os dois conjuntos de dados, pois para realizar tal operação ambas as matrizes analisadas devem ser de igual tamanho. Em seguida, foi processado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de cada imagem, a partir dos quais foi feita a segmentação por crescimento de regiões e classificação supervisionada, com posterior validação.

Figura 2 - Resumo das atividades desenvolvidas neste trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na terceira etapa houve a interpretação dos resultados, visando identificar a correlação entre as imagens NDVI; comparar os produtos das segmentações; avaliar a qualidade das classificações supervisionadas a partir do Índice Kappa e Exatidão Global e comparar os mapas de cobertura e uso da terra gerados a partir da classificação.

### 3.2.1 Materiais

As imagens dos satélites Landsat-8 e Sentinel 2 foram adquiridas georreferenciadas, de forma gratuita, através do site do USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>). A fim de obter imagens com o menor intervalo de dias entre elas, e interferência de nuvens reduzida, foi feita uma pesquisa que resultou nos seguintes produtos com as respectivas datas de aquisição por seus sensores:

- Imagem OLI/Landsat-8 obtida em 30 de setembro de 2017;
- Imagem MSI/Sentinel-2 obtida em 26 de setembro de 2017.

Devido à temática de comparação entre as imagens dos satélites Landsat 8 e Sentinel-2, é importante compreender as diferenças existentes entre os parâmetros dos seus sensores, em especial suas resoluções espacial, espectral e radiométrica. Conforme a Tabela 1, é possível perceber que a diferença entre o tamanho do *pixel* dos produtos analisados é um fator a ser considerado, sendo este aspecto abordado mais à frente.

Tabela 1 - Parâmetros dos sensores OLI/Landsat 8 e MSI/Sentinel-2

Landsat 8 (OLI e TIRS)			Sentinel-2 (MSI)		
Banda	Comprimento de Onda Central (µm)	Resolução Espacial	Banda	Comprimento de Onda Central (µm)	Resolução Espacial
1 - Aerosol	0,443	30 m	1 - Aerosol	0,443	60 m
2 - Azul	0,483	30 m	2 - Azul	0,490	10 m
3 - Verde	0,561	30 m	3 - Verde	0,560	10 m
4 - Vermelho	0,654	30 m	4 - Vermelho	0,665	10 m
5 - NIR	0,864	30 m	5 - Red Edge 1	0,705	20 m
6 - SWIR 1	1,609	30 m	6 - Red Edge 2	0,740	20 m
7 - SWIR 2	2,201	30 m	7 - Red Edge 3	0,783	20 m
8 - Pancromática	0,589	15 m	8A - Red Edge 4	0,865	20 m
9 - Cirrus	1,364	30 m	8 - NIR	0,842	10 m
10 - TIR 1	10,895	100 m	9 - Vapor D'água	0,940	60 m
11 - TIR 2	12,005	100 m	10 - Cirrus	1,375	60 m



11 - SWIR 1	1,610	20 m
12 - SWIR 2	2,190	20 m

Fonte: Adaptada de EMBRAPA e Engesat, (2018).

Os programas utilizados neste trabalho foram: ENVI 5.0 para pré-processamento das imagens, processamento do NDVI e geração de estatísticas; SPRING 5.5.3 para segmentação e classificação supervisionada; e o ArcGIS® 10.5 para validação da classificação e produção dos mapas.

### 3.2.2 Métodos

#### 3.2.2.1 Pré-processamento

Um dos efeitos da atmosfera sobre as imagens orbitais é a redução do contraste entre os objetos de uma dada cena, devido aos fenômenos de espalhamento, absorção e refração da energia eletromagnética, afetando a radiância refletida pela superfície que é captada pelo sensor. Ela também reduz a possibilidade de detecção de pequenos objetos dentro de uma cena, ou de diferenciação entre objetos que apresentem pequenas variações na intensidade de sinal (NOVO, 2008).

Neste contexto, a correção atmosférica de imagens de satélite é feita com a intenção de minimizar os efeitos atmosféricos na radiância de uma cena (SANCHES *et al.*, 2011); e, também, é necessária para o cálculo de índices de vegetação computados a partir de duas ou mais bandas espectrais, visto que elas são afetadas diferentemente pelo espalhamento atmosférico (MATHER, 1999).

Neste trabalho, a correção atmosférica das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2 foi realizada através do programa ENVI 5.0, utilizando processo de Subtração do Pixel Escuro (DOS, do inglês *Dark Object Subtraction*). Os métodos baseados na técnica de subtração dos objetos escuros estimam a interferência atmosférica diretamente da imagem (GÜRTLER *et al.*, 2003). Para efeitos de comparação era essencial que ambas as imagens passassem pelos mesmos processos. Desta forma, o DOS foi escolhido por ser um método compatível aos dois conjuntos de dados, com simples e rápida aplicação.

#### 3.2.2.2 Processamento Digital de Imagens (PDI)

##### 3.2.2.2.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

Segundo Baret e Guyot (1991), os índices de vegetação ressaltam as diferenças entre o solo e a vegetação, como também reduzem a informação espectral de duas bandas em apenas uma, relacionada às características da vegetação (área foliar, biomassa, produtividade, atividade fotossintética e percentagem de cobertura). Rosembach *et al.* (2005) reforçam a importância do uso de imagens NDVI no realce da vegetação em relação aos instrumentos urbanos, água e ao solo exposto.

Neste trabalho, o NDVI foi calculado no programa ENVI 5.0, através da Equação 1, utilizando as bandas do espectro do Vermelho (V) e Infravermelho Próximo (IVP) de cada sensor.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (1)$$

Esta equação gera uma imagem com valores que vão de -1 a +1. Os valores próximos de +1 indicam a presença de vegetação, ou seja, quanto maior o valor do índice, maior será a presença de vegetação. Enquanto os valores próximos a -1 representarão os alvos urbanos, solo exposto e água.

#### 3.2.2.2 Segmentação por Crescimento de Regiões

No processo de segmentação divide-se a imagem em regiões que devem corresponder às áreas de interesse da aplicação. Entende-se por região um conjunto de *pixels* contíguos, que se espalham bidirecionalmente e que apresentam uniformidade. O crescimento de regiões é uma técnica de agrupamento de dados, na qual somente as regiões adjacentes, espacialmente, podem ser agrupadas (INPE, 2004).

As imagens NDVI de cada sensor foram submetidas ao processo de segmentação por crescimento de regiões como uma etapa prévia à classificação supervisionada. Nesta técnica foram utilizados os parâmetros de similaridade e área. A similaridade é o limiar abaixo do qual as regiões são consideradas similares e, conseqüentemente, se adjacentes podem ser agrupadas. O limiar de área é o número mínimo de *pixels* para que uma região seja individualizada.

Durante o processo de segmentação foram testadas as seguintes combinações de limiares de similaridade e área, respectivamente: 5 e 10, 8 e 10, 5 e 15, 8 e 15, 12 e 25, 15 e 25, 25 e 50, 50 e 100. A combinação padrão, com limiar de similaridade igual a 8 e limiar de área igual a 10 *pixels* foi a mais adequada ao mapeamento da área de estudo, significando que a distância Euclidiana entre a média digital de duas regiões na qual são agrupadas é de 8 tons de cinza e a área mínima de 10 *pixels*. Isso indica que a menor área é de 10 *pixels*, ou seja, na

imagem OLI/Landsat-8 corresponde a uma área de 9.000 m<sup>2</sup> (30 m × 30 m × 10) para individualizar regiões espectralmente homogêneas. Enquanto a Imagem MSI/Sentinel-2 corresponde a uma área de 10 m × 10 m × 10, ou 1000 m<sup>2</sup>.

### 3.2.2.2.3 Classificação Supervisionada por Região

Os classificadores por região utilizam, além de informação espectral de cada *pixel*, a informação espacial que envolve a relação com seus vizinhos. Buscam simular o comportamento de um foto-intérprete, reconhecendo áreas homogêneas de imagens, baseados nas propriedades espectrais e espaciais de imagens. A informação de borda é utilizada inicialmente para separar regiões e as propriedades espaciais e espectrais irão unir áreas com mesma textura (INPE, 2004).

A partir do mapa de Unidades Fitoecológicas elaborado pelo IPECE (2018), do mapa de Cobertura Vegetal e Uso da Terra da Serra de Uruburetama proposto por Silva (2007) e de levantamentos feitos em campo foram definidas sete classes temáticas de Cobertura e uso da terra na área de pesquisa (Tabela 2): Mata Úmida; Mata Seca; Caatinga Arbustiva Densa; Caatinga Arbustiva Aberta; Cultivos; Corpos D'água; e Urbano/Solo Exposto. Estas classes subsidiaram a posterior classificação com base nos polígonos gerados pela segmentação em cada produto.

A partir da segmentação por crescimento de regiões, disponível no programa SPRING, foi executada uma classificação supervisionada por regiões, pelo algoritmo de distância Euclidiana denominado *Bhattacharya*, visando extrair as feições de interesse. Este classificador é um algoritmo que permite a interação do analista, que seleciona os polígonos gerados na segmentação, para definir as amostras de treinamento das classes a serem mapeadas.

A classificação *Bhattacharya* utiliza como amostras os polígonos previamente criados no processo de segmentação das imagens NDVI para treinar o classificador, calculando a média e matriz de covariância de cada classe. Em seguida, cada segmento é alocado a uma dessas classes segundo a menor distância de *Bhattacharya*, visando extrair as feições de interesse (BINS, *et al.* 1996; INPE, 2004; MATHER, 2004).

Para a classificação da imagem NDVI, obtida da imagem OLI/Landsat-8, foram selecionadas 561 amostras representativas das sete classes temáticas definidas para o mapeamento. Para classificação da imagem NDVI gerada a partir da imagem MSI/Sentinel-2 foram selecionadas 881 amostras das classes estabelecidas. O número superior de amostras está

relacionado ao fato de a maior resolução espacial desta imagem propiciar a geração de um maior número de segmentos.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados no processamento das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2

<b>Imagens</b>	<b>OLI/Landsat-8</b>	<b>MSI/Sentinel-2</b>
<b>Segmentação</b>	Similaridade = 8 pontos Área ( <i>pixel</i> ) = 10 pontos	
<b>Classes temáticas</b>	Mata Úmida, Mata Seca, Caatinga Arbustiva Densa, Caatinga Arbustiva Aberta, Cultivos, Corpos D'água, Urbano/Solo Exposto.	
<b>Total de amostras (Treinamento)</b>	561	881

Fonte: dados da pesquisa.

### 2.2.2.3 Validação da Classificação Supervisionada

A validação é um procedimento pós-classificatório que visa atestar a qualidade do mapeamento realizado. Para isso foram utilizadas, conforme Congalton (1991), amostras com coordenadas x e y, representativas das classes mapeadas, e que por sua vez correspondem a verdade terrestre.

De acordo com Congalton (1991), para validação em situações que a área de abrangência territorial corresponda até a 4.050 km<sup>2</sup> são necessárias pelo menos 50 amostras para cada classe mapeada.

Devido a extensão da área de estudo foram definidas 50 amostras para cada uma das sete classes, totalizando 350. Essas amostras foram obtidas através de um sorteio randômico a partir da ferramenta *Create Random Points* presente no *software* ArcGIS®.

De acordo com Jensen (2009), existem dois métodos primários para obtenção de informações precisas de coordenadas x e y de um objeto. Um se dá através de medidas de campo utilizando técnicas tradicionais de levantamento topográfico ou instrumentos que utilizam o sistema de posicionamento global (GPS). E o outro ocorre a partir da coleta de dados de sensoriamento remoto do objeto, o registro (retificação) da imagem para um mapa-base, e então a extração das informações de coordenadas x e y diretamente da imagem retificada.

Conforme Chuvieco (1990), os dados de referência para a validação podem ser obtidos a partir de trabalhos de campo ou de documentos auxiliares, como fotografias aéreas e cartas.

Para determinação das classes das amostras de validação na área de pesquisa optou-se por uma imagem orbital de melhor resolução espacial do que as imagens OLI/Landsat-8 e

MSI/Sentinel-2, aplicadas no mapeamento. Nesse intuito foi utilizada uma imagem Geoeye de 2017, com resolução espacial de 0,40 m, para interpretação e identificação dos alvos.

Após esta etapa foi realizado o cruzamento das classes definidas no mapeamento temático com as classes análogas obtidas no levantamento da verdade terrestre a partir da ferramenta *Compute Confusion Matrix* no software ArcGIS®.

Como resultado foi gerada a matriz de erros onde pode-se atestar a qualidade dos mapeamentos realizados a partir dos coeficientes estatísticos Índice Kappa e Exatidão Global.

Segundo Lillesand *et al.* (2004) a matriz de erro, conhecida ainda como matriz de confusão ou tabela de contingência, compara basicamente a relação entre os dados de referência conhecidos e os resultados correspondentes de uma classificação automatizada.

O Índice Kappa é um método estatístico que permite analisar de forma comparativa os resultados dos mapas obtidos por meio do sensoriamento remoto, dentro de certo limite (LANDIS; KOCH,1977).

Conforme Lobão *et al.* (2005), este índice é bastante utilizado para medir a qualidade da classificação e também para quantificar os valores entre os classificadores.

O índice Kappa foi obtido por meio da equação 2:

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^l x_{ii} - \sum_{i=1}^l (x_{i+} + x_{+i})}{n^2 - \sum_{i=1}^l (x_{i+} + x_{+i})} \quad (2)$$

Onde:

$\hat{K}$  = índice de exatidão kappa;  $l$  = nº de linhas da matriz quadrada;  $i$  = nº de observações na linha  $i$  e da coluna  $i$ ;  $e$  = total marginal da linha  $i$  e coluna  $i$ , respectivamente;  $n$  = número total de observações

Conforme pode ser observado na Tabela 3, o resultado obtido pelo índice *Kappa*, varia no intervalo de 0 a 1, sendo que o valor mais próximo a 1 significa a melhor qualidade dos dados classificados.

Tabela 3 - Classes e desempenho do Índice Kappa

Classes do índice	Desempenho
<0	Péssimo
0 - 0,2	Ruim
0,21 - 0,4	Razoável

0,41 - 0,6	Bom
0,61 - 0,8	Muito Bom
0,81 - 1,0	Excelente

Fonte: Adaptado de Landis & Koch (1977).

De acordo com Congalton e Green (1999) a estimativa de acurácia é obtida pela Exatidão Global, que corresponde a razão entre a soma de todos os elementos amostrais classificados corretamente e o número total de elementos, como pode ser verificado na equação 3.

$$EG = \frac{\sum_{i=1}^K X_{ii}}{N} \quad (3)$$

Onde:

$EG$  = índice de exatidão global;  $N$  = nº total de unidades amostrais contempladas pela matriz;  $x_{ii}$  = nº de elementos da diagonal principal corretamente classificados; e  $k$  = nº de categorias analisadas na matriz.

A acurácia pode ser analisada individualmente por meio da análise de erros de omissão e comissão presentes na classificação (CONGALTON; GREEN, 1999). Um erro de omissão ocorre quando um objeto é excluído da classe à qual pertence, enquanto o de comissão ocorre ao incluir um objeto a uma classe que ele não pertença. Na matriz de erros esses valores são obtidos por meio da acurácia do produtor e do usuário, respectivamente (ROVEDDER, 2007).

A acurácia do usuário indica o percentual de acerto da classificação em relação a verdade terrestre. É expressa pela razão entre o número de elementos adequadamente classificados numa dada classe e o total de elementos da mesma classe, como pode ser verificado na equação 4.

$$au = \frac{x_{ii}}{x_{i+}} \quad (4)$$

Onde:

$X_{ii}$  = Número de elementos classificados corretamente;

$X_{i+}$  = Total de elementos classificados para uma classe  $i$ .

A acurácia do produtor representa o percentual de acerto de um polígono ou pixel de referência ter sido corretamente classificado. É expressa pela razão entre o número de elementos classificados corretamente em uma determinada classe pelo número de elementos de referência amostrados para a mesma classe, como pode ser observado na equação 5.

$$ap = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \quad (5)$$

Onde:

X<sub>ii</sub> = Número de elementos classificados corretamente;

X<sub>+i</sub> = Total de elementos classificados para uma classe i.

### 3.3 Resultados e discussão

#### 3.3.1 Correlação entre imagens

No intuito de comparar as imagens OLI/Landsat 8 e MSI/Sentinel-2, a serem aplicadas no mapeamento de Cobertura e uso da terra, foi gerada uma matriz de correlação entre as respectivas imagens NDVI's obtidas, permitindo a análise comparativa entre os produtos dos dois sensores através do coeficiente de correlação de Pearson (r). Este parâmetro estatístico é utilizado para avaliar o grau de correspondência linear entre o NDVI de cada sensor, variando de -1 (correlação negativa perfeita) a +1 (correlação positiva perfeita), como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Valores do coeficiente de correlação de Pearson (r)

Valor da Correlação (r)	Interpretação
0.9 a 1.0 (-0.9 a -1.0)	Correlação positiva (negativa) muito forte
0.7 a 0.9 (-0.7 a -0.9)	Correlação positiva (negativa) forte
0.5 a 0.7 (-0.5 a -0.7)	Correlação positiva (negativa) moderada
0.3 a 0.5 (-0.3 a -0.5)	Correlação positiva (negativa) fraca
0.0 a 0.3 (0.0 a -0.3)	Correlação positiva (negativa) desprezível

Fonte: Adaptado de Mukaka (2012).

Os resultados mostram uma correlação positiva muito forte entre os produtos, evidenciando que, apesar da diferença de resolução espacial entre as imagens, espectralmente elas apresentam uma resposta muito semelhante no geral (Tabela 5). As imagens da série Landsat como um todo já são amplamente conhecidas por suas aplicações ambientais, em



especial na caracterização de Cobertura e uso da terra, vide os trabalhos de Demarchi *et al.* (2011), Freires e Mendes (2012), Nascimento *et al.* (2014), Salis *et al.* (2016) e Almeida *et al.* (2018). Desta forma, este resultado comprova, estatisticamente, que as imagens MSI/Sentinel-2 também podem ser utilizadas para este propósito.

Tabela 5 - Valores de correlação entre os produtos de NDVI dos sensores estudados

Correlação (r)	OLI NDVI	MSI NDVI
OLI NDVI	1.000000	0.956218
MSI NDVI	0.956218	1.000000

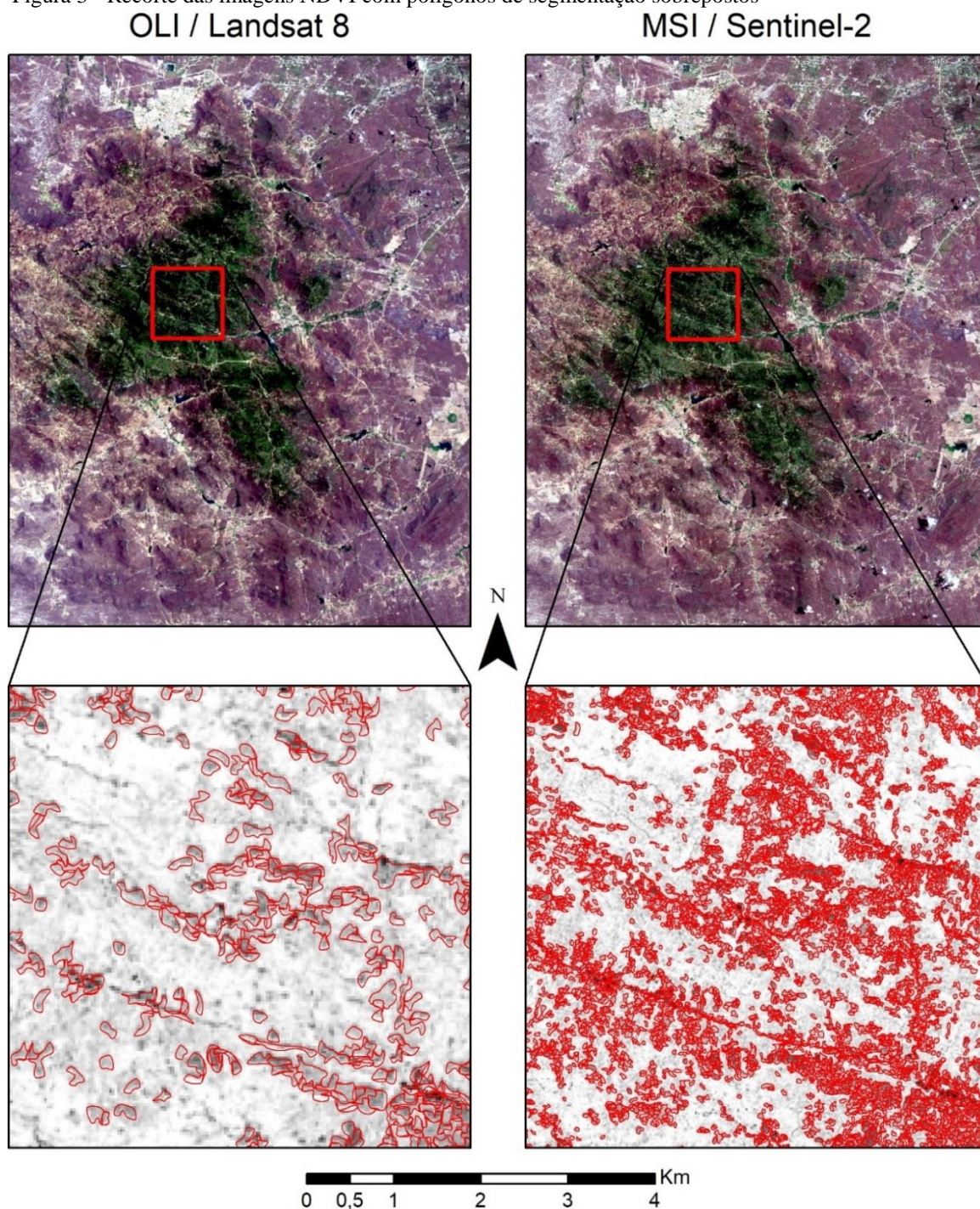
Fonte: Dados da pesquisa.

### 3.3.2 Segmentação das imagens

Verificou-se que a segmentação foi mais efetiva na delimitação dos corpos d'água e na mata úmida, cujas áreas tiveram níveis de cinza mais homogêneos. Nas demais porções, a maior variabilidade de níveis de cinza contribuiu para a heterogeneidade das outras classes temáticas, reduzindo a eficiência do segmentador na geração dos polígonos.

Na Figura 3 são apresentados em traço vermelho os polígonos criados pelos limiares de segmentação definidos, sobrepostos às respectivas imagens NDVI de cada sensor. Um recorte da área total foi utilizado para visualizar o comportamento da segmentação em cada uma das imagens. É possível verificar que a imagem gerada a partir do sensor MSI apresentou maior eficiência na segmentação que o OLI. Visualmente é possível perceber uma maior quantidade de polígonos na imagem oriunda do Sentinel-2, além deles serem consideravelmente menores quando comparados aos gerados a partir do NDVI do Landsat 8. Numericamente, esta discrepância é ainda maior, conforme os dados da Tabela 6, evidenciando que a quantidade de polígonos gerados a partir da imagem MSI/Sentinel-2 é quase oito vezes maior que a OLI/Landsat 8. Além disso, sua área média representa cerca de 12,5% do valor dos polígonos obtidos do NDVI da Landsat 8.

Figura 3 - Recorte das imagens NDVI com polígonos de segmentação sobrepostos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Número de polígonos gerados na segmentação para cada NDVI e suas respectivas áreas médias

Sensor / Satélite	Nº de polígonos	Área média
OLI / Landsat 8	31.861	≅ 55.757 m <sup>2</sup>
MSI / Sentinel-2	252.199	≅ 6.961 m <sup>2</sup>

Fonte: dados da pesquisa



A partir destes resultados, fica evidente o impacto da melhor resolução espacial das imagens MSI/Sentinel-2 na segmentação das classes temáticas definidas, permitindo a melhor definição de alvos que já eram visualizados nas imagens OLI/Landsat 8, porém indo além e conseguindo individualizar inúmeras pequenas manchas relacionadas a áreas com graus variados de intervenção antrópica. Tais porções são relacionadas a áreas de cultivos nas vertentes do maciço, bem como estradas e solos expostos. Alguns exemplos destas áreas podem ser visualizados na Figura 4, onde, com a mudança de perspectiva do observador, é possível identificar fortes intervenções agrícolas em áreas mais restritas que não são bem definidas nas imagens do sensor OLI, cuja menor resolução espacial dificulta a identificação e interpretação destes alvos. Estas constatações reafirmam as colocações de Shimabukuro e Ponzoni (2017), que ponderam a respeito da influência da resolução espacial de um sensor na definição dos alvos. De acordo com os autores, quanto maior a resolução espacial, maiores também as chances de encontrar *pixels* puros. Desta forma, imagens Sentinel-2 têm uma tendência a minimizar a mistura espectral, definindo melhor os alvos desejados

Figura 4 - Manchas de cultivos, delimitadas em traço vermelho, em vertentes no Maciço de Uruburetama



Fotos: Daniel Dantas (Obtidas por ARP, 20/05/2017), Eduardo Freires (20/02/2018 e 25/07/2018).

### 3.3.3 Mapeamento de Cobertura e uso da terra

As Tabelas 7 e 8 apresentam as matrizes de erros de classificações das imagens NDVI geradas a partir das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2. A matriz de erros de classificação mostra a distribuição de porcentagem de *pixels* classificados correta e erroneamente. E por meio dos resultados gerados são calculados o coeficiente Kappa e a Exatidão Global, que indicam a qualidade do mapeamento realizado.

Como pode ser observado na Tabela 7, na classificação da imagem NDVI/Landsat-8, o índice Kappa apresentou o valor de 0,426, o que indica uma boa classificação conforme a tabela de desempenho. Já a exatidão global apresentou um melhor desempenho, com o valor de 0,511, porém verifica-se o baixo percentual de acurácia do usuário e do produtor para as classes caatinga densa, caatinga aberta, urbano/solo exposto, mata seca e cultivos. O que indica um baixo percentual de acerto de classificação em relação a verdade terrestre e também um baixo percentual de acerto de pixel de referência classificado corretamente para essas classes.

Tabela 7 - Matriz de erros de classificação da imagem NDVI/Landsat - 8

Classes	Mata Úmida	Mata Seca	Caatinga Densa	Caatinga Aberta	Urbano/Solo Exposto	Corpos D'água	Cultivos	Total	Acurácia Usuário	Kappa
Mata Úmida	43	0	0	0	1	0	3	47	0.9148	0
Mata Seca	0	17	10	2	9	0	11	49	0.3469	0
Caatinga Densa	0	13	36	7	12	0	7	75	0.48	0
Caatinga Aberta	0	1	8	15	4	0	4	32	0.4687	0
Urbano/Solo Exposto	0	0	1	4	13	7	3	28	0.4642	0
Corpos D'água	0	0	1	0	1	29	0	31	0.9354	0
Cultivos	7	20	4	13	9	9	26	88	0.2954	0
Total	50	51	60	41	49	45	54	350	0	0
Acurácia Produtor	0.86	0.3333	0.6	0.3658	0.2653	0.6444	0.4814	0	<b>0.5114</b>	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0.4262</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

Tal fato pode estar relacionado a grande dificuldade do operador em discernir numa imagem OLI/Landsat-8 os diferentes extratos vegetacionais, que não apresentam faixas de transições nítidas e, em alguns casos, respostas distintas em virtude da mistura espectral. Soma-se a isso as práticas agrícolas, com o corte da vegetação e plantio de variados cultivos, com diferentes fisionomias, que contribuem para dificultar a interpretação dos alvos.

A Classificação obtida a partir da imagem NDVI/Sentinel-2 obteve um índice Kappa de 0.883 e a exatidão global de 0.857, atestando uma excelente classificação conforme a tabela de desempenho. Conforme pode ser observado na Tabela 08, tanto a acurácia do usuário quanto do produtor apresentou percentuais altos, demonstrando, respectivamente, a compatibilidade da classificação com a verdade terrestre e os pixels de referência classificados corretamente. O melhor resultado obtido a partir da imagem MSI/Sentinel-2 indica que sua melhor resolução espacial permitiu inferir e/ou distinguir com maior precisão os alvos. O que também diminuiu possíveis confusões entre classes pelo algoritmo de classificação.

Tabela 8 - Matriz de erros de classificação da imagem NDVI/Sentinel-2

Classes	Mata Úmida	Mata Seca	Caatinga Densa	Caatinga Aberta	Urbano/Sol. Exposto	Corpos D'água	Cultivos	Total	Acurácia Usuário	Kappa
Mata Úmida	46	1	1	0	0	0	0	48	0.9583	0
Mata Seca	0	45	2	0	0	1	1	49	0.9183	0
Caatinga Densa	0	1	46	1	0	0	3	51	0.9019	0
Caatinga Aberta	0	0	2	40	2	0	5	49	0.8163	0
Urbano/Solo Exposto	0	0	5	0	40	1	5	51	0.7843	0
Corpos D'água	0	0	2	0	4	43	0	49	0.8775	0
Cultivos	4	4	2	0	3	0	40	53	0.7547	0
Total	50	51	60	41	49	45	54	350	0	0
Acurácia Produtor	0.92	0.8823	0.7666	0.9756	0.8163	0.9555	0.7407	0	<b>0.8571</b>	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0.8332</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

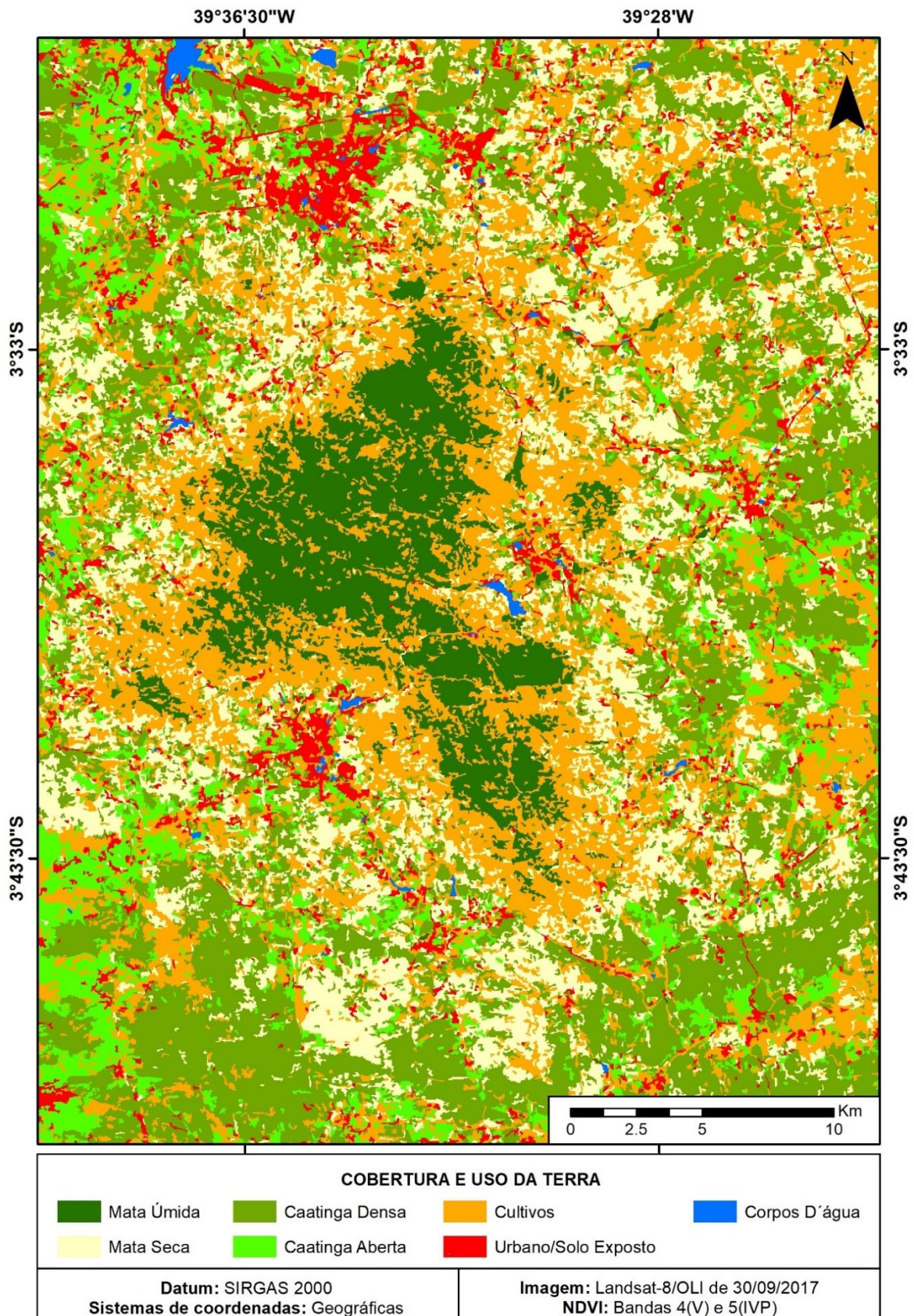
As Figuras 5 e 6 apresentam os mapas gerados a partir da classificação supervisionada por crescimento de regiões das imagens NDVI obtidas das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel 2, respectivamente.

Ao observar as classes de Cobertura e uso da terra desses mapas, é possível identificar uma certa compatibilidade na distribuição espacial das classes temáticas. Contudo, como pode ser verificado na Tabela 9, que traz um comparativo das áreas das classes mapeadas de ambas as imagens, as unidades de Cobertura e uso da terra apresentaram algumas variações na extensão de suas áreas. Essas desconformidades na extensão das áreas das classes de uso de cobertura do solo estão relacionadas às diferentes resoluções espaciais das imagens das quais foram obtidas.



Figura 5 - Mapa de Cobertura e uso da terra gerado a partir da imagem NDVI/Landsat-8

### MAPA DE COBERTURA E USO DA TERRA (NDVI - OLI/LANDSAT-8)

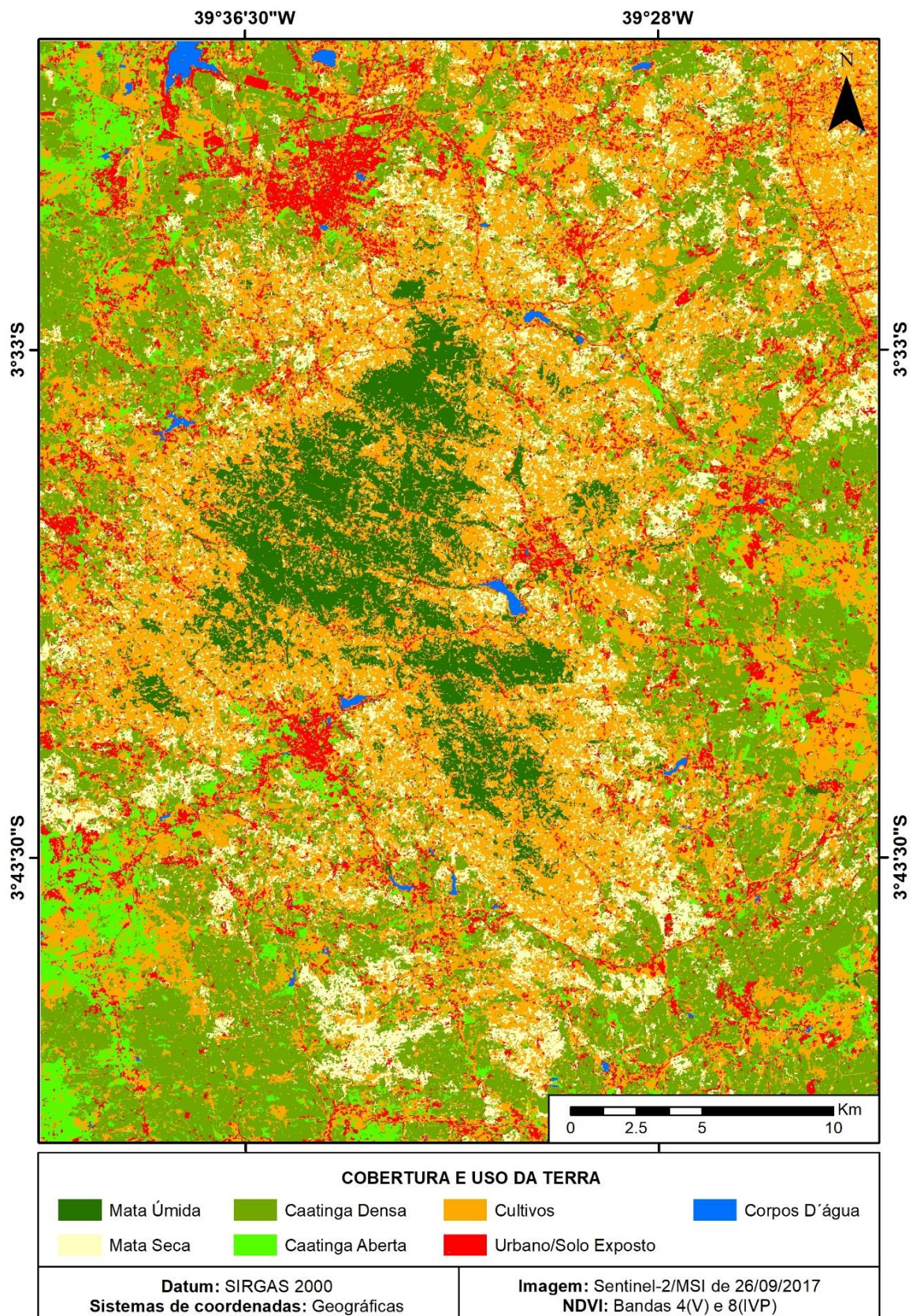


Fonte: elaborado pelo autor.



Figura 6 - Mapa de Cobertura e uso da terra gerado a partir da imagem NDVI/Sentinel-2

### MAPA DE COBERTURA E USO DA TERRA (NDVI - MSI/SENTINEL-2)



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Comparação das áreas das unidades de Cobertura e uso da terra

<b>Classes de Cobertura e Uso da Terra</b>	<b>OLI / Landsat 8</b>	<b>MSI / Sentinel-2</b>
<b>Mata Úmida</b>	109,311592	93,291866
<b>Mata Seca</b>	278,722946	166,630904
<b>Caatinga Densa</b>	374,074262	352,264876
<b>Caatinga Aberta</b>	118,684344	76,257872
<b>Urbano/solo exposto</b>	74,273088	126,917904
<b>Corpos D'água</b>	5,856381	5,663893
<b>Cultivos</b>	384,041266	523,936564
<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>	1344,963879	1344,963879

Fonte: dados da pesquisa.

A diferença de resolução espacial das imagens contribui para respostas espectrais distintas. Conforme Shimabukuro e Ponzoni (2017), os objetos refletem, transmitem e absorvem a radiação eletromagnética incidente de maneira particular. Cada objeto contido dentro de um elemento de resolução no terreno irá refletir mais ou menos do que outro dentro de uma determinada faixa espectral. Consequentemente, o valor de radiância efetivamente medido em uma determinada faixa espectral será fortemente influenciado pelo objeto que refletir mais intensamente nessa mesma faixa espectral. Desta forma, sensores que apresentem produtos com uma forte correlação positiva, mas que apresentem relativa diferença entre suas resoluções espaciais, que é o caso da comparação entre OLI/Landsat 8 e MSI/Sentinel-2, podem apresentar distorções quanto às unidades de Cobertura e uso da terra detectadas, justamente pela melhor capacidade de definição dos alvos do sensor MSI, sendo capaz de diferenciar duas ou mais classes numa mesma área, o que no sensor OLI seria somente uma espécie de alvo.

Ao analisar o mapa gerado da imagem MSI/Sentinel 2 em conjunto com a Figura 7 é possível verificar que as classes Urbano/Solo exposto e Cultivos apresentaram maior extensão que as mesmas classes do mapa gerado a partir da imagem OLI/Landsat-8. Essa maior abrangência decorre do fato da resolução da imagem MSI/Sentinel-2 permitir ao classificador individualizar e identificar com maior precisão áreas como Urbano/Solo exposto e Cultivos do que na imagem OLI/Landsat-8, com menor resolução espacial. Neste caso, a segmentação, que antecede a classificação, gera polígonos maiores, cuja abrangência individualizam classes em detrimento de outras. Assim, no mapa gerado a partir imagem OLI/Landsat-8 verifica-se maior

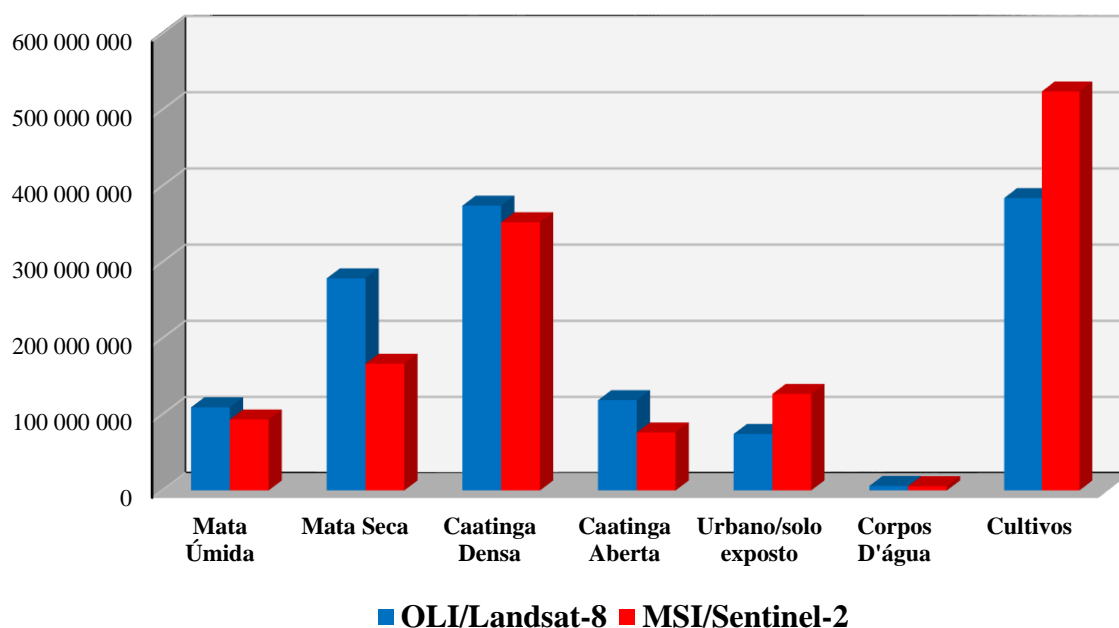


ocorrência das demais unidades de Cobertura e uso da terra: Mata Úmida, Mata Seca, Caatinga Aberta, Caatinga Densa.

Essas variações de áreas das classes de Cobertura e uso da terra podem ser visualizadas nos mapas temáticos. No mapa gerado a partir da imagem MSI/Sentinel-2 observa-se que a unidade Urbano/Solo Exposto, na cor vermelha, está mais disseminada, sendo possível identificar com maior clareza o delineamento das estradas. Assim como é possível perceber uma maior distribuição da Classe Cultivos, na cor laranja, que devido a melhor resolução se individualiza e “incorpora” as áreas de outras unidades temáticas. O que fica claro pela diferença observada na classe Mata Úmida dos dois mapas temáticos.

Figura 7 - Comparação entre as áreas das unidades de Cobertura e uso da terra obtidas a partir da classificação das imagens NDVI, geradas das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2

### Comparação entre as Classes de Cobertura e Uso da Terra



Fonte: dados da pesquisa.

No tocante às aplicações das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2 no mapeamento de cobertura e uso da terra, compreende-se que ambas apresentaram resultados satisfatórios, que são atestados pelos coeficientes Kappa e exatidão global. Porém, em virtude da extensão da área mapeada, representada numa escala de 1:200.000, verifica-se um melhor desempenho da imagem MSI/Sentinel-2, por permitir maior distinção entre os alvos e maior detalhamento das áreas mapeadas, chegando a uma representação mais condizente com a

realidade observada. O que sugere a possibilidade de seu emprego tanto em estudos em escala de análise regional, como também em aplicações que demandem maiores escalas de representação cartográfica. Já a imagem OLI/Landsat-8, apesar do resultado apresentado, demonstrou ser mais adequada a estudos com menores níveis de detalhes, ou com alvos mais homogêneos.

### 3.4 Conclusões

Ao comparar a aplicação das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2 no mapeamento de cobertura e uso da terra da vertente úmida do Maciço de Uruburetama, verificou-se, a partir do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, que as cenas apresentaram alta correlação.

Os mapeamentos de cobertura e uso da terra, gerados a partir dos NDVI's, obtidos das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2, apresentaram resultados satisfatórios, que foram atestados pelo procedimento de validação das classificações supervisionadas pelo algoritmo *Bhattacharya*. A classificação da imagem NDVI/Landsat-8 apresentou índice Kappa de 0,426 e exatidão global de 0,514, indicando um bom desempenho. Enquanto a classificação da imagem NDVI/Sentinel-2 apresentou índice Kappa de 0,833 e exatidão global de 0,857, que atesta uma excelente classificação.

Quando comparados visualmente, os mapeamentos apresentaram semelhanças na distribuição espacial das classes temáticas. Porém, foi possível verificar incompatibilidade das áreas dessas classes. Fato que está relacionado com a resposta espectral dos alvos mapeados em função da resolução espacial de cada cena. A imagem MSI/Sentinel-2 permitiu, a partir da classificação supervisionada, maior detalhamento das classes Urbano/Solo exposto, Corpos D'água e Cultivos, enquanto a imagem OLI/Landsat-8 gerou as classes Mata Úmida, Mata Seca, Caatinga Densa e Caatinga Aberta com maior abrangência que a anterior.

Quando se trata da aplicação dessas imagens no mapeamento de cobertura e uso da terra, compreende-se que ambas apresentaram resultados satisfatórios. No entanto, considerando a extensão da área de análise dessa pesquisa, e a sua respectiva escala de representação, compreende-se que a imagem MSI/Sentinel-2, devido a sua melhor resolução espacial, permite um maior detalhamento dos alvos, e maior acurácia na classificação. O que possibilita o seu emprego tanto nos estudos em escala regional, como em aplicações que demandem maiores escalas de representação cartográfica. Por sua vez, a imagem OLI/Landsat-8, demonstrou ser mais adequada a estudos com menores níveis de detalhes, ou com alvos mais

homogêneos. Sendo muitas vezes necessário trabalhar com um número menor de classes temáticas no intuito de reduzir os erros de classificação e conseqüentemente garantir um mapeamento mais compatível com a verdade.

### 3.5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) e a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento, Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio para realização dessa pesquisa.

### Referências

Almeida, R.F.B.; Júnior, L.G.F. & Bayer, M. 2018. Análise da cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do Rio do Coco e suas implicações sobre as áreas de preservação permanente como instrumento na gestão dos recursos hídricos. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 49: 60-82.

Baret, F. & Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35 (2 e 3): 161-173.

Bins, L.S.; Fonseca, L.M.G.; Erthal, G.J. & Li, F.M. 1996. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 8, Salvador, 1996. *Artigos completos*, São José dos Campos, INPE, p.677-680.

Chuvieco, E. 1990. *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid, Unigraf. 453 p.

Congalton, R.G. A 1991. A review of assessing the accuracy classificatons of remotely sensed data. *Remote Sensing Environment*, 37: 35-46.

Congalton, R.G. & Green, K. 1999. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: principles and practices*. New York, Lewis Publishers. 137 p.

Demarchi, J.C.; Piroli, E.L. & Zimback, C.R.L. 2011. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo-SP usando imagens LANDSAT-5. *RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise*, 21: 234-271.

Freires, E.V. & Mendes, L.M.S. 2012. Análise da cobertura vegetal do município de Maracanaú/CE dos anos de 1991 e 2006. *GeoUECE*, 1 (1): 44-55.

Gürtler, S.; Luiz, A.J.B. & Epiphanyo, J.C.N. 2003. Uniformização de imagens Landsat para previsão de safras agrícolas. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 11, Belo Horizonte, 2003. *Artigos completos*, São José dos Campos, INPE, p. 109-116.

INPE. SPRING, Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas: *manual de ajuda*. São José dos Campos: INPE, 2004.

IPECE, Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Ceará em Mapas: Mapa das Unidades Fitoecológicas do Ceará. 1 mapa: 21x29,7 cm. Em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/>>. Acesso em: 30 mai. 2018.

JENSEN, R.J. 2009. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos, Parêntese. 585 p.

Landis, J.R. & Koch, G.G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33 (1): 159-174.

Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. & Chipman, J.W. 2004. *Remote sensing and interpretation*. 5ed. Madison, Wiley. 763 p.

Lobão, J.S. B.; França-Rocha, W.J.S. & Silva, A.B. 2005. Aplicação dos índices Kappa & PABAK na validação da classificação automática de imagem de satélite em Feira de Santana - BA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, Goiânia, 2005. *Artigos completos*, São José dos Campos, INPE, p. 1207-1214.

Mukaka, M.M. 2012. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, 24 (3): 69-71.

Mather, P.M. 2004. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. Chichester, John Wiley & Sons. 324 p.

Nascimento, S.S.; De Lima, E.R.V. & De Lima, P.P.S. 2014. Análise Temporal da degradação da Caatinga Na Sub-Bacia Do Alto Paraíba. *Okara: Geografia em debate*, 8 (1): 72-94.

Novo, E.M.L.M. 2008. *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações*. São Paulo, Blucher. 363 p.

Rosembach, R.; França, A.M.S. & Florenzano, T.G. 2005. Análise comparativa dos dados NDVI obtidos de imagens CCD/CBERS-2 e TM/LANDSAT-5 em área urbana. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, Goiânia, 2005. *Artigos completos*, São José dos Campos, INPE, p. 1075-1082.

Rovedder, J. 2007. *Validação da classificação orientada a objetos em imagens de satélite Ikonos II e elaboração de indicadores ambientais georreferenciados no município de Torres, planície costeira do Rio Grande do Sul, Brasil*. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, 83p

Salis, H.H.C.; Costa, A.M. & Viana, J.H.M. 2016. Análise do uso e ocupação do solo nas APP de curso d'água da bacia do córrego Marinheiro por meio de NDVI aplicado em imagens Landsat 8 e Ikonos-II. *Geografias*, 22: 40-53.

Sanches, I.D.A.; Andrade, R.G.; Quartaroli, C.F. & Rodrigues, C.A.G. 2011. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 – TM para obtenção de reflectância de superfície e NDVI. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, Curitiba, 2011. *Artigos completos*, São José dos Campos, INPE, p. 7564-7571.

Shimabukuro, Y.E. & Ponzoni, F.J. 2017. *Mistura Espectral: modelo linear e aplicações*. São Paulo, Oficina de Textos. 127 p.

Silva, M.V.C. 2007. *Análise Geoambiental: subsídios ao planejamento agrícola da Serra de Uruburetama – Ce*. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Dissertação de Mestrado, 191p.

USGS, 2018. **United States Geological Survey**. Em: < <http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 5 mai. 2018.

#### **4 CAPÍTULO IV - ANÁLISE DA VULNERABILIDADE NATURAL A PERDA DE SOLOS NA VERTENTE ÚMIDA DO MACIÇO DE URUBURETAMA/CE**

O artigo “Análise da vulnerabilidade natural a perda de solos na vertente úmida do Maciço de Uruburetama/CE” foi submetido para análise e publicação ao periódico *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, da Universidade Federal de Pernambuco, no dia 6 de julho de 2019. A revista apresenta versão online com ISSN 2237-2202. O artigo foi publicado em dezembro de 2019 no volume 9, número 3, p. 116-130, DOI: 10.29150/jhrs.v9.3.p116-130. O texto apresentado segue a mesma estrutura exigida pelo periódico.

O objetivo desse artigo é analisar a vulnerabilidade natural a perda de solos na vertente úmida o Maciço de Uruburetama/CE a partir das variáveis geomorfométricas extraídas do MDE ALOS PALSAR.

## **Analysis of the natural vulnerability of soil loss in the Uruburetama Massif/CE**

---

### **Abstract**

Knowledge of the physical characteristics of a given environment is essential to ensure the effective management of natural resources. In this sense, the survey of morphometric variables is fundamental to guide land use planning. This work evaluated the natural vulnerability to soil degradation of the Uruburetama Massif humid hillside, using as evaluation support the morphometric variables extracted from the ALOS PALSAR Digital Elevation Model (DEM). For this, the slope, slope orientation, horizontal and vertical curvature variables were integrated in GIS environment, from a multicriteria analysis, where weights were established in percentages for each variable and grades from 0 to 10 for their respective thematic classes. From the natural vulnerability to soil loss map generated, it was found that practically all slopes of the humid hillside of the massif have medium to very high vulnerability. The slopes of the east, north and, especially, northeastern oriented massif showed the highest occurrence of high and very high vulnerability. The very low and low vulnerability classes are mainly distributed in the area surrounding the wetland, which corresponds to the backwoods depression, and in sectors of some valleys, where the process of pedogenesis is superior to morphogenesis. The map of natural vulnerability to soil degradation is an important instrument for environmental planning, serving as a support for orientation and supervision of use and occupation, in order to reduce damage and ensure sustainable agricultural development.

Keywords: DEM, ALOS PALSAR, geomorphometric variables, GIS.

### **Análise da vulnerabilidade natural à perda de solos da vertente úmida do Maciço de Uruburetama/CE**

#### **Resumo**

O conhecimento das características físicas de determinado ambiente é imprescindível para garantir a gestão dos recursos naturais de forma eficaz. Nesse sentido, o levantamento das variáveis morfométricas é fundamental para orientar o ordenamento do uso ocupação do solo. Diante do exposto, esse trabalho avaliou a vulnerabilidade natural à perda de solos da vertente úmida do Maciço de Uruburetama/CE, tendo como suporte de avaliação as variáveis morfométricas extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS PALSAR. Para isso as variáveis declividade, orientação das vertentes, curvatura horizontal e vertical foram integradas em ambiente SIG, a partir de uma análise multicritério, onde foram estabelecidos pesos em percentuais para cada variável e notas de 0 a 10 para suas respectivas classes temáticas. A partir do mapa de vulnerabilidade natural à perda de solos gerado, constatou-se que praticamente todas as encostas da vertente úmida do maciço apresentam vulnerabilidade média a muito alta. As vertentes do maciço com orientação leste, norte e, sobretudo, nordeste apresentaram maior ocorrência de vulnerabilidade alta e muito alta. As classes de vulnerabilidade muito baixa e baixa se distribuem principalmente na área de entorno da vertente úmida, que corresponde a depressão sertaneja, e em setores de alguns vales, onde o processo de pedogênese é superior a morfogênese. O mapa de vulnerabilidade natural à perda de solos é um importante instrumento para o planejamento ambiental, servindo como suporte para orientação e fiscalização de uso e ocupação, no intuito de reduzir os danos e garantir o desenvolvimento agrícola sustentável.

Palavras-chave: MDE, ALOS PALSAR, variáveis geomorfométricas, SIG.

---



## 4.1 Introdução

A erosão dos solos é um fenômeno natural que modela a superfície da Terra. Esse fenômeno atua com maior intensidade em paisagens que possuam algum tipo de declividade, geralmente superior a 3°. A erosão do solo pode ser dividida em natural e antrópica. A erosão natural é um fenômeno que compõe o processo de formação dos solos ao longo do tempo, enquanto que a erosão antrópica, também conhecida por erosão acelerada, é responsável por sua degradação.

Os problemas resultantes da erosão antrópica dos solos são: remoção de nutrientes; redução da penetração das raízes e do armazenamento de água; perda de áreas úteis para fins agropecuários; aumento do assoreamento dos corpos d'água e a consequente poluição dos recursos hídricos pelo transporte de defensivos agrícolas (JORGE; GUERRA, 2013).

As variações nas taxas de erosão são determinadas pela interação dos seguintes fatores controladores: erosividade da chuva; erodibilidade do solo; cobertura vegetal; e características das encostas. Ainda, as intervenções humanas podem alterar esses fatores por meio de adoção de práticas agrícolas adequada, ou ausência delas, contribuindo para acelerar ou retardar os processos erosivos (GUERRA, 2005).

Os fatores relacionados às características das encostas podem afetar a estabilidade dos solos de diferentes maneiras, seja pela declividade ou pelo comprimento e forma da encosta (Guerra, 2005). As características geométricas do relevo, tais como: convexas, côncavas e retilíneas, que resultam da ação de processos erosivos e/ou deposicionais no tempo, igualmente condicionam a espacialização de processos subsequentes. Entre o topo e o fundo do vale transitam sedimentos e diversos elementos dentríticos ou solúveis, por meio de mecanismos associados a água, ao vento ou ao gelo, em interação com as forças da gravidade (COELHO NETTO, 2005).

A vertente, que representa a conexão dinâmica entre o interflúvio e o fundo do vale, poderá ter suas formas originais e antropogênicas reconhecidas para determinação de limiares no jogo de forças entre resistência e destruição (DYLIK, 1968).

De acordo com Loureiro e Ferreira (2013), o conhecimento da dinâmica dos processos erosivos e dos fatores condicionantes dos movimentos de massa é de extrema relevância para um planejamento e gestão ambiental eficazes, já que a compreensão da gênese e a abrangência desses fenômenos se fazem essenciais para mitigar as perdas materiais e humanas que eles geram.

Nesse sentido, conhecer as variáveis físicas que controlam a dinâmica sedimentar de determinado ambiente é imprescindível para orientar as atividades agrícolas e a ocupação do solo, com vista a garantir a sustentabilidade e a reduzir os riscos associados às intervenções humanas.

Diante do fato exposto, esta pesquisa avaliou a vulnerabilidade natural a perda de solos da vertente úmida do Maciço de Uruburetama, no estado do Ceará, tendo como suporte para avaliação as variáveis morfométricas (declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal e orientação das vertentes) derivadas do Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado a partir de imagens orbitais do sensor ALOS PALSAR.

## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Caracterização da área de estudo

A serra de Uruburetama está localizada na porção setentrional do estado do Ceará, distante 100 km da capital, Fortaleza. Trata-se de um maciço residual montanhoso em formato circular com um pequeno alongamento na direção E-W (BRANDÃO e FREITAS, 2014). Esse maciço é extremamente dissecado em colinas e cristas, possui vales superimpostos, em formato de V, dispostos de forma paralela com orientação NW-SE (BRANDÃO, 2003). A porção úmida/subúmida da serra corresponde às encostas norte-oriental e à superfície de cimeira (platô da serra). O maciço é fortemente tectonizado e intensamente fraturado, em que em muitos casos, a rede de drenagem se adapta a essas estruturas (SOUZA; OLIVEIRA, 2006).

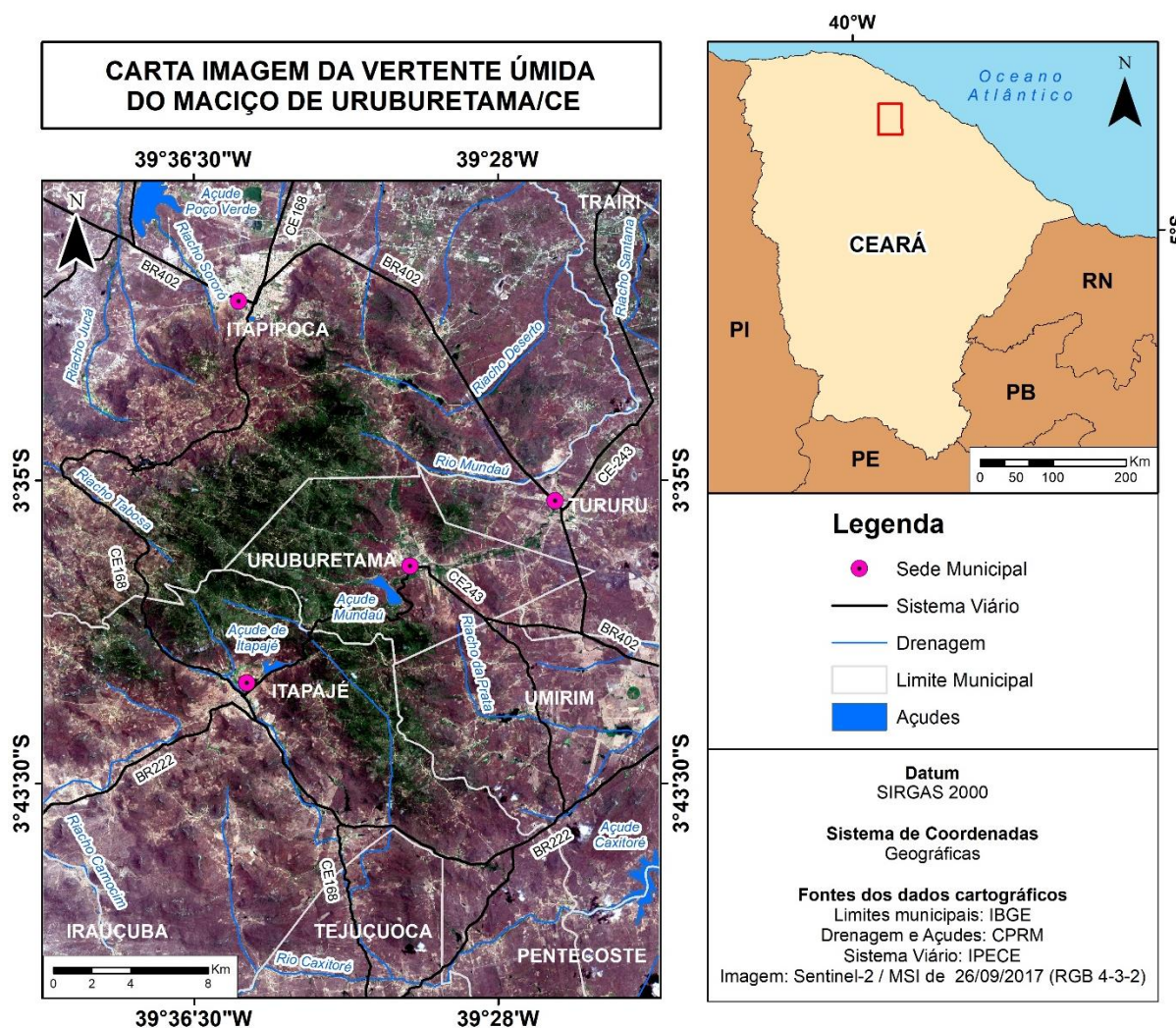
A área de estudo compreende a vertente úmida da serra de Uruburetama e adjacências, totalizando 1.342,73 km<sup>2</sup>. Como pode ser observado na Tabela 1 e na Figura 1, ela está inserida, em diferentes proporções, dentro do limite administrativo de nove municípios do estado do Ceará, que são: Irauçuba, Itapajé, Itapipoca, Pentecoste, Tejuçuoca, Trairi, Tururu, Umirim e Uruburetama.

Tabela 1. Proporção de abrangência dos municípios na área de estudo

<b>Municípios</b>	<b>Área abrangida em Km<sup>2</sup></b>	<b>Percentual de área</b>
Irauçuba	21,42	1,60%
Itapajé	379,85	28,29%
Itapipoca	503,22	37,48%
Pentecoste	21,55	1,61%
Tejuçuoca	61,30	4,57%
Trairi	2,02	0,15%
Tururu	119,71	8,92%
Umirim	136,66	10,18%
Uruburetama	97,00	7,22%
<b>Total</b>	<b>1342,73</b>	<b>100%</b>

Fonte: IBGE (2018).

Figura 1 – Localização da vertente úmida da serra de Uruburetama, na região norte do estado do Ceará



Fonte: elaborado pelo autor.

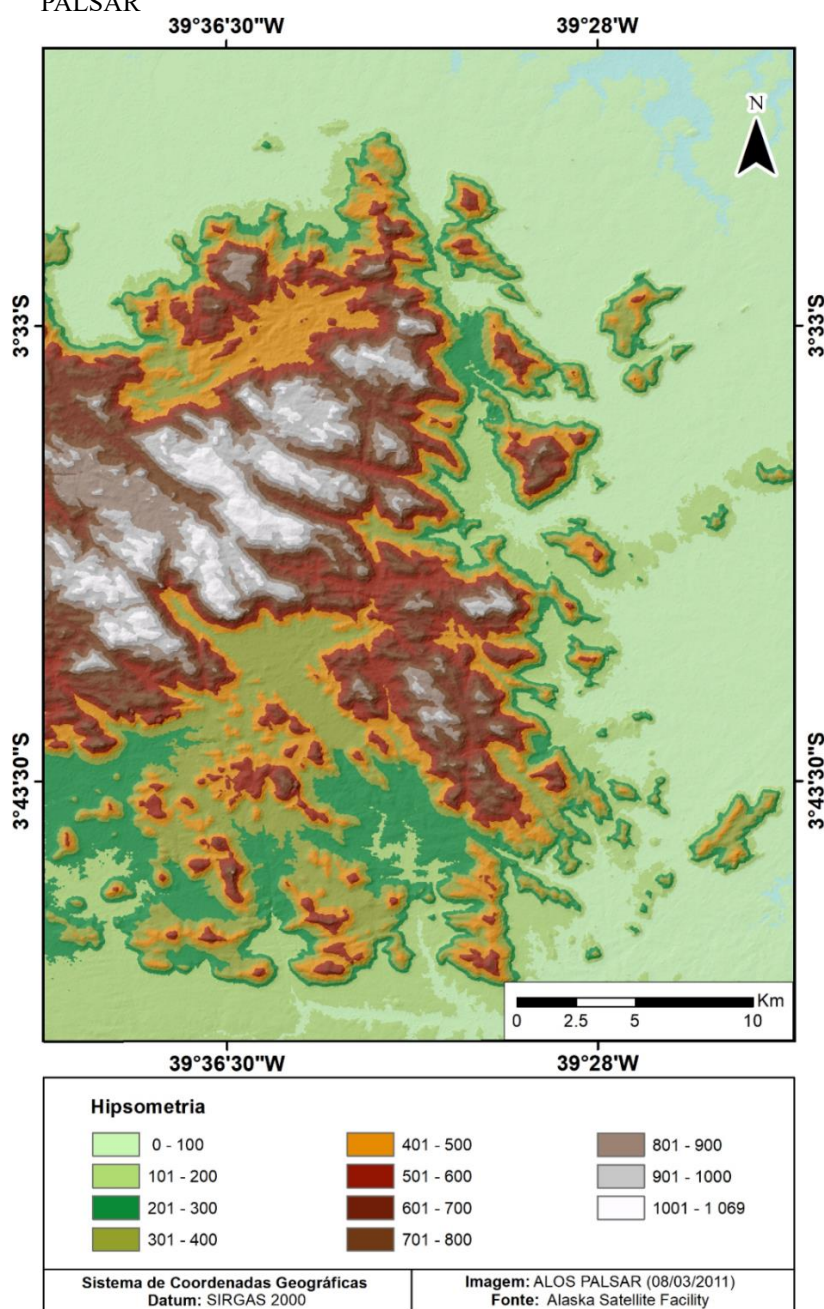
#### 4.2.2 Materiais

Para análise da vulnerabilidade natural à perda de solos no Maciço de Uruburetama foi utilizada como suporte de avaliação uma cena do sensor ALOS PALSAR, órbita absoluta 27262, frame 7110, com resolução espacial de 12,5m, disponibilizado na base de dados do *Alaska Satellite Facility*, da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA). A cena foi imageada pelo sensor em 8 de março de 2011 (Figura 2). Dentre os Modelos Digitais de Elevação gratuitos a imagem ALOS PALSAR se destaca em virtude de sua maior resolução espacial. As imagens ASTER-GDEM e SRTM por exemplo, com grande empregabilidade em estudos ambientais, possuem resolução espacial de 30 m. Além disso, conforme Becek (2014), as avaliações de precisão indicam que o MDE ALOS é mais preciso que os demais modelos gratuitos de abrangência global disponível. Duarte *et al.* (2019), ao comparar a precisão vertical

entre os três modelos mencionados, constataram que a imagem ALOS foi a que apresentou melhor resultado na delimitação de uma bacia hidrográfica na Amazônia.

O *software* ArcGIS® 10.3.1 foi empregado no processamento da imagem; e, subsidiariamente, os arquivos vetoriais dos limites municipais e das unidades federativas, bem como os de hidrografia, rodovias e sedes municipais foram obtidos nos sítios eletrônicos, respectivamente, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Figura 2 – Hipsometria da vertente úmida da serra de Uruburetama, na região norte do estado do Ceará elaborado a partir do MDE ALOS PALSAR

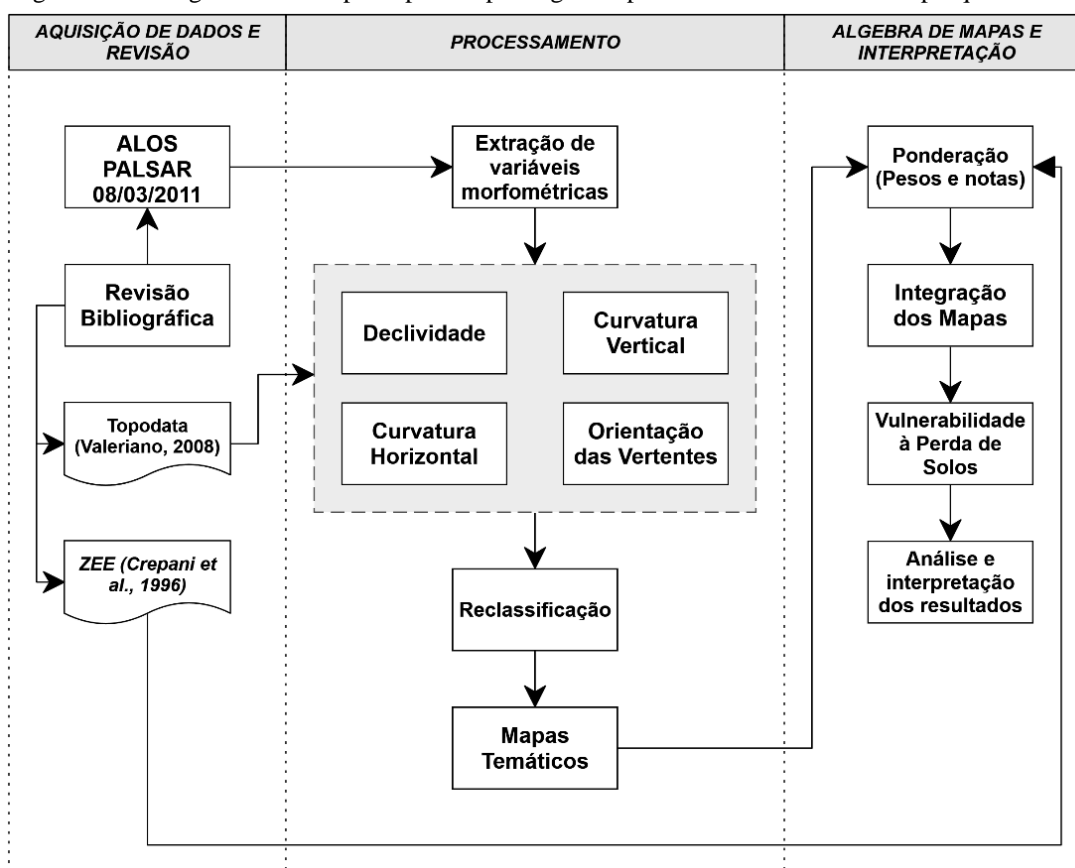


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.2.3 Métodos

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas (Figura 3). A primeira etapa consistiu na obtenção da cena do sensor ALOS PALSAR e na revisão bibliográfica. A obtenção das variáveis morfométricas deu-se conforme metodologia descrita por Valeriano (2008) a partir do modelo digital de elevação. Para análise multicritério foi utilizado como referência Crepani *et al.* (1996), que atribuíram valores de estabilidade (1 a 3) às categorias morfodinâmicas estabelecidas na ecodinâmica de Tricart (1977): meios estáveis, meios intergrades e meios instáveis, como pode observado na Tabela 2.

Figura 3 – Fluxograma com as principais etapas seguidas para o desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas

<b>Categoria morfodinâmica</b>	<b>Relação morfogênese pedogênese</b>	<b>Valor</b>
Estável	Prevalece a pedogênese	1
Intermediária	Equilíbrio pedogênese/morfogênese	2
Instável	Prevalece a morfogênese	3

Fonte: Crepani *et al.* (1996).

Crepani *et al.* (1996) estabeleceram 21 classes de vulnerabilidade a perda de solos dentro do intervalo de 1 a 3. Estas classes estão distribuídas em situações onde há o predomínio dos processos de pedogênese (às quais se atribuem valores próximos de 1,0), passando por quadros intermediários (às quais se atribuem valores próximos de 2,0), até situações de predomínio dos processos de morfogênese (às quais se atribuem valores próximos de 3,0). Nesse sentido, os valores propostos diminuem conforme a maior estabilidade dos solos e aumentam em decorrência de sua maior instabilidade.

Na segunda etapa houve o processamento do MDE ALOS PALSAR visando a extração de variáveis morfométricas (declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal e orientação das vertentes) a partir da ferramenta *Spatial Analyst* do software ArcGIS® 10.3.1. Em seguida, foram definidas as classes temáticas das variáveis, e posteriormente, com o objetivo de transformar os intervalos dessas classes para valores inteiros, foi realizada uma reclassificação.

A terceira e última etapa correspondeu à álgebra de mapas realizada a partir da análise multicritério com a ferramenta *Weighted Overlay*. Nesta etapa, como pode ser observado na Tabela 3, para cada variável analisada foram estabelecidos pesos em percentuais conforme o grau de importância para o fenômeno analisado (erosão e movimento de massa), totalizando 100%. Adaptando a metodologia de Crepani *et al.* (1996), foram definidas notas de 1 a 10 para as classes de cada variável mapeada, conforme a relevância assumida no evento deflagrado. Para esta pesquisa foram adotados valores inteiros de 1 a 10 em conformidade com as pesquisas de Brandão (2003) e Carmo *et al.* (2015).

Os mapas temáticos das variáveis morfométricas, com seus respectivos pesos e notas, foram submetidos a álgebra de mapas a partir da Equação 1.

$$V = d * 0,35 + cv * 0,30 + ch * 0,20 + ov * 0,15 \quad (1)$$

Em que:  $V$  corresponde à vulnerabilidade natural à perda de solos;  $d$  à declividade;  $cv$  à curvatura vertical;  $ch$  à curvatura horizontal; e  $ov$  à orientação de vertente.

Com a ponderação dos pesos e notas, obteve-se o mapa de vulnerabilidade natural a perda de solos, em seguida, foi realizada a análise e interpretação dos resultado.

Tabela 3 - Pesos e notas atribuídos às e classes temáticas

<b>Declividade</b>	
<b>Peso (35%)</b>	<b>Notas</b>
0 - 3%	1
3 - 8%	2
8 - 20%	4
20 - 45%	6
45 - 75%	8
>75%	10
<b>Curvatura Vertical</b>	
<b>Peso (30%)</b>	<b>Notas</b>
Muito Convexa	2
Convexa	4
Retilínea	6
Côncava	8
Muito Côncava	10
<b>Curvatura Horizontal</b>	
<b>Peso (20%)</b>	<b>Notas</b>
Muito Divergente	2
Divergente	4
Planar	6
Convergente	8
Muito Convergente	10
<b>Orientação Das Vertentes</b>	
<b>Peso (15%)</b>	<b>Notas</b>
Noroeste	1
Oeste	2
Sudeste	4
Sul	5
Sudoeste	6
Norte	8
Leste	9
Nordeste	10

Fonte: dados da pesquisa.

### 4.3 Resultados e discussão

Os fatores relativos às encostas, tais como a declividade, o comprimento e a forma, podem afetar a erodibilidade dos solos de diferentes maneiras. Com a ação e interação desses fatores ocorrem os mecanismos de infiltração de água no solo, armazenamento e escoamento em superfície e subsuperfície. Conseqüentemente a ação da água, como agente erosivo, deve ser compreendida, levando-se em conta a complexidade desses fatores (GUERRA, 2005).

#### 4.3.1 Declividade

A declividade é a inclinação maior ou menor do relevo em relação ao horizonte. Seus valores podem ser expressos em graus, de 0° a 90°, porém é mais comumente expressa em porcentagem, de zero a infinito (VALERIANO, 2008; TORRES *et al.*, 2012). Tem



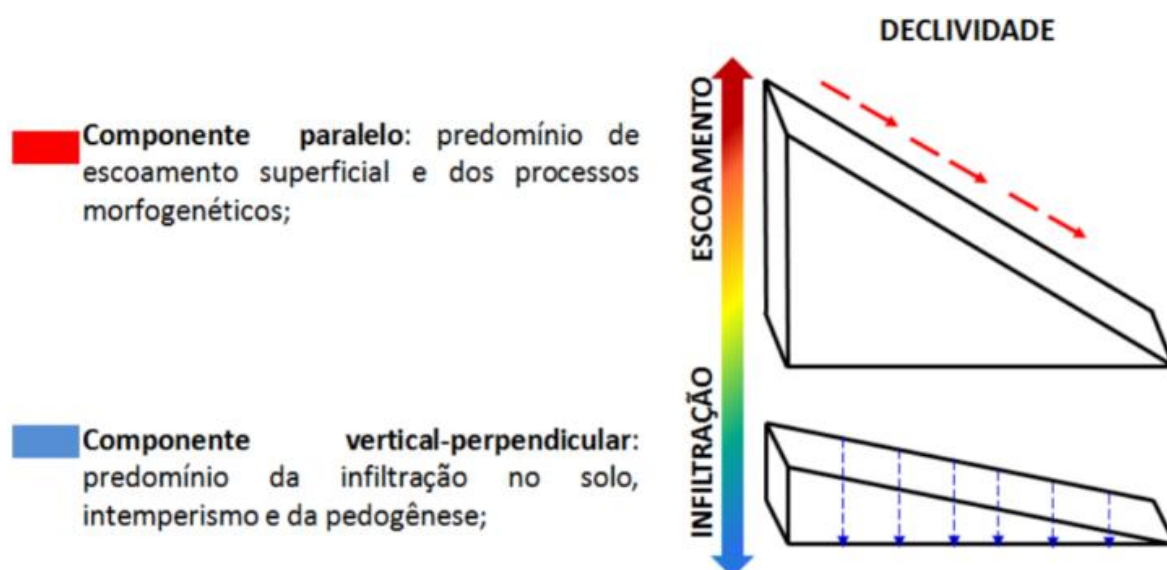
influência direta sobre o equilíbrio entre a infiltração de água no solo e escoamento superficial, além de controlar a intensidade dos fluxos de matéria, que vai variar conforme o grau de inclinação da vertente (VALERIANO, 2008).

O estudo da declividade é primordial para análise geomorfológica. Ao associá-la à pedologia, à cobertura vegetal e a fatores como o clima e orientação das vertentes, é possível deduzir os riscos de desmoronamentos ou deslizamentos de terras, auxiliando assim no planejamento e na prevenção de desastres naturais (VALERIANO, 2008).

Ainda relacionado à declividade, o escoamento e a infiltração apresentam forte interação com ela, que associada à litologia, tipo de solos, cobertura vegetal, precipitação e outros fatores morfométricos podem indicar um grau maior ou menor da probabilidade do risco de erosão das vertentes (PRADHAN, 2010).

Conforme a declividade do terreno (Figura 4), o desenvolvimento dos solos (pedogênese) pode ocorrer por meio de fluxo com componente vertical ou perpendicular, ou o desenvolvimento dos processos erosivos (morfogênese) em função de fluxos com componentes paralelos que se caracterizam pela remoção de detritos das vertentes, resultando na perda de solos e esculturação do relevo (SILVA NETO, 2013).

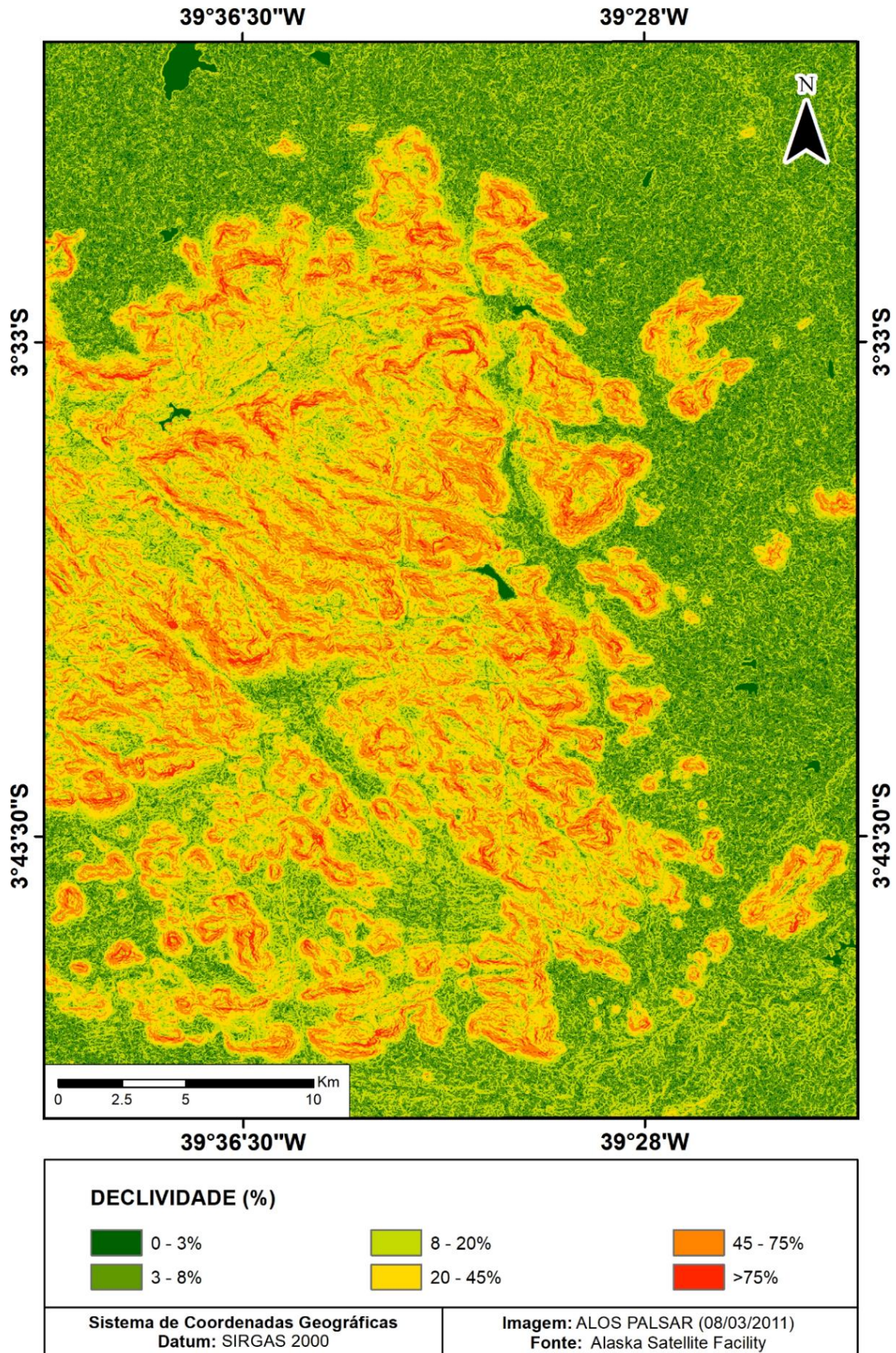
Figura 4 – Declividade de vertente e processos morfogenéticos e pedogenético



Fonte: Silva Neto (2013).

A Figura 5 apresenta o mapa de declividade gerado a partir do MDE ALOS PALSAR. As classes de declividade foram definidas conforme Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1979), como podem ser observadas na Tabela 4.

Figura 5 – Mapa de declividade em percentuais na vertente úmida da serra de Uruburetama



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Classes de Declividade

<b>Classes de Relevô</b>	<b>Declividade (%)</b>
Plano	0-3%
Suave ondulado	3-8%
Ondulado	8-20%
Forte Ondulado	20-45%
Montanhoso	45-75%
Escarpado	>75%

Fonte: EMBRAPA (1979).

Na Tabela 5 podem ser observadas as classes de declividade e as suas respectivas áreas de abrangência em percentuais.

Vale destacar que a declividade do terreno é um parâmetro relevante para o disciplinamento do uso da terra, pois serve de patamar para importantes elementos restritivos, a exemplo das áreas de preservação permanente, que devem ser mantidas em declives superiores a 45° (TORRES *et al.*, 2012).

Em virtude da relevância dessa variável para deflagração dos processos de transporte sedimentar, foi atribuído peso de 35% na análise multicritério.

Tabela 5 – Classes de Declividade e área de abrangência em percentuais

<b>Classes de Relevô</b>	<b>Área (%)</b>
Plano	13,36
Suave ondulado	47,41
Ondulado	24,87
Forte Ondulado	9,22
Montanhoso	4,48
Escarpado	0,65

Fonte: Dados da pesquisa.

#### ***4.3.2 Curvatura Vertical e Curvatura Horizontal***

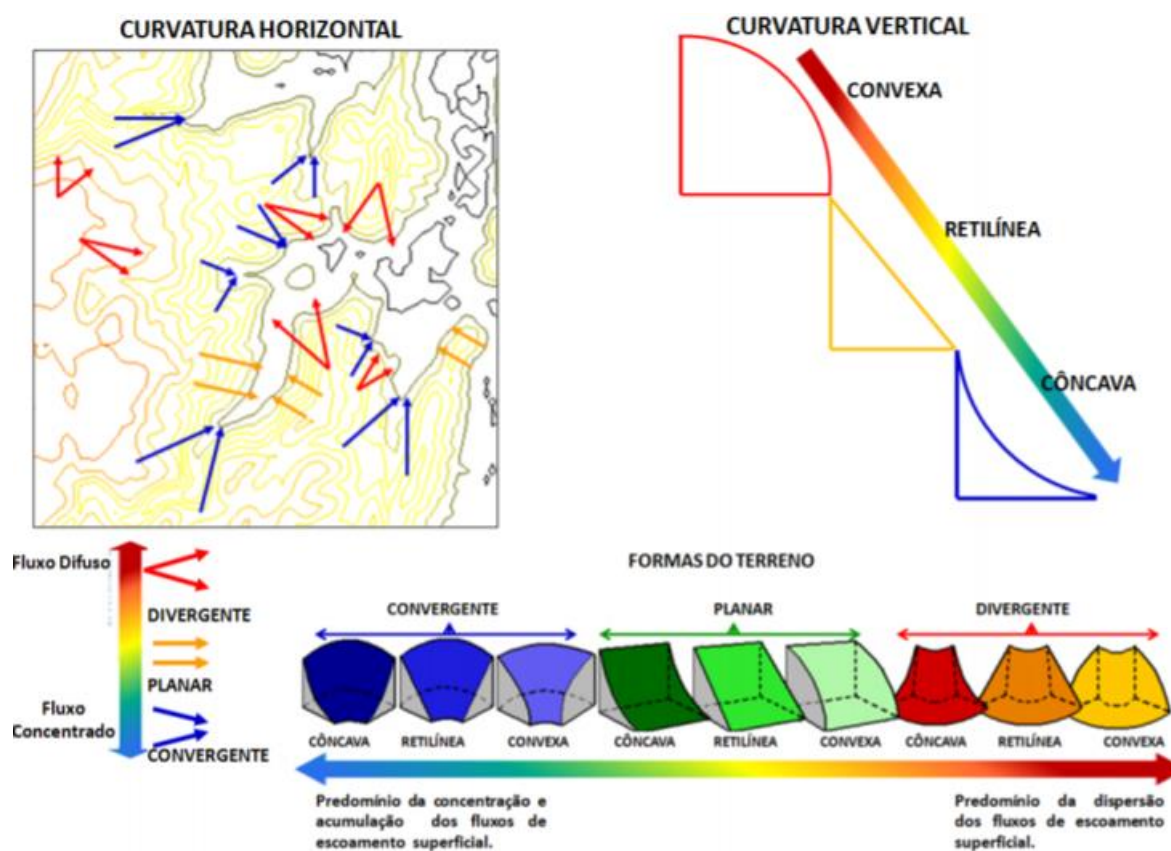
A curvatura vertical expressa o formato da vertente quando observada em perfil, ou seja, refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno, como pode ser visto na Figura 6 (VALERIANO, 2008; BISPO, *et al.*, 2011).

A análise dos tipos de curvaturas verticais de vertentes é importante do ponto de vista morfológico, pedogenético e hidrológico. Ao associar a curvatura vertical à declividade, ao clima e ao substrato do terreno, pode-se inferir o tipo de solo formado na vertente, sua possível movimentação por gravidade e até prováveis pontos de acumulação. Sua aplicabilidade também é bem-sucedida no mapeamento geomorfológico e pedológico (CARMO *et al.*, 2015).



A curvatura horizontal refere-se ao formato da vertente quando observada em projeção horizontal (VALERIANO, 2008). A curvatura horizontal corresponde ao caráter divergente ou convergente das linhas de fluxo no terreno (Figura 6). A curvatura divergente refere-se ao alargamento das linhas de fluxos, podendo indicar topografia mais suave ou vales abertos, enquanto que o caráter convergente sugere um estreitamento dos caminhos do escoamento formando vales mais fechados.

Figura 6 – Curvaturas Horizontal e Vertical, e formas do terreno



Fonte: Silva Neto (2013), adaptado de Valeriano (2008).

Quando associada a outras variáveis como curvatura vertical e declividade, a curvatura horizontal exerce um importante controle sobre a vazante dos fluxos superficiais (HILBERTS *et al.*, 2004).

As curvaturas vertical e horizontal apresentam influência direta nos processos de migração e acúmulo de água, minerais e materiais orgânicos no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade (BISPO *et al.*, 2011).

As classes de curvatura vertical (côncavo, retilíneo ou convexo) e horizontal (convergente, planar ou divergente) ao serem combinadas originam diferentes formas do terreno, como pode visualizado na Figura 6.

Conforme descrito por Valeriano (2008), os casos extremos de combinações de curvatura do terreno são representados pela forma côncavo-convergente, que apresenta a máxima concentração e acúmulo do escoamento, e pela forma convexa-divergente, com máxima dispersão do escoamento. As combinações intermediárias têm características hidrológicas mais dependentes das relações entre as intensidades (módulos) dos efeitos individuais.

Como pode ser observado na Figura 7, foram definidas cinco classes para curvatura vertical: muito côncava, côncava, retilínea, convexa e muito convexa. Para curvatura horizontal (Figura 8), também foram definidas cinco classes: muito convergente, convergente, planar, divergente, muito divergente. Nas Tabelas 6 e 7 podem ser visualizados as classes de curvatura horizontal e vertical com suas respectivas áreas de abrangência em percentuais.

Tabela 6 – Classes de Curvatura Horizontal e área de abrangência em percentuais

<b>Classes de Curvatura Horizontal</b>	<b>Área (%)</b>
Muito Convergente	2,01
Convergente	15,76
Planar	58,71
Divergente	20,31
Muito Divergente	3,21

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 7 – Classes de Curvatura Vertical e área de abrangência em percentuais

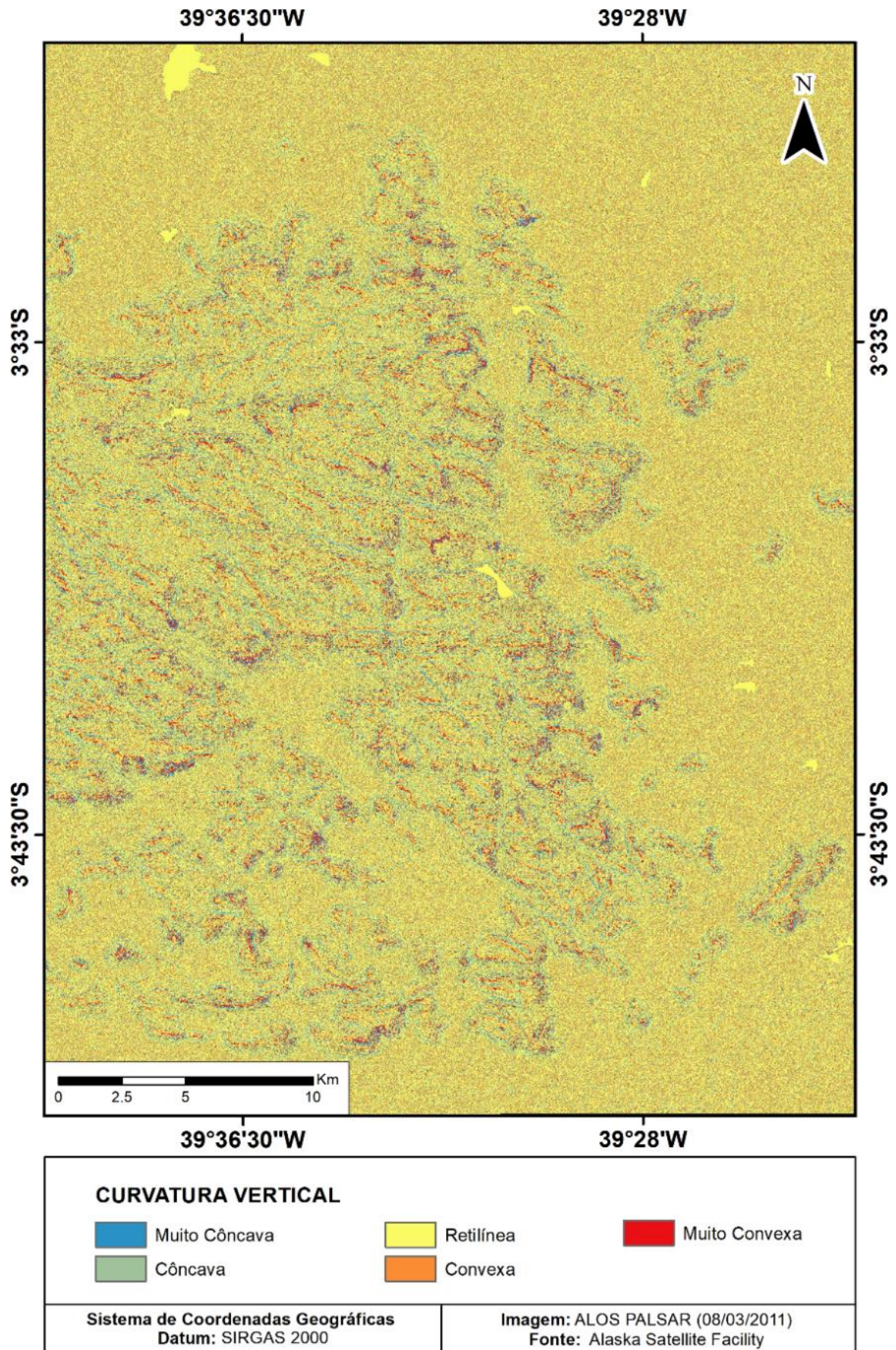
<b>Classes de Curvatura Vertical</b>	<b>Área (%)</b>
Muito Côncava	2,85
Côncava	27,22
Retilínea	46,30
Convexa	22,32
Muito Convexa	1,31

Fonte: Dados da pesquisa.

Para essas variáveis os pesos em percentuais atribuídos foram de 20% para curvatura horizontal e 30% para curvatura vertical, por esta variável ter maior relevância na análise.



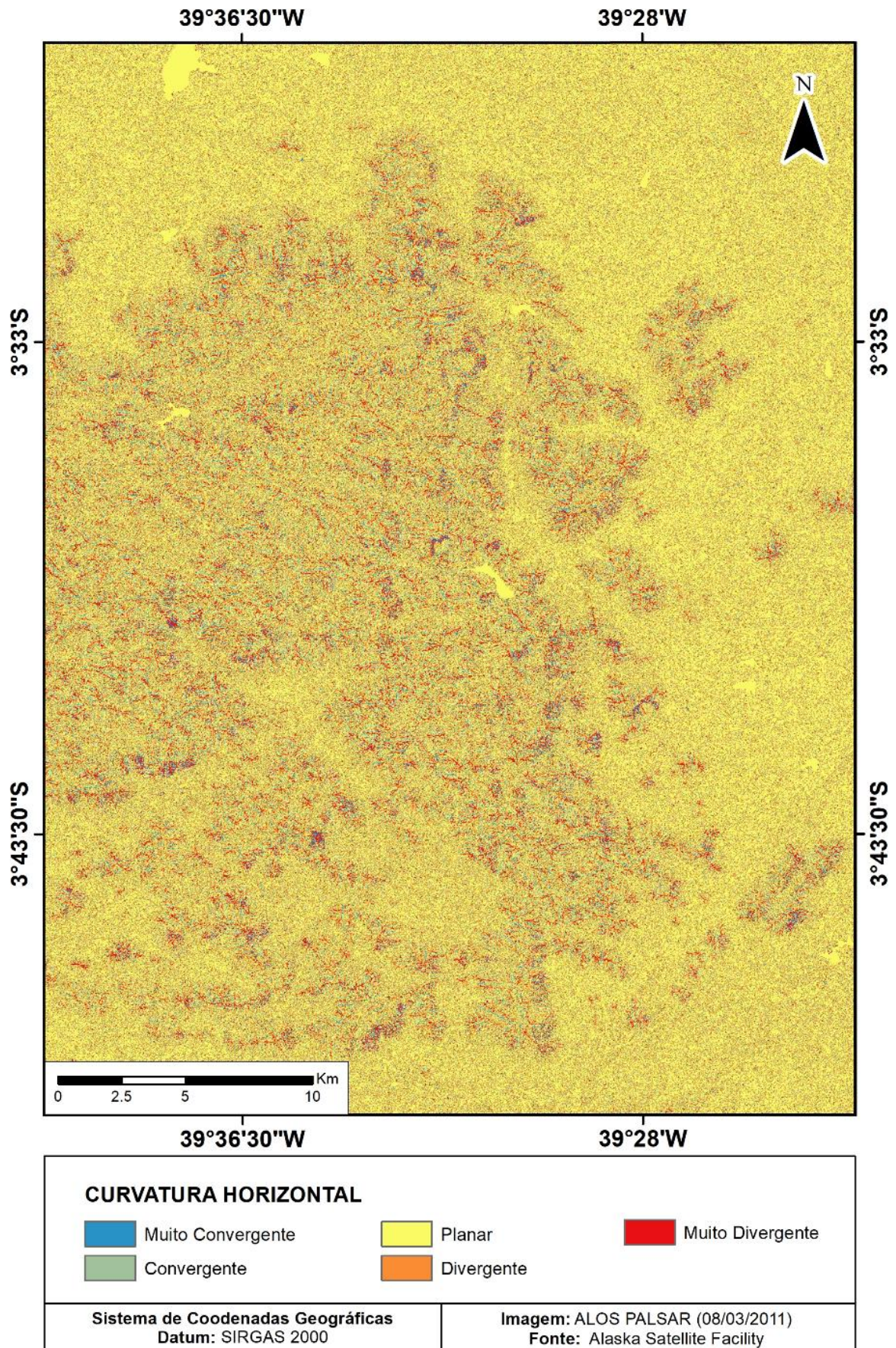
Figura 7 – Mapa de curvatura vertical da vertente úmida da serra de Uruburetama



Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 8 – Mapa de curvatura horizontal da vertente úmida da serra de Uruburetama



Fonte: elaborado pelo autor.

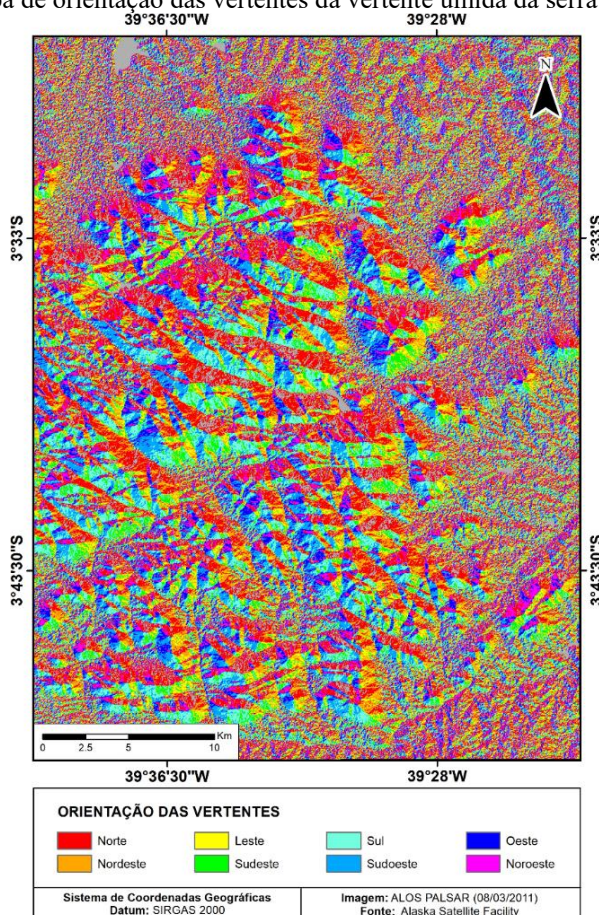


### 4.3.3 Orientação das vertentes

A orientação de vertentes (ou direção) diz respeito ao ângulo azimutal correspondente à maior inclinação do terreno, no sentido descendente. É expressa em graus, de 0° a 360° e traduz a estrutura de hidrologia superficial, ao determinar um caminhamento esperado de escoamento que se costuma chamar de linhas de fluxo. As linhas de fluxo, os canais de drenagem e divisores de água podem ser definidos em função do arranjo local de diferentes orientações, o que fica prontamente visível em representações adequadas da variável (VALERIANO, 2008).

Ao definir as linhas de fluxos é possível compreender a dinâmica e orientação do transporte sedimentar e dos movimentos gravitacionais. A esta variável, por apresentar menor contribuição na deflagração dos processos erosivos e movimento de massa, foi atribuído o menor peso percentual (15%). Devido à disposição do relevo os setores a barlavento, com maior disponibilidade pluviométrica, receberam as maiores notas: nordeste (10), leste (9) e norte (8), enquanto que as menores notas foram atribuídas para noroeste (1), oeste (2) e sudeste (4). Na Figura 9 pode ser observado o mapa de orientação das vertentes da área de estudo.

Figura 9 – Mapa de orientação das vertentes da vertente úmida da serra de Uruburetama



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3.4 Mapa de vulnerabilidade natural a perda de solos

O mapa de vulnerabilidade natural a perda de solos obtido através da análise multicritério e da álgebra dos mapas temáticos se encontra na Figura 10. Na Tabela 8 podem ser observadas as classes de vulnerabilidade com seus respectivos intervalos e áreas de abrangência.

Tabela 8 - Intervalos das classes de vulnerabilidade e abrangência em percentuais

<b>Classes</b>	<b>Intervalos</b>	<b>%</b>
Muito Baixa	1 - 4	38,92
Baixa	4 - 5	29,71
Média	5 - 6	23,40
Alta	6 - 7	5,84
Muito Alta	7-10	2,13

Fonte: dados da pesquisa.

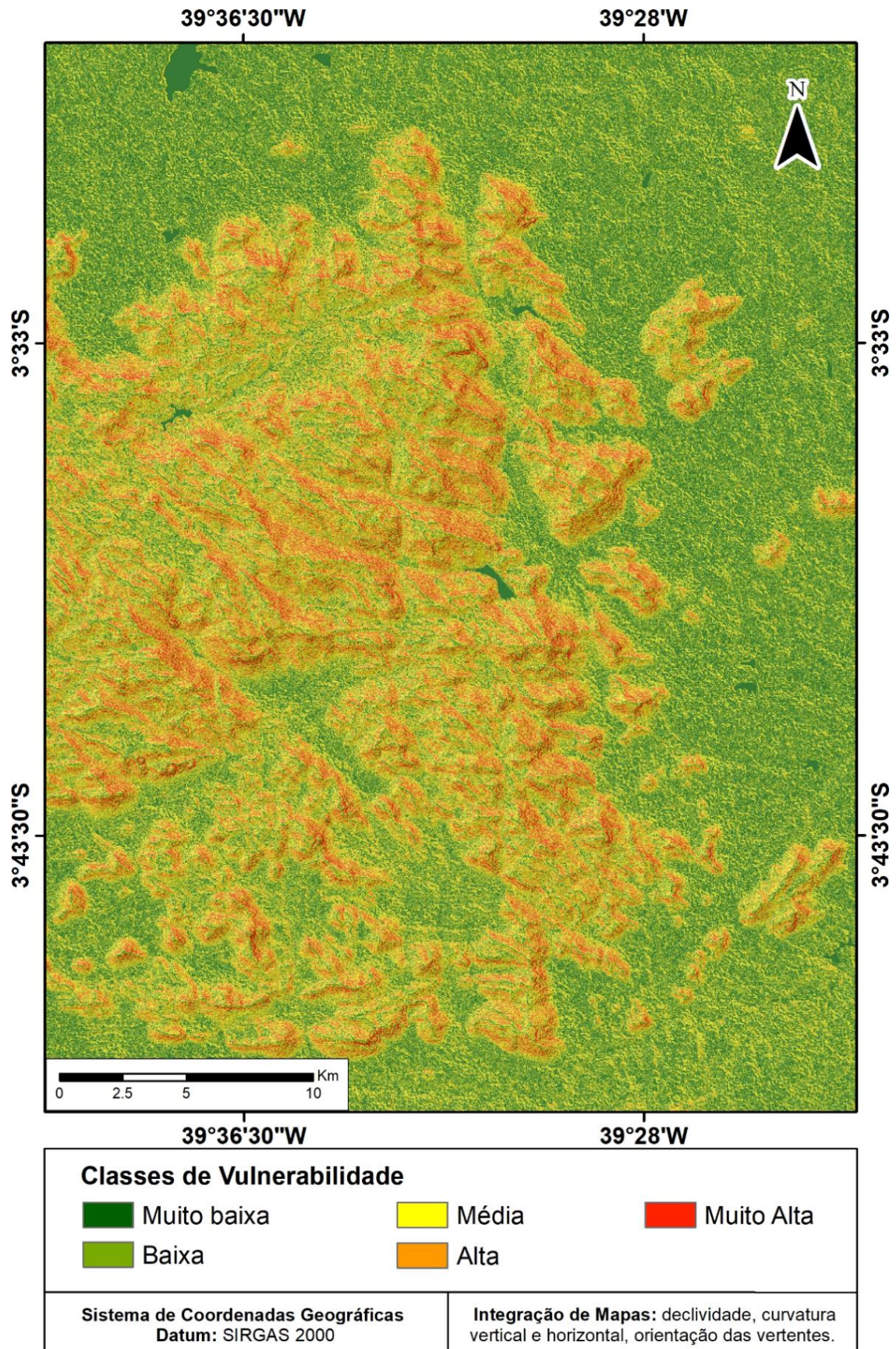
As classes de vulnerabilidade muito baixa e baixa se distribuem principalmente na área de entorno da vertente úmida do Maciço de Uruburetama. Essa área corresponde a depressão sertaneja, cujas cotas altimétricas atingem 200 m e as declividades são mais modestas. Em alguns setores do maciço podem ser observados vales encravados, marcados pela ocorrência de alveólos, formados ao longo do tempo por uma grande deposição de sedimentos que entulharam grandes seções, favorecendo a formação de solos e configurando ambientes estáveis, que apresentam vulnerabilidade baixa ou muito baixa conforme a topografia local.

Por sua vez as classes de vulnerabilidade média, alta e muito alta estão distribuídas principalmente nas encostas do maciço. As maiores altitudes verificadas nessas áreas, associadas ao percentual de declividade, formas das encostas e orientação das vertentes, favorecem a atuação dos agentes erosivos e desencadeadores de movimentos massa.

A ocorrência de classes vulnerabilidade alta e muito alta pode ser explicada pelo forte controle estrutural verificado no maciço. Por se configurar num relevo fortemente fraturado, com vales superimpostos em forma de V, há um número expressivo de encostas submetidas a ação dos agentes intempéricos e conseqüentemente do transporte sedimentar, que favorece a esculturação do relevo e reflete a susceptibilidade desses ambientes aos processos morfogenéticos.



Figura 10 – Mapa de vulnerabilidade natural a perda de solos da vertente úmida da serra de Uruburetama



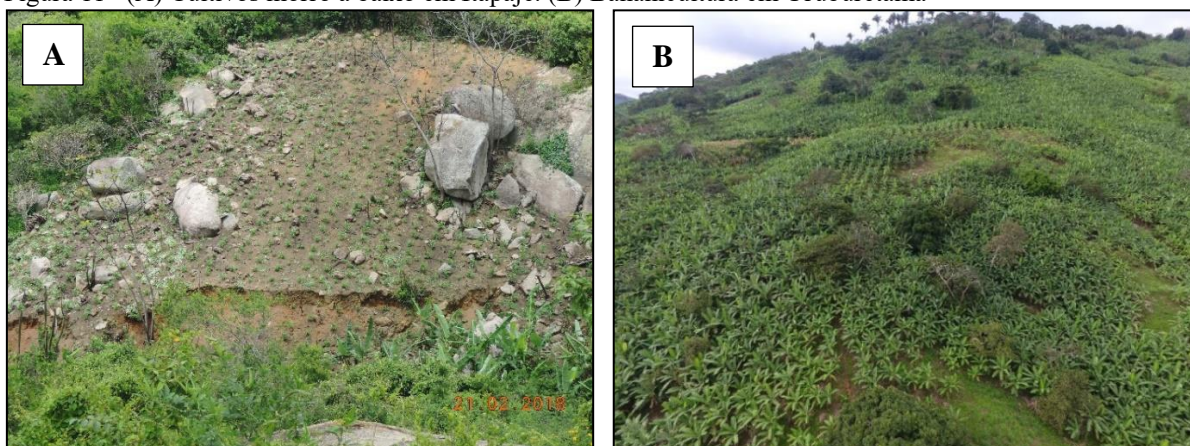
Fonte: dados da pesquisa.



É possível observar, também, que as classes de vulnerabilidade alta e muito alta estão dispostas sobretudo nas vertentes orientadas a leste, norte, e principalmente a nordeste do maciço. O fato da região leste do maciço apresentar um relevo escarpado e montanhoso, associado a sua disposição a barlavento, que favorece o efeito orográfico e maiores índices pluviométricos, tornam esse área mais vulnerável a degradação dos solos.

A partir do mapa de vulnerabilidade é possível orientar e fiscalizar o uso e a ocupação na vertente úmida do Maciço de Uruburetama, visando reduzir os danos e garantir o desenvolvimento agrícola sustentável. Uma parcela significativa da população local vive da atividade agrícola familiar, nesse caso, é comum observar intervenções nas encostas que favorecem os processos erosivos. Como pode ser observado na Figura 11-A, muitos cultivos são praticados sem adoção de técnicas agrícolas adequadas. Neste caso, observa-se o condenável plantio morro abaixo, cujas culturas estão dispostas na direção do fluxo, favorecendo a erosão laminar e a perda gradual da produtividade do solo a partir da redução dos nutrientes.

Figura 11– (A) Cultivos morro a baixo em Itapajé. (B) Bananicultura em Uruburetama



Fotos: A - Eduardo Freires (21/02/2018), B - Daniel Gomes (20/05/2017).

Outro problema comum na área é o cultivo da banana (Figura 11-B), cultura completamente inadequada para áreas planálticas. Por apresentarem raízes rasas, as bananeiras não garantem a estabilidade dos solos e conseqüentemente potencializam os processos erosivos e o movimento de massa.

Além do mais, observa-se que nessas áreas são desenvolvidas atividades agrícolas em desacordo com o Código Florestal (Lei 12.651/2012), por serem praticadas em encostas com declividade superior a 45° e em topo de morros acima de 100 metros de altitude.

Ao espacializar a vulnerabilidade natural a perda de solos dessas áreas é possível orientar as intervenções no sentido de compatibilizar as atividades aos limites impostos pelas

características físicas do ambiente. Assim é possível identificar quais as áreas são mais adequadas à agricultura e a ocupação e o que pode ser feito para mitigar os impactos dessas ações, como o cultivo em patamares, através das curvas de nível, a adoção de culturas compatíveis as características de solo e clima local, a adequação do tipo de sistema de irrigação adotado e, bem como o atendimento às determinações do Código Florestal.

Conforme Ross (2004), é cada vez mais necessário que se faça inserções antrópicas absolutamente compatíveis com as potencialidades dos recursos naturais de um lado e com as fragilidades dos sistemas ambientais naturais de outro.

#### **4.4 Considerações finais**

Como pôde ser observado no mapa de vulnerabilidade natural à perda de solos, as classes de vulnerabilidade muito baixa e baixa se distribuem principalmente na área de entorno da vertente úmida do Maciço de Uruburetama, que corresponde a depressão sertaneja, e em setores de alguns vales onde o processo de pedogênese é superior a morfogênese.

Por outro lado as classes de vulnerabilidade média, alta e muito alta estão distribuídas principalmente nas encostas do maciço em virtude das características de declividade, formas das encostas e orientação das vertentes. A interação desse fatores favorecem a atuação dos agentes erosivos e desencadeadores de movimentos de massa, que retratam o predomínio de processos modeladores do relevo, ou morfogênese.

Os resultados demonstraram que as variáveis geomorfométricas, extraídas do MDE ALOS PALSAR, são bons recursos para análise de vulnerabilidade.

O mapa de vulnerabilidade natural à perda de solos, obtido a partir das variáveis, geomorfométricas constitui um importante documento para gestão da área de pesquisa. A espacialização da vulnerabilidade permite ao gestor orientar as atividades econômicas e a ocupação humana respeitando os limites impostos pelos condicionantes físicos locais.

A partir da tomada de decisão pelos gestores ou órgãos competentes, as intervenções humanas no maciço podem ser pensadas no sentido de garantir maior produtividade e sustentabilidade a prática agrícola, seja pela adoção do cultivo em curvas de nível, para evitar a perda de solos, ou com a escolha de culturas adequadas às condições naturais do local, sempre respeitando a legislação ambiental vigente. Da mesma forma as ocupações das vertentes devem ser orientadas no sentido de evitar os riscos e as perdas ambientais e humanas.

## 4.5 Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro concedido; e ao Programa de Pós-graduação em Geologia da UFC pelo incentivo a esta pesquisa.

## Referências

- Becek, K., 2014. Assessing global digital elevation models using the runway method: the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer versus the shuttle radar topography mission case. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing* v. 52, n. 8, p. 4823–4831.
- Bispo, P. C; Almeida, C. M; Valeriano, M. M; Medeiros, J. S; Crepani, E., 2011. Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial. *Revista Geociências*, v. 30, n. 3, p. 467-478.
- Brandão, R. L., 2003. Zoneamento Geoambiental da região de Irauçuba/CE. Texto explicativo. Carta Geoambiental. Fortaleza: CPRM. 67p.
- Brandão, R. L.; Freitas, L. C. B., 2014. Geodiversidade do estado do Ceará. Fortaleza: CPRM, 214p.
- Brasil, Lei 12.651/2012, dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as [Leis nºs 6.938](#), de 31 de agosto de 1981, [9.393](#), de 19 de dezembro de 1996, e [11.428](#), de 22 de dezembro de 2006; revoga as [Leis nºs 4.771](#), de 15 de setembro de 1965, e [7.754](#), de 14 de abril de 1989, e a [Medida Provisória nº 2.166-67](#), de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm). Acesso em: 15 de maio de 2019.
- Carmo, A. M.; Souto, M. V. S.; Duarte, C. R., 2015. Análise qualitativa e comparativa das variáveis morfométricas da região serrana da porção sul do maciço central do Ceará geradas através dos MDE: SRTM, ASTER GDEM E TOPODATA. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 67, n. 3, p. 603-620.
- Coelho Netto, A. L., 2005. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: Guerra, A.J.T.; Cunha, S. B. *Geomorfologia – Uma atualização de bases e conceitos*. 6ª ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp.149 – 209.
- Crepani, E.; Medeiros, J. S. de; Azevedo, L. G. de; Hernandez Filho, P.; Florenzano, T. G.; D. V., 1996. Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico. Metodologia desenvolvida para subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico e capacitar os técnicos dos Estados da Amazônia Legal. INPE, São Jose dos Campos. 18p.



- Duarte, M. L.; Silva, D. M. P.; Silva, T. A.; Guimarães, L. R. 2019. Evaluation of digital elevation models in the delimitation of hydrographic basins in the south of Amazonas region. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v. 9, n. 2, p. 99-107.
- Dylik, J., 1968. Notion du versant em geomorphologie. *Bulletin de l'Académie Polonaise des Scienses*, v. 16, n. 2, p. 125-132.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2009. Sistema brasileiro de classificação de solos. EMBRAPA-SPI, Rio de Janeiro. 367 p.
- Guerra, A. J. T., 2005. Processos erosivos nas encostas. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. *Geomorfologia – Uma atualização de bases e conceitos*. 6ª ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp.149 – 209.
- Hilberts, A. G. J.; Loona, E. E. V.; Trocha, P. A.; Paniconi, C., 2004. The hillslope-storage Boussinesq model for non-constant bedrock slope. *Journal of Hydrology*, v. 291, n. 3-4, p. 160-173.
- Jorge, M. C. O; Guerra, A. J. T., 2013. Erosão dos solos e movimentos de massa: recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. In: Guerra, A. J. T.; Jorge, M. C. O. *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. Oficina de Textos, São Paulo, pp.7-30.
- Loureiro, H. A. S.; Ferreira, S. M., 2013. O papel das geotecnologias no estudo de feições erosivas e de movimentos de massa no Brasil. In: Guerra, A. J. T; Jorge, M. C. O. *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. Oficina de Textos, São Paulo, pp.95-125.
- Pradhan, B., 2010. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. *Advances in Space Research*, v. 45, n. 10, p. 1244-1256.
- Ross, J. L. S., 2004. Geomorfologia aplicada aos EIAs-RIMA. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. *Geomorfologia e meio ambiente*. 5ª ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp.291 - 335.
- Silva Neto, J. C. A., 2013. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. *Revista Geografia*, v. 22, n.1, p. 5-25.
- Souza, M. J. N; Oliveira, V. P. V., 2006. Os enclaves úmidos e sub-úmidos do semi-árido do Nordeste Brasileiro. *Mercator*, v. 5, n. 9, p. 85-102.
- Torres, F. T. P.; Marques Neto, R.; Menezes, S. O., 2012. *Introdução à Geomorfologia*. Cengage Learning, São Paulo. 322p.
- Tricart, J., 1977. *Ecodinâmica*. IBGE, Rio de Janeiro. 97p.
- Valeriano, M. M., 2008. *Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais*. INPE, São José dos Campos. 72p.

## **5 CAPÍTULO V - INFLUÊNCIA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS NO DESENCADEAMENTO DOS MOVIMENTOS DE MASSA NO MACIÇO DE URUBURETAMA, CEARÁ**

O artigo intitulado “Influência de lineamentos estruturais no desencadeamento dos movimentos de massa no Maciço de Uruburetama, Ceará” foi submetido para análise e publicação ao periódico Revista Brasileira de Geografia Física, da Universidade Federal de Pernambuco, no dia 11 de dezembro de 2019. A revista apresenta versão online com ISSN 1984-2295. O artigo foi publicado em junho de 2020 no volume 13, número 3, p. 1294-1308, DOI: 10.26848/rbgf.v13.3.p1294-1308. O texto apresentado segue a mesma estrutura exigida pelo periódico.

O objetivo desse artigo foi analisar a influência dos lineamentos estruturais no desencadeamento dos movimentos de massa no Maciço de Uruburetama/CE.

## **Influência de lineamentos estruturais no desencadeamento dos movimentos de massa no Maciço de Uruburetama, Ceará**

---

### **Resumo**

A disposição de estruturas geológicas em áreas planálticas é elemento importante na compreensão da dinâmica que ocorre na superfície de suas encostas e que é responsável pela esculturação do relevo. Neste contexto destacam-se os movimentos gravitacionais, que podem gerar perdas econômicas, ambientais e humanas em eventos de alta energia e/ou com grande extensão. Esta pesquisa analisou a influência de lineamentos estruturais no desencadeamento dos movimentos gravitacionais no Maciço de Uruburetama, localizado no estado do Ceará. A metodologia consistiu na extração automática de lineamentos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) fornecido pelo sensor orbital ALOS PALSAR. A partir da média de filtros direcionais aplicados a 0°, 45°, 90° e 135° de iluminação foi possível realçar as feições lineares da imagem original, facilitando sua extração. Posteriormente, foram elaborados mapas de distribuição espacial e densidade de lineamentos, além de diagrama de roseta. Tais produtos subsidiaram a análise da disposição dos principais *trends* estruturais da área, destacando que a maior densidade e a orientação predominante de lineamentos podem ser indicativas do grau de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa no Maciço de Uruburetama, desde que também sejam consideradas as características físicas dominantes e o grau de intervenção humana nas encostas. Os resultados demonstraram que os lineamentos estruturais obtidos de forma automática, quando analisados em conjunto com as características ambientais podem ser aplicados na análise de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa.

Palavras-chave: ALOS PALSAR. Filtros direcionais. Fusão de imagens. Extração de lineamentos.

### **Influence of structural lineaments as a trigger of mass movements in the Uruburetama Massif, Ceará state, Brazil**

### **Abstract**

The geological structures arrangement in plateau areas is an important element in understanding the dynamics that occur on the surface of their slopes and which is responsible for relief sculpting. In this context, gravitational movements stand out, which can generate economic, environmental and human losses in high energy events and / or with large extension. This research analyzed the influence of structural lineaments in the gravitational movements triggering in the Uruburetama massif, located in the state of Ceará. The methodology consisted of automatic extraction of lineaments from the Digital Elevation Model (DEM) provided by the ALOS PALSAR orbital sensor. From the average of directional filters applied at 0°, 45°, 90° and 135° of illumination it was possible to enhance the linear features of the original image, facilitating their extraction. Subsequently, maps of spatial distribution and lineaments density were developed, as well as a rosette diagram. Such products subsidized the analysis of the disposition of the main structural trends of the area, emphasizing that the higher density and the predominant orientation of lineaments may be indicative of the degree of susceptibility to the occurrence of mass movements in the Uruburetama massif, if the dominant physical conditions and the degree of human intervention on the slopes are also considered. The results showed that the structural lineaments obtained automatically, when analyzed together with the environmental characteristics can be applied in the susceptibility analysis to the occurrence of mass movements.

Keywords: ALOS PALSAR. Directional filters. Image fusion. Lineaments extraction

---

## 5.1 Introdução

A geomorfologia do Nordeste brasileiro é marcada por estruturas deformacionais dúcteis e rúpteis, registradas no embasamento cristalino de origem Pré-cambriana e representadas por um conjunto de feições desenvolvidas ao longo de zonas de falhas. Neste contexto, as zonas de cisalhamento exercem importante controle nas feições morfológicas da região, condicionando a geração e evolução de maciços estruturais, cristas lineares e vales incisos. Tais feições compõem altos e baixos topográficos, orientados segundo a direção dos *trends* estruturais (MAIA; BEZERRA, 2014).

Nas áreas dos terrenos cristalinos, formados por rochas metamórficas, normalmente gnaisses, e ígneas graníticas, o relevo esculpido é geralmente suave e resultado da erosão seletiva ao longo de linhas de fraqueza, relacionadas a fraturas, juntas, dobras ou rochas débeis que formam depressões, ou, então, rochas duras, que tendem a originar áreas mais elevadas (PENHA, 2005).

Apesar de mais de 90% do volume da crosta ser constituído por rochas ígneas e metamórficas, os sedimentos e as rochas sedimentares recobrem aproximadamente 66% da superfície dos continentes. Todavia, mesmo nessas áreas, em grande parte cobertas por fina película sedimentar, as estruturas existentes no embasamento subjacente se refletem na cobertura, controlando em maior ou menor grau a modelagem da superfície. As faixas fraturadas ou diaclasadas, zonas hidrotermalizadas, estruturas planares e lineares, por serem mais susceptíveis à meteorização, tendem a formar setores rebaixados, em contraste com as áreas constituídas por rochas maciças, com raras discontinuidades e, portanto, mais elevadas (PENHA, *op. cit.*).

As fraturas e falhas representam importantes discontinuidades, tanto em termos mecânicos quanto hidráulicos. O avanço da frente de intemperismo nos maciços rochosos é influenciado diretamente pela presença de fraturas de alívios de tensão e falhas, que atuam como caminhos preferenciais de alteração, permitindo o avanço dos processos para o interior do maciço de forma muito mais efetiva, sendo preponderantes para a ocorrência de movimentos gravitacionais (FERNANDES; AMARAL, 2004). Da mesma forma a orientação da foliação e/ou o bandamento composicional influenciam diretamente na estabilidade das encostas em áreas onde afloram rochas metamórficas, ou ainda em cortes de estrada onde o mergulho das camadas ocorre para fora das encostas.

O conhecimento do substrato, formado por complexos metamórficos/magmáticos, é de grande importância na investigação geomorfológica dessas regiões (PENHA, 2005).

Portanto, conhecer as estruturas geológicas dessas áreas é primordial para compreender os fenômenos que ocorrem na superfície dos terrenos, como a erosão diferencial e os movimentos de massa, e que são responsáveis pela esculturação do relevo.

Para Bastos (2012), as características geológicas são importantes na deflagração dos movimentos de massa ao influenciar os fluxos de água superficiais e subsuperficiais e, conseqüentemente, provocar a instabilidade dos materiais.

A deflagração de movimentos de massa envolve uma série contínua de eventos de causa e efeito que resultam na ruptura de materiais terrestres (solo e/ou rocha), quando as solicitações são maiores que a resistência dos terrenos (BITAR, 1995).

Segundo Hart (1988, *apud* JORGE e GUERRA, 2013), os movimentos de massa resultam da força de cisalhamento nas encostas, causada pela gravidade, peso do material e água no solo, que consegue sobrepor a resistência dos materiais, determinada por propriedades de coesão dos solos.

“Os movimentos de massa, lentos ou rápidos, são provocados por atividade biológica ou por processos físicos resultantes de condições climáticas, mas a ação da gravidade é o fator principal” (PENTEADO, 1980, p.100).

Os vários tipos de movimentos de massa dependem de fatores, como: estrutura geológica; tipo dos materiais; declividade; orientação e forma da vertente; área de contribuição; intensidade; e distribuição das precipitações. Diferentes metodologias vêm sendo desenvolvidas tendo em vista a previsão dos movimentos de massa, a qual pode subsidiar os administradores públicos em atividades, como: elaboração de planos de evacuação; elaboração de mapas de susceptibilidade; planejamento urbano; e planejamento de traçado de rodovias, entres outros (GUIMARÃES *et al.*, 2008)

Além da frequência elevada dos movimentos de massa em razão das condições naturais, ocorre também um grande número de acidentes associados às intervenções antrópicas nas vertentes. Dentre as intervenções em áreas urbanas, a que mais preocupa é a ocupação irregular das encostas, com o conseqüente desmatamento e corte de taludes, propiciando uma maior susceptibilidade à ocorrência dos movimentos de massa (GUIMARÃES *et al.*, *op cit.*).

O homem vem se constituindo no mais importante agente modificador da dinâmica das encostas. O avanço das diversas formas de uso e ocupação do solo em áreas naturalmente susceptíveis aos movimentos gravitacionais de massa acelera e amplia os processos de instabilização nas vertentes (BITAR, 1995).

Conforme Jorge e Guerra (2013), o que pode ser observado nas últimas décadas, no Brasil e em vários outros países, é a aceleração dos movimentos de massa, não apenas causados

pelas variáveis do meio físico, mas, principalmente, pela maneira como as construções são feitas sem considerar os riscos naturais inerentes de cada ambiente.

De acordo com Loureiro e Ferreira (2013), o conhecimento da dinâmica dos processos erosivos e dos fatores condicionantes dos movimentos de massa é de extrema relevância para um planejamento e gestão ambiental eficaz, já que a compreensão da gênese e abrangência desses fenômenos se faz essencial para mitigar as perdas materiais e humanas que eles geram.

O Maciço de Uruburetama, localizado na porção setentrional do estado do Ceará, apresenta características geológicas que favorecem os processos erosivos e o desencadeamento de movimentos de massa.

Esse maciço apresenta grande influência do controle estrutural, com falhas que representam descontinuidades do relevo e podem ser associadas tanto a eventos tectônicos pretéritos, como também a alívios de pressão (LIMA *et al.*, 2015).

O relevo mostra-se intensamente dissecado em colinas e cristas, com vales superimpostos, em forma de V, segundo uma disposição paralela e orientada a NW-SE (BRANDÃO, 2003). O maciço é fortemente tectonizado e intensamente fraturado, cujas estruturas influenciam diretamente na rede de drenagem que, em muitos casos, se adapta a elas (SOUZA; OLIVEIRA, 2006).

Os lineamentos topográficos que representam estas estruturas podem ser indicativos da suscetibilidade para ocorrência de movimentos gravitacionais. Portanto, a extração e espacialização dos lineamentos, bem como a análise de densidade e orientação dessas feições podem revelar quais as áreas ou setores do maciço apresentam maior predisposição à ocorrência desses eventos.

Nesse sentido, esta pesquisa objetiva avaliar a influência de lineamentos estruturais no desencadeamento de movimentos de massa no Maciço de Uruburetama, tendo como suporte de análise o MDE ALOS PALSAR e sistemas de informações geográficas.

Este maciço residual possui cerca de 1.000 km<sup>2</sup> de área e está localizado, aproximadamente, 100 km a oeste de Fortaleza (SOUZA; OLIVEIRA, 2006). Ele é consistido por um relevo montanhoso de formato circular, sendo um pouco alongado na direção E-W (BRANDÃO; FREITAS, 2014).

A altitude média do maciço situa-se entre 500 e 800m, alcançando mais de 1.000 m em locais específicos, como no limite municipal entre Itapajé e Itapipoca (SILVA, 2007; LIMA *et al.* 2019).

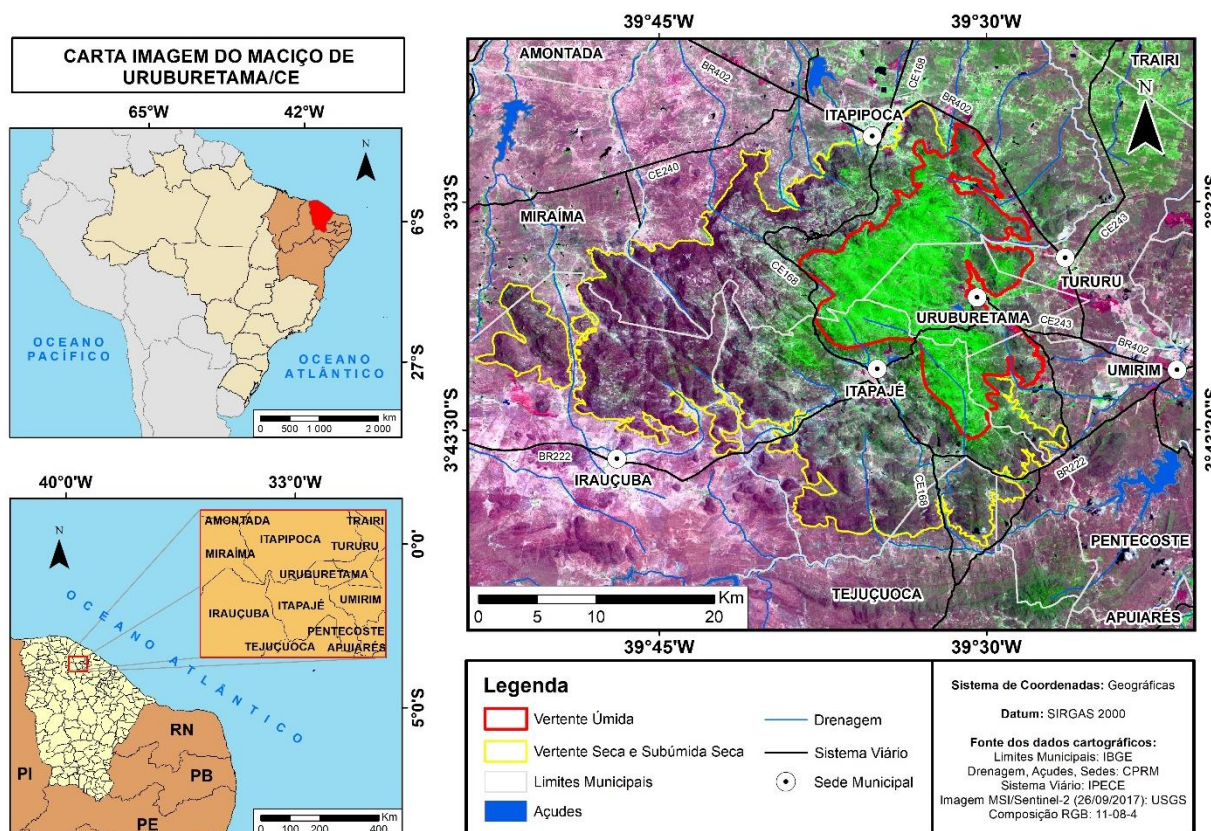


Como pode ser observado na Figura 1, o Maciço de Uruburetama está localizado dentro dos limites administrativos de oito municípios (Irauçuba, Itapajé, Itapipoca, Miráíma Tejuçuoca, Tururu, Umirim e Uruburetama), que, conforme IBGE (2018), apresentam em sua totalidade uma população estimada para 2018 em 336.462 habitantes. Esse fato não só remete à pressão exercida sobre a área como também reflete a dificuldade de implementar um planejamento ambiental no Maciço.

O Maciço de Uruburetama pode ser sub-compartimentado, de acordo com aspecto climático regente, em três unidades geomorfológicas: vertente úmida; vertente subúmida seca; e vertente seca (BRANDÃO, 2003; SILVA, 2007; FALCÃO SOBRINHO *et al.* 2019).

As porções voltadas para o litoral, a barlavento (vertente úmida), apresentam condições de umidade elevadas, favorecendo o desenvolvimento de solos profundos e, conseqüentemente, uma vegetação mais densa e de maior porte. Nos setores a sotavento (vertente subúmida seca e vertente seca), as condições climáticas são mais agressivas (secas), sendo o intemperismo físico o principal agente modelador da paisagem. Nessas vertentes, predominam os solos rasos, com frequentes afloramentos rochosos, condicionando a presença de uma vegetação mais seca e menos densa (BRANDÃO, 2003).

Figura 1 – Localização do Maciço de Uruburetama na porção norte do estado do Ceará



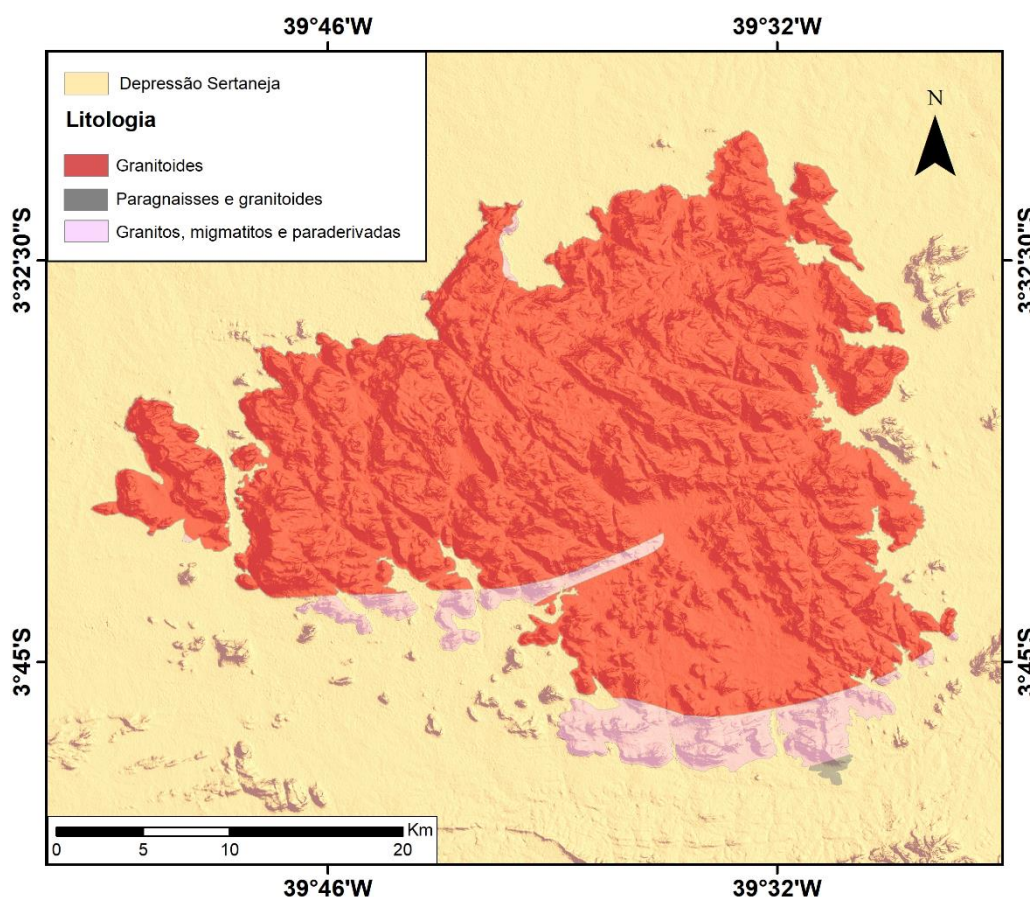
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2 Contexto geológico

Localizada na província da Borborema, a área de estudo é constituída em quase sua totalidade por rochas do Complexo Nordestino, formação cronologicamente pertence ao Pré-Cambriano do inferior-médio (OLIVEIRA, 2002). A unidade litoestratigráfica no maciço é representada pela Suíte Intrusiva Tamboril-Santa Quitéria. Conforme Schobbenhaus e Neves (2003), essa unidade, formada na Era Neoproterozoica (1,0 Ga – 540 Ma), é composta por rochas plutônica félsicas a intermediárias.

Com relação à distribuição litológica, conforme pode ser observado na Figura 2, os granitoides correspondem quase à totalidade do maciço. Em menor escala ocorrem associações granito-migmatíticas ao sul e a sudoeste da área, e paragnaisse-granitoide numa porção restrita ao sul do maciço.

Figura 2 – Litologias constituintes do Maciço de Uruburetama (2003)



Fonte: adaptado de Cavalcante *et al.*

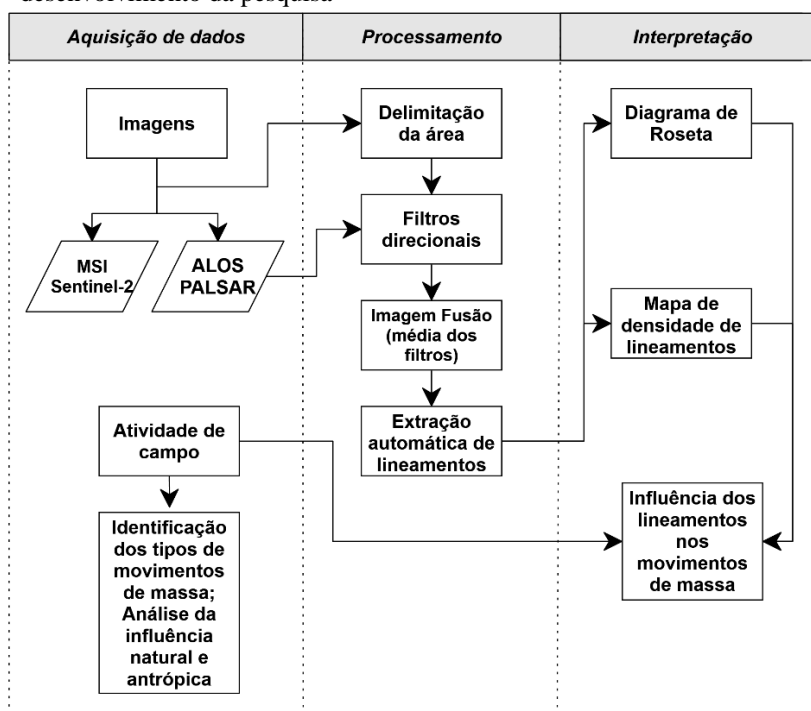
As unidades de menor abrangência são os depósitos quaternários de origem aluvial e colúvio-aluvial, que se encontram distribuídos em diferentes setores da área de pesquisa, onde predominam processos de sedimentação.

Depósitos aluviais (localmente colúviais) são formados por argilas, areias argilosas, quartzosas e quartzofeldspáticas, conglomeráticas ou não, cascalhos e argilas orgânicas / fluvial (CAVALCANTE *et al.*, 2003).

### 5.3 Metodologia

Conforme observado no fluxograma da Figura 3, a metodologia da pesquisa se deu em três etapas: aquisição de dados; processamento das imagens obtidas; e interpretação dos resultados.

Figura 3 – Fluxograma com as principais etapas seguidas para o desenvolvimento da pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor.

Na primeira etapa da pesquisa foi adquirida uma imagem orbital do satélite Sentinel-2 de 26 de setembro de 2017, com até 10 m de resolução espacial, já devidamente georreferenciada e ortorretificada, no site do Serviço Geológico do Estados Unidos - USGS, e o Modelo Digital de Elevação (MDE) do Sensor ALOS PALSAR, órbita absoluta 27262, frame 7110, com resolução espacial de 12,5 m, de 8 de março de 2011, disponibilizado na base de dados do Alaska Satellite Facility, da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA).

Paralelamente, foi realizada a revisão bibliográfica que subsidiou a pesquisa e permitiu identificar e caracterizar os movimentos de massa, a partir das classificações de Guidicini e Nieble (1983) e IPT (1991), que podem ser observadas no Quadro 1, e compreender

a morfodinâmica da área a partir da Ecodinâmica de Tricart (1977). Na atividade de campo foram identificados e registrados os movimentos de massa e a influência natural e antrópica na deflagração do fenômeno.

Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa

<b>Guidicini e Nieble (1983)</b>	<b>IPT (1991)</b>
<b><i>Escoamentos</i></b> Rastejos Corridas	<b><i>Rastejos</i></b>  <b><i>Corridas de Massa</i></b>
<b><i>Escorregamentos</i></b> Rotacionais Translacionais Quedas de blocos Quedas de detritos	<b><i>Escorregamentos</i></b>  <b><i>Quedas/Tombamentos</i></b>
<b><i>Subsidências</i></b> Subsidências Recalques Desabamentos	-----
<b><i>Formas de Transição</i></b>	-----
<b><i>Movimentos Complexos</i></b>	

Fonte: adaptado de Fernandes e Amaral (2004).

Para suporte de avaliação e processamento das imagens foram utilizados os softwares Global Mapper 18.1, ArcGIS® 10.5, PCI Geomatica 2018 e Stereonet 10.

No software ArcGIS® 10.5 as duas imagens subsidiaram a delimitação do Maciço de Uruburetama em relação aos limites topográficos da depressão sertaneja, cujas cotas estão entre 100 e 200 m, e também a delimitação da vertente úmida da serra a partir da topografia e da ocorrência da Floresta subperenifólia tropical pluvionebular (mata úmida).

O MDE ALOS PALSAR foi utilizado para identificação das feições estruturais no Maciço de Uruburetama.

Para obtenção das feições lineares, ou trends estruturais, inicialmente foram aplicados, no software Global Mapper 18.1, os filtros direcionais ao MDE ALOS PALSAR, com a iluminação orientada aos azimutes de 0°, 45°, 90°, 135° e zênite de 70 m de altitude. Conforme demonstrado por Batista *et al.* (2014), os filtros direcionais promovem o ressaltado das estruturas lineares que se encontram em direção paralela à direção do filtro.

Após a aplicação dos filtros direcionais sobre o MDE, as imagens foram salvas em formato *GeoTiff* e em seguida foram submetidas ao processo de fusão, através da ferramenta *Raster Calculator* do ArcGIS® 10.5, conforme metodologia de Abdullah *et al.* (2010) e Lopes (2017). Como demonstrado na Equação 1, a fusão consistiu na média aritmética entre as

imagens com azimutes  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , que resultou numa imagem onde se preservam as estruturas realçadas nas diferentes direções.

$$\frac{Az0 \text{ Alt}70 + Az45 \text{ Alt}70 + Az90 \text{ Alt}70 + Az135 \text{ Alt}70}{4} \quad (1)$$

No intuito de comprovar a eficácia da aritmética aplicada, foi escolhido um ponto em comum para as quatro imagens representativas dos filtros direcionais e para a imagem fusão gerada a partir do cálculo. Em seguida foi utilizada a ferramenta *Extract Multi Values to Points* do *software* ArcGIS® 10.5, para extrair o valor do *pixel* da mesma posição nas imagens mencionadas. Como pode ser verificado na Tabela 1, a médias dos valores de pixels obtidos das imagens dos filtros direcionais correspondem ao valor do *pixel* da imagem fusão obtida, o que comprova a qualidade do produto gerado.

Tabela 1 – Valor do *pixel* no ponto pré-determinado nas quatro imagens com geometrias solares diferentes e na imagem fusão resultante da média das imagens

<b>Azimute Solar</b>	<b>Altitude Solar</b>	<b>Valor do <i>pixel</i> do ponto</b>
<b>0°</b>	70	186
<b>45°</b>	70	186
<b>90°</b>	70	205
<b>135°</b>	70	232
<b>Média</b>	70	202

Fonte: dados da pesquisa.

A partir da imagem fusão gerada, os lineamentos foram extraídos automaticamente, através do algoritmo *LINE* do módulo *Focus* do *software* PCI Geomática. Os parâmetros estão apresentados na Tabela 2. Foram realizados vários testes, inclusive com parâmetros utilizados por outros autores, como Abdullah *et al.* (2010), Conceição e Silva (2013) e Lopes *et al.* (2017), porém os valores apresentados foram mais adequados às características geológicas e geomorfológicas da área de pesquisa.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada (*input*) utilizados através do algoritmo *LINE*

<b>Parâmetros</b>	<b>Algoritmo <i>LINE</i></b>
<i>Filter Radius (Pixel)</i>	8
<i>Edge Gradient Threshold</i>	70
<i>Curve Length Threshold</i>	30
<i>Line Fitting Error Threshold</i>	3
<i>Angular Difference Threshold</i>	15
<i>Linking Distance Threshold</i>	30

Fonte: dados da pesquisa.

A extração automática de lineamentos através do algoritmo *LINE* se dá a partir da manipulação de parâmetros globais que podem ser pré-definidos (*default*) ou alterados pelo usuário.

Esses parâmetros foram sumarizados conforme Conceição e Silva (2013):

***Filter Radius (FR)***: especifica o raio do filtro de detecção de borda, em pixels. Este parâmetro determina o nível até o qual o algoritmo detecta a informação como um lineamento. Um grande valor de *Filter Radius* indica que menos detalhes podem ser detectados, e também menos ruído. O valor padrão é 10, sendo que o intervalo de valores deste parâmetro é de 0 até 8192.

***Edge Gradient Threshold (EGT)***: especifica o limite do nível de gradiente mínimo de um pixel de borda para obter uma imagem binária. Os pixels acima do limiar representarão na imagem binária um elemento de borda. Este valor deve estar na faixa de 0 a 255, sendo que o valor padrão é 100.

***Curve Length Threshold (CLT)***: especifica o comprimento mínimo de curva, em pixels, para ser considerado como lineamento.

***Line Fitting Error Threshold (LFET)***: especifica, em pixels, o erro máximo permitido ao sobrepor uma linha sobre uma curva. Os valores mais baixos proporcionam um melhor ajuste, mas também segmentos mais curtos na linha.

***Angular Difference Threshold (ADT)***: especifica o ângulo máximo, em graus, entre segmentos de uma linha. Se o ângulo excede o máximo especificado, a linha é dividida em dois ou mais vetores. Este ângulo também define o ângulo máximo entre dois vetores para serem ligados. O valor padrão é 30.

***Linking Distance Threshold (LDT)***: especifica a distância mínima, em pixels, entre os pontos finais de dois vetores para serem ligados. O valor padrão é de 20.

De posse dos lineamentos extraídos automaticamente, foi realizada a medição da densidade dos vetores correspondentes aos lineamentos estruturais, no *software* ArcGIS® 10.5, no intuito de identificar a relevância dessas feições no desencadeamento dos processos erosivos e movimentos de massa.

No *software* Stereonet 10 foi gerado o diagrama de rosetas a fim de identificar e visualizar a direção predominante do *trend* regional dessas estruturas.

Na etapa final foi realizada a interpretação dos resultados.

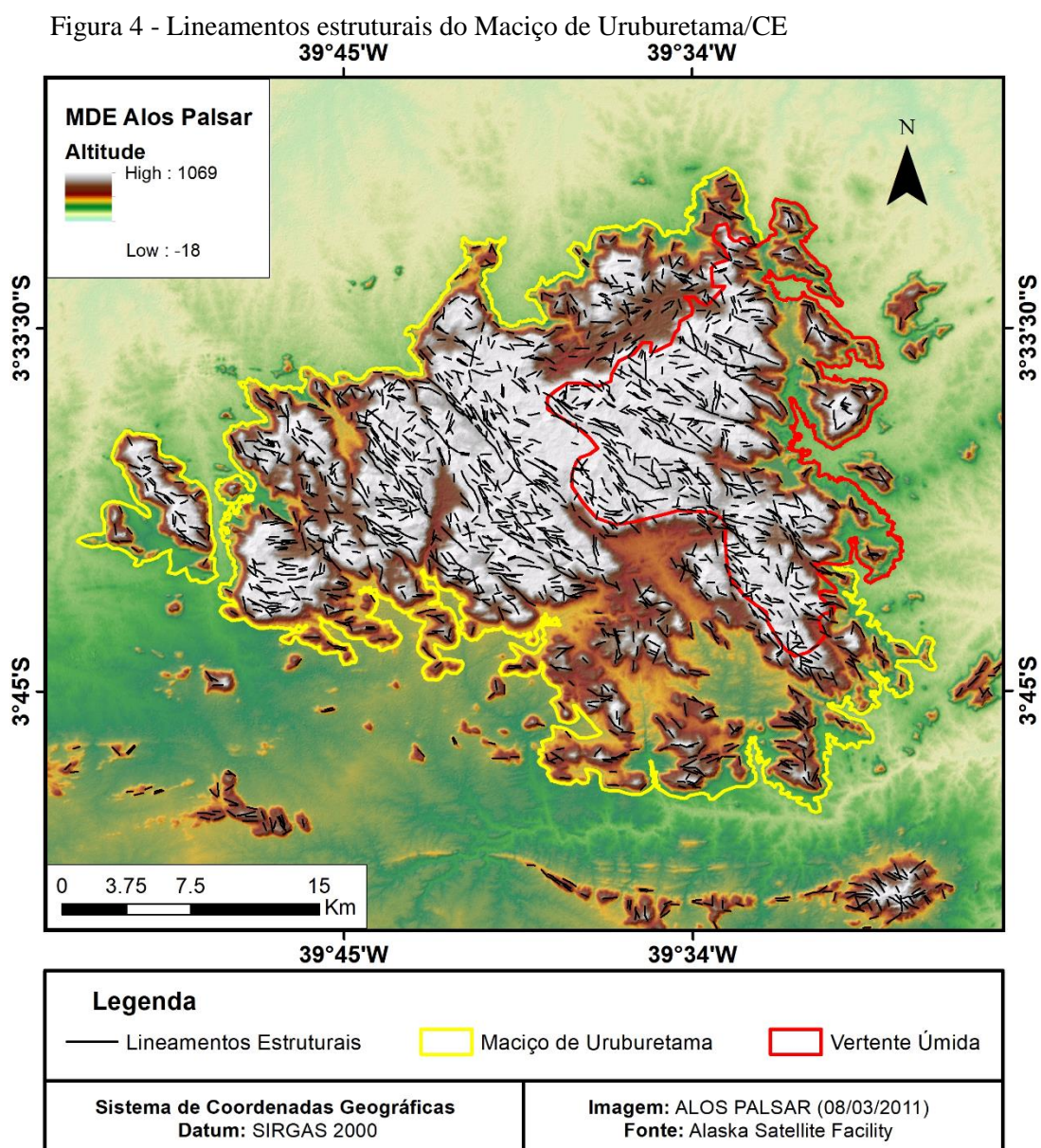


## 5.4 Resultados e discussão

Os lineamentos correspondem a feições de larga escala que aparecem no relevo de uma região, podendo ser representada por uma crista montanhosa, ou um vale, resultante da geologia estrutural (GUERRA; GUERRA, 1997).

Brito *et al.* (2016), destacam que os lineamentos são expressões do relevo e desempenham um papel importante na intemperização das rochas, através da formação de planos de fraqueza, contribuindo para a redução dos parâmetros de resistência.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos lineamentos topográficos do Maciço de Uruburetama, obtidos a partir do procedimento de extração automática no *software* PCI Geomatica (2018).



Fonte: elaborado pelo autor.

Os lineamentos extraídos retratam um relevo fortemente fraturado e dissecado em cristas, colinas e lombas alongadas, que se alternam com vales em forma de V e planícies alveolares (SOUZA; OLIVEIRA, 2006), como pode ser observado na Figura 5.

Os vales são esculpidos pela rede de drenagem que exibe um forte controle estrutural. Nos setores de suavização topográfica, a diminuição do gradiente implica no predomínio dos processos de sedimentação, que originam as planícies alveolares recobertas por sedimentos aluviais e coluviais (SOUZA; OLIVEIRA, 2006).

Figura 5 – Feições do relevo do Maciço de Uruburetama



Foto: Daniel Dantas (obtida por ARP, 20/05/2017).

A altimetria média no Maciço de Uruburetama é de aproximadamente 750 m. Em áreas de maior umidade predominam as formas de topos convexos, com vertentes curtas e declives que variam de 10% a 30%. As cristas apresentam feições simétricas, com vertentes retilíneas e compridas (Figura 6). Os declives são mais íngremes e maiores do que 30%. (SOUZA; OLIVEIRA, 2006). As cristas mais elevadas atingem de 800 a 900 metros de altitude (BRANDÃO; FREITAS, 2014).

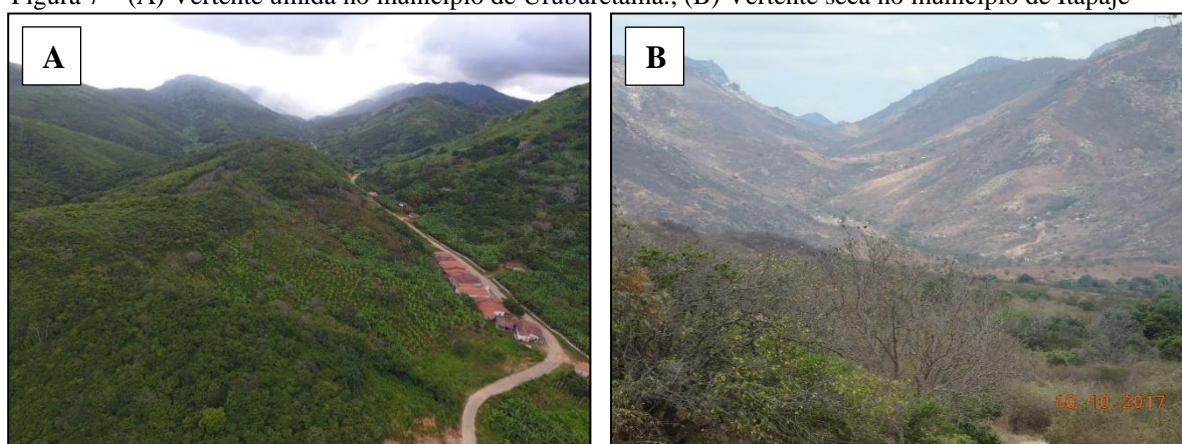
Figura 6 – vertentes retilíneas e compridas



Foto: Daniel Dantas (obtida por ARP, 20/05/2017).

As vertentes norte e leste são mais úmidas (Figura 7-A), como verificado nos municípios de Uruburetama e Itapipoca que apresentam índices pluviométricos entre 1.100 e 1.300mm anuais, sendo que 2/3 dessas chuvas ocorrem no trimestre março-abril-maio (SOUZA; OLIVEIRA, 2006), enquanto que as vertentes sul e oeste são mais secas (Figura 7-B), como observado nos municípios de Itapagé e Irauçuba. Esta última localidade, situada na Depressão Sertaneja junto à zona de sombra da serra de Uruburetama, registra pluviometria entre 400 e 500 mm/ano. Este é um dos mais baixos índices do estado do Ceará, fato que contribui para um cenário com estágio avançado de desertificação (BRANDÃO, 2003).

Figura 7 – (A) Vertente úmida no município de Uruburetama.; (B) Vertente seca no município de Itapagé



Fotos: A – Daniel Dantas (obtida por ARP, 20/05/2017), B – Eduardo Freires (10/10/2017).

Com relação aos solos, na vertente úmida do maciço há um predomínio dos Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos, solos bem estruturados, com gradiente textural entre os horizontes A e Bt, com boa fertilidade natural, muitas vezes associados a cascalhos e calhaus de quartzo (Figura 8-A). Nessa área prevalece o intemperismo químico e geração de solos profundos areno-argilosos ou argilo-arenosos, bem drenados, e que são revestidos por redutos de mata atlântica subperenifólia.

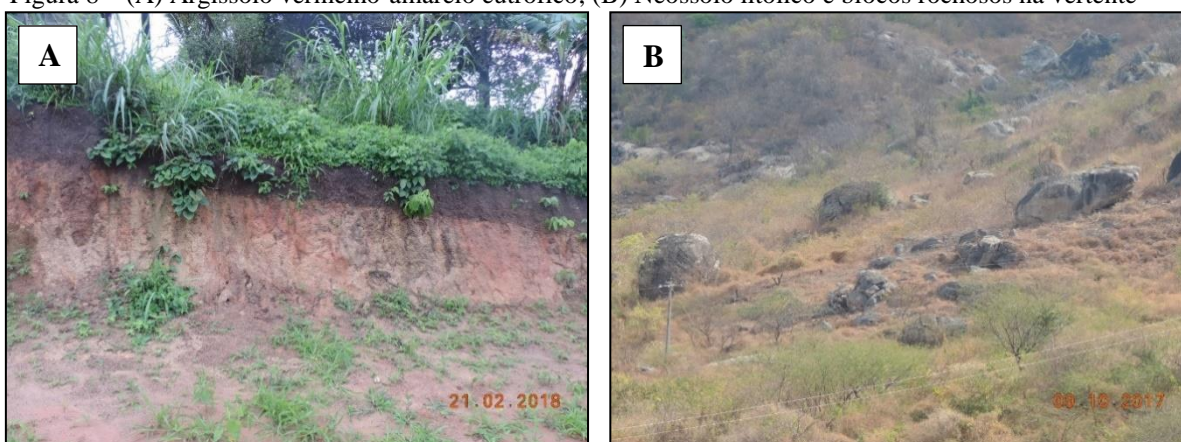
Nas áreas secas há domínio de Neossolos Litólicos eutróficos, solos menos profundos, com horizonte A assente sobre a rocha ou sobre um horizonte C de pouca espessura, compreendendo solos muito suscetíveis aos processos erosivos e afloramentos de rocha (Figura 8-B). Neste caso, predominam os processos de intemperismo físico e geração de solos pouco profundos ou rasos, arenosos ou cascalhentos, com ocorrência de muitos blocos rochosos nas vertentes íngremes dos maciços residuais, estando revestidos por mata atlântica subcaducifólia, floresta estacional decídua (caducifólia) ou por caatinga arbórea (BRANDÃO; FREITAS, 2014).



Ao analisar as características físicas do Maciço de Uruburetama é possível identificar e distinguir os tipos e movimento de massa e os seus elementos deflagradores. Os condicionantes atuam com intensidades distintas nas vertentes úmida e seca.

Verificou-se que no setor úmido da serra há a prevalência de ocorrências de escorregamentos do tipo rotacional e translacional, cujo material movimentado pode conter ou não blocos de rochas e detritos. Na área seca do maciço predominam quedas de blocos e detritos.

Figura 8 – (A) Argissolo vermelho-amarelo eutrófico; (B) Neossolo litólico e blocos rochosos na vertente



Fotos: Eduardo Freires (A - 21/02/2018, B - 09/10/2017).

Essa tendência é verificada em função das características dominantes em cada um dos setores da serra. Enquanto na vertente úmida observa-se elevados índices pluviométricos, que favorecem à formação de solos mais desenvolvidos e profundos, e por sua vez propiciam o crescimento da floresta pluvionebular, na vertente seca os baixos índices de chuvas contribuem para ocorrência de solos rasos, recobertos por uma vegetação caducifólia ou subcaducifólia, e que são mais susceptíveis aos processos erosivos. Tal situação contribui para cenários distintos na dinâmica das vertentes.

Na vertente seca pode ser observado inúmeros blocos de rochas expostos a partir do processo de erosão das encostas (Figura 9).

Em muitos casos, o processo de erosão natural é responsável pelo desgaste do material que estabiliza o bloco provocando o seu movimento morro abaixo. As rochas e paredões rochosos também estão submetidas ao intemperismo físico que é responsável por sua fragilização e ao longo do tempo, associado a processos químicos, pode provocar rupturas e induzir a quedas de blocos e detritos. Por vezes, estes processos podem ser intensificados a partir das intervenções antrópicas nas vertentes, como atividades agrícolas praticadas de forma inadequada (Figura 10-A e B) ou cortes para abertura de estradas.

Figura 9 – Blocos de Rochas expostos a partir da erosão diferencial no município de Itapajé

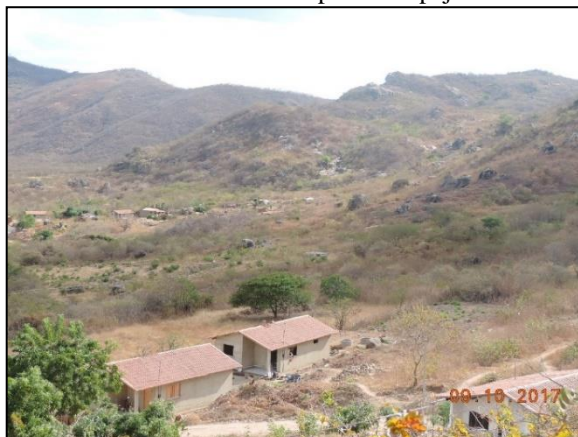
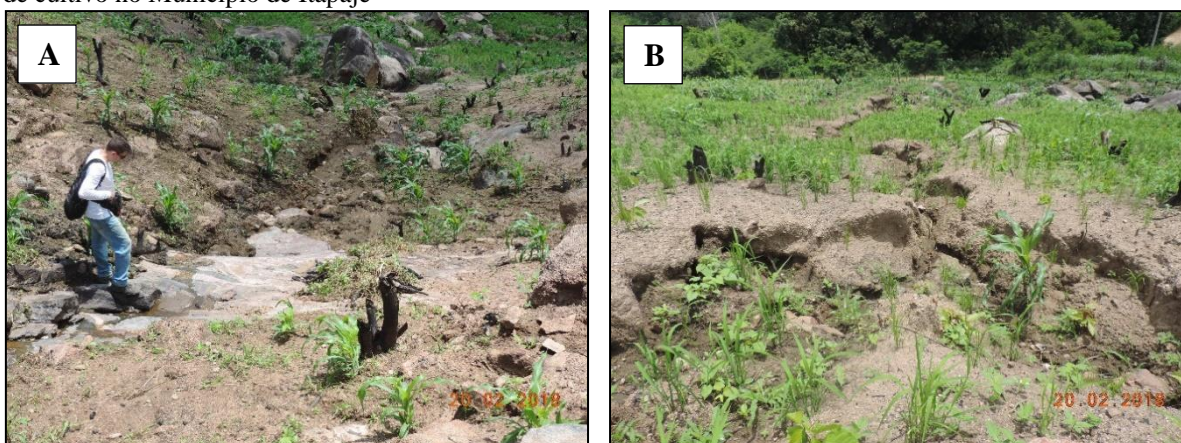


Foto: Eduardo Freires (09/10/2017).

Lima *et al.* (2015), destacam que as culturas de subsistência do milho e do feijão, bem como a bananicultura, desenvolvidas nas encostas, além de promover a degradação da vegetação serrana, potencializam a ocorrência de eventos morfodinâmicos.

Figura 10 - (A) Erosão acelerada em área de cultivo no município de Itapajé.; (B) Formação de voçoroca em área de cultivo no Município de Itapajé



Fotos: Eduardo Freires (20/02/2018).

Na vertente úmida, em virtude da ocorrência de solos mais profundos, pode ser verificada uma dinâmica diferente. Os movimentos gravitacionais geralmente são compostos de material terroso. Em áreas de colúvios ou em depósitos de tálus o material movimentado pode conter seixos, calhaus e matações. Essas formações podem ser facilmente instabilizadas, acarretando em movimentos de massa (Figura 11). Um grande volume de água precipitada pode aumentar o peso na encosta favorecendo a movimentação. Por outro lado, as intervenções provocadas nessas áreas potencializam as ocorrências já que a instabilidade mecânica é alta. Esta observação fica mais evidente no período chuvoso, quando as ocorrências aumentam.



Os movimentos de massa induzidos são aqueles deflagrados pela execução de cortes e aterros inadequados, pela concentração de águas pluviais e servidas, pela retirada da vegetação etc. (RIFFEL, *et al.*, 2016).

Figura 11 – Queda de blocos na Estrada para Itacolomy, Uruburetama



Fotos: Eduardo Freires (25/07/2018).

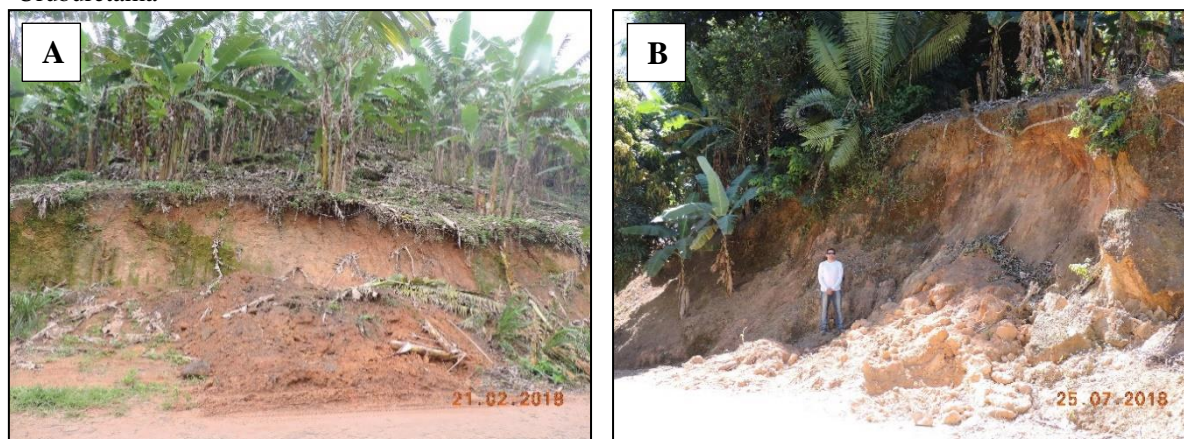
Os movimentos gravitacionais mais comuns na vertente úmida são os escorregamentos dos tipos rotacional e o translacional. Geralmente estão associados aos cortes de encostas para construção de estradas. Em muitos casos os taludes gerados pela abertura de estradas ficam expostos, sem nenhum método ou técnica de estabilização. Para agravar o quadro, os cultivos praticados encosta acima, sem considerar a topografia do relevo e o uso indiscriminado da irrigação, agravam a instabilidade detonando esses movimentos. Os cortes de estradas associados às práticas agrícolas inadequadas demonstram ser uma combinação determinante para deflagração dessas ocorrências, como pode ser observado nas Figuras 12-A e 12-B, em que são registrados escorregamentos do tipo rotacional e nas Figuras 13-A e 13-B que apresentam escorregamentos translacionais.

Os escorregamentos rotacionais apresentam superfície de ruptura curva, côncava para cima (forma de “colher”), ao longo da qual se dá um movimento rotacional da massa de solo. A presença de mantos de alteração espessos e homogêneos, como aqueles originados de rochas argilosas, facilita sua ocorrência. Geralmente estão associados à percolação da água em profundidade, sendo deflagrados algum tempo depois de um evento chuvoso. Esse tipo de escorregamento muitas vezes se dá em decorrência de cortes no sopé da encosta, provocados por erosão fluvial ou pela construção de moradias e estradas. Apresenta como feições típicas as escarpas de topo, fendas transversais na massa transportada e uma língua de material acumulado na base da encosta (DIAS e HERRMANN, 2002; FERNANDES e AMARAL, 2004).



Os Escorregamentos Translacionais representam a forma mais frequente entre todos os tipos de movimento de massa. Apresentam superfícies de ruptura com forma planar associadas às heterogeneidades dos solos e rochas que representam descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas derivadas de processos geológicos, geomorfológicos ou pedológicos (GUIDICINI e NIEBLE, 1983; FERNANDES e AMARAL, 2004; TOMINAGA *et al.*, 2015).

Figura 12 – Escorregamento Rotacional. (A) Localidade de Itacoatiara, Itapipoca; (B) Localidade de Itacolomy, Uruburetama



Fotos: Eduardo Freires (A – 21/02/2018, B – 25/07/2018).

Figura 13 – Escorregamento translacional. (A) Localidade de Itacolomy, Uruburetama.; (B) Localidade de Água fria, Uruburetama



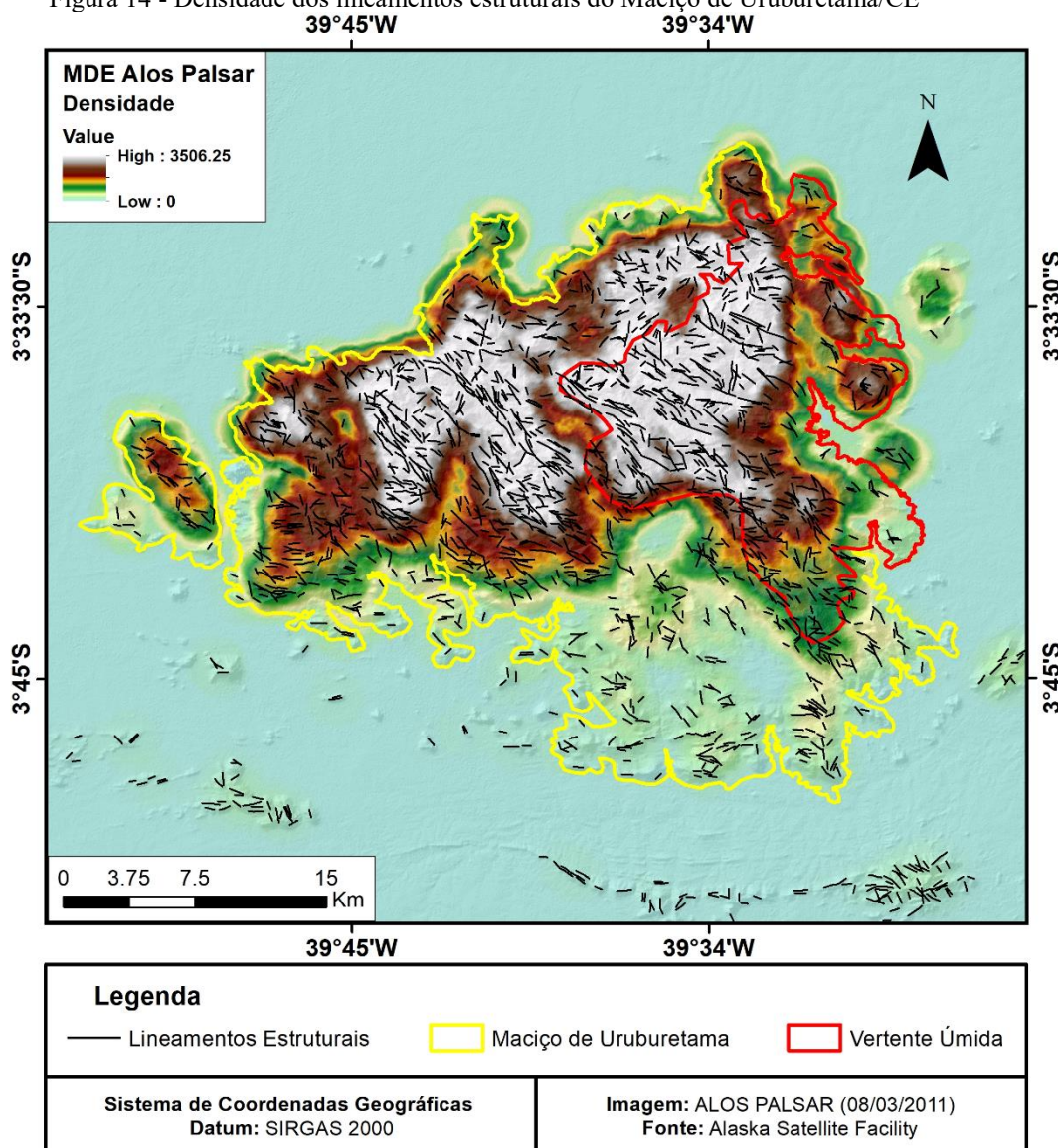
Fotos: Eduardo Freires (A – 25/07/2018, B – 17/03/2018).

Na Figura 14 pode ser observada a densidade de lineamentos na área de estudo. A maior densidade de lineamentos implica na ocorrência de um maior número de vertentes. Os setores onde os lineamentos estão mais adensados pode ser um indicativo da susceptibilidade a ocorrência de movimentos de massa. Todavia, observa-se que a deflagração de movimentos gravitacionais no Maciço de Uruburetama tem um forte componente humano.

Na vertente úmida esse fenômeno pode ser observado com maior frequência em virtude das características físicas que propiciam o desenvolvimento da atividade agrícola. A

ocorrência de solos profundos e maiores índices pluviométricos favorecem a agricultura, porém as intervenções promovidas a partir dessa atividade funcionam como gatilhos que induzem o movimento de massa nas encostas, que podem ser intensificados a partir de abertura de estradas. Por outro lado, nos setores secos da serra onde as condições do meio físico são mais limitantes, com solos rasos e menores índices pluviométricos, as atividades agrícolas influenciam na aceleração do processo erosivo, que por sua vez podem favorecer a movimentação de blocos estabilizados pelos sedimentos. O intemperismo físico é mais atuante na vertente seca, onde podem ser observados paredões e blocos rochosos expostos nas vertentes a partir da erosão diferencial. Este contexto implica numa dinâmica distinta, tendo a mecânica de rochas maior atuação nos movimentos gravitacionais nessa área, sendo predominante a ocorrência de queda de blocos e detritos.

Figura 14 - Densidade dos lineamentos estruturais do Maciço de Uruburetama/CE



Fonte: Elaborado pelo autor.

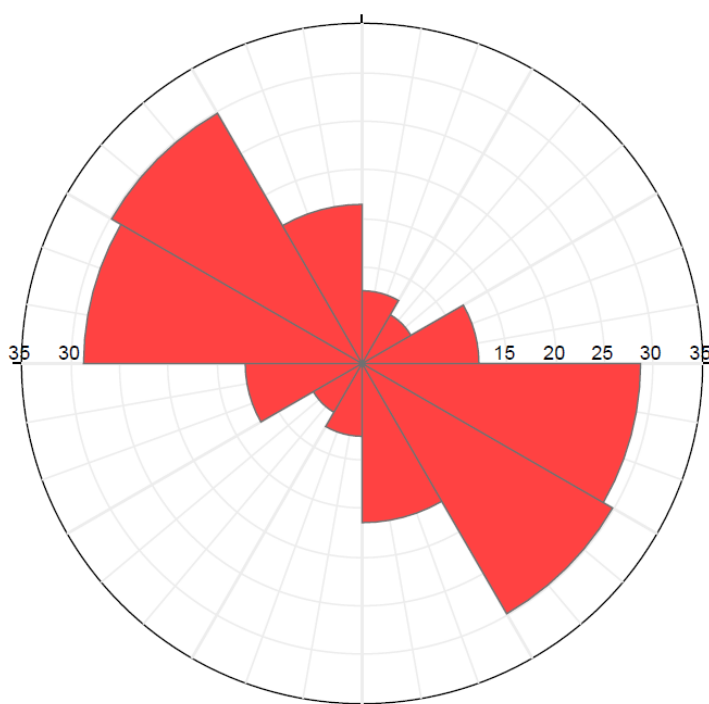


Sobre a ocorrência dessas estruturas rochosas que compõem o relevo, Maia e Castro (2017) destacam que a existência de topografias elevadas no embasamento resulta da menor erosão em núcleos de maior resistência mecânica aos processos denudacionais, onde a dificuldade se deve, principalmente, às características litológicas, faciológicas, petrográficas e estruturais que se somam a fim de aumentar ou diminuir a coesão físico-química da rocha frente à meteorização.

Em áreas com deficiência hídrica há o predomínio do intemperismo mecânico, pois falta água e ácidos (provenientes de organismos) para que ocorra reações químicas mais rápidas. A desagregação das rochas ocorre por meio da intensidade da insolação e suas consequentes variações diurnas e noturnas de temperatura sobre os afloramentos rochosos. Dependendo da natureza das rochas e de suas estruturas e texturas, os afloramentos rochosos intemperizados fornecem proporções variadas de detritos (RIBEIRO *et al.*, 2010; ABNER *et al.*, 2019).

O diagrama de roseta na Figura 15 indica a orientação dos lineamentos topográficos do Maciço de Uruburetama. Como pode ser observado há uma preponderância de lineamentos com orientação no *trend* NW-SE. Isto indica que a maior parte das vertentes estão dispostas a nordeste, a barlavento do maciço, e a sudoeste, a sotavento do maciço. A partir dessa compreensão é possível inferir que tais setores são prevalentes para ocorrência dos movimentos de massa.

Figura 15 – Distribuição da frequência de *trend* dos lineamentos extraídos na área em estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os condicionantes atuantes para ocorrência dos movimentos de massa nos dois setores apresentam intensidade distintas e podem ocorrer em virtude das características ambientais dominantes de cada área ou em decorrência do uso e ocupação do solo efetivado sem planejamento ou técnicas adequadas.

Os lineamentos extraídos de forma automática, analisados em conjunto com as características ambientais dominantes nas vertentes do Maciço de Uruburetama, se apresentaram como um importante instrumento para identificação de áreas susceptíveis a ocorrência de movimentos gravitacionais. A distribuição, densidade e orientação dos lineamentos pode ser um recurso para subsidiar o monitoramento de encostas propícias a deflagração de movimentos de massa.

### **5.5 Considerações finais**

Os lineamentos, obtidos de forma automática a partir do MDE ALOS PALSAR, permitiram avaliar a influência dos trends estruturais no desencadeamento dos movimentos de massa.

A partir do mapa de densidade de lineamentos foi possível identificar quais áreas eram mais propícias a deflagração dos movimentos de massa, tendo em vista que as áreas com relevo mais recortado implicam na ocorrência de mais cristas, colinas, vales e, conseqüentemente, em mais vertentes expostas aos agentes intempéricos e às intervenções antrópicas.

Da mesma forma, ao identificar a orientação principal dos lineamentos estruturais, foi possível compreender qual a disposição das vertentes aos condicionantes que favorecem à erosão e ao intemperismo e induzem os movimentos de massa. Tendo os setores nordeste e sudoeste do maciço maior tendência a ocorrência desses eventos.

Ao analisar os produtos gerados em conjuntos com as características ambientais do Maciço de Uruburetama, compreende-se que ocorrem dinâmicas diferentes em suas encostas. Os condicionantes deflagradores de movimentos de massa nos setores úmido e seco da serra atuam com intensidades diferentes e geram processos distintos.

Enquanto na vertente úmida são observados maiores índices pluviométricos e conseqüentemente solos profundos, na vertente seca ocorrem baixas média de chuvas e solos rasos. Essas particularidades acarretam na predominância de escorregamentos do tipo rotacional e translacional na vertente úmida e em queda de blocos e detritos ou tombamentos na vertente seca.

Todavia, observa-se que os movimentos de massa no maciço são potencializados pelas atividades humanas. Na vertente úmida a atividade agrícola praticada sem aplicação de técnicas adequadas e o corte de encostas para abertura de estradas funcionam como gatilhos para deflagração de escorregamentos. Na vertente seca a agricultura de subsistência, sobretudo o cultivo do milho, expõe os solos à erosão acelerada que, além de limitar a produção agrícola, induz à movimentação de blocos rochosos estabilizados pelos sedimentos. Observa-se que na vertente úmida há um forte componente humano na deflagração dos movimentos. Os cultivos e a abertura de estradas são uma combinação propícia a deflagração de escorregamentos. Na vertente seca o intemperismo físico é mais atuante, em virtude do processo de erosão diferencial que atuou nas encostas expondo blocos e paredões rochosos. Nesse caso há o predomínio da mecânica de rochas, sendo mais comuns movimentos como quedas de blocos e detritos ou tombamentos.

A extração automática de lineamentos demonstrou ser um excelente recurso para identificação de áreas com maior susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa, seja a partir de sua distribuição, ou da análise de densidade e orientação dessas estruturas. Os lineamentos extraídos de forma automática constituem um ótimo instrumento para o monitoramento das encostas que abrigam condições favoráveis para a deflagração de movimentos de massas.

## **5.6 Agradecimentos**

Os autores agradecem a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro concedido; e ao Programa de Pós-graduação em Geologia da UFC pelo incentivo a esta pesquisa.

## **Referências**

- Abdullah, A., Akhir, J.M., Abdullah, I., 2010. Automatic Mapping of lineaments using Shaded Relief Images derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering (Online)* 15, 949 – 957.
- Cordeiro, A.M.N., Carvalho, I.P., Bastos, F.H. Lima, D. L.S., 2019. O papel das estruturas litológicas na dinâmica e evolução do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. *Revista da Casa da Geografia de Sobral (Online)* 21, 81-93.
- Bastos, F.H., 2012. Movimentos de massa no maciço de Baturité e contribuições para estratégias de planejamento ambiental. Tese (Doutorado). Fortaleza, UFC.

- Batista, C.T., Verissimo, C.U.V., Amaral, W.S., 2014. Levantamento de feições estruturais lineares a partir de sensoriamento remoto – uma contribuição para o mapeamento geotécnico na Serra de Baturité, Ceará. *Revista do Instituto de Geociências/ Geologia USP, Série Científica* 14, 67-82. DOI: 10.5327/Z1519-874X201400020004.
- Bitar, O.Y., 1995. Curso de Geologia aplicado ao meio ambiente. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo.
- Brandão, R.L., 2003. Zoneamento Geoambiental da região de Irauçuba/CE. Texto explicativo. Carta Geoambiental. CPRM, Fortaleza.
- Brandão, R.L., Freitas, L.C.B., 2014. Geodiversidade do estado do Ceará. CPRM, Fortaleza.
- Brito, M.M., Weber, E.J., Krigger, V.S., Leitzke, F.P., 2016. Análise dos fatores condicionantes de movimentos de massa no município de porto alegre a partir de registros históricos análise dos fatores condicionantes de movimentos de massa no município de Porto Alegre a partir de registros históricos. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)* 68, 1853-1872.
- Cavalcante, J.C., Vasconcelos, A.M., Medeiros, M.F., Paiva, I.G., 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará. 1 ed. Escala 1:500.000. CPRM, Fortaleza.
- Conceição, R.A.C., Silva, A.Q., 2013. Extração automática de lineamentos utilizando imagens SRTM, Landsat ETM+ e ALOS PALSAR na região de Nobres, MT. In: *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, INPE, Foz do Iguaçu*. p.3688-3695.
- Dias, F.P., Herrmann, M.L.P., 2002. Susceptibilidade a deslizamentos: estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis – SC. *Revista Caminhos de Geografia (Online)* 3, 57-73.
- Falcão Sobrinho, J., Nascimento Neto, J.N., Falcão, C.L.C., 2019. Análise do uso e ocupação do solo em um ambiente úmido em meio ao semiárido cearense: Serra de Uruburetama. *Revista de Geociências do Nordeste (Online)* 5, 42-53. DOI: 10.21680/2447-3359.2019v5n0ID18430
- Fernandes, N.F., Amaral, C.P., 2004 Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A.J.T.; Cunha, S.B. (Orgs.), *Geomorfologia e meio ambiente*, 5 ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp.123 – 194.
- Guerra, A.T., Guerra, A.J.T., 1997. Novo dicionário geológico-geomorfológico. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro.
- Guidicini, G., Nieble, C.M., 1983 Estabilidade de taludes naturais e de escavações. 2 ed. Blucher, São Paulo.
- Guimarães, R.F., Carvalho Júnior, O.A.; Gomes, R.A.T.; Fernandes, N.F., 2008. Movimentos de massa. In: Florenzano, T.G. (org.), *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. Oficina de textos, São Paulo, pp.159 -184.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018. Portal das cidades: panorama/ população. Brasília. Disponível: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso: 28 out. 2018.
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas., 1991. Ocupação de encostas. IPT, São Paulo.



- Jorge, M.C.O., Guerra, A.J.T., 2013. Erosão dos solos e movimentos de massa: recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. In: Guerra, A.J.T.; Jorge, M.C.O. (Orgs.), Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas. Oficina de textos, São Paulo, pp.7-30.
- Lima, D.L.S., Cordeiro, A.M.N., Bastos, F.H., 2015. Agentes condicionantes e desencadeadores de movimentos gravitacionais de massa na vertente úmida do maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 8, 1142-1157. DOI: 10.26848/rbgf.v8.4.p1142-1152.
- Lima, D.L.S., Cordeiro, A.M.N., Bastos, F.H., Maia, R.P., 2019. Geomorfologia granítica do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 20, 373-395. DOI: 10.20502/rbg.v20i2.1401.
- Lopes, M.F.L., 2017. Abordagem metodológica para extração de estruturas a partir de dados de radar (SRTM+) na região da jazida de P-U de Itaitaia-Ce. TCC (Graduação). Fortaleza, UFC.
- Lopes, M.F.L., Fontenele, G.B., Gameiro, S., Miranda, M.P., Duarte, C.R., Souto, M.V.S., 2017. Análise comparativa dos lineamentos da região da jazida fósforo-uranífera de Itaitaia-Ce gerados através do MDE: SRTM+, ASTER GDEM 2 e TOPODATA. In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE, João Pessoa. p.763-770. Internet. ISBN 978-85-17-00088-1. IBI: <8JMKD3MGP6W34M/3PS44NE>. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2017/10.23.17.13>. Acesso em: 2 mai. 2018.
- Loureiro, H.A.S., Ferreira, S.M., 2013. O papel das geotecnologias no estudo de feições erosivas e de movimentos de massa no Brasil. In: Guerra, A.J.T., Jorge, M.C.O. (Orgs.), Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas. Oficina de textos, São Paulo, pp.95-125.
- Maia, R.P., Castro, H.S., 2017. Erosão Diferencial e Propriedades Geomorfológicas das Rochas- Exemplos do NE Brasileiro. *Revista de Geociências do Nordeste (Online)* 3, 1-15.
- Maia, R.P., Bezerra, F.H.R., 2014. Tópicos de Geomorfologia Estrutural – Nordeste Brasileiro. Edições UFC, Fortaleza.
- Oliveira, V.P.V., 2002. Prospección, caracterización y cartografía edafopaisagística em uma região montañosa del semiárido brasileiro: la Sierra de Uruburetama (Sertão Nordeste-Ceará-Brasil). Tese (Doutorado). Almeria, Universidad de Almeria.
- Penha, H.M., 2005. Processos endogenéticos na formação do relevo. In: Guerra, A.J.T.; CUNHA, S.B.C. (Orgs.), Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 6 ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro. pp.51-92.
- Pentado, M.M., 1983. Fundamentos de geomorfologia. 3 ed. IBGE, Rio de Janeiro.
- Ribeiro, S.C.; Marçal, M.S.; Corrêa, A.C.B., 2010. Geomorfologia de Áreas Semiáridas: Uma Contribuição ao Estudo dos Sertões Nordestinos. *Revista de Geografia (Online)* 27, 120-137.

- Riffel, E.S., Guasselli, L.A., Bressani, L.A., 2016 Desastres associados a movimentos de massa: uma revisão de literatura. *Boletim Goiano de Geografia (Online)* 36, 285-101. DOI: [10.5216/bgg.v36i2.42796](https://doi.org/10.5216/bgg.v36i2.42796).
- Schobbenhaus, C., Neves, B.B.B., 2003. A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana. In: Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. (Orgs.), *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Brasília. pp. 5-54.
- Silva, M.V.C., 2007. *Análise Geoambiental: subsídios ao planejamento agrícola da Serra de Uruburetama – Ce. Dissertação (Mestrado)*. Fortaleza, UECE.
- Souza, M.J.N., Oliveira, V. P. V., 2006. Os enclaves úmidos e sub-úmidos do semi-árido do Nordeste Brasileiro. *Mercator (Online)* 5, 85-102. DOI: 10.4215/RM0000.0000.0000.
- Tominaga, L.K., Santoro, J., Amaral, R., 2015. *Desastres naturais: conhecer para prevenir*. 3 ed. Instituto Geológico, São Paulo.
- Tricart, J., 1977. *Ecodinâmica*. IBGE, Rio de Janeiro.

## **6 CAPITULO VI – ANÁLISE DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL À DEGRADAÇÃO DOS SOLOS NA VERTENTE ÚMIDA DO MACIÇO DE URUBURETAMA/CE**

O artigo “Análise da vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos na vertente úmida do Maciço de Uruburetama/CE” será submetido para análise e publicação no periódico Revista Brasileira de Geomorfologia. A revista apresenta versão online com ISSN 2236-5664. O texto apresentado segue a mesma estrutura exigida pelo periódico.

O objetivo desse artigo é analisar a vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos na vertente úmida o Maciço de Uruburetama/CE a partir da integração de variáveis físicas e humanas em ambiente SIG.

## ANÁLISE DA VULNEABILIDADE AMBIENTAL À DEGRADAÇÃO DOS SOLOS NA VERTENTE ÚMIDA DO MACIÇO DE URUBURETAMA/CE

### Resumo

As características físicas observadas no Maciço de Uruburetama/CE impõem certos limites ao uso e ocupação do espaço, e sinalizam para necessidade de se implementar medidas orientadas a reduzir os impactos ambientais e econômicos. A expansão urbana e das atividades primárias promovem intervenções que comprometem os recursos naturais e a sustentabilidade agrícola no maciço. Nesse sentido essa pesquisa objetivou analisar a vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos a partir de uma análise multicritério e álgebra de mapas envolvendo as seguintes variáveis: cobertura e uso da terra, vulnerabilidade natural a perda de solos, erosividade, erodibilidade e densidade de lineamentos. O mapeamento de cobertura e uso da terra, obtido de uma classificação supervisionada da imagem MSI/Sentinel-2, mostrou que as classes Cultivos e Urbano/Solo exposto correspondem a 48,3% da área de estudo, o que indica o estágio de alteração da paisagem. A vulnerabilidade natural, gerada através das variáveis geomorfométricas extraídas do MDE ALOS PALSAR, revelou que as vertentes do maciço com orientação leste, norte e nordeste apresentaram maior ocorrência de vulnerabilidade Alta e Muito Alta. As classes Muito Baixa e Baixa distribuem-se principalmente no domínio de depressão sertaneja. O Mapa de erosividade foi obtido pelo interpolador IDW através do cálculo de erosividade realizado com base em registros pluviométricos de 23 postos de monitoramento da FUNCEME num intervalo de 10 anos (2010-2019). As classes de erosividade estão associadas a atuação de sistemas geradores de chuvas locais, que perdem força em direção ao continente. Assim, observou-se a ocorrência das classes de erosividade Moderada a Forte (92,66%) e Forte (7,34%). A erodibilidade dos solos foi processada por Krigagem Ordinária a partir do fator K obtido dos resultados das análises de 92 amostras de solos deformadas (granulometria, estrutura do solo, matéria orgânica) e 92 indeformadas (permeabilidade). As classes de erodibilidade estão associadas à distribuição e as características dos solos locais. A classe Muito Baixa (8%) está associada ao Planossolo Háplico Eutrófico e ao Neossolo Quartzarênico Órtico. A classe Baixa (83%) relaciona-se à ocorrência de Argissolo Vermelho-Amarelo e ao Neossolo Litólico, enquanto a classe Moderada (9%) associa-se principalmente ao Luvissoilo Crômico. O mapa de densidade de lineamentos, obtido dos lineamentos estruturais extraídos automaticamente da imagem ALOS PALSAR, associa a concentração de estrutura geológicas como cristas, lombas, vales, entre outros, a susceptibilidade à ocorrência de eventos morfodinâmicos. Os setores onde os lineamentos estão mais adensados podem ser um indicativo da maior susceptibilidade a processos erosivos e movimentos de massa. A integração das variáveis em ambiente SIG permitiu constatar que as classes de vulnerabilidade Alta e Muito Alta distribuem-se principalmente nas encostas do maciço, estando associadas às características físicas dominantes e ao grau de alteração antrópica. As áreas de menor vulnerabilidade ocorrem no domínio da Depressão Sertaneja e nos setores mais elevados do maciço, de difícil acesso, e com cotas altimétricas entre 600 e 1000m. O mapa de vulnerabilidade ambiental à perda de solos se constitui como instrumento de suporte a gestão e ao planejamento ambiental para orientar o uso e ocupação na vertente úmida do Maciço de Uruburetama e entorno.

**Palavras chaves:** Análise Muticritério, SIG, Planejamento.

### Abstract

The physical characteristics observed in the Massif of Uruburetama / CE impose certain limits on the use and occupation of space, and signal the need to implement measures aimed at reducing environmental and economic impacts. Urban expansion and primary activities promote interventions that compromise natural resources and agricultural sustainability in the massif. In this sense, this research aimed to analyze the environmental vulnerability to soil degradation from a multicriteria analysis and map algebra involving the following variables: coverage and land use, natural vulnerability to soil loss, erosivity, erodibility and lineament density. The coverage and land use mapping, obtained from a supervised classification of the MSI / Sentinel-2 image, showed that the Cultivation and Urban / Exposed soil classes correspond to 48.3% of the study area, which indicates the stage of change of the landscape. The natural vulnerability, generated through the geomorphometric variables extracted from the DEM ALOS PALSAR, revealed that the slopes of the massif with east, north and northeast orientation had a higher occurrence of High and Very High vulnerability. The Very Low and Low classes are mainly distributed in the field of country depression. The erosivity map was obtained by the IDW interpolator through the

erosivity calculation performed based on rainfall records of 23 FUNCEME monitoring stations over a 10-year interval (2010-2019). The erosivity classes are associated with the performance of local rain-generating systems, which lose strength towards the continent. Thus, the occurrence of moderate to strong (92.66%) and strong (7.34%) erosivity classes was observed. Soil erodibility was processed by Ordinary Kriging based on the K factor obtained from the analysis results of 92 deformed soil samples (granulometry, soil structure, organic matter) and 92 undisturbed (permeability). The erodibility classes are associated with the distribution and characteristics of local soils. The Very Low class (8%) is associated with the Haploss Eutrophic Planossol and the Neosol Quartzarenic Ortico. The Low class (83%) is related to the occurrence of Red-Yellow Argisol and the Litolic Neossol, while the Moderate class (9%) is mainly associated with Chromic Luvisol. The line density map, obtained from the structural lines automatically extracted from the ALOS PALSAR image, associates the concentration of geological structures such as ridges, bumps, valleys, among others, with the susceptibility to the occurrence of morphodynamic events. The sectors where the lineaments are more dense may be an indication of the greater susceptibility to erosive processes and mass movements. The integration of variables in a GIS environment showed that the classes of vulnerability High and Very High are distributed mainly on the slopes of the massif, being associated with the dominant physical characteristics and the degree of human alteration. The areas of least vulnerability occur in the area of sertaneja depression and in the higher sectors of the massif, which are difficult to access, and with altimetric levels between 600 and 1000m. The map of environmental vulnerability to soil loss is a tool to support environmental management and planning to guide the use and occupation of the humid slope of the Uruburetama Massif and its surroundings.

**Keywords:** Muticriteria Analysis, GIS, Planning.

## 6.1 Introdução

A intervenção humana sobre o relevo terrestre – seja em áreas urbanas ou rurais – acarreta na ocupação e transformação da superfície. Dependendo do tamanho dessa intervenção, das práticas conservacionistas e dos riscos geomorfológicos envolvidos, os impactos ambientais associados poderão causar grandes prejuízos ao meio físico e aos seres humanos (GUERRA, 2011).

No foco dessas transformações os solos apresentam impactos imediatos – seja pela ampliação das fronteiras agrícolas ou o uso intensivo aos quais são submetidos – levando-os à exaustão e/ou à redução gradativa de sua produtividade. Aliada a esta problemática, observa-se que a expansão urbana desordenada tem afetado esse recurso em diferentes intensidades. Pode-se inferir seu grau de impacto a partir do desmatamento indiscriminado, que reduz a qualidade dos solos, pela exploração mineral, pelo avanço dos prédios sem qualquer monitoramento, ou ainda pela expansão de favelas em áreas inadequadas, até mesmo protegidas pela legislação ambiental

Os danos provocados pelo homem sobre os solos e a cobertura vegetal têm sido efetuados a nível mundial, porém são mais proeminentes nas regiões onde ocorrem ocupações desordenadas das terras e/ou onde a necessidade de sobrevivência predomina sobre os fatores econômicos, sociais e ambientais (PALMIERI; LARACH, 2004). Nessa perspectiva, torna-se urgente a elaboração de estudos que identifiquem mudanças na paisagem, permitindo um planejamento que garanta a utilização racional dos solos em função da velocidade de ocupação

do espaço físico e promova uma adequação de uso desse recurso respeitando sua vocação natural.

A realização destes estudos requer o levantamento de variáveis ambientais que servem como base para a elaboração de planos de ação. A partir da identificação e avaliação dos atributos ambientais de uma determinada área é possível uma adequação entre as potencialidades da terra às possibilidades de uso, conservação e a exploração sustentável. Neste contexto, Ross (2004) indica que é cada vez mais necessário que se façam inserções antrópicas absolutamente compatíveis com as potencialidades dos recursos naturais de um lado e com as fragilidades dos sistemas ambientais naturais de outro.

Através de um diagnóstico sobre as condições ambientais do solo que envolvam informações como declividade do terreno, cobertura vegetal, escoamento superficial, entre outras variáveis, é possível estimar respostas aos impactos antrópicos. Essas informações permitem fazer um planejamento que adequa as atividades humanas às características do solo e, conseqüentemente, reduzir os conflitos de uso.

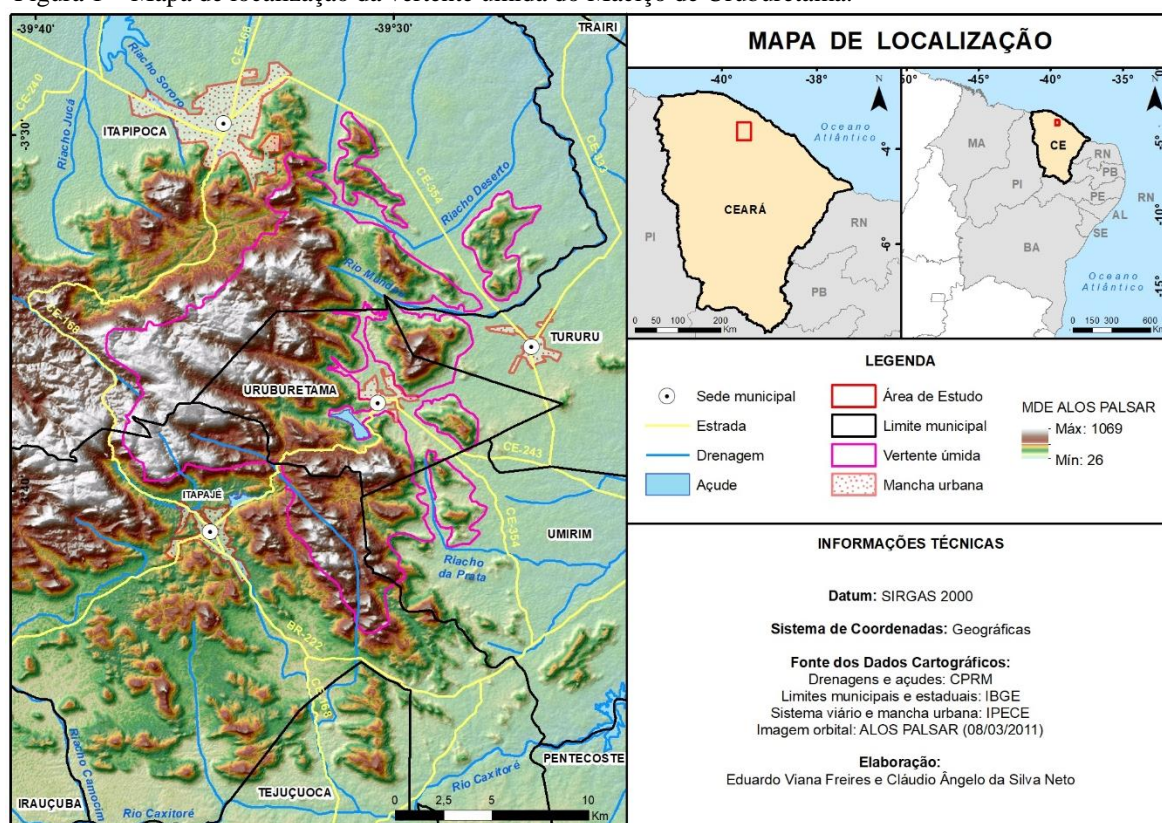
Localizado na região norte do estado do Ceará, o Maciço de Uruburetama é um exemplo de espaço físico marcado por forte intervenção antrópica. Apoiada sobretudo nas atividades do setor primário, a população local tem contribuído para um contexto de degradação dos solos que pode se tornar irreversível. Em decorrência de tais intervenções, sobretudo a partir das atividades agrícolas e aberturas de estradas, podem ser observados graves problemas de erosão e movimentos de massa na área. Silva (2007) reforça que o Maciço de Uruburetama é o mais desconfigurado ambientalmente do estado do Ceará, principalmente quando se comparara com as serras do Machado, Meruoca, das Matas e Baturité.

A área delimitada desta pesquisa (Figura 1) está localizada dentro dos limites administrativos de nove municípios (Irauçuba, Itapajé, Itapipoca, Pentecoste, Tejuçuoca, Trairi, Tururu, Umirim e Uruburetama) que, conforme IBGE (2018), apresentam em sua totalidade uma população estimada para o ano de 2018 de 373.788 habitantes. Este quadro não só remete à pressão exercida sobre a área como também reflete a dificuldade de implementar o planejamento ambiental no Maciço em face da influência de tantos municípios.

Diante da problemática apresentada, este trabalho objetiva analisar a vulnerabilidade à degradação dos solos na vertente úmida do Maciço de Uruburetama e seu entorno, a partir da integração de variáveis ambientais – naturais e antrópicas – com o intuito de subsidiar a gestão e o planejamento ambiental. Com essa perspectiva, foram utilizadas técnicas de geoprocessamento e geotecnia, além de observações em campo.



Figura 1 – Mapa de localização da vertente úmida do Maciço de Uruburetama.



Fonte: elaborado pelo autor.

## 6.2 Material e métodos

A metodologia da pesquisa está sintetizada no fluxograma da Figura 2.

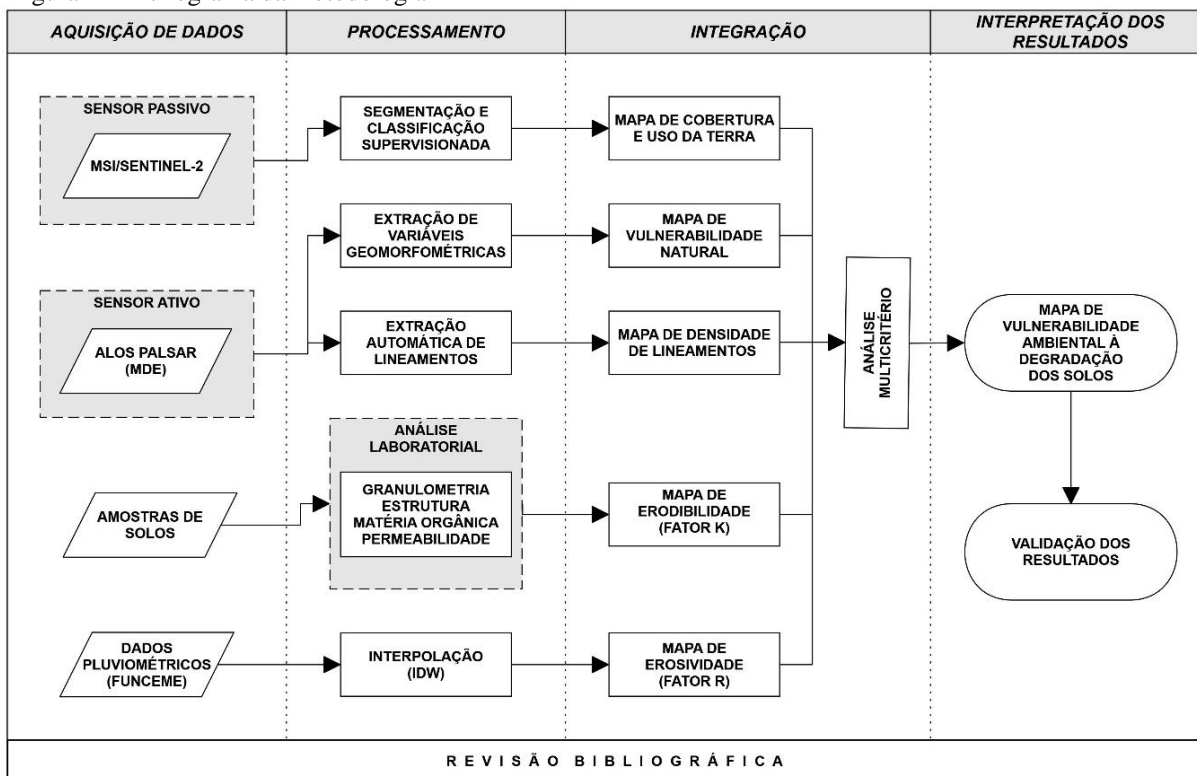
Como pode ser observado, na primeira etapa houve a obtenção de dados que subsidiaram a elaboração da pesquisa. Foram adquiridas as imagens MSI/Sentinel-2, no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2018), e a ALOS PALSAR no site do Alaska Satellite Facility. Além disso, foram obtidas amostras de solos deformadas e indeformadas a partir das atividades de campo, bem como, os dados pluviométricos da área de estudo, gerados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) através de seus postos de monitoramento.

Na segunda etapa os dados mencionados foram submetidos a processamentos e análises visando espacializar variáveis de interesse. Assim, no software SPRING 5.5.3, a imagem MSI/Sentinel foi submetida ao processo de segmentação e classificação supervisionada, voltado para geração do mapa de cobertura e uso da terra.

A imagem ALOS PALSAR, através de seu modelo digital de elevação (MDE), foi utilizada para extração das variáveis geomorfométricas (declividade, curvatura horizontal, curvatura vertical e orientação das vertentes) no software ArcGIS® 10.5. Em seguida as

variáveis geomorfométricas obtidas foram submetidas a uma análise multicritério e álgebra de mapas que permitiram espacializar a vulnerabilidade natural à perda de solos na área de pesquisa. O MDE também foi utilizado para extração automática de lineamentos no software Geomatica 2018, por meio do algoritmo *LINE*. Posteriormente foi gerado o mapa de densidade de lineamentos no software ArcGIS® 10.5.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia



Fonte: elaborado pelo autor.

As amostras de solos coletadas em campo, num total de 92 amostras deformadas e 92 indeformadas, foram submetidas a análise laboratorial conforme as normas da ABNT solos. As amostras deformadas foram utilizadas para análise de granulometria, estrutura e matéria orgânica, enquanto que as amostras indeformadas foram submetidas ao cálculo de permeabilidade. Os quatro parâmetros analisados subsidiaram a determinação do Fator K, ou a erodibilidade dos solos, em conformidade a metodologia de Wischmeier *et al.* (1971). Num segundo momento, os valores obtidos a partir da determinação do fator K foram submetidos a uma análise Geoestatística no *software* GeoMS, onde foi possível gerar e identificar o variograma que melhor representasse a natureza dos dados, e, que por sua vez, permitiu inferir os parâmetros que seriam utilizados na interpolação por *Krigagem* ordinária e consequentemente na geração do mapa de erodibilidade.

Os dados pluviométricos utilizados, que correspondem a um período de 10 anos (2010-2019), subsidiaram a determinação do Fator R, ou erosividade da chuva. Com base na metodologia de Carvalho (1994), foi calculada a erosividade a partir dos dados das estações de monitoramento selecionadas. Posteriormente os resultados obtidos foram submetidos a uma interpolação pela Ponderação do Inverso da distância (IDW), no *software* ArcGIS® 1.5., que resultou no mapa de erosividade.

A terceira etapa consistiu na integração dos mapas gerados na etapa anterior por meio de uma análise multicritério e álgebra de mapas no *software* ArcGIS® 10.5. Para cada variável analisada foram estabelecidos pesos em percentuais conforme a importância assumida no evento analisado. Da mesma forma, para cada uma das classes presentes nas variáveis mapeada foram estabelecidas notas de 0 a 10 de acordo com a sua relevância nos eventos deflagrados. O resultado desse procedimento foi o mapa de vulnerabilidade ambiental a perda de solos.

Na última etapa foi realizada a análise e a interpretação dos produtos gerados, bem como o relatório final.

### **6.2.1 Mapeamento de cobertura e uso da terra**

A partir do processamento e classificação temática de imagem orbital do sensor MSI (satélite Sentinel-2), além de atividades de campo voltadas para a definição e validação de classes, foi possível gerar um mapa de cobertura e uso da terra para a área em estudo.

As classes de cobertura e uso terra foram definidas em conformidade ao mapa de Unidades Fitoecológicas elaborado pelo IPECE (2018), ao mapa de Cobertura Vegetal e Uso da Terra da Serra de Uruburetama proposto por Silva (2007) e aos levantamentos realizados em campo nesta pesquisa. Foram determinadas sete classes temáticas de cobertura e uso da terra na área de pesquisa: Mata Úmida; Mata Seca; Caatinga Arbustiva Densa; Caatinga Arbustiva Aberta; Cultivos; Corpos D'água; e Urbano/Solo Exposto.

A imagem adquirida corresponde a data de 26 de dezembro de 2017, obtida já devidamente georreferenciada e ortorretificada. A fim de minimizar os efeitos atmosféricos na radiação da superfície imageada, visto que a atmosfera afeta a radiação da superfície que é captada pelo sensor, foi realizada a correção radiométrica, através do processo de subtração do *pixel* escuro (DOS, do inglês *Dark Object Subtraction*). Essa técnica estima a interferência atmosférica diretamente da imagem, reamostrando os valores de cada *pixel* (GÜRTLER *et al.*, 2003; SANCHES *et al.*, 2011).

O processo de classificação temática teve como base a geração do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Essa técnica realça a vegetação em relação aos instrumentos urbanos, água e ao solo exposto, como também reduz a informação espectral de duas bandas em apenas uma, relacionada às características da vegetação: área foliar, biomassa, produtividade, atividade fotossintética e percentagem de cobertura (ROSEMBACK *et al.*, 2005; VERONA *et al.*, 2005).

Posteriormente, a nova imagem NDVI foi submetida ao processo de segmentação por crescimento de regiões. Nesta técnica foram utilizados os parâmetros de similaridade e área, onde a primeira é o limiar abaixo do qual as regiões são consideradas similares e, conseqüentemente, se adjacentes podem ser agrupadas. Já o limiar de área é o número mínimo de *pixels* para que uma região seja individualizada. Após vários testes, a combinação com limiar de similaridade igual a 8 e limiar de área igual a 10 *pixels* foi a que se apresentou mais adequada ao mapeamento da área de estudo.

A partir da segmentação por crescimento de regiões foi executada uma classificação supervisionada por regiões, por meio do algoritmo de distância Euclidiana *Bhattacharya*, visando identificar e extrair as classes de interesse. Este classificador é um algoritmo que permite a interação do analista, que seleciona os polígonos gerados na segmentação, para definir as amostras de treinamento das classes a serem mapeadas. Para execução do treinamento foram selecionadas 881 amostras representativas das sete classes temáticas definidas para o mapeamento.

Para atestar a qualidade da classificação temática foi realizada a validação do procedimento. Foram utilizadas amostras georreferenciadas e representativas das classes mapeadas, correspondendo à verdade terrestre conforme Congalton (1991). Devido à extensão da área de estudo foram geradas 50 amostras aleatórias através de um sorteio randômico para cada uma das sete classes mapeadas, totalizando 350.

Para determinação das classes das amostras de validação optou-se por uma imagem orbital de melhor resolução espacial. Nesse intuito foi utilizada uma imagem do satélite GeoEye de 2017, com resolução espacial de 0,41 m, para identificação e interpretação dos alvos.

Após esta etapa foi realizado o cruzamento das classes definidas no mapeamento temático com as classes análogas obtidas no levantamento da verdade terrestre. Como resultado foi gerada uma matriz de erros onde pôde-se atestar a qualidade do mapeamento realizado a partir dos coeficientes estatísticos Índice *Kappa* e Exatidão Global.

O Índice *Kappa* (Equação 1) é bastante utilizado para medir a qualidade da classificação e também para quantificar os valores entre os classificadores (LOBÃO *et al.*, 2005).

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^e x_{ii} - \sum_{i=1}^e (x_{i+} + x_{+i})}{n^2 - \sum_{i=1}^e (x_{i+} + x_{+i})} \quad (1)$$

Onde:  $\hat{K}$  = Índice de Exatidão *Kappa*;  $l$  = nº de linhas da matriz quadrada;  $n$  = nº de observações na linha  $i$  e da coluna  $i$ ;  $e$  = total marginal da linha  $i$  e coluna  $i$ , respectivamente; e  $n$  = número total de observações.

O resultado obtido pelo Índice *Kappa*, varia no intervalo de 0 a 1 (Tabela 1), sendo que o valor mais próximo a 1 significa a melhor qualidade dos dados classificados.

Tabela 1 - Classes e desempenho do Índice *Kappa*

Classes do índice	Desempenho
< 0	Péssimo
0 - 0,2	Ruim
0,21 - 0,4	Razoável
0,41 - 0,6	Bom
0,61 - 0,8	Muito Bom
0,81 - 1,0	Excelente

Fonte: Adaptado de Landis e Koch (1977).

A estimativa de acurácia, por sua vez, é obtida pela Exatidão Global (Equação 2), que corresponde à razão entre a soma de todos os elementos amostrais classificados corretamente e o número total de elementos (CONGALTON; GREEN, 1999).

$$EG = \frac{\sum_{i=1}^k x_{ii}}{N} \quad (2)$$

Onde:  $EG$  = índice de exatidão global;  $N$  = nº total de unidades amostrais contempladas pela matriz;  $x_{ii}$  = nº de elementos da diagonal principal corretamente classificados; e  $k$  = nº de categorias analisadas na matriz.

A acurácia pode ser analisada individualmente por meio da análise de erros de omissão e comissão presentes na classificação (CONGALTON; GREEN, 1999). Um erro de omissão ocorre quando um objeto é excluído da classe à qual pertence, enquanto o de comissão ocorre ao incluir um objeto a uma classe que ele não pertença. Na matriz de erros esses valores são obtidos por meio da acurácia do produtor e do usuário, respectivamente (ROVEDDER, 2007).

### 6.2.2 Vulnerabilidade natural à perda de solos

A extração de variáveis morfométricas a partir do modelo digital de elevação (MDE) do sensor PALSAR (satélite ALOS), com resolução espacial de 12,5 m, possibilitou a geração do mapa de vulnerabilidade natural à perda dos solos. Para isso, foi utilizada imagem orbital datada de 8 de março de 2011 da área de estudo.

Neste trabalho foi adotada a metodologia descrita por Valeriano (2008), gerando assim as variáveis declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal e orientação das vertentes (Figura 3).

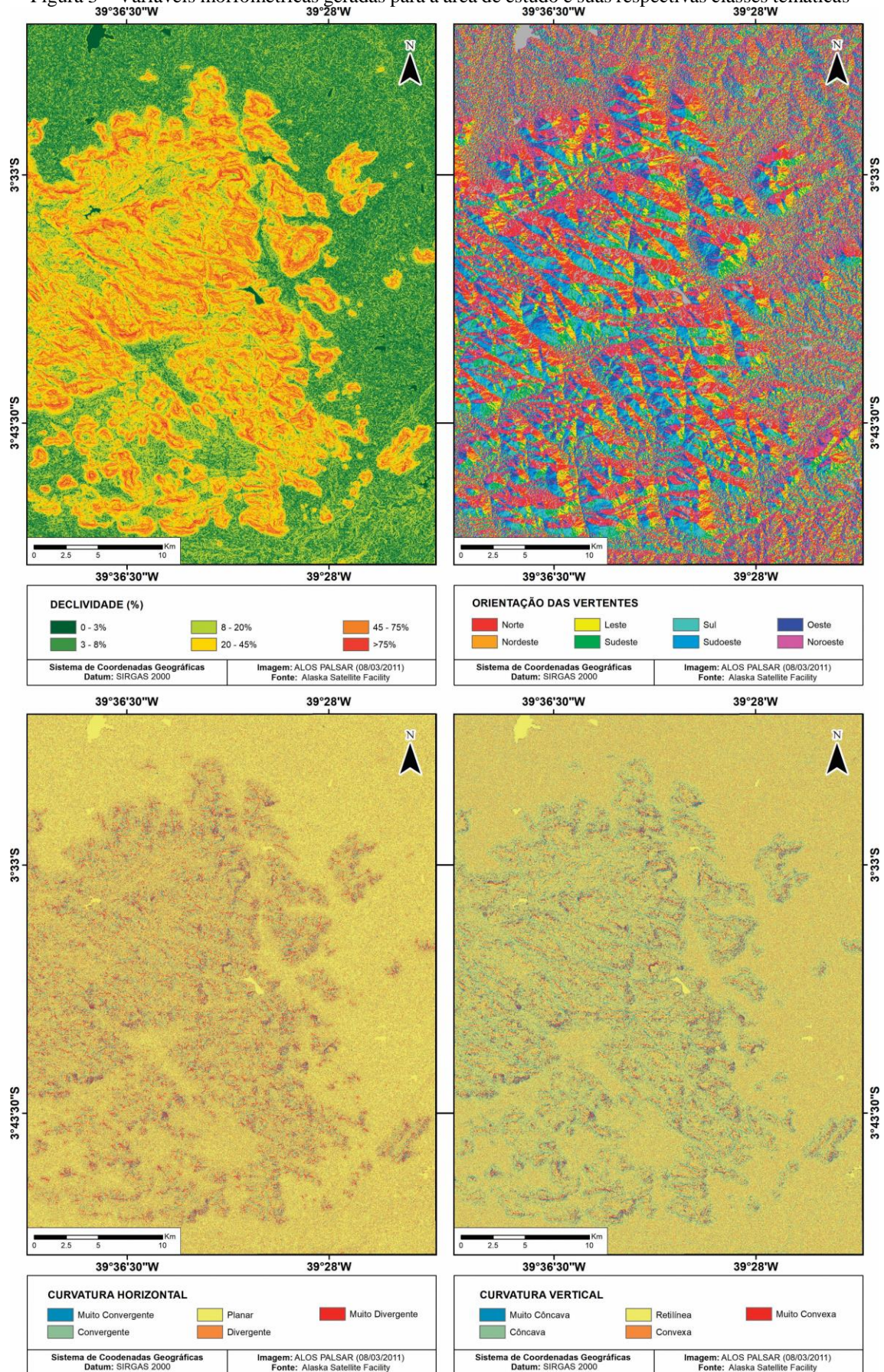
As variáveis, com suas respectivas classes, foram submetidas ao processo de álgebra de mapas realizada a partir de análise multicritério. Para cada variável analisada foram estabelecidos pesos em percentuais (Tabela 2) conforme o grau de importância para o fenômeno analisado (erosão e movimento de massa), totalizando 100%. Adaptando a metodologia de Crepani *et al.* (1996) e Crepani *et al.* (2008) foram definidas notas de 1 a 10 para as classes de cada variável mapeada, conforme a relevância assumida no evento deflagrado. Posteriormente os mapas temáticos das variáveis morfométricas, com seus respectivos pesos e notas, foram submetidos a álgebra de mapas a partir da Equação 3.

$$V = d * 0,35 + cv * 0,30 + ch * 0,20 + ov * 0,15 \quad (3)$$

Em que:  $V$  corresponde à vulnerabilidade natural à perda de solos;  $d$  à declividade;  $cv$  à curvatura vertical;  $ch$  à curvatura horizontal; e  $ov$  à orientação de vertente.



Figura 3 – Variáveis morfométricas geradas para a área de estudo e suas respectivas classes temáticas



Fonte: adaptado de Freires *et al.* (2019).

Tabela 2 - Pesos e notas atribuídos às e classes temáticas

<b>Declividade</b>	
<b>Peso (35%)</b>	<b>Notas</b>
0 - 3%	1
3 - 8%	2
8 - 20%	4
20 - 45%	6
45 - 75%	8
>75%	10
<b>Curvatura Vertical</b>	
<b>Peso (30%)</b>	<b>Notas</b>
Muito Convexa	2
Convexa	4
Retilínea	6
Côncava	8
Muito Côncava	10
<b>Curvatura Horizontal</b>	
<b>Peso (20%)</b>	<b>Notas</b>
Muito Divergente	2
Divergente	4
Planar	6
Convergente	8
Muito Convergente	10
<b>Orientação Das Vertentes</b>	
<b>Peso (15%)</b>	<b>Notas</b>
Noroeste	1
Oeste	2
Sudeste	4
Sul	5
Sudoeste	6
Norte	8
Leste	9
Nordeste	10

Fonte: dados da pesquisa.

### 6.2.3 Erosividade da chuva (*Fator R*)

“A erosividade da chuva representa um índice numérico que expressa a sua capacidade, esperada em dada localidade, de causar erosão em uma área sem proteção” (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012). Nesta pesquisa, a erosividade foi obtida a partir de registros de chuvas observados na área de pesquisa num período dez anos (2010 a 2019), através de 23 postos pluviométricos (Tabela 3) da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME). Os dados foram aplicados na Equação 4, proposta por Carvalho (1994), gerando o valor da erosividade em M.J.mm/ha.h.ano.

$$Ecl = 6,866. (Pm^2/P)^{0,85} \quad (4)$$

Onde: Ecl = Média mensal do índice de erosão; Pm = precipitação média mensal (mm); P = precipitação média anual (mm).

Tabela 3 – Distribuição dos postos da FUNCEME por município e Erosividade obtida

<b>MUNICÍPIO</b>	<b>POSTO</b>	<b>EROSIVIDADE (M.J.mm/ha.h.ano)</b>
Amontada	Amontada	567.10998090
	Icarai de Amontada	1034.8637840
Apuiarés	Apuiarés	566.31803390
General Sampaio	General Sampaio	553.50357800
Irauçuba	Irauçuba	413.81946670
	Juá	424.01142850
Itapajé	Itapajé	592.03820170
	Santa Cruz	726.04729750
Itapipoca	Arapari	761.28362860
	Itapipoca	773.04213750
Miraíma	Miraíma	559.80806980
Paraipaba	Paraipaba	925.49958090
Pentecoste	Casa de Pedra	548.78060840
	Pentecoste	536.69665290
	Sebastiao de Abreu	551.54214170
São Gonçalo do Amarante	São Gonçalo	676.40273880
	Sede	815.62094130
	Siupe	987.26395620
São Luiz do Curu	São Luiz do Curu	602.08856830
Trairi	Fazenda Lages	777.64624000
	Trairi	881.69986640
Umirim	Umirim	605.90803350
Uruburetama	Uruburetama	667.21604780

Fonte: dados da pesquisa.

Os valores correspondentes ao Fator R foram enquadrados nas classes de erosividade propostas por Carvalho (1994), como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Taxas de erosividade das classes médias anuais

<b>CLASSE DE EROSIVIDADE</b>	<b>VALOR DE R</b>
Fraca	$R < 250$
Moderada	$250 < R < 500$
Moderada a Forte	$500 < R < 750$
Forte	$750 < R < 1000$
Muito forte	$R > 1000$

Fonte: Carvalho (1994).

Para avaliar a distribuição espacial da erosividade foi utilizado a Ponderação do Inverso das Distâncias ou IDW (*Inverse Distance Weighting*). De acordo com Jacob e Young (2006), trata-se de um interpolador que implementa o pressuposto de que as coisas mais próximas entre si são mais parecidas do que as mais distantes. Assim, no intuito de inferir um



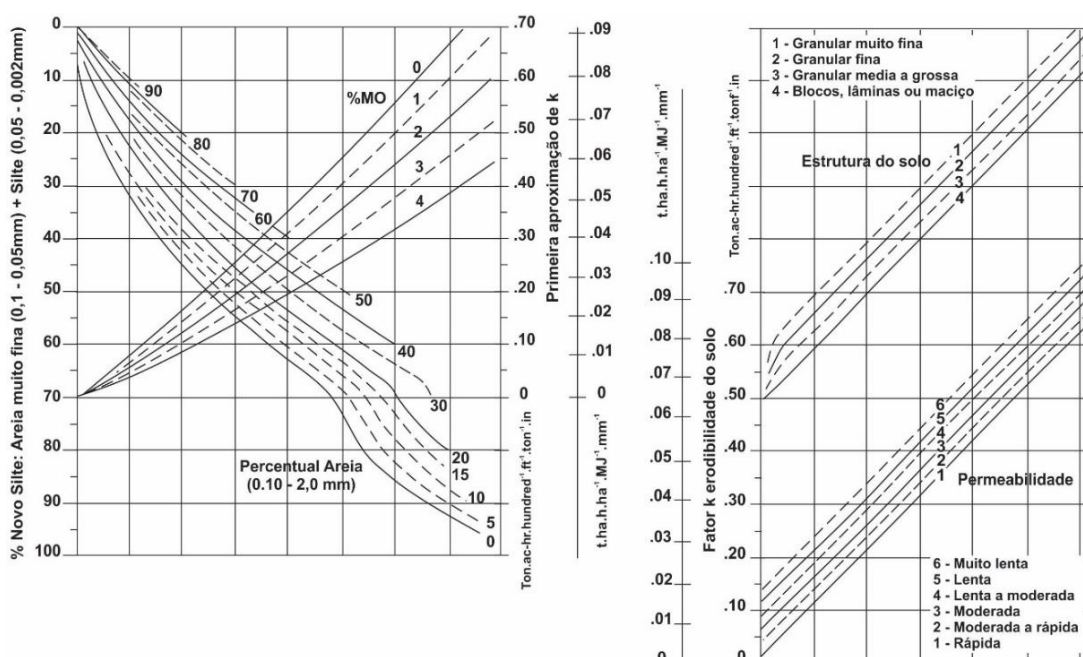
valor para algum local não medido, o IDW usará os valores amostrados à sua volta, que terão um maior peso do que os valores mais distantes, ou melhor, cada ponto irá manter uma influência no novo ponto, que diminui na medida em que a distância aumenta, daí deriva o seu nome.

#### 6.2.4 Determinação da erodibilidade dos solos (Fator K)

A erodibilidade, ou Fator K, representa a susceptibilidade ou predisposição de um solo a processos erosivos (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Quanto menores a estabilidade dos agregados dos solos e a capacidade de infiltração de água nele, maior susceptibilidade ele terá aos processos erosivos. Os solos ricos em silte e areia e com material cimentante (matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio) são muito propensos a processos erosivos, em razão da pequena resistência que oferecem ao desprendimento de partículas durante a precipitação (PRUSKI, 2009).

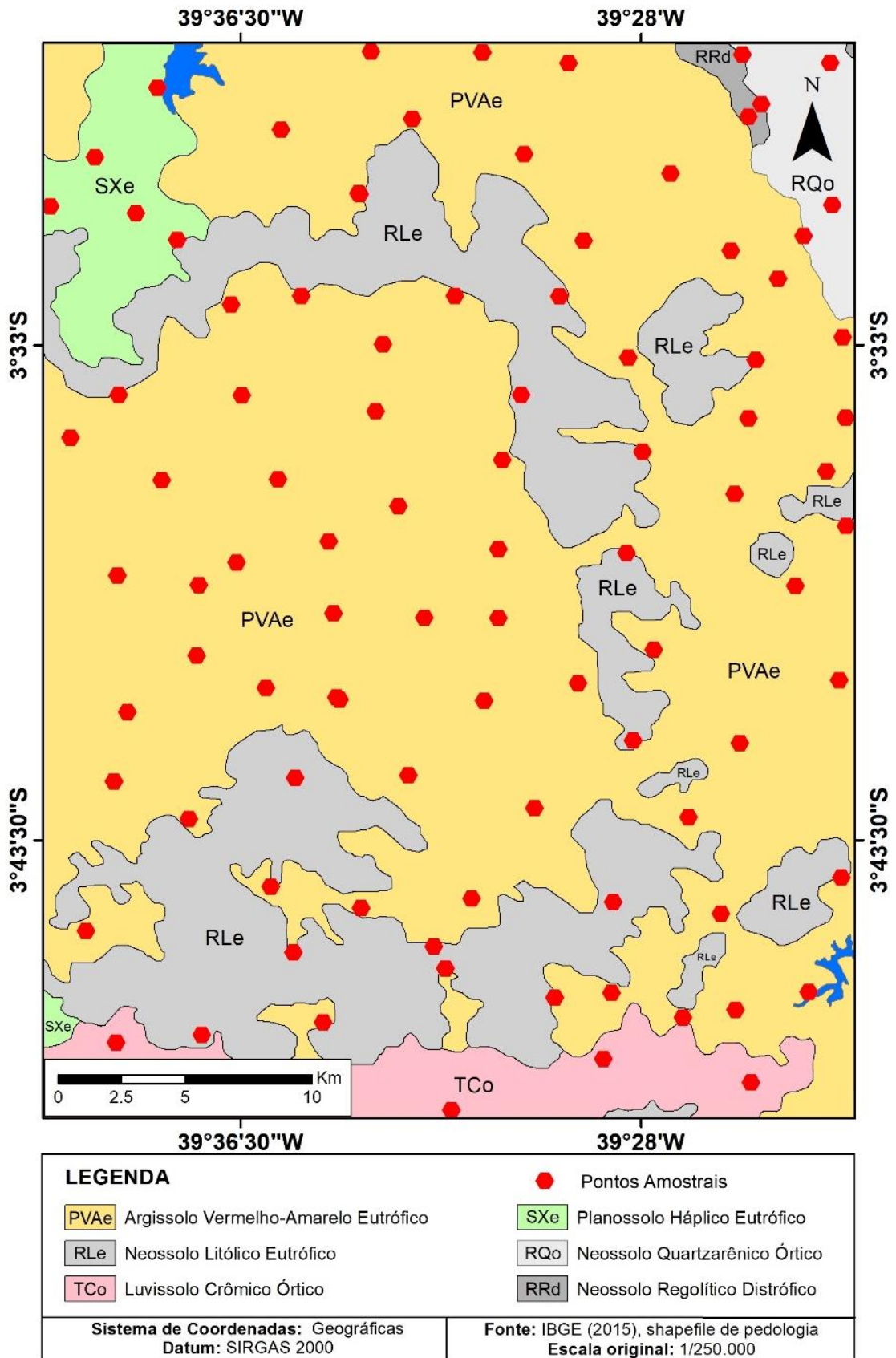
A erodibilidade dos solos foi determinada de forma indireta através do Nomograma (Figura 4) proposto por Wischmeier *et al.* (1971). Para isso, foram realizadas coletas de 184 amostras de solos, sendo 92 deformadas e 92 indeformadas (Figura 5), em seis incursões a campo. As amostras deformadas foram submetidas a ensaios laboratoriais para determinação de granulometria, teor de matéria orgânica e estrutura do solo. Enquanto as amostras indeformadas foram utilizadas para a determinação da permeabilidade dos solos.

Figura 4 - Nomograma para determinação da erodibilidade dos solos



Fonte: Wischmeier *et al.*, (1971).

Figura 5 - Distribuição dos pontos de coletas das amostras de solos obtidas na área de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise no nomograma se dá a partir da integração dos parâmetros de granulometria, teor de matéria orgânica, estrutura do solo e permeabilidade, obtidos através de ensaios realizados em laboratório, das amostras de solos deformadas e indeformadas, conforme normas da ABNT Solos (Figura 6).

Para aplicação dos valores obtidos nas análises, e obtenção do fator de erodibilidade com maior precisão, foi utilizada a Equação 5, que representa uma aproximação algébrica do Nomograma (ARS/USDA, 1997).

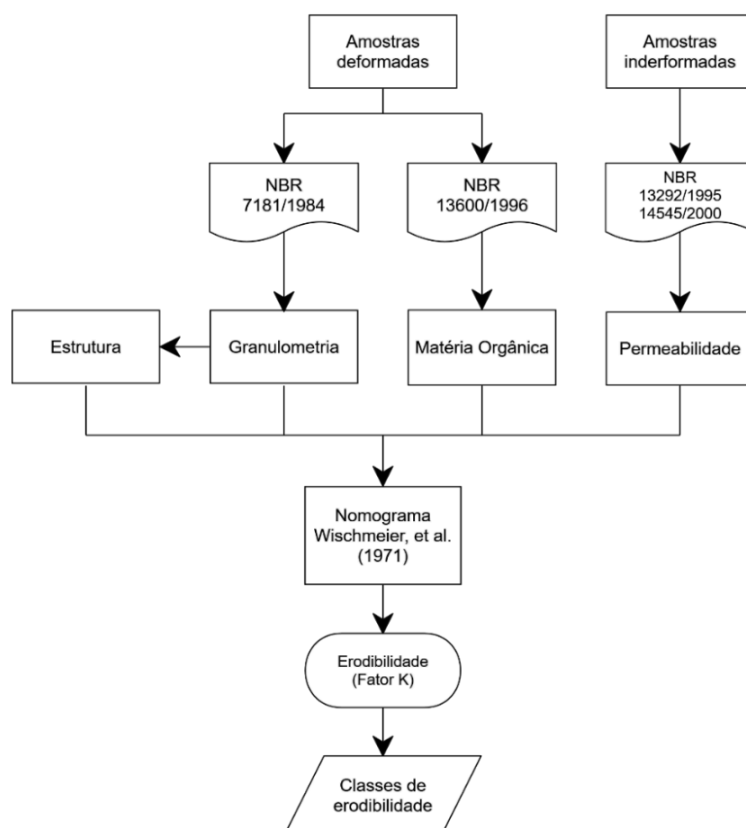
$$K = \left\{ \frac{[2,1(10^{-4})(12-OM)M^{1,14} + 3,25(s-2) + 2,5(p-3)]}{100} \right\} 0,1318 \quad (5)$$

Onde: OM = Conteúdo de matéria orgânica, %; M= Parâmetro que representa a textura do solo; s = Classe de estrutura do solo; p = permeabilidade.

Já o parâmetro M é calculado a partir da Equação 6:

$$M = (\% \text{ silte} + \% \text{ areia muito fina}) (100 - \% \text{ argila}) \quad (6)$$

Figura 6 – Fluxograma para determinação da erodibilidade



Fonte: elaborado pelo autor.



Para a análise granulométrica as 92 amostras deformadas de solos coletadas foram submetidas aos procedimentos estabelecidos pela NBR 7181 de dezembro de 1984, que prescreve o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por combinação de sedimentação e peneiramento. Esse ensaio é utilizado para determinar a distribuição granulométrica do solo, ou seja, a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa seca total utilizada para o ensaio.

Para realização do ensaio foram utilizados de forma complementar a NBR 5734 de dezembro 1989, que especifica as peneiras para ensaio, e a NBR 6457 de agosto de 1986, que trata da preparação de amostras de solos para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

A estrutura reflete a resistência do solo à erosão através das propriedades físico-químicas da argila, que faz com que os agregados permaneçam estáveis em presença de água e de propriedades biológicas devido à presença de matéria orgânica humificada. Quanto maior a estabilidade dos agregados em água, maior a permeabilidade do solo e menor a desagregação, implicando no menor escoamento superficial e arraste das partículas individualizadas pela água (CORRECHEL, 2003).

Na Tabela 5 são apresentadas as classes dessas estruturas e as suas categorias correspondentes. Os valores de  $\psi$  para os solos de estrutura granular muito fina, granular fina, granular média a grossa e em bloco, lâmina ou maciço são, respectivamente, 1, 2, 3 e 4 (WISCHMEIER *et al.*, 1971).

Os valores de categoria da estrutura do solo da área de pesquisa foram definidos a partir dos resultados obtidos através da análise granulométrica das amostras, onde pode-se constatar o percentual de cada tamanho de sedimentos.

Tabela 5 – Classes e categorias de estrutura do solo

<b>Categoria da estrutura</b>	<b>Classificação</b>
1	Granular muito fina (> 50% finos)
2	Granular fina (> 50% areia)
3	Granular média a grossa (> 50% areia grossa)
4	Bloco, lâmina ou maciço (> 50% de pedregulho)

Fonte: adaptado de Wischmeier *et al.* (1971).

Para análise da matéria orgânica foi utilizado 0,5 kg da amostra deformada obtida em campo. Esse ensaio foi realizado conforme a NBR 13600 de maio de 1996, que descreve os procedimentos para determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C.

A Equação 7 foi utilizada nos cálculos para determinação do teor de matéria orgânica:

$$MO = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \cdot 100 \quad (7)$$

Onde: MO = teor de matéria orgânica, em %; A = massa da amostra seca em estufa, à temperatura de 105°C a 110°C, em g; B = massa da amostra queimada em mufla, à temperatura de (440 ± 5) °C, em g.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados conforme a NBR 13292 de abril de 1995, norma que rege a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante, e NBR 14545 de julho de 2000, que trata da determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. O ensaio de permeabilidade tem como objetivo determinar o coeficiente de permeabilidade com a água percolando através do solo em regime de escoamento laminar. A permeabilidade do solo é um importante fator para análise de erodibilidade, pois quanto maior a infiltração, menor será o escoamento superficial e consequentemente menor o potencial o erosivo.

O cálculo de permeabilidade por carga constante se deu a partir da Equação 8:

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \quad (cm/s) \quad (8)$$

Onde: K = Coeficiente de permeabilidade por carga constante (cm/s); Q = Volume de água medida na proveta (cm<sup>3</sup>); L = Altura do corpo de prova (cm); A = Área do corpo de prova (cm<sup>2</sup>); H = Carga hidráulica (cm); t = Tempo decorrido do ensaio (s).

O cálculo do coeficiente de permeabilidade por carga variável se deu pela Equação 9:

$$K_{20} = 2,3 \cdot \frac{aL}{At} \cdot \log \frac{h_o}{h_f} \cdot Fc \quad (9)$$

Onde: K<sub>20</sub> = Coeficiente de Permeabilidade por carga variável (cm/s); a = área da seção transversal da bureta (cm<sup>2</sup>); L = Diâmetro do corpo de prova (cm); A = Área da seção transversal do corpo de prova (cm<sup>2</sup>); t = Tempo decorrido do ensaio (s); H<sub>o</sub> = Altura inicial do nível d'água (cm); H<sub>f</sub> = Altura final do nível d'água (cm).

A Tabela 6 apresenta os valores e as classes de permeabilidade. Os valores de  $p$  para solos com permeabilidade rápida, moderada a rápida, moderada, lenta a moderada, lenta e muito lenta são de 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente (WISCHMEIER *et al.*, 1971).

Tabela 6 – Classificação dos valores de permeabilidade do solo

<b>Código de permeabilidade</b>	<b>Classificação</b>	<b>Intervalos de permeabilidade (cm/s)</b>
6	Muito lenta	$< 2,8 \times 10^{-5}$
5	Lenta	$2,8 \times 10^{-5} - 5,6 \times 10^{-5}$
4	Lenta a moderada	$5,6 \times 10^{-5} - 1,46 \times 10^{-4}$
3	Moderada	$1,46 \times 10^{-4} - 5,6 \times 10^{-4}$
2	Moderada a rápida	$5,6 \times 10^{-4} - 1,7 \times 10^{-3}$
1	Rápida	$> 1,7 \times 10^{-3}$

Fonte: adaptado de Wischmeier *et al.* (1971).

#### 6.2.4.1 Espacialização da erodibilidade (fator K) por Krigagem ordinária

Com o fator K obtido de todos os pontos amostrais (APÊNDICE B), conforme metodologia proposta, cada valor foi enquadrado dentro das classes de erodibilidade proposta por McKenzie *et al.* (2002), como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação de erodibilidade

<b>Intensidade da erodibilidade</b>	<b>Intervalo do fator K t.ha.h (ha.MJ.mm)<sup>-1</sup></b>
Muito baixa	$< 0,01$
Baixa	$0,01 - 0,02$
Moderada	$0,02 - 0,04$
Alta	$0,04 - 0,06$
Muito Alta	$> 0,06$

Fonte: McKenzie *et al.* (2002).

Para espacialização do Fator K, e posteriormente das classes de erodibilidade, foi realizada uma interpolação pelo método de Krigagem ordinária.

A krigagem é um processo geoestatístico de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, com base em valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica. A diferença fundamental em relação as estimativas por médias ponderadas ou por médias móveis é que somente a Krigagem apresenta estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada ao valor estimado (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

De acordo com Yamamoto e Landim (*op. cit.*), a krigagem ordinária é um método local de estimativa em que um ponto não amostrado resulta da combinação linear dos valores encontrados na vizinhança próxima. O estimador da krigagem ordinária é baseado na fórmula

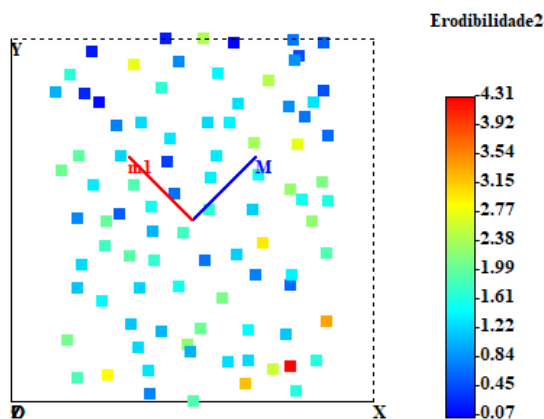
da média ponderada, onde os ponderadores dependem da informação estrutural fornecida pelo variograma. O valor da variável de interesse em um ponto não amostrado ( $x_0$ ) é calculado como combinação linear dos pontos de dados vizinhos ( $Z(x_i), i=1,n$ ), conforme a Equação 10:

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (10)$$

Para construção e modelagem do variograma foi utilizado o *software* geoMS, onde foram definidos os parâmetros para tais procedimentos.

Como pode ser observado na Figura 7, foram identificadas a partir da distribuição e variância das amostras a direção principal ( $45^\circ$ ) e a direção ortogonal ou secundária ( $-45^\circ$ ). Com base nessas direções foram definidos os azimutes transversais a esses eixos, ou seja  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Sob a possibilidade de as amostras apresentarem um comportamento semelhantes em todas as direções foi definido um azimuth omnidirecional, representado por  $1^\circ$ .

Figura 7 – Distribuição das amostras com direções principal (M) e secundária (m1)



Fonte: dados da pesquisa.

A partir dos azimutes identificados foram definidos os valores dos parâmetros para construção dos variogramas, que podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – parâmetros utilizados para construção do variograma

Azimute	Parâmetros	Valores inseridos	Azimute	Parâmetros	Valores inseridos
45°; -45°, 0°; e 90°	<i>Tolerance</i>	12	Omnidirecional 1°	<i>Tolerance</i>	180
	<i>Lag Distance</i>	3500		<i>Lag Distance</i>	3500
	<i>Cut Distance</i>	100000...		<i>Cut Distance</i>	100000...

Fonte: Dados da pesquisa.

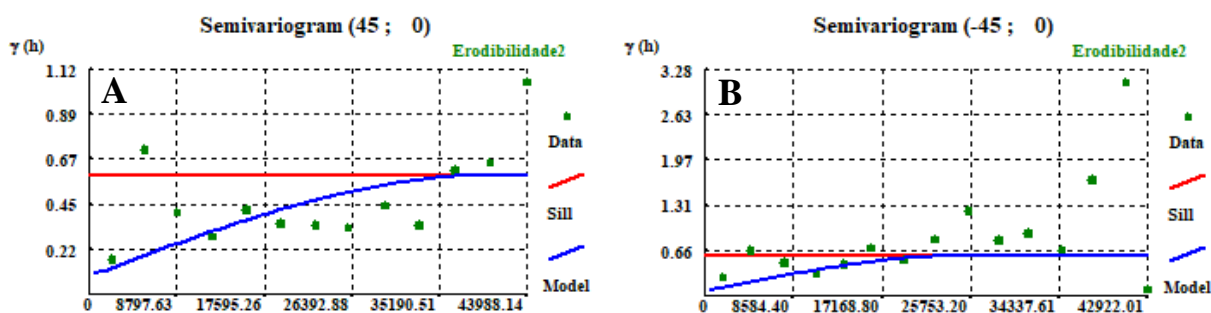
Na etapa seguinte houve a modulação ou ajustamento dos variogramas visando inferir a distância ou amplitude representativa para área e pares de pontos conforme as direções estabelecidas. Com o ajustamento buscou-se também reduzir o efeito pepita.

De acordo com Soares (2006), o efeito pepita mede a variabilidade correspondente a uma pequena escala não abrangida pela malha de amostragem e a variabilidade à escala da amostra induzida por erros não sistemáticos de amostragem e monitorização que acrescentam à estrutura do fenômeno um ruído aleatório.

Todos os variogramas foram modulados a partir modelo esférico. Conforme Soares (2006), o modelo esférico é função de dois parâmetros: um patamar  $C$ , limite superior para o qual tendem os valores do variograma com o aumento dos valores de  $h$ , e a amplitude  $h=a$ , a distância a partir da qual os valores de  $\gamma(h)$  param de crescer e são iguais a um patamar que é normalmente coincidente com a variância de  $Z(x)$ . A amplitude mede a distância a partir da qual os valores de  $Z(x)$  deixam de estar correlacionados.

Após os ajustamentos de todos os variogramas foi o selecionado o que apresentava a maior amplitude, ou seja, o variograma representativo da direção  $45^\circ$ , e o variograma ortogonal a esta direção, no caso  $-45^\circ$ , conforme podem ser observados nas Figura 8.

Figura 8 – (A) Variograma com direção  $45^\circ$ ; (B) Variograma com direção  $-45^\circ$



Fonte: dados da pesquisa.

Com base nos parâmetros de construção e modulação do variograma com direção  $45^\circ$  foi realizada a krigagem dos dados amostrais (fator  $K$ ) no *software* ArcGIS® 10.5. Tais parâmetros podem ser observados na Tabela 9.

A partir do processo de krigagem foi gerado um mapa de distribuição das amostras interpoladas em 10 classes. Posteriormente as classes foram redefinidas conforme os intervalos de erodibilidade de Mackenzie *et al.* (2002), que resultou no mapa de erodibilidade com três classes (Muito Baixa, Baixa, Moderada).

Tabela 9 – Parâmetros utilizados na Krigagem ordinária

<i>Direction main</i>	45°
<i>Semivariogram model</i>	Esférico
<i>Lag size</i>	3500
<i>Number of lags</i>	12
<i>Major range</i>	40469.089
<i>Minor range</i>	25753.205
<i>Partial Sill</i>	0.5
<i>Nugget</i>	0.092
<i>Maximum Neighbors</i>	15
<i>Minimum Neighbors</i>	5

Fonte: dados da pesquisa.

### 6.2.5 Densidade de lineamentos

Para esta etapa da pesquisa foram utilizadas uma imagem orbital do satélite Sentinel-2 de 26 de setembro de 2017, com até 10 m de resolução espacial, já devidamente georreferenciada e ortorretificada, e o MDE do sensor ALOS PALSAR, órbita absoluta 27262, frame 7110, com resolução espacial de 12,5 m, de 8 de março de 2011.

Ambas as imagens subsidiaram a delimitação do Maciço de Uruburetama, seja em relação aos limites topográficos da Depressão Sertaneja, cujas cotas estão entre 100 e 200 m, como também à delimitação da vertente úmida da serra a partir da topografia e da ocorrência da Floresta Subperenifólia Tropical Pluvionebulosa (mata úmida).

Para obtenção das feições lineares, ou *trends* estruturais, inicialmente foram aplicados, filtros direcionais ao MDE ALOS PALSAR, com a iluminação orientada aos azimutes de 0°, 45°, 90°, 135° e inclinação de 70°. Conforme Batista (2014), os filtros direcionais promovem o ressaltado das estruturas lineares que se encontram em direção paralela à direção do filtro.

Após a aplicação dos filtros direcionais sobre o MDE, as imagens foram submetidas ao processo de fusão, conforme metodologia de Abdullah *et al.* (2010) e Lopes (2017). Este procedimento consistiu na média aritmética (Equação 11) entre as imagens com azimutes 0°, 45°, 90° e 135°, que resultou numa imagem onde se preservam as estruturas realçadas nas diferentes direções utilizadas:

$$\frac{Az0 \text{ Alt}70 + Az45 \text{ Alt}70 + Az90 \text{ Alt}70 + Az135 \text{ Alt}70}{4} \quad (11)$$

A partir da imagem fusão gerada, os lineamentos foram extraídos através do algoritmo *LINE* do *software* PCI Geomática. Nesta etapa, vários testes com parâmetros de extração foram realizados, inclusive com valores utilizados por outros autores, como Abdullah



*et al.* (2010), Conceição e Silva (2013) e Lopes *et al.* (2017). No caso desta pesquisa, os valores da Tabela 10 foram mais adequados às características geológicas e geomorfológicas da área.

Tabela 10 - Parâmetros de entrada utilizados no algoritmo LINE

Parâmetros	Algoritmo LINE
<i>Filter Radius (Pixel)</i>	8
<i>Edge Gradient Threshold</i>	70
<i>Curve Length Threshold</i>	30
<i>Line Fitting Error Threshold</i>	3
<i>Angular Difference Threshold</i>	15
<i>Linking Distance Threshold</i>	30

Fonte: dados da pesquisa.

A partir das feições extraídas foi realizada a medição da densidade dos vetores correspondentes aos lineamentos estruturais, no intuito de identificar sua distribuição espacial e intensidade, interpretando assim a sua relevância no desencadeamento dos processos erosivos e movimentos de massa na área.

### 6.2.6 Espacialização da vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos

O mapa de vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos foi gerado a partir de uma análise multicritério envolvendo as variáveis geradas nas etapas anteriores dessa pesquisa. As variáveis Cobertura e Uso da Terra, Vulnerabilidade Natural a Perda de Solos, Erosividade, Erodibilidade e Densidade de Lineamentos, com suas respectivas classes, foram submetidas a uma álgebra de mapas através da ferramenta *Weighted Overlay* no software ArcGIS®.

Seguindo a metodologia aplicada na obtenção da vulnerabilidade natural, foram estabelecidos pesos em percentuais conforme o grau de importância para o fenômeno analisado (erosão e movimento de massa), totalizando 100%. Para as classes foram estabelecidas notas de 0 a 10, conforme a relevância apresentada por cada uma no desencadeamento dos processos dentro da variável (Tabela 11). Na etapa seguinte os mapas temáticos das variáveis propostas, com seus respectivos pesos e notas, foram submetidos a álgebra de mapas a partir da Equação 12.

$$V = ct * 0,30 + vn * 0,25 + r * 0,20 + k * 0,15 + dl * 0,10 \quad (12)$$

Em que:  $V$  corresponde à vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos;  $ct$  à cobertura e uso da terra;  $vn$  à vulnerabilidade natural à perda de solos;  $r$  à erosividade;  $k$  à erodibilidade e  $dl$  à densidade de lineamentos.

Tabela 11 -Variáveis utilizadas na análise multicritério

<b>COBERTURA E USO DA TERRA</b>	
<b>Peso (30%)</b>	<b>Notas</b>
Corpos d'água	0
Mata Úmida	1
Mata Seca	3
Caatinga Arbustiva Densa	5
Caatinga Arbustiva Aberta	6
Urbano/Solo Exposto	8
Cultivos	10
<b>VULNERABILIDADE NATURAL</b>	
<b>Peso (25%)</b>	<b>Notas</b>
Muito baixa	2
Baixa	4
Média	6
Alta	8
Muito alta	10
<b>EROSIVIDADE (FATOR R)</b>	
<b>Peso (20%)</b>	<b>Notas</b>
Fraca	2
Moderada	4
Moderada a Forte	6
Forte	8
Muito Forte	10
<b>ERODIBILIDADE (FATOR K)</b>	
<b>Peso (15%)</b>	<b>Notas</b>
Muito Baixa	2
Baixa	4
Moderada	6
Alta	8
Muito Alta	10
<b>DENSIDADE DE LINEAMENTOS</b>	
<b>Peso (10%)</b>	<b>Notas</b>
Muito baixa	2
Baixa	4
Média	6
Alta	8
Muito Alta	10

Fonte: dados da pesquisa.

Para validação do mapa de vulnerabilidade ambiental foi realizado um levantamento de campo voltado ao registro de ocorrências de movimentos de massa e de erosão acelerada. Ao todo foram identificadas 101 ocorrências no Maciço de Uruburetama, que foram geoposicionadas e comparadas às classes de vulnerabilidade observadas no mapa. As correspondências dos registros com as classes de maior vulnerabilidade puderam atestar a qualidade do produto cartográfico obtido.

## 6.3 Resultados

### 6.3.1 Mapa de cobertura e uso da terra

A Classificação obtida a partir da imagem NDVI/Sentinel-2 obteve um índice Kappa de 0.883, atestando uma excelente classificação conforme a tabela de desempenho. Da mesma forma, a exatidão global de 0.857 comprovou o desempenho da classificação. Tanto a acurácia do usuário quanto do produtor apresentou percentuais altos, demonstrando, respectivamente, a compatibilidade da classificação com a verdade terrestre e os pixels de referência classificados corretamente. A Figura 9 apresenta o mapa de cobertura e uso da terra gerado a partir da classificação supervisionada por crescimento de regiões da imagem NDVI obtida da imagem MSI/Sentinel 2. Os percentuais das classes encontram-se na Tabela 12.

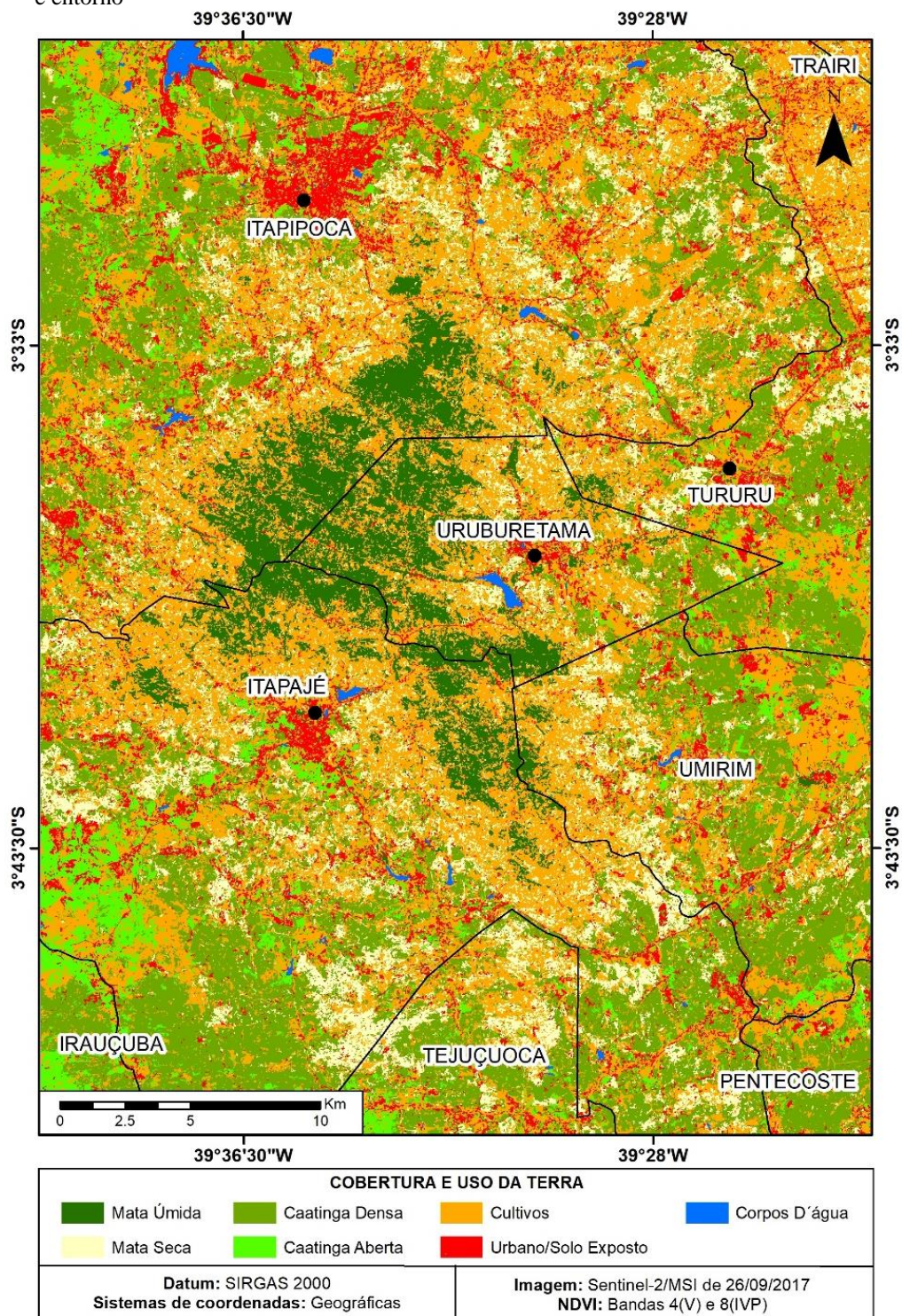
Tabela 12 – Distribuição das classes de cobertura e uso da terra em percentual

<b>Classes de Cobertura e Uso da Terra</b>	<b>Áreas (%)</b>
<b>Mata Úmida</b>	6,94%
<b>Mata Seca</b>	12,37%
<b>Caatinga Densa</b>	26,19%
<b>Caatinga Aberta</b>	5,67%
<b>Urbano/solo exposto</b>	9,4%
<b>Corpos D'água</b>	0,42%
<b>Cultivos</b>	38,9%
<b>Total</b>	100

Fonte: dados da pesquisa.

Como pode ser observado, as classes cultivos e urbano/solo exposto correspondem a 48,3% da área de estudo, o que indica o elevado estágio de alteração da paisagem e, conseqüentemente, de degradação da cobertura vegetal. Os problemas destacados estão associados sobretudo a expansão das atividades agrícolas, que ocorrem em desacordo com as prescrições legais, a não aplicação de técnicas adequadas de cultivo; e ao fato de introduzirem culturas incompatíveis as características edafoclimáticas do local, como é caso da bananeira.

Figura 9 - Mapa de cobertura e uso da terra da vertente úmida do Maciço de Uruburetama e entorno



Fonte: adaptado Freires *et al.* (2019).

### 6.3.2 Mapa de vulnerabilidade natural à perda de solos

O mapa de vulnerabilidade natural à perda de solos obtido através da análise multicritério e da álgebra dos mapas temáticos se encontra na Figura 10. Na Tabela 13 podem

ser observadas as classes de vulnerabilidade com seus respectivos intervalos e áreas de abrangência.

Tabela 13 - Intervalos das classes de vulnerabilidade natural e abrangência em percentuais

<b>Classes</b>	<b>Intervalos</b>	<b>%</b>
Muito Baixa	1 - 4	38,92
Baixa	4 - 5	29,71
Média	5 - 6	23,40
Alta	6 - 7	5,84
Muito Alta	7-10	2,13

Fonte: dados da pesquisa.

As classes de vulnerabilidade muito baixa e baixa se distribuem principalmente na área de entorno da vertente úmida do Maciço de Uruburetama. Essa área corresponde a depressão sertaneja, cujas cotas altimétricas atingem 200 m e as declividades são mais modestas. Em alguns setores do maciço podem ser observados vales encravados, marcados pela ocorrência de alveólos, formados ao longo do tempo por uma grande deposição de sedimentos que entulharam grandes seções, favorecendo a formação de solos e configurando ambientes estáveis, que apresentam vulnerabilidade baixa ou muito baixa conforme a topografia local.

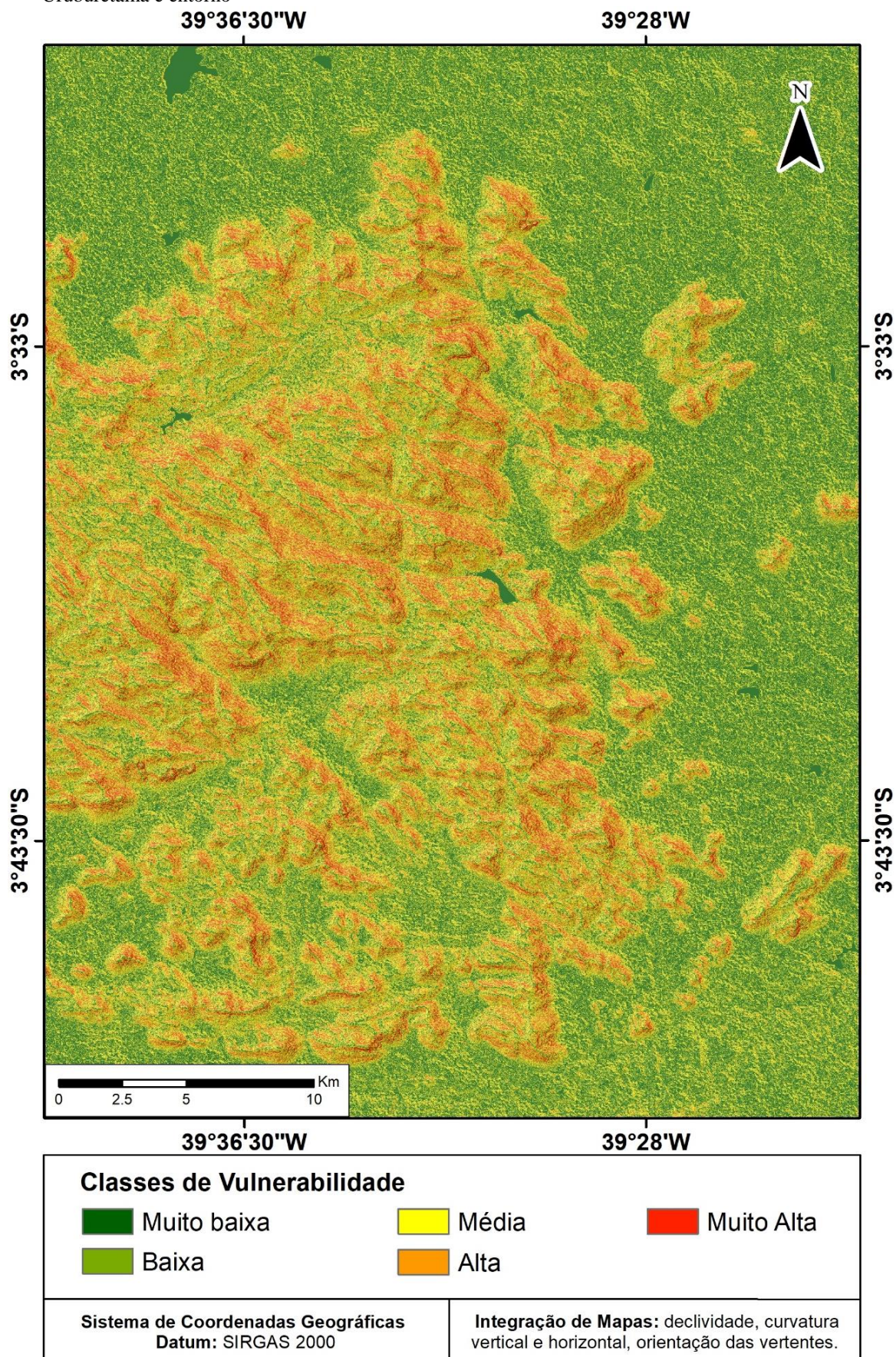
Por sua vez as classes de vulnerabilidade média, alta e muito alta estão distribuídas principalmente nas encostas do maciço. As maiores altitudes verificadas nessas áreas, associadas ao percentual de declividade, formas das encostas e orientação das vertentes, favorecem a atuação dos agentes erosivos e desencadeadores de movimentos massa.

A ocorrência de classes vulnerabilidade alta e muito alta pode ser explicada pelo forte controle estrutural verificado no maciço. Por se configurar num relevo fortemente fraturado, com vales superimpostos em forma de V, há um número expressivo de encostas submetidas a ação dos agentes intempéricos e conseqüentemente do transporte sedimentar, que favorece a esculturação do relevo e reflete a susceptibilidade desses ambientes aos processos morfogenéticos.

É possível observar, também, que as classes de vulnerabilidade alta e muito alta estão dispostas sobretudo nas vertentes orientadas a leste, norte, e principalmente a nordeste do maciço. O fato da região leste do maciço apresentar um relevo escarpado e montanhoso, associado a sua disposição a barlavento, que favorece o efeito orográfico e maiores índices pluviométricos, tornam esse área mais vulnerável a degradação dos solos.



Figura 10 – Mapa de vulnerabilidade natural à perda de solos da vertente úmida do Maciço de Uruburetama e entorno



Fonte: dados da pesquisa



### 6.3.3 Mapa de Erosividade

A serra de Uruburetama está inserida numa área de Clima Tropical de Zona Equatorial. Conforme Mendonça e Danni-Oliveira (2007), esse tipo climático se distribui por parte das regiões Norte e Nordeste e engloba todo estado do Ceará.

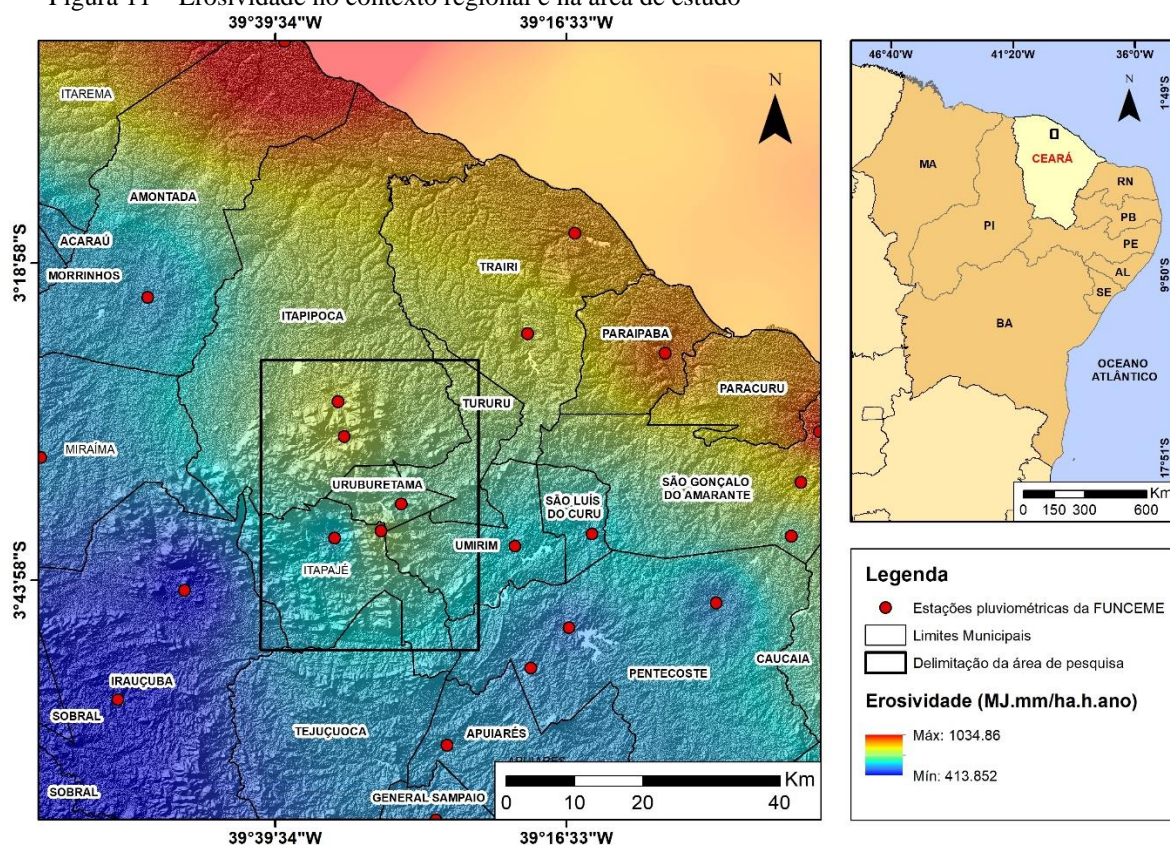
“Esse clima se caracterizo por uma considerável variabilidade pluviométrica e térmica. A temperatura apresenta expressiva variabilidade espacial e temporal, mesmo que toda área esteja enquadrada no âmbito dos climas quentes” (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007, P.90).

De acordo com Silva (2007), a precipitação na Serra de Uruburetama engloba características típicas de regime tropical com a máxima no outono e a mínima no inverno. No setor sul/oeste, a precipitação média anual é de 460 mm (sede municipal de Irauçuba). Apresenta geralmente três meses chuvosos concentrados no final do verão, começo do outono, entre os meses de fevereiro, março e abril. No setor norte/leste, a precipitação média anual é de 1.056 mm (sede de Uruburetama). Apresenta geralmente de seis a sete meses chuvosos, concentrados no primeiro semestre do ano.

A variabilidade pluviométrica fica evidente na Figura 11, que apresenta distribuição da erosividade em contexto regional. É possível observar que os maiores registros de erosividade ocorrem nos municípios litorâneos em virtude das maiores taxas de precipitação, a exemplo de São Gonçalo do Amarante, Paraipaba, Trairi e Amontada. O volume de chuvas tende a diminuir em direção ao interior do continente a medida que ocorre a redução da atuação dos sistemas geradores de chuva. Por outro lado, a disposição do Maciço de Uruburetama favorece a ocorrência de chuvas orográficas, o que implica em maiores médias pluviométricas no setor norte/leste e conseqüentemente em índices de erosividade mais elevados na porção a barlavento da serra, como em setores dos municípios de Itapipoca e Uruburetama. Em contrapartida, os municípios situados a sotavento do maciço, como Irauçuba e Itapajé, apresentam menores médias pluviométricas, o que implica em menores taxas de erosividade.

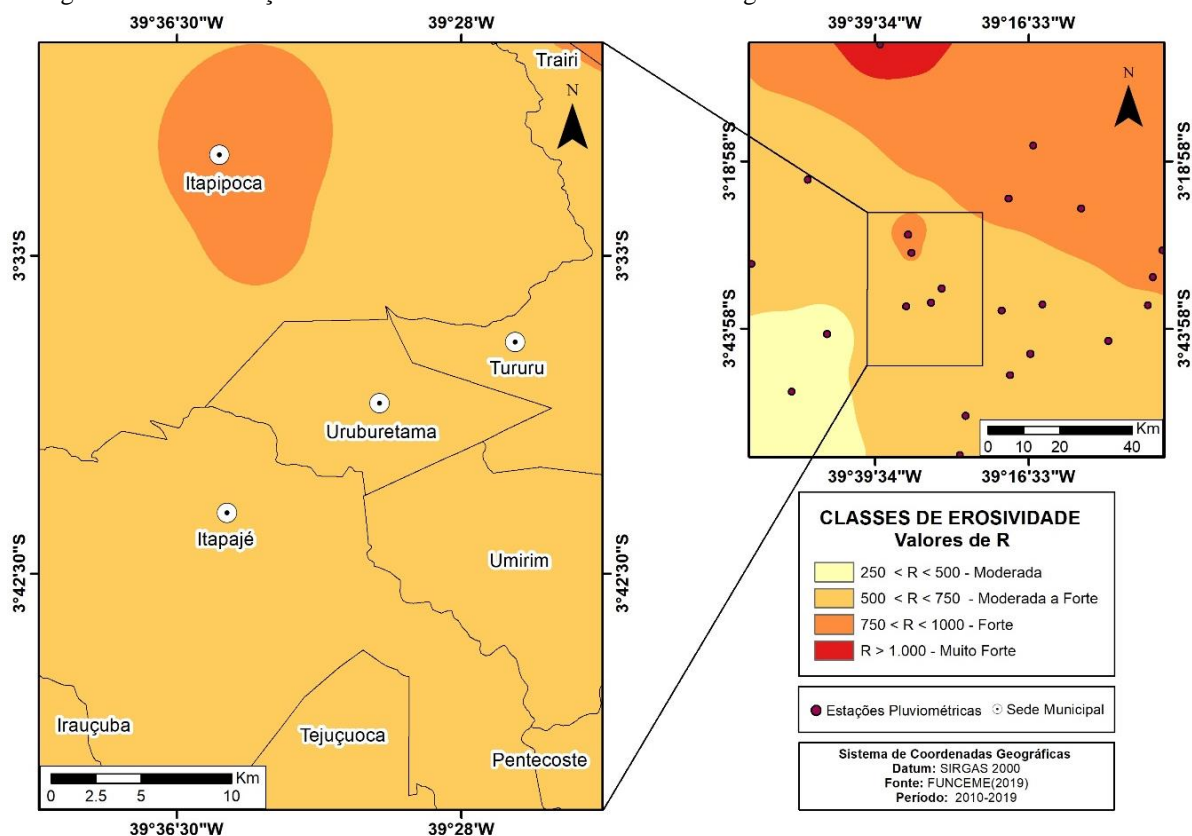
A Figura 12 apresenta a distribuição das classes de erosividade em contexto regional e local. Como pode ser observado as classes de Erosividade Forte e Muito Forte estão distribuídas sobretudo nas porções norte e nordeste, onde os índices pluviométricos mais elevados estão associados a proximidade do litoral, área marcada pela influência de sistemas geradores de precipitação de menor escala, a exemplo das linhas de instabilidade formadas ao longo da costa e das brisas marítimas e terrestres.

Figura 11 – Erosividade no contexto regional e na área de estudo



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 12 – Distribuição das classes de erosividade no contexto regional e na área de estudo



Fonte: elaborado pelo autor.

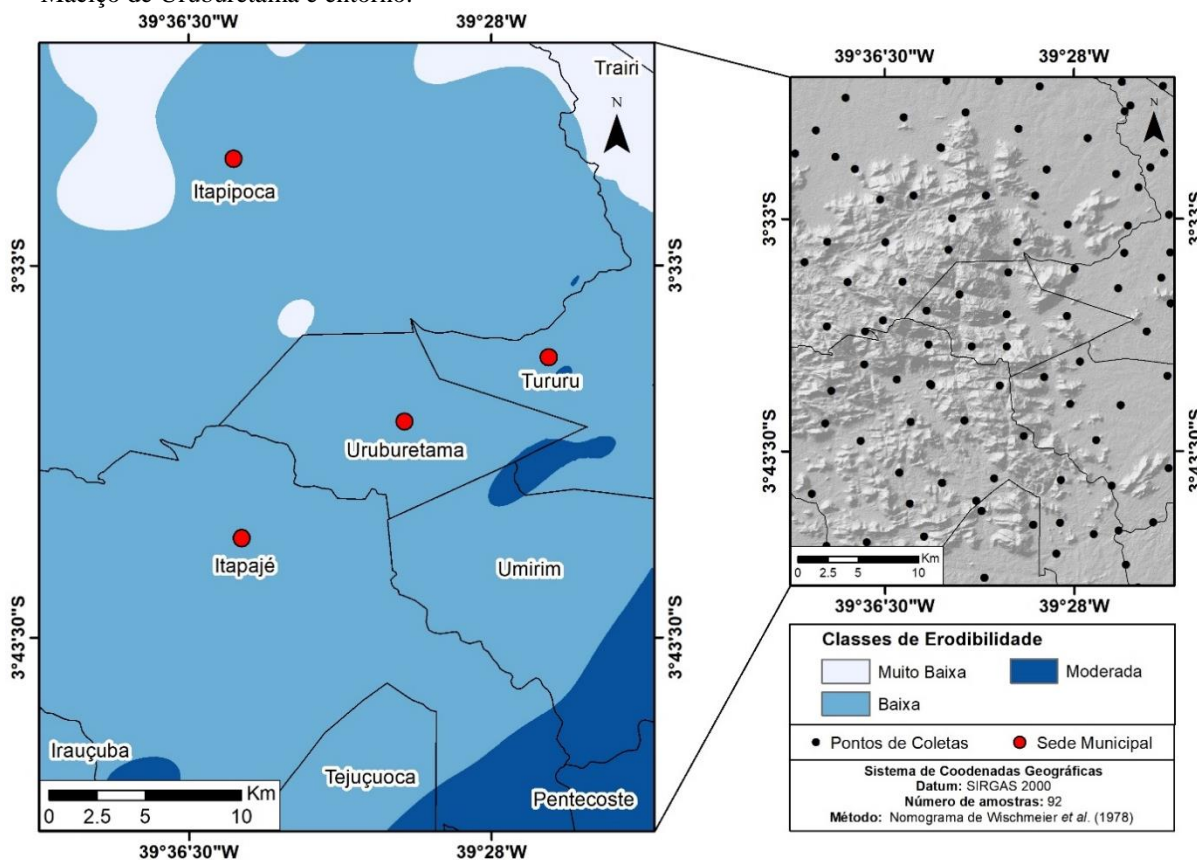
Dentro dos limites da área de pesquisa ocorrem apenas duas classes de erosividade: Moderada a Forte, em quase sua totalidade, que representa 92,66%, e Erosividade Forte, restrita a porções dos municípios de Itapipoca e Trairi, que totaliza 7,34%.

### 6.3.4 Mapa de Erodibilidade

A Figura 13 apresenta a espacialização da erodibilidade dos solos na vertente úmida do Maciço de Uruburetama e seu entorno, gerada a partir dos dados de granulometria, estrutura do solo, matéria orgânica e permeabilidade, obtidos das 184 amostras de solos coletadas na área de pesquisa.

Como pode ser observado, conforme a classificação de McKenzie (2002), foram definidas três classes de erodibilidade: Erodibilidade Muito Baixa, Erodibilidade Baixa e Erodibilidade Moderada.

Figura 13 – Distribuição de pontos de coletas e mapa de erodibilidade de solos da vertente úmida do Maciço de Uruburetama e entorno.



A classe de erodibilidade Muito Baixa representa 8% da área mapeada e ocorre em setores restritos da porção norte da área de pesquisa. Nesses setores são observados sobretudo

solos que apresentam altos percentuais de areia em sua composição, a exemplo do Planossolo Háplico Eutrófico, à noroeste, e do Neossolo Quartzarênico Órtico, à nordeste. Estes solos por apresentarem alta permeabilidade favorecem a infiltração das águas pluviais, reduzindo assim a capacidade da erosão laminar.

A classe Erodibilidade Baixa abrange 83% da área de pesquisa e corresponde sobretudo a ocorrência de Argissolo Vermelho-Amarelo e ao Neossolo Litólico. O primeiro é caracterizado por apresentar maiores teores de argila, que por sua vez reduz a permeabilidade dos solos e favorece o escoamento superficial. Por outro lado, o maior teor de matéria orgânica favorece a estabilidade e a infiltração. Com grande dispersão nas encostas e platô do Maciço de Uruburetama, sua estabilidade depende do percentual de declividade, da proteção da cobertura vegetal e do tipo de manejo ao qual está submetido. O Neossolo Litólico, por sua vez, por ser um solo raso e pedregoso, apresenta permeabilidade muito lenta, o que também favorece o escoamento superficial. O cultivo de culturas temporárias sem aplicação de técnicas adequadas potencializa os processos erosivos.

Em setores ao sul da área de pesquisa, marcados pela ocorrência do Luvisolo Crômico, que bordejia o Rio Caxitoré, e também no entorno do Açude Caxitoré, pode ser observada a classe de Erodibilidade Moderada, que corresponde 9% da área de estudo. O Luvisolo Crômico é caracterizado por apresentar alto teor de argila e pouca profundidade, muitas vezes são pedregosos. Além disso, na área de entorno, e sobretudo nas várzeas, do Rio e do Açude Caxitoré observa-se um maior aporte de sedimentos finos e de matéria orgânica. Essa condição favorece a atividade agrícola, no entanto o uso prologando, sem práticas de manejo adequadas, tornam o solo mais erodível à medida que ocorre a perda da matéria orgânica, responsável por aumentar a resistência dos agregados. A ocorrência de secas nos últimos anos expôs essas áreas durante longo período a intervenção agrícola, favorecendo a redução da matéria orgânica e, por sua vez, da resistência do solo a erosão laminar. Consequentemente, esses setores demonstram maior potencial a erosão laminar que os demais mencionados.

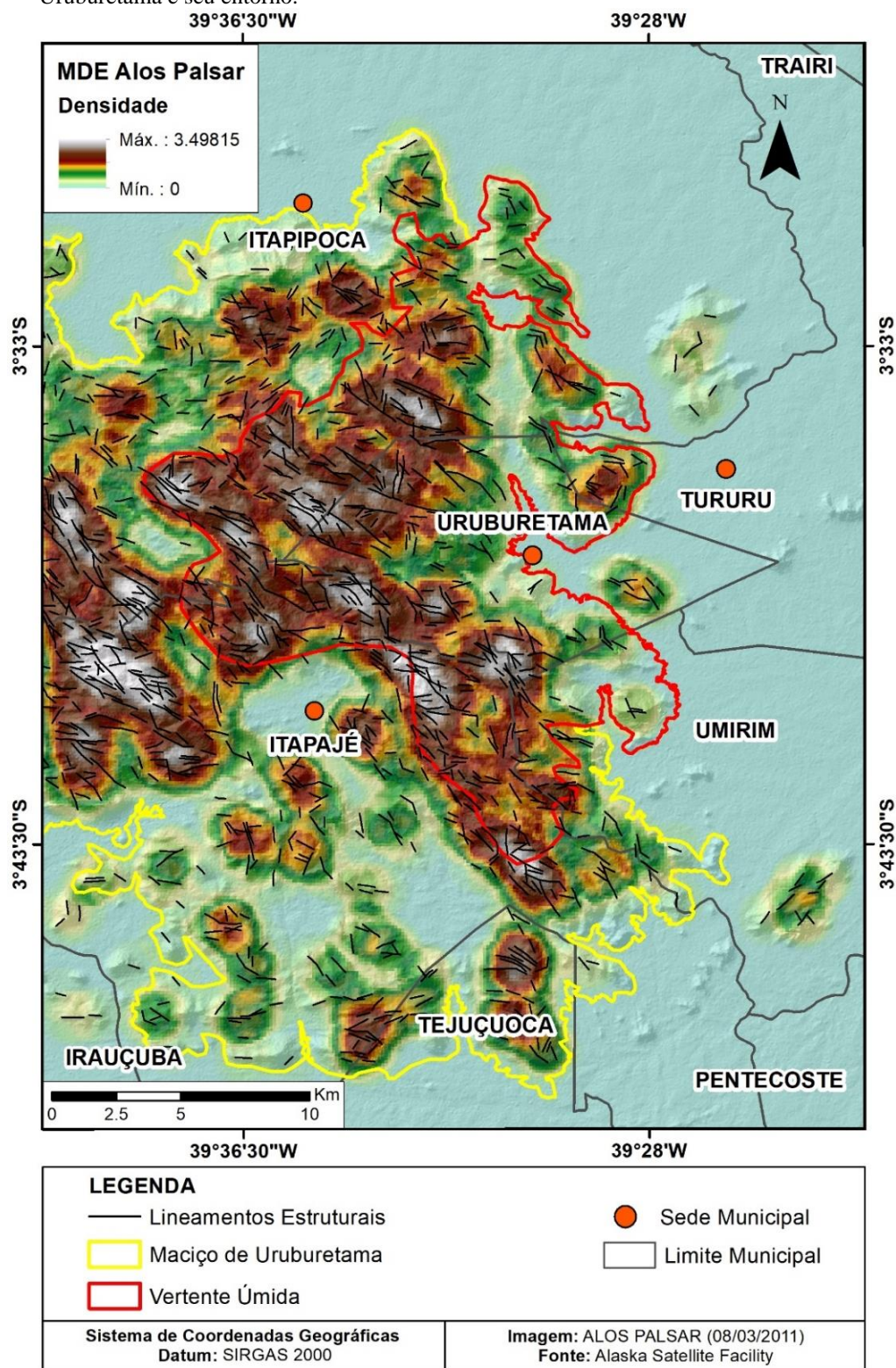
### ***6.3.5 Mapa de Densidade de lineamentos***

Na Figura 14 pode ser observada a densidade de lineamentos na área de estudo. A maior densidade de lineamentos implica na ocorrência de um maior número de vertentes. Os setores onde os lineamentos estão mais adensados pode ser um indicativo da susceptibilidade a



processos erosivos e movimentos de massa. Todavia, observa-se que a ocorrência desses fenômenos no Maciço de Uruburetama tem um forte componente humano.

Figura 14 – Mapa de densidade de lineamentos da vertente úmida do Maciço de Uruburetama e seu entorno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na vertente úmida podem ser observados movimentos gravitacionais e erosão acelerada com maior frequência em virtude das características físicas que propiciam o desenvolvimento da atividade agrícola. A ocorrência de solos profundos e maiores índices pluviométricos favorecem a agricultura, porém as intervenções promovidas a partir dessa atividade funcionam como gatilhos que induzem a perda de solos a partir de movimentos de massa e ravinamento nas encostas, intensificados muitas vezes a partir de abertura de estradas. Por outro lado, nos setores secos da serra onde as condições do meio físico são mais limitantes, com solos rasos e menores índices pluviométricos, as atividades agrícolas influenciam na aceleração do processo erosivo, que por sua vez podem favorecer a movimentação de blocos estabilizados pelos sedimentos. O intemperismo físico é mais atuante na vertente seca, onde podem ser observados paredões e blocos rochosos expostos nas vertentes a partir da erosão diferencial. Este contexto implica numa dinâmica distinta, tendo a mecânica de rochas maior atuação nos movimentos gravitacionais nessa área, sendo predominante a ocorrência de queda de blocos e detritos.

Os condicionantes atuantes na deflagração dos processos erosivos e de movimentos de massa nos dois setores apresentam intensidade distintas e podem ocorrer em virtude das características ambientais dominantes de cada área ou em decorrência do uso e ocupação do solo efetivado sem planejamento ou técnicas adequadas.

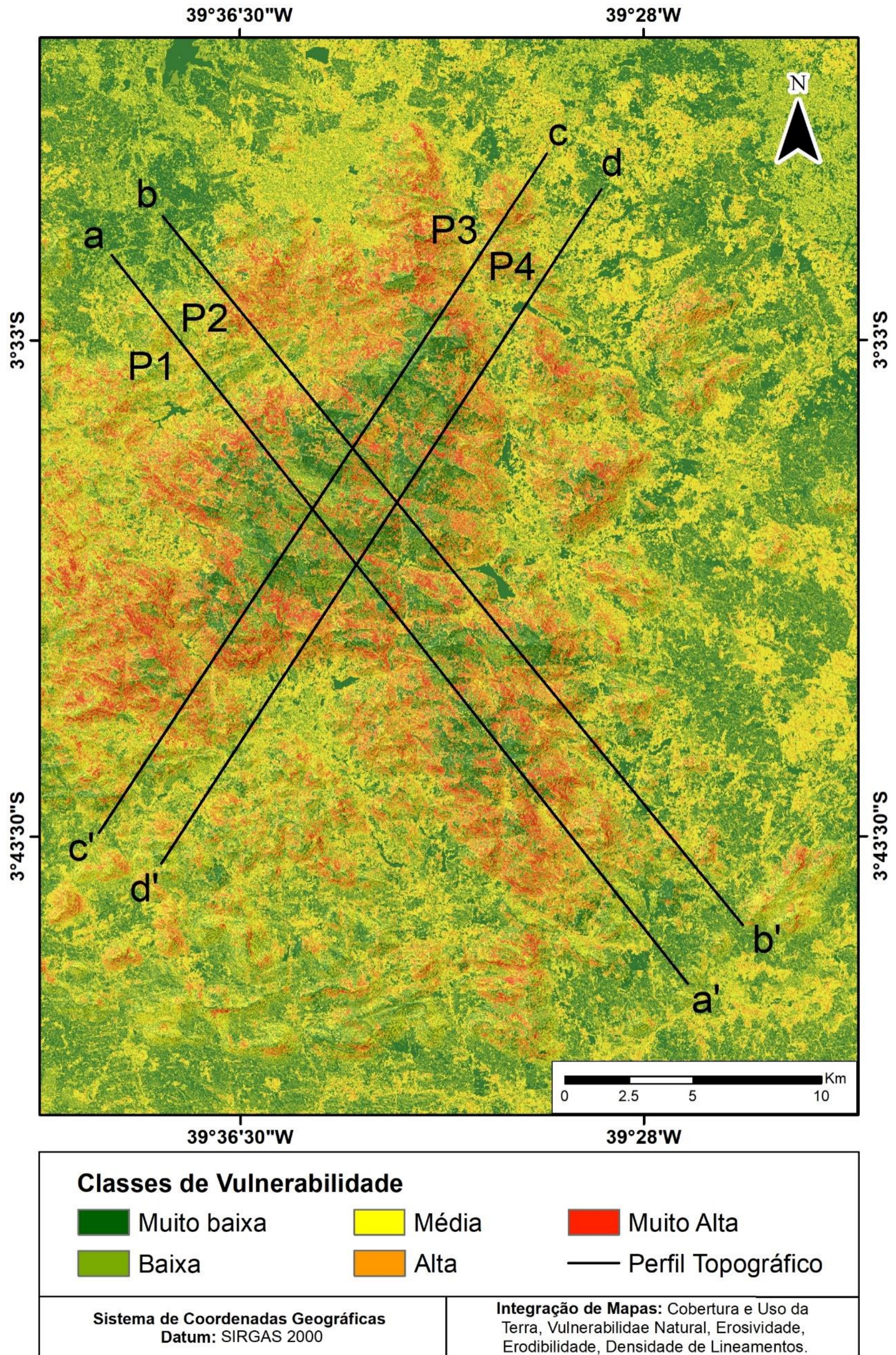
### ***6.3.6 Mapa de vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos***

A partir da análise multicritério e álgebra de mapas envolvendo as variáveis Cobertura e Uso da Terra, Vulnerabilidade Natural à perda de Solos, Erosividade, Erodibilidade e Densidade de Lineamentos, foi obtido o mapa de Vulnerabilidade Ambiental à Degradação dos solos (Figura 15), onde foram definidas as seguintes classes: Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta (Tabela 14).

Os resultados mostram que as classes de Vulnerabilidade Muito Baixa (19,9%) e Baixa (31%), que juntas totalizam 50,9%, correspondem, sobretudo, a setores da Depressão Sertaneja, marcados pelo predomínio de um relevo plano e suave ondulado, com baixos percentuais de declividade, e onde os recursos encontram-se em estágio de conservação e/ou preservação; e aos espaços com altitudes mais elevadas do maciço, que impõem limites ao acesso e onde possível observar remanescentes da vegetação primária.



Figura 15 – Mapa de vulnerabilidade ambiental da vertente úmida do Maciço de Uruburetama e seu entorno



Fonte: Elaborado pelo autor.



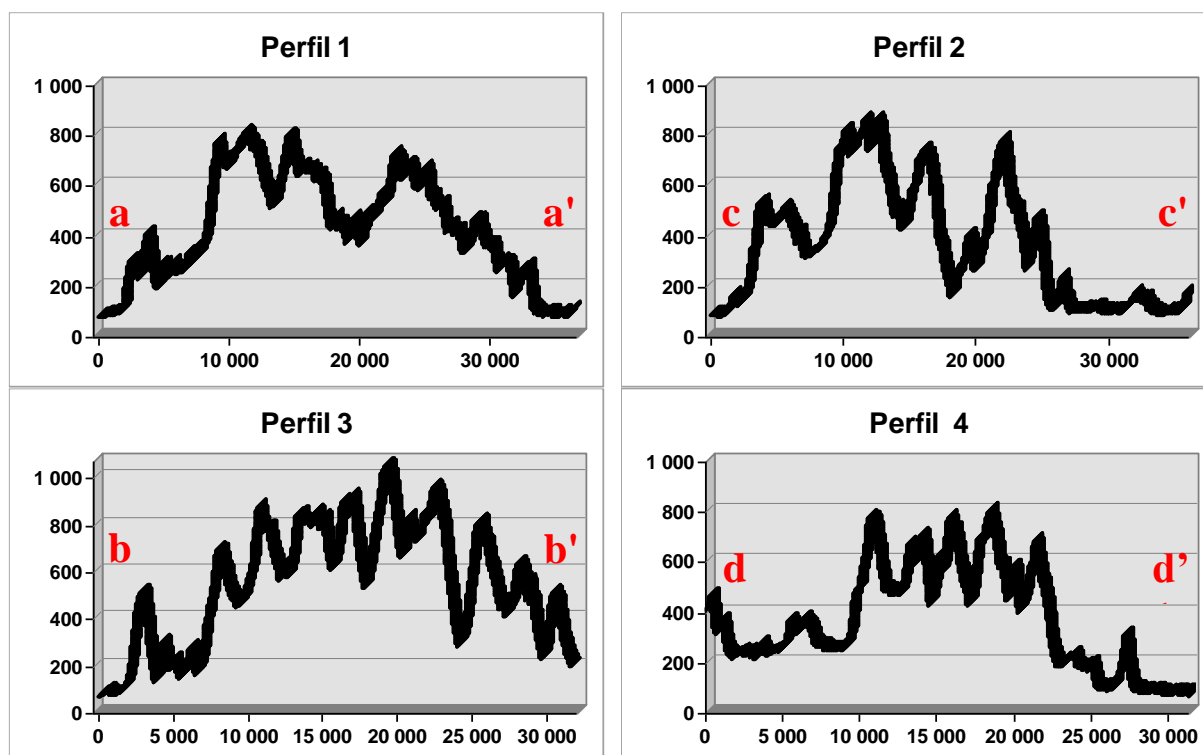
Tabela 14 - Intervalos das classes de vulnerabilidade ambiental e abrangência em percentuais

Classes	Intervalos	%
Muito Baixa	1 - 3	19,9
Baixa	3 - 4	31,0
Média	4 - 5	27,5
Alta	5 - 6	16,8
Muito Alta	6 - 10	4,8

Fonte: dados da pesquisa.

Ao se analisar o mapa de vulnerabilidade (Figura 15) em conjunto com os perfis topográficos na Figura 16, verifica-se que as áreas da vertente úmida com menor vulnerabilidade correspondem aos setores mais elevados, com cotas altimétricas superiores a 600 m. Essas áreas sofrem menor pressão por estarem mais afastadas dos núcleos urbanos e apresentarem acessos difíceis, com estradas não pavimentadas, com declividades acentuadas, e que não recebem a manutenção devida por parte do poder público, se tornando quase impossível o tráfego na estação chuvosa, agravado ainda mais por quedas de blocos nas estradas.

Figura 16 – Perfis topográficos do Maciço de Uruburetama



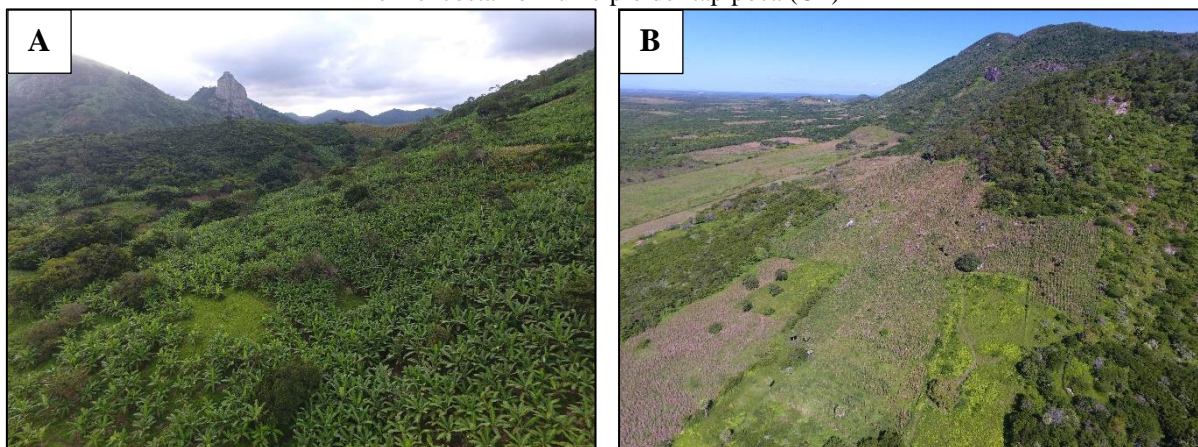
Fonte: Dados da pesquisa.

Por outro lado, as classes de Vulnerabilidade Média, Alta e Muito Alta à degradação dos solos correspondem a 49,1% da área de estudo. As classes de vulnerabilidade Alta (16,8%) e Muito Alta (4,8%) estão disseminadas sobretudo nas encostas do maciço, onde são observadas

declividades superiores a 20% e que estão enquadradas nas classes de relevo forte ondulado, montanhoso e escarpado. A predisposição natural, aliada às intervenções humanas, contribui para esse cenário. Com a expansão urbana e agrícola nas encostas da serra, que acontecem sem o acompanhamento técnico necessário, observa-se um quadro de intensificação dos processos erosivos e dos movimentos de massa.

Essas intervenções ocorrem em grande escala, atingindo encostas com diferentes percentuais de declividade e com altitudes variadas, contrariando inclusive as prescrições legais observadas no Código Florestal (Lei 12.651/2012). É notório o desenvolvimento do chamado efeito borda, onde gradativamente se observa o avanço das ações antrópicas em direção as áreas mais elevadas e a região central do maciço (Figura 17).

Figura 17 – (A) encosta completamente alterada pela bananicultura em Uruburetama/CE, (B) avanço do plantio em encosta no município de Itapipoca (CE)



Fotos: A - Daniel Gomes (obtidas por ARP, 20/05/2017).

Como consequência são observados diversos impactos sobre os solos. A Figura 18 apresenta a aceleração dos processos erosivos a partir da supressão da vegetação nativa para o plantio de culturas temporárias como o milho e o feijão, que na maioria das vezes ocorre a semeadura morro abaixo, que potencializa o fluxo superficial e o transporte dos elementos constituintes do solo.

Figura 18 – Cultivo de milho associado ao feijão no município de Itapajé no Maciço de Uruburetama (CE)



Fotos: Eduardo Freires (20/02/2018).

O avanço urbano também compromete a estabilidade das vertentes, sobretudo a partir dos cortes para abertura de estradas. As diversas estradas, que conectam as sedes municipais às pequenas localidades, intensificam os processos erosivos e os movimentos gravitacionais (Figura 19) a partir da exposição das vertentes aos agentes intempéricos. Essas estradas também estimulam as ocupações, que por sua vez suprimem a vegetação estabilizadora das encostas. Em outros casos é possível verificar cortes de vertentes para ampliar a área edificável de algumas habitações.

Figura 19 – Bloqueio de estrada por queda de bloco na localidade de São Jerônimo, em Itapipoca (CE).



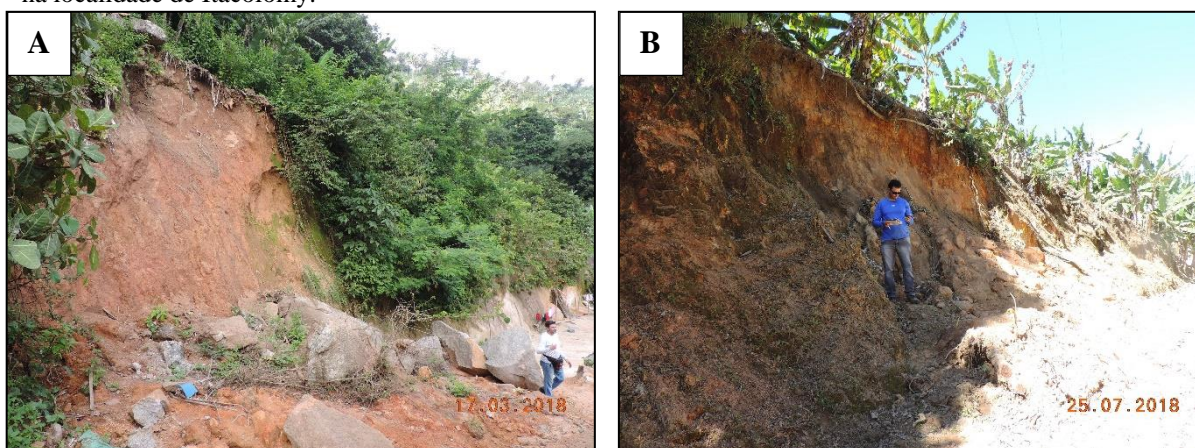
Fotos: Eduardo Freires (21/02/2018).

O fato do relevo do maciço ser fortemente fraturado implica na maior exposição de vertentes aos agentes intempéricos e aos processos erosivos, da mesma forma que os vales em V funcionam como caminhos preferenciais para disseminação das intervenções. Nessa perspectiva ocorre uma combinação que potencializa a perda de solo a partir de movimentos de massa: o cultivo praticado nas encostas no regime morro abaixo, sobretudo a bananeira, e o



corte da vertente para abertura de estradas com a consequente formação do talude artificial. A associação de cultivos e corte de estradas funcionam com gatilhos para deflagração de escorregamentos Rotacionais e Translacionais no maciço, como os verificados na Figura 20.

Figura 20 – Escorregamentos associados a cortes de encostas em áreas de cultivo no município de Uruburetama. (A) Escorregamento Translacional na localidade de Água Fria. (B) Escorregamento Rotacional na localidade de Itacolomy.



Fotos: Eduardo Freires e Claudio Ângelo (A – 17/03/2018, B – 25/07/2018).

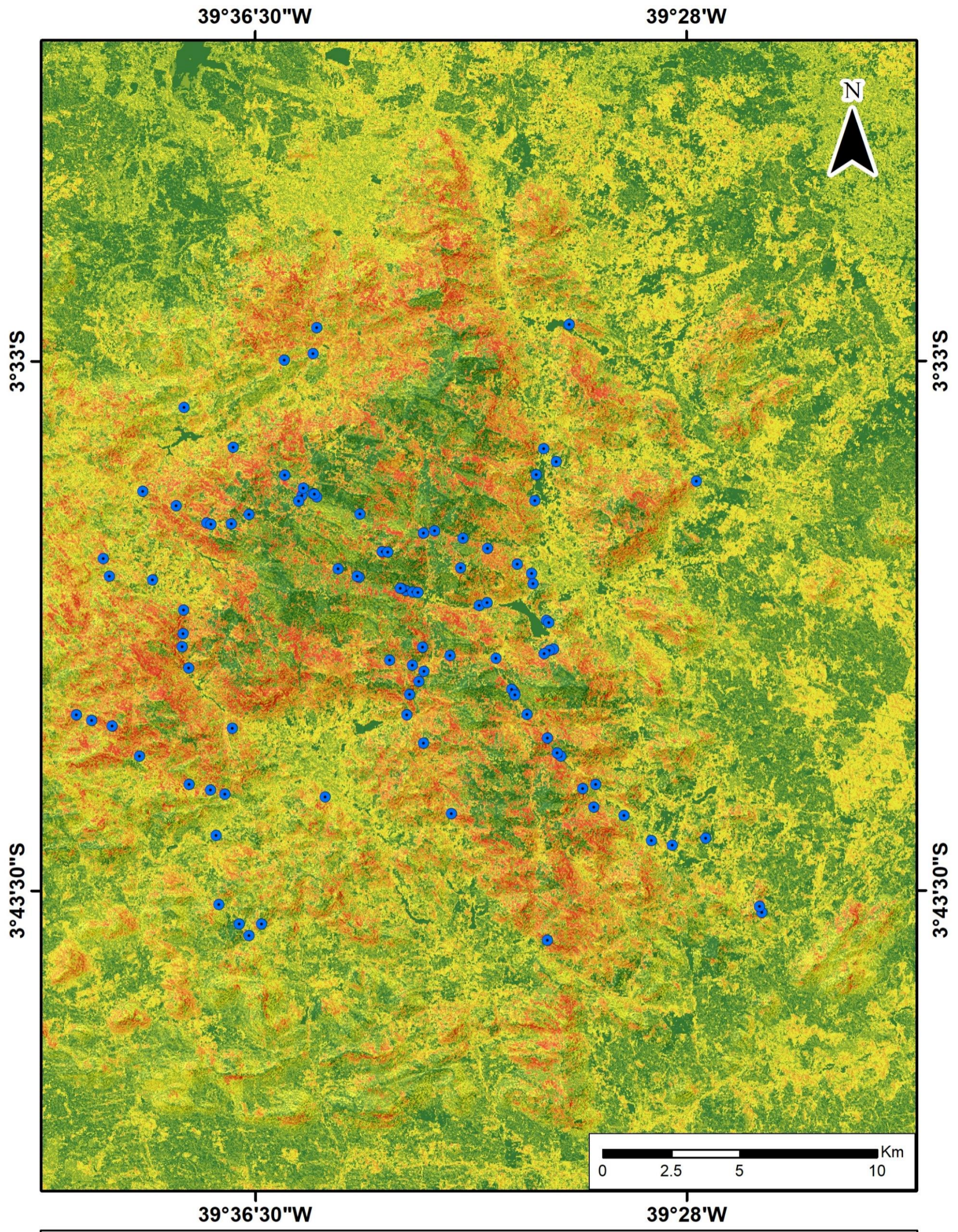
A Figura 21 apresenta o mapa de vulnerabilidade com os registros de ocorrências de movimentos de massa e erosão acelerada no Maciço de Uruburetama. Esses registros, que totalizam 101 ocorrências, compõem um inventário voltado a validação do mapa de vulnerabilidade ambiental obtido.







Como pode ser observado na Tabela 15 e no Gráfico 22, os registros de ocorrências de movimento de massa e erosão acelerada estão concentrados sobretudo nas classes de vulnerabilidade Média (34,7%), Alta (47,5%) e Muito Alta (10,9%). O inventário desses registros mostra que essas classes juntas representam 93,1% do total. Quando se analisam as classes de vulnerabilidade Alta e Muito Alta, que indicam maior tendência à deflagração dos eventos analisados, observa-se que as duas concentram 58,4% das ocorrências. Por outro lado, as classes Muito Baixa (1%) e Baixa (5,9%) representam apenas 6,9% do total dos registros.

Os dados apresentados atestam a qualidade do mapa gerado e indicam que a integração das variáveis analisadas (Cobertura e uso do solo, Vulnerabilidade natural à perda de solos, Erosividade, Erodibilidade e Densidade de Lineamentos) compõe um excelente recurso para estudos dessa natureza.



Figura 21 - Validação do mapa de vulnerabilidade ambiental a partir de Inventário com registros de movimentos de massa e erosão acelerada



<b>Classes de Vulnerabilidade</b>					
	Muito baixa		Média		Muito Alta
	Baixa		Alta		Movimento de massa e erosão acelerada
<b>Sistema de Coordenadas Geográficas</b> Datum: SIRGAS 2000			<b>Integração de Mapas:</b> Cobertura e Uso da Terra, Vulnerabilidade Natural, Erosividade, Erodibilidade, Densidade de Lineamentos.		

Fonte: Elaborado pelo autor.

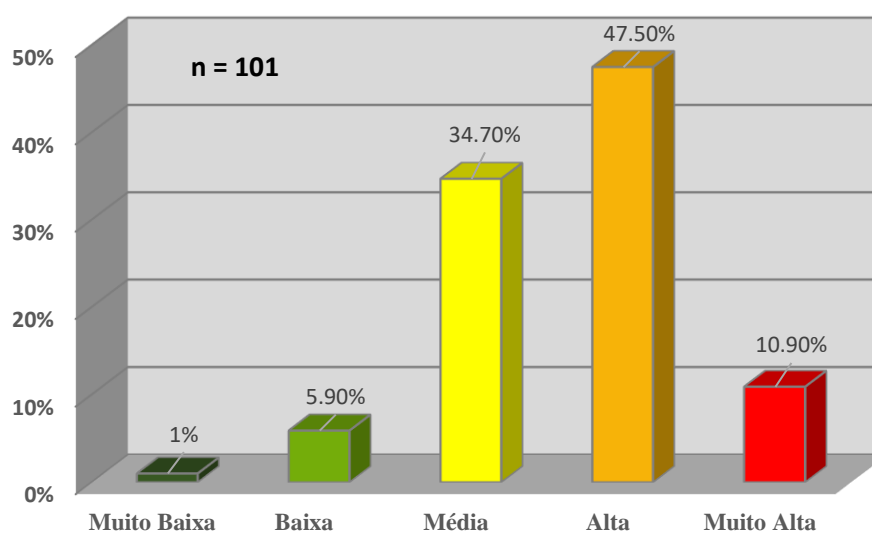


Tabela 15 – Registros de ocorrências de movimentos de massa e erosão acelerada por classe de vulnerabilidade ambiental

CLASSES DE VULNERABILIDADE	Nº DE OCORRÊNCIAS	%
Muito Baixa	1	1
Baixa	6	5.9
Média	35	34.7
Alta	48	47.5
Muito Alta	11	10.9
Total	101	100

Fonte: dados da pesquisa.

Gráfico 1 – Distribuição dos registros de ocorrências de movimentos de massa e erosão acelerada por classe de vulnerabilidade ambiental em percentual



Fonte: dados da pesquisa.

## 6.4 Conclusões

O mapa de vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos da vertente úmida da Serra de Uruburetama evidencia os limites impostos ao uso e ocupação e aponta para a necessidade de planejamento que oriente as atividades econômicas e a expansão urbana.

Como pôde ser verificado, a partir da espacialização da vulnerabilidade, as classes Muito Baixa e Baixa, que representam 50,9% da área de estudo, ocorrem sobretudo em setores do domínio da Depressão Sertaneja, onde são observadas baixas declividades e as intervenções não alteraram de forma severa esse ambiente; e também nas áreas mais elevadas do maciço, com cotas altimétricas superiores a 600 m, e que impõem dificuldade ao acesso e onde é possível encontrar os remanescentes da vegetação nativa.

As classes de vulnerabilidade Alta e Muito Alta, que totalizam 21,6% da área de pesquisa, apresentam ampla disseminação nas encostas da serra. A ocorrência de tais classes decorre da pressão exercida pela expansão urbana e sobretudo da forte intervenção promovida pela atividade agrícola no maciço, que se processa sem considerar as limitações impostas pelo ambiente, sem respeitar as determinações legais estabelecidas na legislação e sem os cuidados técnicos voltados para o uso eficiente e sustentável do solo.

É comum o cultivo nas encostas no regime de semeadura morro abaixo, que potencializam fluxo superficial e conseqüentemente a perda dos solos. Além disso, a predominância da bananicultura na vertente úmida da serra agrava ainda mais o quadro por reduzir drasticamente a estabilidade dos solos.

A expansão urbana ocorre em áreas com altos percentuais de declividade, sem considerar os riscos associados, e sem que haja o monitoramento por parte dos órgãos públicos. É comum o corte de encostas visando ampliar o espaço edificável, todavia não são adotadas medidas ou técnicas estabilizadoras do talude artificial. Da mesma forma, as estradas abertas nas encostas voltadas para interligar as diferentes localidades, ou as sedes municipais, se configuram como um dos principais fatores que induzem aos processos erosivos e aos movimentos de massa. O corte de estradas quando associadas aos cultivos nas encostas potencializam os movimentos gravitacionais, sendo responsáveis por inúmeros movimentos de massa registrados nos municípios inseridos na área de pesquisa.

Adicionalmente às condições humanas, existem fatores de ordem natural que contribuem para esse quadro. O fato do relevo ser fortemente fraturado implica no maior número de encostas expostas aos processos intempéricos, e conseqüentemente a erosão e movimentos de massa, como também favorece a disseminação das intervenções humanas

através dos vales entalhados. O mapa de densidade de lineamentos reflete a ocorrência de estruturas geológicas como cristas, colinas e vales que indicam a partir de suas distribuições o maior ou menor potencial a eventos morfodinâmicos. Entretanto, as classes de maior vulnerabilidade não necessariamente estarão associadas as de maior densidade, pois outros fatores devem ser considerados, como: ocorrência e preservação da cobertura vegetal, declividade, volume de chuvas, entre outros.

O inventário com o registro de 101 ocorrências de movimento de massa e erosão acelerada no Maciço de Uruburetama atesta a qualidade do mapa de vulnerabilidade ambiental. Ao integrar os registros com o mapa de vulnerabilidade, observa-se que mais 93% das ocorrências estão posicionadas nas classes de vulnerabilidade Média, Alta e Muito Alta. As classes Alta e Muito Alta, que indicam maior tendência à degradação dos solos, totalizam 58,4% dos registros.

O mapa de vulnerabilidade natural à perda de solos, obtido a partir das variáveis morfométricas, também indica que praticamente todas as encostas da vertente úmida do maciço apresentam vulnerabilidade média a muito alta. As vertentes do maciço com orientação leste, norte e, sobretudo, nordeste apresentaram maior ocorrência de vulnerabilidade Alta e Muito Alta, fato que está relacionado ao relevo escarpado, que apresenta altos percentuais de declividade. Contudo, quando se considera as intervenções humanas e demais variáveis, há uma alteração na distribuição dessas classes.

O mapa de distribuição de erosividade obtido a partir dos registros pluviométricos dos 23 postos da FUNCEME mostra que as classes diminuem de intensidade em direção ao interior. Esse quadro está relacionado ao decaimento do volume de chuvas que ocorre em direção ao continente em função da redução da atuação dos sistemas geradores de chuvas de menor escala, e que apresentam maior energia sobre o litoral, como as brisas marítimas e terrestres. Em consequência desse fato, observa-se na área de pesquisa apenas duas classes de erosividade: Moderada a Forte, que representa 92,66% da área, e Erosividade Forte, que totaliza 7,34% e está restrita a porções dos municípios de Itapipoca e Trairi, cujas estações pluviométricas ultrapassaram 761 MJ.mm/ha.h.ano. É importante compreender que a erosividade é uma variável que expressa a capacidade da chuva de causar erosão em solos sem proteção. Sua influência é maior em setores desmatados, abandonados pela agricultura itinerante e em áreas de plantio de culturas temporárias, que expõem os solos durante meses. Por outro lado, sua atuação fica limitada em áreas com ocorrência de cobertura vegetal, sobretudo em setores cobertos por vegetação primária.

Com relação a distribuição das classes de erodibilidade, observou-se que 8% da área mapeada corresponde a classe de Erodibilidade Muito Baixa. Sua ocorrência está associada ao Planossolo Háptico Eutrófico e ao Neossolo Quartzarênico Órtico, que apresentam textura arenosa que favorecem a infiltração das águas pluviais, reduzindo assim a capacidade da erosão laminar. A classe de Erodibilidade Baixa representa 83% da área e está relacionada à ocorrência de Argissolo Vermelho-Amarelo e ao Neossolo Litólico. O Argissolo Vermelho-Amarelo apresenta um maior teor de argila em sua composição, o que favorece o escoamento superficial, contudo possui maior percentual de matéria orgânica que propicia a estabilidade e a infiltração. A sua estabilidade vai depender de fatores como: percentual de declividade, da proteção da cobertura vegetal e do tipo de manejo ao qual está submetido. O Neossolo Litólico por ser um solo raso e pedregoso, apresenta permeabilidade muito lenta, o que também favorece o escoamento superficial. O cultivo de culturas temporárias sem aplicação de técnicas adequadas potencializa os processos erosivos. A classe de Erodibilidade Moderada se distribui por 9% da área de pesquisa e está associada principalmente a ocorrência do Luvisolo Crômico, que bordeja o Rio Caxitoré, e também a área de várzea no entorno do Açude Caxitoré. O Luvisolo Crômico apresenta alto teor de argila e pouca profundidade, o que contribui para o escoamento. Aliado a isso, por se distribuir por superfícies de várzea, observa-se um maior aporte de sedimentos finos e de matéria orgânica. Essa condição favorece a atividade agrícola, porém o uso prologando, sem práticas de manejo adequadas, tornam o solo mais erodível à medida que ocorre a perda da matéria orgânica, responsável por aumentar a resistência dos agregados.

A integração das variáveis propostas demonstrou grande potencial para análise de vulnerabilidade ambiental à degradação de solos. Os resultados apresentados atestam a importância e a eficiência das ferramentas do geoprocessamento em estudos dessa natureza e indicam o atual cenário no Maciço de Uruburetama a partir de variáveis físicas e antrópicas. A distribuição das classes de vulnerabilidade ambiental revela as limitações ao uso e ocupação do solo, servindo de suporte para prognósticos de possíveis quadros gerados a partir de intervenções não planejadas ou que não considerem as restrições impostas pelos condicionantes físicos locais. Adicionalmente, o mapa de vulnerabilidade ambiental à perda de solos pode subsidiar a gestão e o planejamento ambiental no maciço, servindo como instrumento de orientação para uso e ocupação de áreas preferenciais, bem como, sendo indicativo de medidas que deverão ser tomadas no intuito de evitar perdas econômicas, ambientais e humanas.

## 6.5 Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro concedido; e ao Programa de Pós-graduação em Geologia da UFC pelo incentivo a esta pesquisa.

## Referências

ABNT, Normas técnicas que fixa as características técnicas e os métodos para a verificação e a calibração de peneiras para ensaio, constituídas de telas de fios metálicos tecidos. **NBR 5734, dezembro de 1989, peneiras para ensaios com telas de tecido de metálico.**

ABNT, Normas técnicas para ensaios em solos. **NBR 6457, agosto de 1986, Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.**

ABNT, Normas técnicas para ensaios em solos. **NBR 7181, dezembro de 1984, Análise granulométrica.**

ABNT, Normas técnicas para ensaios em solos. **NBR 13292, abril de 1995, Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante**

ABNT, Normas técnicas para ensaios em solos. **NBR 13600, maio de 1996, Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C.**

ABNT, Normas técnicas para ensaios em solos. **NBR 14545, julho de 2000, determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.**

ARS-USDA, Agricultural Research Service. **Predicting soil**, 1994.

ABDULLAH, A.; AKHIR, J.M.; ABDULLAH, I. Automatic Mapping of lineaments using Shaded Relief Images derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v.15, p. 949 – 957, 2010.

BATISTA, C.T; VERISSIMO, C.U.V; AMARAL, W.S. Levantamento de feições estruturais lineares a partir de sensoriamento remoto – uma contribuição para o mapeamento geotécnico na Serra de Baturité, Ceará. **Revista do Instituto de Geociências/ Geologia USP, Série Científica**, São Paulo, v.14, n.2, p.67-82, 2014. DOI: 10.5327/Z1519-874X201400020004.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8ª ed. São Paulo: Ícone, 2012. 355 p.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

CONCEIÇÃO, R.A.C; SILVA, A.Q. Extração automática de lineamentos utilizando imagens SRTM, Landsat ETM+ e ALOS PALSAR na região de Nobres, MT. In: XVI Simpósio



Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 3688-3695. ISBN 978-85-17-00066-9. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.58.28>. Acesso em: 22 ago. 2018.

CONGALTON, R.G. A. A review of assessing the accuracy classificatons of remotely sensed data. **Remote Sensing Environment**, Berkeley, v.37, n.1, p.35-46, 1991. Disponível em: [https://www.academia.edu/3182836/A\\_review\\_of\\_assessing\\_the\\_accuracy\\_of\\_classifications\\_of\\_remotely\\_sensed\\_datahttps://www.academia.edu/3182836/A\\_review\\_of\\_assessing\\_the\\_accuracy\\_of\\_classifications\\_of\\_remotely\\_sensed\\_data](https://www.academia.edu/3182836/A_review_of_assessing_the_accuracy_of_classifications_of_remotely_sensed_datahttps://www.academia.edu/3182836/A_review_of_assessing_the_accuracy_of_classifications_of_remotely_sensed_data). Acesso em: 03 jun. 2018.

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 1999. 137p.

CORRECHEL, V. **Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do “Fallout” do <sup>137</sup>Cs**. 2003. Tese (Doutorado em ciências). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2003. 79p.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S. de; AZEVEDO, L.G. de; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T.G.; D.V. **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico**. Metodologia desenvolvida para subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico e capacitar os técnicos dos Estados da Amazônia Legal (Convenio SAE/INPE). São Jose dos Campos: INPE, 1996. 18 p.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; PALMEIRA, A.F.; SILVA, E.F. (2008). Zoneamento ecológico-econômico. In: FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. Editora Oficina de textos, São Paulo: p. 285 -317.

FREIRES, E.V; SILVA NETO, C.A.; CUNHA, D.S.R.; DUARTE, C.R.; VERÍSSIMO, C.U.V.; GOMES, D. D. M. Comparação de Imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2 no Mapeamento de Cobertura e Uso da Terra no Maciço de Uruburetama, Ceará. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 4, p. 427-442, 2019. DOI: 10.11137/2019\_4\_427\_442.

FREIRES, E.V; SILVA NETO, C.A.; SILVA, M.T.; DUARTE, C.R.; VERÍSSIMO, C.U.V.; GOMES, D.D.M. Analysis of the natural vulnerability of soil loss in the Uruburetama Massif/CE. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, n. 3, p. 116-130, 2019. DOI: 10.29150/jhrs.v9.3.p116-130.

GUERRA, A.J.T. (2011). Encostas urbanas. In: GUERRA, A.J.T (Org.). **Geomorfologia Urbana**. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro: p. 13 - 42.

GÜRTLER, S.; LUIZ, A.J.B.; EPIPHANIO, J.C.N. Uniformização de imagens Landsat para previsão de safras agrícolas. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2003. p. 109-116. ISBN 85-17-00017-X. Disponível em: <http://urlib.net/rep/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.15.12.19>. Acesso em: 12 set.2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Portal das cidades: panorama/ população**. Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 28 out. 2018.

IPECE, Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Secretária do Planejamento e Gestão do Estado do Ceará. **Mapa das unidades fitoecológicas do Estado do Ceará**. Fortaleza: IPECE, 2007. 1 mapa, color. Disponível em: [http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/images3x/Unidades\\_Fitoecologicas.jpg](http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/images3x/Unidades_Fitoecologicas.jpg). Acesso 26 mar. 2016.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso dos métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. In: XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, 15., 2006, Caxambu. **Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais**. Caxambu-MG: ABEP, 2006, p.1-22. Disponível em: <http://www.nepo.unicamp.br/vulnerabilidade/admin/uploads/producoes/MétodosInterpolação>. Acesso em: 23 mar. 2020.

LOBÃO, J.S. B.; FRANÇA-ROCHA, W.J.S.; SILVA, A.B. Aplicação dos índices Kappa & PABAK na validação da classificação automática de imagem de satélite em Feira de Santana – BA. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais do XII do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1207-1214. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.14.18/doc/1207.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2018.

LOPES, M.F.L.; FONTENELE, G.B.; GAMEIRO, S.; MIRANDA, M.P.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S. Análise comparativa dos lineamentos da região da jazida fósforo-uranífera de Itaitia-Ce gerados através do MDE: SRTM+, ASTER GDEM 2 e TOPODATA. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18., 2017, João Pessoa. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2017. p.763-770. Internet. ISBN 978-85-17-00088-1. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2017/10.23.17.13>. Acesso em: 2 mai. 2018.

MCKENZIE, N. J., COUGHON, K. J.; CRESSWELL, H. P. **Soil Physical Measurements and Interpretation for Land Evaluation**. Melbourne: CSIRO Publishing, 2002. 392p.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206p.

PALMIERI, F.; LARACH, J.O.I. (2004). Pedologia e geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B (Org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. 5ª ed. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro: p. 59 – 122.

PRUSKI, F. F. (2009). Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. In: PRUSKI, F. F. **Conservação de água e solo: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2ª ed. editora UFV, Viçosa: p. 40-73.

ROSEMBACK, R.; FRANÇA, A.M.S.; FLORENZANO, T.G. Análise comparativa dos dados NDVI obtidos de imagens CCD/CBERS-2 e TM/LANDSAT-5 em área urbana. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1075-1082. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em:

<http://mar.te.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.16.17.49/doc/1075.pdf>. Acesso em: 10 out. 2017.

ROSS, J.L.S. (2004). **Geomorfologia aplicada aos EIAs-RIMA**. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (Org.). Geomorfologia e meio ambiente. 5ª ed. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro: p. 291 - 335.

ROVEDDER, J. **Validação da classificação orientada a objetos em imagens de satélite Ikonos II e elaboração de indicadores ambientais georreferenciados no município de Torres, planície costeira do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2007. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007. 83p.

SANCHES, I.D.A.; ANDRADE, R.G.; QUARTAROLI, C.F.; RODRIGUES, C.A.G. 2011. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 – TM para obtenção de reflectância de superfície e NDVI. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15., 2011, Curitiba. **Anais XV do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2011. p. 7564-7571. ISBN 978-85-17-00056-0. Disponível em: <http://mar.te.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.11.12.17/doc/p1555.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2018.

SILVA, M.V.C. **Análise Geoambiental: subsídios ao planejamento agrícola da Serra de Uruburetama – Ce**. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geografia). Departamento de Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza. 2007. 191p.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: IST Press, 2006. 214p.

USGS. **United States Geological Survey. Imagem MSI/Sentinel-2. Departamento do Interior Disponível em:** < <http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 5 mai. 2018.

VALERIANO, M.M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008. 72p.

VERONA, J.D; SHIMABUKURO, Y.E.; SANTOS, J.R. Potencialidade das imagens-fração multitemporais TM/Landsat na caracterização de variações fenológicas em área de floresta tropical na Amazônia. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, São José dos Campos: INPE, p. 713-720. ISBN: 85-17-00018-8. Disponível em: <http://mar.te.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.11.22.57/doc/713.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2018.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215p.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **J. Journal of Soil and Water Conservation**, v. 26, n.5, 1971. p. 189-193.

WISCHMEIER, W.H; SMITH D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Agriculture handbook. Washington. D.C: US. Departamente of Agriculture, 1978. 60p.

## 7 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados demonstraram o elevado estágio de degradação dos recursos naturais no Maciço de Uruburetama. As intervenções humanas alteram a paisagem e potencializam a dinâmica dos processos que ocorrem nas encostas.

A partir da análise socioambiental constatou-se o avançado grau de alteração da paisagem no Maciço de Uruburetama em decorrência da expansão urbana e das atividades agrícolas. As intervenções ocorrem indiscriminadamente, inclusive em áreas de preservação permanente, desrespeitando as determinações da Lei Federal nº 12.651/2012 (Novo Código Florestal).

Associado a essas atividades observa-se um elevado nível de comprometimento dos recursos naturais, seja a partir do desmatamento indiscriminado e do cultivo no regime de semeadura morro abaixo, que potencializam a erosão superficial, e/ou em decorrência do corte de encostas para ampliação de áreas edificáveis, exploração do arisco e abertura de estradas, que favorecem a deflagração de movimento de massa, que, por sua vez, podem ser potencializados pela bananicultura, pelo cultivo de culturas temporárias que expõem os solos ao agentes erosivos durante meses e pelos sistemas de irrigação praticados de forma inadequada. Soma-se a isso, o aumento expressivo das áreas destinadas aos cultivos de culturas como o milho e o feijão e a prática de agricultura itinerante, marcada pela incorporação de novas áreas de plantio ao processo produtivo após exaurir a capacidade de produção do solo em uso.

O nível de degradação atingido no Maciço de Uruburetama indica a ineficiência de atuação dos órgãos de meio ambiente na gestão e no planejamento ambiental local. Embora todos os municípios da área de pesquisa disponham de órgão gestor ambiental, e que alguns possuam leis que disciplinem o uso e ocupação do solo, é notório que suas atuações ocorrem de forma deficitária, seja por falta de recursos financeiros, técnicos e humanos. A maioria desses órgãos atuam integrados a outros setores da administração pública, como agricultura, pecuária, recursos hídricos, cultura e turismo. A resolução de determinados problemas de ordem ambiental muitas vezes passa por conflitos de interesse que podem inibir a tomada de decisão dos órgãos gestores.

Sugere-se que todos os municípios da área de pesquisa desenvolvam estudos técnicos (zoneamento, Plano Diretor, cartas geotécnicas de aptidão a urbanização, mapeamento e cadastro de áreas de risco, entre outros) e leis que orientem e disciplinem o uso e ocupação do solo. Compreende-se a necessidade de implementação de uma Área de Proteção Ambiental



(APA) na serra por parte da Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará (SEMA), e consequentemente uma atuação efetiva da Superintendência Estadual de Meio Ambiente (SEMACE) na fiscalização da expansão urbana e das atividades agrícolas, bem como, na capacitação de recursos humanos junto aos órgãos locais para atuarem em seus municípios. É necessário que sejam efetuados métodos e técnicas de proteção e estabilização dos taludes de corte das estradas, construídas pelo poder público, no intuito de diminuir os riscos, a perda de solos e evitar que as comunidades fiquem isoladas em decorrência dos movimentos de massa. Da mesma forma, é de suma importância a recuperação de áreas degradadas visando garantir o desenvolvimento da prática agrícola e a estabilidade das encostas.

O uso de imagens orbitais, de ensaios geotécnicos empregados e das ferramentas dos sistemas de informações geográficas permitiram extrair informações relevantes a respeito quadro natural, ambiental e da dinâmica das vertentes na área de estudo.

Ao comparar a aplicação das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2 no mapeamento de cobertura e uso da terra verificou-se, a partir do NDVI, que as cenas apresentaram alta correlação.

Os mapeamentos de cobertura e uso da terra apresentaram resultados satisfatórios, que foram atestados pelo procedimento de validação através do índice Kappa e exatidão global.

Considerando a extensão da área de análise dessa pesquisa, e a sua respectiva escala de representação, compreende-se que a imagem MSI/Sentinel-2, devido a sua melhor resolução espacial, permite um maior detalhamento dos alvos, e maior acurácia na classificação. O que possibilita o seu emprego tanto nos estudos em escala regional, como em aplicações que demandem maiores escalas de representação cartográfica.

A aplicação de análise multicritério, por meio de variáveis geomorfométricas, na espacialização da vulnerabilidade natural à perda de solos, permitiu constatar que as classes de vulnerabilidade muito baixa e baixa se distribuem principalmente na área de entorno da vertente úmida do Maciço de Uruburetama, que corresponde a depressão sertaneja, e em setores de alguns vales onde o processo de pedogênese é superior a morfogênese.

As classes de vulnerabilidade média, alta e muito alta estão distribuídas principalmente nas encostas do maciço em virtude das características de declividade, formas das encostas e orientação das vertentes. A interação desses fatores favorecem a atuação dos agentes erosivos e desencadeadores de movimentos de massa, que retratam o predomínio de processos modeladores do relevo, ou morfogênese.

A extração automática de lineamentos a partir do MDE ALOS PALSAR e a espacialização de sua densidade permitiu avaliar a influência dos lineamentos estruturais na

dinâmica de encostas no Maciço de Uruburetama. A partir do mapa de densidade de lineamentos foi possível identificar quais áreas eram mais propícias a deflagração dos movimentos de massa, tendo em vista que as áreas com relevo mais recortado implicam na ocorrência de mais cristas, colinas, vales e, conseqüentemente, em mais vertentes expostas aos agentes intempéricos e às intervenções antrópicas.

Ao identificar a orientação principal dos lineamentos estruturais (noroeste-sudeste), foi possível compreender qual a disposição das vertentes aos condicionantes que favorecem à erosão e ao intemperismo e induzem os movimentos de massa. Tendo os setores nordeste e sudoeste do maciço maior tendência a ocorrência desses eventos.

Ao analisar a distribuição dos lineamentos, sua densidade e orientação em conjuntos com as características ambientais do Maciço de Uruburetama, compreende-se que ocorrem dinâmicas diferentes em suas encostas. Os condicionantes deflagradores de movimentos de massa nos setores úmido e seco da serra atuam com intensidades diferentes e geram processos distintos. Enquanto na vertente úmida são observados maiores índices pluviométricos e conseqüentemente solos profundos, na vertente seca ocorre baixas média de chuvas e solos rasos. Essas particularidades acarretam na predominância de escorregamentos do tipo rotacional e translacional na vertente úmida e em queda de blocos e detritos ou tombamentos na vertente seca.

Observa-se que os movimentos de massa no maciço são potencializados pelas atividades humanas. Na vertente úmida a atividade agrícola praticada sem aplicação de técnicas adequadas e o corte de encostas para abertura de estradas funcionam como gatilhos para deflagração de escorregamentos. Na vertente seca a agricultura de subsistência, sobretudo o cultivo do milho, expõe os solos a erosão acelerada que, além de limitar a produção agrícola, induz a movimentação de blocos rochosos estabilizados pelos sedimentos. É possível constatar que na vertente úmida há um forte componente humano na deflagração dos movimentos. Os cultivos e a abertura de estradas são uma combinação propicia a deflagração de escorregamentos. Na vertente seca o intemperismo físico é mais atuante, em virtude do processo de erosão diferencial que atuou nas encostas expondo blocos e paredões rochosos. Nesse caso há o predomínio da mecânica de rochas, sendo mais comuns movimentos como quedas de blocos e detritos ou tombamentos.

O mapa de distribuição da erosividade, gerado a partir da interpolação (IDW) do Fator R, obtido através dos registros pluviométricos da FUNCEME, apresenta duas classes: Moderada a Forte, que representa 92,66% da área, e Erosividade Forte, que totaliza 7,34% e está restrita a porções dos municípios de Itapipoca e Trairi, cujas estações pluviométricas

ultrapassaram 761 MJ.mm/ha.h.ano. Tal fato está relacionado a variabilidade pluviométrica, decorrente da redução da atuação de frentes geradoras de chuvas, e ao efeito orográfico.

O Mapa de erodibilidade, gerado através de Krigagem ordinária do Fator K, obtido, por sua vez, por meio dos resultados das análises laboratoriais das 184 amostras de solos coletadas em campo, indica que 8% da área mapeada corresponde a classe de Erodibilidade Muito Baixa. Sua ocorrência está associada ao Planossolo Háplico Eutrófico e ao Neossolo Quartzarênico Órtico. A classe de Erodibilidade Baixa representa 83% da área e está relacionada à ocorrência de Argissolo Vermelho-Amarelo e ao Neossolo Litólico. A classe de Erodibilidade Moderada se distribui por 9% da área de pesquisa e está associada principalmente a ocorrência do Luvisolo Crômico, que bordejia o Rio Caxitoré, e também à área do entorno do Açude Caxitoré.

A análise de vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos no maciço indicou que as classes de vulnerabilidade Muito Baixa e Baixa, que perfazem 50,9% da área de estudo, ocorrem em setores da depressão sertaneja, marcados por baixas declividades e onde os recursos locais encontram-se em estado de conservação e/ou preservação; e em áreas situadas acima de 600 metros de altitude, onde o relevo impõe dificuldade de acesso e é possível encontrar os remanescentes da vegetação nativa.

As classes Alta e Muito Alta, que correspondem a 21,6% da área, apresentam forte dispersão nas encostas da serra e estão associadas a pressão exercida pela expansão urbana e sobretudo da atividade agrícola, que se dá sem considerar os limites do meio e em desacordo com as prescrições legais e cuidados técnicos necessários para o uso eficiente e sustentável do solo.

A integração do inventário, composto por 101 de ocorrências de movimento de massa e erosão acelerada, com as classes do mapa de vulnerabilidade ambiental atesta a qualidade do mapeamento. Mais de 93% dos registros estão posicionados nas classes Média, Alta e Muito Alta. As classes Alta e Muito Alta, que representam 21,6% da área de pesquisa, apresentam 58,4% das ocorrências.

Os mapas obtidos a partir do processamento de imagens, integração e espacialização de dados compõem um arcabouço técnico que pode subsidiar o planejamento e a gestão ambiental no Maciço de Uruburetama.

O mapa de cobertura e uso da terra ilustra o cenário atual das transformações processadas na área de pesquisa. A partir dele é possível realizar uma análise da dinâmica de

uso e ocupação, processada ao longo dos anos, baseada em cenários pretéritos, bem como, realizar prognósticos de possíveis intervenções apoiado no quadro vigente.

O mapa de vulnerabilidade natural à perda de solos constitui um importante documento para gestão da área de pesquisa. A espacialização da vulnerabilidade permite ao gestor orientar as atividades econômicas e a ocupação humana respeitando os limites impostos pelos condicionantes físicos locais. A partir da tomada de decisão pelos gestores ou órgãos competentes, as intervenções antrópicas no maciço podem ser pensadas no sentido de garantir maior produtividade e sustentabilidade à prática agrícola, seja pela adoção do cultivo em curvas de nível, para evitar a perda de solos, ou com a escolha de culturas adequadas às condições naturais do local, sempre respeitando a legislação ambiental vigente. Da mesma forma, as ocupações das vertentes devem ser orientadas no sentido de evitar os riscos e as perdas ambientais e humanas.

A extração automática de lineamentos estruturais demonstrou ser um excelente recurso para identificação de áreas com maior susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa, seja a partir de sua distribuição, ou da análise de densidade e orientação dessas estruturas. Os lineamentos extraídos de forma automática se configuram como um instrumento de suporte ao monitoramento das encostas que abrigam condições favoráveis para a deflagração de movimentos de massa. Para isso, faz-se necessário conhecer os condicionantes físicos locais e as intervenções humanas processadas no maciço.

Os mapas de erodibilidade e erosividade indicam as áreas com menor e maior potencial aos processos erosivos, considerando as propriedades do solo e a energia das chuvas, respectivamente. Essas informações são de grande relevância, pois permitem estabelecer medidas preventivas para reduzir a perda de solos, que na maioria das vezes são derivadas das intervenções não planejadas e que não leva em consideração fatores como: tipo de solo, cultura adotada, sistemática de plantio, declividade do terreno, volume de chuvas e sistema de irrigação empregado. Reconhecer a susceptibilidade dos solos aos processos erosivos é suma importância para que medidas mitigadoras sejam adotadas visando garantir a sustentabilidade agrícola.

A integração das variáveis propostas por meio das ferramentas do geoprocessamento demonstrou grande potencial para análise de vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos. A associação de variáveis físicas e humanas permitiu a compreensão do atual quadro ambiental no Maciço de Uruburetama. As classes de vulnerabilidade ambiental expõem as limitações ao uso e ocupação do solo, servindo de suporte para prognósticos de possíveis cenários gerados em decorrência de ações não planejadas ou que desconsideram os limites do meio. O mapa de vulnerabilidade ambiental à degradação dos solos se constitui como

uma ferramenta de suporte à gestão e ao planejamento ambiental, que pode ser usado na orientação de uso e ocupação de áreas preferenciais ou como indicativo de medidas que deverão ser tomadas para evitar perdas econômicas, ambientais e humanas.



## REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, A.; AKHIR, J.M.; ABDULLAH, I. Automatic Mapping of lineaments using Shaded Relief Images derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**.v.15; p. 949 – 957, 2010. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.475.9387&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 02 ago. 2019.
- ABNT. **ABNT NBR 5734**: peneiras para ensaios com telas de tecido de metálico. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.
- ABNT. **ABNT NBR 6457**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ABNT. **ABNT NBR 7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ABNT. **ABNT NBR 13292**: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ABNT. **ABNT NBR 13600**: Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ABNT. **ABNT NBR 14545**: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- ALMEIDA, R.F.B.; JÚNIOR, L.G.F.; BAYER, M. 2018. Análise da cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do Rio do Coco e suas implicações sobre as áreas de preservação permanente como instrumento na gestão dos recursos hídricos. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v.49, p. 60-82, dez, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/58652/37458>. Acesso em: 27 mai 2018.
- AB’SABER, N.A. **Geomorfologia: o domínio morfoclimático semiárido das caatingas brasileiras**. São Paulo: Instituto de Geografia /USP, 1974. 43, 37 p.
- AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F. F. Principais modelos para estimar a perda de solo em áreas agrícolas. *In*: PRUSKI, F. F. **Conservação de água e solo: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2ª ed. Viçosa: ed. UFV, 2009. p. 74-107.
- AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE/ U.S DEPARTAMENT OF AGRICULTURE. **Predicting soil erosion by water**: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE), 1997. 404 p.
- AYOADE, J.O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 18ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015. 350 p.
- BARBOSA, Honório. Ceará possui 175 cidades incluídas no Semiárido. Diário do Nordeste, Fortaleza, 28 Novembro 2017. Caderno Região. Disponível em:

<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/regiao/ceara-possui-175-cidades-incluidas-no-semiarido-1.1857199>. Acesso em: 2 ago. 2019.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p. 161-173, Feb. /Mar. 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003442579190009U>. Acesso em: 12 dez. 2018.

BASTOS, F.H. **Movimentos de massa no maciço de Baturité e contribuições para estratégias de planejamento ambiental**. 2012. 257 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BATISTA, C.T. **Geoprocessamento aplicado ao mapeamento geotécnico em escala regional: o caso da Serra de Baturité, CE**. 2014. 218 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BATISTA, C.T; VERISSIMO, C.U.V; AMARAL, W.S. Levantamento de feições estruturais lineares a partir de sensoriamento remoto – uma contribuição para o mapeamento geotécnico na Serra de Baturité, Ceará. **Revista do Instituto de Geociências/ Geologia USP, Série Científica**, São Paulo, v.14, n.2, p.67-82, Jun. 2014.

BECEK, K. Assessing global digital elevation models using the runway method: the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer versus the shuttle radar topography mission case. **IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing**, v. 52, n. 8, p. 4823–4831, aug. 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/260992496\\_Assessing\\_Global\\_Digital\\_Elevation\\_Models\\_Using\\_the\\_Runway\\_Method\\_The\\_Advanced\\_Spaceborne\\_Thermal\\_Emission\\_and\\_Reflection\\_Radiometer\\_Versus\\_the\\_Shuttle\\_Radar\\_Topography\\_Mission\\_Case](https://www.researchgate.net/publication/260992496_Assessing_Global_Digital_Elevation_Models_Using_the_Runway_Method_The_Advanced_Spaceborne_Thermal_Emission_and_Reflection_Radiometer_Versus_the_Shuttle_Radar_Topography_Mission_Case). Acesso em: 12 oct. 2018.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8ª ed. São Paulo: Ícone, 2012. 355 p.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. **Caderno de Ciências da Terra/**, USP-IGEOG, São Paulo, n. 13, p. 1-27, 1972.  
BINS, L.S.; FONSECA, L.M.G.; ERTHAL, G.J.; LI, F.M. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., 1996, Salvador. **Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 1996. p.677-680. CD-ROM. ISBN 85-17-00014-5. (INPE-6203-PRE/2292). Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.05.09.30/doc/T205.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2017.

BISPO, P. C; ALMEIDA, C. M; VALERIANO, M. M; MEDEIROS, J. S; CREPANI, E. Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 467-478, jul. /set. 2011.

BITAR, O. Y. **Curso de Geologia aplicado ao meio ambiente**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1995. 247 p.

BIVAR, W.S.B; FORTES, L.P.S; SIMÕES, P.C.M; TAI, D.W; CÔRTEZ, S da C. **Manual técnico de geomorfologia**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p.

BLOOM, A.L. **Superfície da Terra**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2000. 184 p.

BOTELHO, R.G.M. Planejamento ambiental e microbacia hidrográfica. *In*: GUERRA, A.J.T; SILVA, A.S; BOTELHO, R.G.M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos**. 10ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015. p. 269 - 300.

BRANDÃO, R.L. Diagnóstico Geoambiental e os principais problemas de ocupação do meio físico da Região Metropolitana de Fortaleza. *In*: **Projeto SINFOR – Sistema de Informações para a Gestão e administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza: CPRM, 1995. p. 1-99.

BRANDÃO, R.L. **Zoneamento Geoambiental da região de Irauçuba/CE**. Texto explicativo. Carta Geoambiental. Fortaleza: CPRM, 2003. 67 p.

BRANDÃO, R.L; FREITAS, L.C.B. **Geodiversidade do estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2014. 214 p.

BRASIL, **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (Novo Código Florestal)** . Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF, 2012. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm). Acesso em: 15 fev. 2017.

BRITO, M.M.; WEBER, E.J.; KRIGGER, V.S.; LEITZKE, F.P. Análise dos fatores condicionantes de movimentos de massa no município de porto alegre a partir de registros históricos análise dos fatores condicionantes de movimentos de massa no município de Porto Alegre a partir de registros históricos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 9, p. 1853-1872, out. 2016.

CARMO, A.M; SOUTO, M.V.S; DUARTE, C.R; MESQUITA, A.F. Análise de Risco Ambiental a Erosão Gerada a partir de produtos de sensores remotos: MDE Topodata e Landsat 8. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17., 2015, João Pessoa. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2015. p. 5927-5934. Internet. ISBN 978-85-17-0076-8. IBI: <8JMKD3MGP6W34M/3JM4D98>. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2015/06.15.16.05.08>. Acesso em: 25 jun. 2016.

CARMO, A. M.; SOUTO, M. V. S.; DUARTE, C. R. Análise qualitativa e comparativa das variáveis morfométricas da região serrana da porção sul do maciço central do Ceará geradas através dos MDE: SRTM, ASTER GDEM E TOPODATA. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 67, n. 3, p. 603-620, mai. /jun. 2015.  
CARVALHO, F.C. de. Sustentabilidade de sistemas Agroflorestais pecuários em ambientes semi-áridos. *In*: SOBRINHO, J.F.; FALCÃO, C.L.C. **Semi-Árido: diversidades, fragilidades e potencialidades**. Sobral: Sobral Gráfica, 2006. p. 71 – 107.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

CAVALCANTE, J.C.; VASCONCELOS, A.M.; MEDEIROS, M.F.; PAIVA, I.G. **Mapa Geológico do Estado do Ceará**. 1ª edição. Fortaleza: CPRM, 2003. 1 mapa, color. Escala 1:500.000. Disponível em:  
<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/2355/Mapa%20Geologico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 mar. 2016.

CEARÁ, Secretária do Planejamento e Gestão do Estado do Ceará. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Mapa das unidades fitoecológicas do Estado do Ceará**. Fortaleza: IPECE, 2007. 1 mapa, color. Disponível em:  
[http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/images3x/Unidades\\_Fitoecologicas.jpg](http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/images3x/Unidades_Fitoecologicas.jpg). Acesso 26 mar. 2016.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH). Companhia de Gestão de Recursos hídricos. **Atlas dos recursos hídricos do Ceará**. Fortaleza: COGERH, 2018. 1 atlas. Disponível em:  
[http://atlas.srh.ce.gov.br/infraestrutura/acudes/detalhaCaracteristicasTecnicas.php?cd\\_acude=267&](http://atlas.srh.ce.gov.br/infraestrutura/acudes/detalhaCaracteristicasTecnicas.php?cd_acude=267&). Acesso em: 29 jan. 2018.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. **Movimento de Massa**. Cachoeira Paulista, 2017. Disponível em:  
<http://www.cemaden.gov.br/deslizamentos/>. Acessado em: 16 mar. 2017.

CHUVIECO, E. Fundamentos de teledetection espacial. Madrid: Unigraf, 1990. 453 p.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. *In*: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia – Uma atualização de bases e conceitos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p.149 – 209.

CONCEIÇÃO, R.A.C; SILVA, A.Q. Extração automática de lineamentos utilizando imagens SRTM, Landsat ETM+ e ALOS PALSAR na região de Nobres, MT. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 3688-3695. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD).  
 IBI: <3ERPFQRTRW34M/3E7GCTQ>. Disponível em:  
<http://marte2.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.58.28>. Acesso em: 22 ago. 2018.

CONGALTON, R.G. A. A review of assessing the accuracy classificatons of remotely sensed data. **Remote Sensing Environment**, Berkeley, v.37 n.1, p. 35-46, Jul. 1991. Disponível em:  
[https://www.academia.edu/3182836/A\\_review\\_of\\_assessing\\_the\\_accuracy\\_of\\_classifications\\_of\\_remotely\\_sensed\\_datahttps://www.academia.edu/3182836/A\\_review\\_of\\_assessing\\_the\\_accuracy\\_of\\_classifications\\_of\\_remotely\\_sensed\\_data](https://www.academia.edu/3182836/A_review_of_assessing_the_accuracy_of_classifications_of_remotely_sensed_datahttps://www.academia.edu/3182836/A_review_of_assessing_the_accuracy_of_classifications_of_remotely_sensed_data). Acesso em: 03 jun. 2018.

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 1999. 137p.

CORDEIRO, A.M.N.; CARVALHO, I.P.; BASTOS, F.H.; LIMA, D. L.S. O papel das estruturas litológicas na dinâmica e evolução do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. **Revista da Casa da Geografia de Sobral** (Online) v. 21, n. 2 p. 81-93, set. 2019. Disponível em: <https://rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/477/385>. Acesso em: 5 nov. 2019.

CORRECHEL, V. **Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do “Fallout” do <sup>137</sup>Cs**. 2003. 79 f. Tese (Doutorado em ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

COSTA, N.M.C; SILVA, J.X. Geoprocessamento aplicado à criação de planos de manejo: o caso do Parque Estadual da Pedra Branca – RJ. *In*: ZAIDAN, R.T; SILVA, J.X. (Org.). **Geoprocessamento & análise ambiental**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 2012. p. 67-114.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981. 313 p.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S. de; AZEVEDO, L.G. de; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T.G.; D.V. **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico**. Metodologia desenvolvida para subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico e capacitar os técnicos dos Estados da Amazônia Legal (Convenio SAE/INPE); Luís Guimaraes de Azevedo, consultor SAE/PR; INPE-6145-PUD/028. São Jose dos Campos: INPE, 1996. 18 p.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S. de; HERNANDEZ FILHO, P; FLORENZANO, T.G; VALDETE, D.; BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao zoneamento-ecológico econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001. 124 p.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; PALMEIRA, A.F.; SILVA, E.F. Zoneamento ecológico-econômico. *In*: FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de textos, 2008. p. 285 -317.

CUNHA, S.B. Geomorfologia fluvial. *In*: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (Org.). **Geomorfologia – Uma atualização de bases e conceitos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p. 211 – 252.

DEMARCHI, J.C.; PIROLI, E.L.; ZIMBACK, C.R.L. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo–SP usando imagens LANDSAT-5. **RA’E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba v. 21, p. 234-271, jan./abr. 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA A SECA. **Açude Caxitoré: descrição geral**. Fortaleza, 2018. Disponível em: <http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/caxitore.htm>. Acessado em: 29 jan. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA A SECA **Açude Mundaú: descrição geral**. Fortaleza, 2018. Disponível em: <http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/mundau.htm>. Acesso em: 29 jan. 2018.



DIAS, F.P.; HERRMANN, M.L.P. Susceptibilidade a deslizamentos: estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis – SC. **Revista Caminhos de Geografia** (Online) v. 3, n. 6 p. 57-73, jun. 2002. Disponível em:

<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15295>. Acesso em: 5 out. 2019.

DUARTE, M. L.; SILVA, D. M. P.; SILVA, T. A.; GUIMARÃES, L. R. Evaluation of digital elevation models in the delimitation of hydrographic basins in the south of Amazonas region. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, Recife v. 9, n. 2, p. 99-107, mai./ago. 2019.

DYLIK, J. Notion du versant em geomorphologie. **Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, Série des Sciences** Geologiques et Geographiques, v. 16, n. 2, p. 125-132, 1968.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite**. Brasília, 2018. Disponível em

[https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao\\_landsat.html](https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_landsat.html). Acessado em: 10 fev. 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2009. 367 p.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Parâmetros do sensor MSI do satélite Sentinel-2**. Paris, 2018. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Acesso em: 4 mai. 2018.

EVANS, R. Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: An empirical viewpoint. In: KIRKBY, M.J.; MORGAN, R.P.C. (Org.). **Soil Erosion**. Chichester: John Wiley, p.109-28.

FALCÃO SOBRINHO, J.; NASCIMENTO NETO, J.N.; FALCÃO, C.L.C. Análise do uso e ocupação do solo em um ambiente úmido em meio ao semiárido cearense: Serra de Uruburetama. **Revista de Geociências do Nordeste** v.5, p. 42-53, out. 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/18430>. Acesso em: 5 dez. 2019.

FERNANDES, A. **Conexões florísticas do Brasil**. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2003. 134 p.

FERNANDES, A. **Fitogeografia Brasileira: províncias Florísticas**. 3ª ed. Fortaleza: Realce Editora e Indústria Gráfica, 2006. 202 p.

FERNANDES, N.F; AMARAL, C.P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia e meio ambiente**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p. 123 – 194.

FLORENZANO, Tereza Gallotti. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de textos, 2002. 97 p.

FREIRES, E.V.; MENDES, L.M.S. Análise da cobertura vegetal do município de Maracanaú/CE dos anos de 1991 e 2006. **GeoUECE**, Fortaleza, v. 1 n.1, p. 44-55, dez. 2012.

FREIRES, E.V.; SILVA NETO, C.A.; CUNHA, D.S.R.; DUARTE, C.R.; VERÍSSIMO, C.U.V.; GOMES, D.D.M. Comparação de Imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2 no Mapeamento de Cobertura e Uso da Terra no Maciço de Uruburetama, Ceará. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 4, p. 427-442, dez. 2019.

FREIRES, E.V.; SILVA NETO, C.A.; SILVA, M.T.; DUARTE, C.R.; VERÍSSIMO, C.U.V.; GOMES, D. D. M. Analysis of the natural vulnerability of soil loss in the Uruburetama Massif/CE. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, n. 3, p. 116-130, dez. 2019.

GALETI, P. A. **Conservação do solo, reflorestamento, clima**. 2ª ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 279 p.

GUERRA, A.J.T. Encostas urbanas. *In*: GUERRA, A.J.T (Org.). **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. p. 13 - 42.

GUERRA, A.J.T. O início do processo erosivo. *In*: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G. (Org.). **Erosão e conservação dos solos**. 10ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015. p. 17 - 55.

GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. *In*: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia – Uma atualização de bases e conceitos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p.149 – 209.

GUERRA, A.T; GUERRA, A.J.T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997. 652 p.

GUIDICINI, G; NIEBLE, C.M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavações**. São Paulo: Blucher, 1983. 196 p.

GÜRTLER, S.; LUIZ, A.J.B.; EPIPHANIO, J.C.N. Uniformização de imagens Landsat para previsão de safras agrícolas. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2003. p. 109-116. CD-ROM. ISBN 85-17-00017-X. (INPE-16118-PRE/10721). Disponível em: <http://urlib.net/rep/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.15.12.19>. Acesso em: 12 set. 2017.

GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T.; FERNANDES, N.F. Movimentos de massa. *In*: FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de textos, 2008. p. 159 -184.

HADLEY, R.F.; LAL, R.; ONSTAD, C.A.; WALING, D.E.; YAIR, A, N.F. **Recent developments in erosion and sediment field studies. Technical documents in hidrology**. International Hydrological Programme: Paris: UNESCO (IHP), 1985, p.127.

HART, M.G. **Geomorphology: pure and applied**. Londres: Allen and Unwin Publishers, 1986. 228 p.

HILBERTS, A. G. J.; LOONA, E. E. V.; TROCHA, P. A.; PANICONI, C. The hillslope-storage Boussinesq model for non-constant bedrock slope. **Journal of Hydrology**, v. 291, n. 3-4, p. 160-173, jun. 2004.

IBGE. Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Mapa de climas zonais**. Escala 1: 5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 1 mapa, color. Disponível em: [https://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas\\_brasil/brasil\\_clima.pdf](https://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf). Acesso em: 16 mai. 2018.

IBGE. Diretoria de Geodésia e Cartografia. **Mapa temático de Pedologia**. Escala 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 1 mapa em Formato vetorial. Disponível em: [ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/pedologia/vetores/escala\\_250\\_mil/recorte\\_milionesimo/](ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/vetores/escala_250_mil/recorte_milionesimo/). Acesso em: 15 fev. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de pedologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 315p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal das cidades: panorama/ população**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 28 outubro 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal das cidades: produção agrícola**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 30 outubro 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **SPRING**. Versão 5.5.3. São José dos Campos, 2018. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/SPRING/portugues/download.php>. Acesso: 01 jul. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **SPRING, Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas: manual de ajuda**. São José dos Campos: INPE, 2004.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Ocupação de encostas**. São Paulo: IPT, 1991. 216 p.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso dos métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. *In: Encontro Nacional de Estudos Populacionais*, 15., 2006, Caxambu. **Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais**. Caxambu-MG: ABEP, 2006, p.1-22. Disponível em: <http://www.nepo.unicamp.br/vulnerabilidade/admin/uploads/producoes/MétodosInterpolação>. Acesso em: 23 Mar 2020.

JORGE, M.C.O; GUERRA, A.J.T. Erosão dos solos e movimentos de massa: recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. *In: GUERRA, A J.T; JORGE, M.C.O (Org.). Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 7-30.

JENSEN, R.J. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 585 p.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G..The measurement of observer agreement for categorical data. **International Biometric Society**, v. 33, n.1, p. 159-174, mar. 1977. Disponível em:

[https://www.dentalage.co.uk/wpcontent/uploads/2014/09/landis\\_jr\\_\\_koch\\_gg\\_1977\\_kappa\\_and\\_observer\\_agreement.pdf](https://www.dentalage.co.uk/wpcontent/uploads/2014/09/landis_jr__koch_gg_1977_kappa_and_observer_agreement.pdf). Acesso em: 10 sep. 2018.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W.; CHIPAN, J.W. **Remote sensing and interpretation**. 5ed. John New York: Wiley & Sons Inc, 2004. 763 p.

LIMA, D.L.S.; CORDEIRO, A.M.N.; BASTOS, F.H. Agentes condicionantes e desencadeadores de movimentos gravitacionais de massa na vertente úmida do maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n.4, p. 1142-1157, set./out. 2015

LIMA, D.L.S.; CORDEIRO, A.M.N.; BASTOS, F.H.; MAIA, R.P. Geomorfologia granítica do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 2, p. 373-395, abr./jun. 2019. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/1401/386386439>. Acesso em: 11 set. 2019.

LOBÃO, J.S. B.; FRANÇA-ROCHA, W.J.S.; SILVA, A.B. Aplicação dos índices Kappa & PABAK na validação da classificação automática de imagem de satélite em Feira de Santana – BA. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais do XII do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1207-1214. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12615-PRE/7908). Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.14.18/doc/1207.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2018.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 51, n. 2, p. 189-196, 1992.

LOPES, M.F.L. **Abordagem metodológica para extração de estruturas a partir de dados de radar (SRTM+) na região da jazida de P-U de Itataia-Ce**. 2017. 52 f. TCC (Graduação em de Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

LOPES, M.F.L.; FONTENELE, G.B.; GAMEIRO, S.; MIRANDA, M.P.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S. Análise comparativa dos lineamentos da região da jazida fósforo-uranífera de Itataia-Ce gerados através do MDE: SRTM+, ASTER GDEM 2 e TOPODATA. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18., 2017, João Pessoa. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2017. p.763-770. Internet. ISBN 978-85-17-00088-1. IBI: <8JMKD3MGP6W34M/3PS44NE>. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2017/10.23.17.13>. Acesso em: 2 mai. 2018.

LOUREIRO, H.A.S; FERREIRA, S.M. O papel das geotecnologias no estudo de feições erosivas e de movimentos de massa no Brasil. *In*: GUERRA, A J.T; JORGE, M.C.O. (Org.). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 95-125.

LYONS, S. E.; ROSS, R. M. . Earth Hazards of the South Central US. Chapter 10. In: LUCAS, M. D.; SWABY, A. N.; ROSS, R. M. (ed.). **The Teacher-Friendly Guide to the Earth Science of the South Central US**. Publisher: Paleontological Research Institution. p.301-340

MAIA, R.P.; CASTRO, H.S. Erosão Diferencial e Propriedades Geomorfológicas das Rochas- Exemplos do NE Brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 3, n. 1, p. 1-15, jun. 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/11107>. Acesso em: 5 mai. 2018.

MAIA, R.P.; BEZERRA, F.H.R. **Tópicos de Geomorfologia Estrutural – Nordeste Brasileiro**. Fortaleza: Edições UFC, 2014. 124 p.

MARINHO, R.R.; PARADELLA, W.R.; OLIVEIRA, C.G.; SILVA, A.Q.; SANTOS, A.R. Aplicação de imagens SAR orbitais na identificação de inundações e escorregamentos de terra ocorridos no vale do Itajaí/SC durante o desastre de 2008. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 15., 2011, Curitiba. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2011. p. 8295-8302. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). IBI: <3ERPFQRTRW/39UFN8H>. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/06.29.12.43/doc/p0697.pdf>. Acesso: 7 jun. 2017.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra: curso básico de geotecnia**. 2ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

MCKENZIE, N. J., COUGHBON, K. J.; CRESSWELL, H. P. **Soil Physical Measurements and Interpretation for Land Evaluation**. Melbourne: CSIRO Publishing, 2002. 392 p.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.

MORAES, A.C.R. **Meio ambiente e ciências humanas**. 4ª edição. São Paulo: Annablume, 2005. 161p.

MORAIS, J.O. Compartimentação territorial evolutiva da zona costeira. *In: LIMA, L.C; MORAIS, J.O; SOUZA, M.J.N. (Org.).* **Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará**. Fortaleza: FUNECE, 2000. p.106 – 184.

MATHER, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 324 p.

MUKAKA, M.M. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, v. 24, n.3, p. 69-71, sep. 2012. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3576830/>. Acesso em: 01 jul. 2018.

NASCIMENTO, S.S.; DE LIMA, E.R.V.; DE LIMA, P.P.S. Análise Temporal da degradação da Caatinga Na Sub-Bacia Do Alto Paraíba. **Okara: Geografia em debate**, João Pessoa, v. 8, n.1, p. 72-94, jan./jun. 2014.

NETO, J.C.A.S. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. **Revista Geografia**, Londrina, v. 22, n. 1, p. 05-25, jan./abr. 2013.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2008. 363 p.

OLIVEIRA, V.P.V. **Prospección, caracterización y cartografía edafopaisagística em uma região montañosa del semiárido brasileiro: la Sierra de Uruburetama (Sertão Nordeste-Ceará-Brasil)**. 2002, 585 p. Tese (Doctorado en Edafología y Química Agrícola) – Faculdade de Ciencias experimentales, Universidad de Almeria, 2002.

PALMIERI, F.; LARACH, J.O.I. Pedologia e geomorfologia. *In*: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B (Org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p. 59 – 122.

PENHA, H.M. Processos endogenéticos na formação do relevo. *In*: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p. 51-92.

PENTEADO, M.M. **Fundamentos de geomorfologia**. 3ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1983. 186 p.

PETLEY, D.J. Ground Investigation, sampling and testing for studies of slope instability. *In*: BRUNSDEN, D.; PRIOR, D. (Org). **Slope instability**. Salisbury: John Wiley e Sons, 1984. P. 67-101.

PRADHAN, B. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. **Advances in Space Research**, v. 45, n. 10, p. 1244-1256, 2010. Disponível em: [https://www.academia.edu/1536193/Remote\\_sensing\\_and\\_GISbased\\_landslide\\_hazard\\_analysis\\_and\\_crossvalidation\\_using\\_multivariate\\_logistic\\_regression\\_model\\_on\\_three\\_test\\_areas\\_in\\_Malaysia](https://www.academia.edu/1536193/Remote_sensing_and_GISbased_landslide_hazard_analysis_and_crossvalidation_using_multivariate_logistic_regression_model_on_three_test_areas_in_Malaysia). Acesso em: 17 maio 2018.

PRUSKI, F. F. Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. *In*: PRUSKI, F. F. **Conservação de água e solo: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2ª ed. Viçosa: ed. UFV, 2009. p. 40-73.

RIBEIRO, S.C.; MARÇAL, M.S.; CORRÊA, A.C.B., Geomorfologia de Áreas Semiáridas: Uma Contribuição ao Estudo dos Sertões Nordestinos. **Revista de Geografia**, v. 27, n.1, p. 120-137, jan./mar. 2010.

RIFFEL, E.S.; GUASSELLI, L.A.; BRESSANI, L.A. Desastres associados a movimentos de massa: uma revisão de literatura. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 36, n.2, p. 285-101, Mai./Ago. 2016. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/42796>. Acesso em: 28 nov. 2019.

RIZZINI, Carlos Toledo. **Tratado de fitogeografia do Brasil**. São Paulo: Âmbito Cultural Edições Ltda, 1997. 746 p.



RODRIGUEZ, J.M.M. Planejamento ambiental: bases conceituais, níveis e métodos. *In*: CAVALCANTI, A.P.B. **Desenvolvimento sustentável e planejamento**: bases teóricas e conceituais. Fortaleza: UFC – Imprensa Universitária, 1997. p. 37-66.

RODRIGUEZ, J.M.M.; SILVA, E.V. **Planejamento e gestão ambiental: subsídios da geocologia das paisagens e da teoria geossistêmica**. Fortaleza: edições UFC, 2016. 370 p.

ROSEMBACK, R.; FRANÇA, A.M.S.; FLORENZANO, T.G. 2005. Análise comparativa dos dados NDVI obtidos de imagens CCD/CBERS-2 e TM/LANDSAT-5 em área urbana. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1075-1082. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12615-PRE/7908). Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.16.17.49/doc/1075.pdf>. Acesso em: 10 out. 2017.

ROSS, J.L.S. **Geomorfologia aplicada aos EIAs-RIMA**. *In*: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (Org.). Geomorfologia e meio ambiente. 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p. 291 - 335.

ROVEDDER, J. **Validação da classificação orientada a objetos em imagens de satélite Ikonos II e elaboração de indicadores ambientais georreferenciados no município de Torres, planície costeira do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2007. 83 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SALIS, H.H.C.; COSTA, A.M.; VIANA, J.H.M. Análise do uso e ocupação do solo nas APP de curso d'água da bacia do córrego Marinheiro por meio de NDVI aplicado em imagens Landsat 8 e Ikonos-II. **Geografias**, Belo Horizonte v. 22 p. 40-53, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/166906/1/Analise-uso.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2018.

SANCHES, I.D.A.; ANDRADE, R.G.; QUARTAROLI, C.F.; RODRIGUES, C.A.G. 2011. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 – TM para obtenção de reflectância de superfície e NDVI. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15., 2011, Curitiba. **Anais XV do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2011. p. 7564-7571. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). IBI: <3ERPFQRTRW/39UFN8H>. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.11.12.17/doc/p1555.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2018.

SALOMÃO, F.X.T. Controle e prevenção dos processos erosivos. *In*: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R.G.M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos**. 10ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015, p. 229 - 267.

SANTOS, R.F.dos. **Planejamento Ambiental: teoria e pratica**. São Paulo: Oficina de textos, 2004. 184 p.

SCHOBENHAUS, C; NEVES, B. B. B. A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana. *In*: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES,

J. H. (Org.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. Brasília: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p.

SEIXAS, B.L.S. **Fundamentos do manejo e da conservação do solo**. Salvador: Centro Editorial e Didático da UFBA, 1984. 304 p.

SELBY, M.J. **Hillslope Materials and processes**. Oxford: Oxford University Press, 1993. 451 p.

SERRANO, A. La variable ambiental en los planes de ordenación del territorio. **Revista Situación**, Bilbao, n.2, p.123-126, 1991.

SHIMABUKURO, Y.E.; PONZONI, F.J. **Mistura Espectral: modelo linear e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos. 2017. 127 p.

SILVA, Jorge Xavier da. **Geoprocessamento para a análise Ambiental**. Rio de Janeiro: J. Xavier Silva, 2001. 228 p.

SILVA, M.V.C. **Análise Geoambiental: subsídios ao planejamento agrícola da Serra de Uruburetama – Ce**. 2007, 191 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2007.

SILVA NETO, J. C. A. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. **Revista Geografia**, Londrina v. 22, n.1, jan./abr. 2013.

SOBRINHO, J.F.; FALCAO, C.L.C. Agricultura no semi-Árido cearense e técnicas de monitoramento do processo erosivo. *In*: SOBRINHO, J.F.; FALCÃO, C.L.C. **Semi-Árido: diversidades, fragilidades e potencialidades**. Sobral: Sobral Gráfica, 2006. p. 144 – 165.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: IST Press, 2006. 214p.

SOTCHAVA, U.B. Por uma teoria de classificação de geossistemas de vida terrestre. **Biogeografia**, São Paulo, n.14, p. 1-24, 1978.

SOUZA, M.J.N. Bases naturais e esboço do zoneamento geoambiental do estado do Ceará. *In*: LIMA, L.C; MORAIS, J.O; SOUZA, M.J.N (Org.). **Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará**. Fortaleza: FUNECE, 2000. p. 6 - 104.

SOUZA, M.J.N., *et al.* **Geossistemas e potencialidades dos recursos naturais: Serra de Baturité e áreas sertanejas periféricas**. Fortaleza: FNMA/UFC/FUNCEME, Fortaleza, 1994. 102 p.

SOUZA, M.J.N; NETO. Contexto Geoambiental do semiárido do Ceará: problemas e perspectivas. *In*: SOBRINHO, J.F.; FALCÃO, C.L.C. (Org.). **Semi-Árido: diversidades, fragilidades e potencialidades**. Sobral: Sobral Gráfica, 2006. p. 14 – 33.

SOUZA, J.L.L.L.; GOMES, T.S.; DIAS, R.S.; SANTOS, R.L. A utilização de geotecnologia enquanto ferramenta de análise da susceptibilidade a erosão do solo no semiárido baiano. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba. **Anais do XV Simpósio**

- Brasileiro de Sensoriamento Remoto.** São José dos Campos: INPE, 201. p.4303-4310. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). IBI: <3ERPFQRTRW/39UFN8H>. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.22.17.04/doc/p1311.pdf>. Acesso em: 27 de nov. 2016.
- SOUZA, M.J.N; NETO, J.M; SANTOS, J.O; GONDIM, M.S. **Diagnóstico Geoambiental do Município de Fortaleza: subsídio ao macrozoneamento ambiental e à revisão do Plano Diretor Participativo- PDPFor.** Fortaleza: Prefeitura Municipal de Fortaleza, 2009. 172 p.
- SOUZA, M.J.N; OLIVEIRA, V.P.V. Os enclaves úmidos e sub-úmidos do semi-árido do nordeste brasileiro. **Mercator** - Revista de Geografia da UFC, v. 5, n. 09, p. 85-102, nov. 2006.
- SUGUIO, K.; BIGARELA, J.J. **Ambiente fluvial.** Curitiba: Editora Universidade Federal do Paraná, 1979. 189 p.
- TOLEDO, M.C.; OLIVEIRA, S.M.B.; MELFI, A.J. Intemperismo e formação do solo. *In*: TEIXEIRA, W; TOLEDO, M.C.M; FAIRCHILD, T.R; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra.** 2ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2003. p. 139-166.
- TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** 3ª ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015. 196 p.
- TORRES, F.T.P; MARQUES NETO, R.; MENEZES, S.O. **Introdução à geomorfologia.** São Paulo: Cengage Learning, 2012. 322 p.
- TRICART, Jean. **Ecodinâmica.** Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1977. 91 p.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Imagem MSI/Sentinel-2 de 26 de setembro de 2017.** Departamento do Interior dos E.U.A, 2018. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 5 mai. 2018.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Imagem OLI/Landsat-8 de 30 de setembro de 2017.** Departamento do Interior dos E.U.A, 2018. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 5 mai. 2018.
- VALERIANO, M.M. **Topodata:** guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p.
- VERONA, J.D; SHIMABUKURO, Y.E.; SANTOS, J.R. Potencialidade das imagens-fração multitemporais TM/Landsat na caracterização de variações fenológicas em área de floresta tropical na Amazônia. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 713-720. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12615-PRE/7908). Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.11.22.57/doc/713.pdf>. Acesso em: 10 out. 2017.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215p.

WILD, A. **Soils and the environment: an introduction**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 287 p.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **J. Journal of Soil and Water Conservation**, v. 26, n.5, p. 189-193, 1971.

WISCHMEIER, W.H; SMITH D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Agriculture handbook. Washington. D.C; US. Departamente of Agriculture.1978.

WISCHMEIER, W.H; SMITH D.D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transaction, American Geophysical Unin.**, Washington, v.39, n. 2 p. 285-291, 1958.

ZAIDAN, R.T; SILVA, J.X. Geoprocessamento ao zoneamento de áreas com necessidade de proteção: o caso do Parque Estadual do Ibitipoca-MG. *In*: ZAIDAN, R.T; SILVA, J.X. **Geoprocessamento & análise ambiental**. 6<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 2012, p. 31-66.

## APÊNDICE A - LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

#### CAPITULO I

Figura 1	– Estrutura Funcional dos Geossistemas .....	21
Figura 2	– Escala de vulnerabilidade das Unidades Territoriais Básicas .....	25
Figura 3	– Esquema ilustrativo de Rastejo.....	37
Figura 4	– Esquema ilustrativo de Corrida de Massa.....	38
Figura 5	– Esquema ilustrativo de Subsidência.....	38
Figura 6	– Esquema Ilustrativo dos Escorregamentos Rotacional e Translacional.....	40
Figura 7	– Esquema ilustrativo de Queda de Blocos.....	40
Figura 8	– Composição 321 (RGB) da Imagem Orbital OLI/Landsat-8.....	50
Figura 9	– Composição 432 (RGB) da Imagem Orbital MSI/sentinel-2.....	51
Figura10	– Fluxograma da metodologia.....	53
Figura 11	– ARP Phantom.....	55
Figura 12	– Bate estaca e procedimentos de campo.....	56
Figura 13	– Pontos de obtenção das amostras deformadas e indeformadas de solos.....	58

#### CAPITULO II

Figura 1	– Fluxograma da metodologia empregada .....	63
Figura 2	– Mapa de localização da área de estudo .....	65
Figura 3	– Mapa Geológico da área de estudo.....	66
Figura 4	– Mapa Geomorfológico da área de estudo.....	69
Figura 5	– Depressão e inselbergs no município de Tururu.....	70
Figura 6	– Relevo dissecado no município de Uruburetama.....	72
Figura 7	– Influência do clima nos elementos da paisagem.....	74

Figura 8 – Mapa de Tipos Climáticos da área de estudo.....	77
Figura 9 – Mapa de distribuição de solos da área de estudo.....	81
Figura 10 – Mapa de Cobertura e Uso do Terra.....	85
Figura 11 – Casas construídas em áreas de preservação permanente e sob risco geológico.....	89
Figura 12 – Recorte de talude para edificações na localidade de Santa Maria.....	90
Figura 13 – Exploração de arisco no município de Itapipoca.....	90
Figura 14 – Movimento de massa – (A) Queda de bloco em estrada em São Jerônimo/Itapipoca; (B) Escorregamento Rotacional em talude.....	91
Figura 15 – Cortes de taludes na CE 243. Que liga Itapajé a Uruburetama.....	91
Figura 16 – Plantio de banana em encosta, Santa Maria/Uruburetama.....	96
Figura 17 – Escorregamento Rotacional associado a bananicultura Itacolomy/Uruburetama.....	97
Figura 18 – Escorregamento Rotacional (A) associado a irrigação (B) Itacoatiara/Itapipoca .....	98
Figura 19 – Solo exposto em área de cultivo de caju no município de Itapipoca.....	100
Figura 20 – Cultivo de milho morro abaixo no município de Itapipoca.....	107
Figura 21 – Cultivo morro abaixo com ocorrência de voçoroca no município de Itapajé.....	107
Figura 22 – Cultivo de milho em área de preservação permanente no município de Itapajé.....	108

### CAPÍTULO III

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo .....	124
Figura 2 – Resumo das atividades desenvolvidas neste trabalho .....	125
Figura 3 – Recorte das imagens NDVI com polígonos de segmentação sobrepostos.....	135



Figura 4 – Manchas de cultivos, delimitadas em traço vermelho, em vertentes no Maciço de Uruburetama.....	136
Figura 5 – Mapa de cobertura e uso da terra gerado a partir da imagem NDVI/Landsat	139
Figura 6 – Mapa de cobertura e uso da terra gerado a partir da imagem NDVI/Sentinel	140
Figura 7 – Comparação entre áreas das unidades de cobertura e uso da terra gerado a partir da imagem NDVI/Landsat-8.....	142

#### **CAPITULO IV**

Figura 1 – Localização da vertente úmida da serra de Uruburetama, na região norte do estado do Ceará.....	151
Figura 2 – Hipsometria da vertente úmida da serra de Uruburetama, na região norte do estado do Ceará elaborado a partir do MDE ALOS PALSAR.....	152
Figura 3 – Fluxograma com as principais etapas seguidas para o desenvolvimento da pesquisa.....	153
Figura 4 – Declividade de vertente e processos morfogenéticos e pedogenéticos.....	156
Figura 5 – Mapa de declividade em percentuais na vertente úmida da serra de Uruburetama.....	157
Figura 6 – Curvaturas horizontal e vertical, e formas do terreno.....	159
Figura 7 – Mapa de curvatura vertical da vertente úmida da serra de Uruburetama.....	161
Figura 8 – Mapa de curvatura horizontal da vertente úmida da serra de Uruburetama.	162
Figura 9 – Mapa de orientação das vertentes da vertente úmida da serra de Uruburetama.....	163
Figura 10 – Mapa de vulnerabilidade natural a perda de solos da vertente úmida da serra de Uruburetama.....	165
Figura 11 – (A) Cultivos morro abaixo em Itapajé (B) Bananicultura em Uruburetama	166

#### **CAPITULO V**

Figura 1 – Localização do Maciço de Uruburetama.....	175
--	-----

Figura 2 – Litologias constituintes do Maciço de Uruburetama.....	176
Figura 3 – Fluxograma com as principais etapas seguidas para o desenvolvimento da pesquisa.....	177
Figura 4 – Lineamentos estruturais do Maciço de Uruburetama.....	181
Figura 5 – Feições do relevo do Maciço de Uruburetama.....	182
Figura 6 – Vertentes retilíneas e compridas.....	182
Figura 7 – (A) Vertente úmida no Maciço de Uruburetama.; (B) Vertente seca no município de Itapajé.....	183
Figura 8 – (A) Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico.; (B) Neossolo Litólico e blocos rochosos na vertente.....	184
Figura 9 – Blocos de rochas expostos a partir da erosão diferencial no município e Itapajé.....	185
Figura 10 – (A) Erosão acelerada em área de cultivo no município de Itapajé.; (B) Formação de voçoroca em área de cultivo no município de Itapajé.....	185
Figura 11 – Queda de blocos na estrada para Itacolomy, Uruburetama.....	186
Figura 12 – Escorregamento Rotacional. (A) localidade de Itacoatiara, Itapipoca.; (B) Localidade de Itacolomy, Uruburetama. ....	187
Figura 13 – Escorregamento Translacional. (A) Localidade de Itacolomy, Uruburetama.; (B) Localidade de Água Fria, Uruburetama.....	187
Figura 14 – Densidade de lineamentos estruturais do Maciço de Uruburetama.....	188
Figura 15 – Distribuição da frequência de <i>Trend</i> dos lineamentos extraídos na área em estudo.....	189

## CAPITULO VI

Figura 1 – Mapa de localização da vertente úmida do Maciço de Uruburetama.....	199
Figura 2 – Fluxograma da metodologia.....	200
Figura 3 – Variáveis morfométricas geradas para a área de estudo.....	205
Figura 4 – Nomograma para determinação da erodibilidade dos solos.....	208

Figura 5 – Distribuição dos pontos de coletas de amostras de solos .....	209
Figura 6 – Fluxograma para determinação da erodibilidade.....	210
Figura 7 – Distribuição das amostras com direções principal e secundária.....	214
Figura 8 – (A) variograma com direção 45° e (B) variograma com direção -45°.....	215
Figura 9 – Mapa de cobertura e uso da terra da vertente úmida do Maciço.....	220
Figura 10 – Mapa de vulnerabilidade natural à perda de solos da vertente úmida do Maciço de Uruburetama.....	222
Figura 11 – Erosividade no contexto regional e na área de estudo.....	224
Figura 12 – Distribuição das classes de erosividade no contexto regional e na área de estudo.....	224
Figura 13 – Distribuição de pontos de coletas e mapa de erodibilidade de solos.....	225
Figura 14 – Mapa de densidade de lineamentos da vertente úmida do Maciço.....	227
Figura 15 – Mapa de vulnerabilidade ambiental da vertente úmida do Maciço.....	229
Figura 16 – Perfis topográficos do Maciço de Uruburetama.....	230
Figura 17 – (A) encosta alterada pela bananicultura em Uruburetama/CE, (B) avanço do plantio em encosta no município Itapipoca (CE) .....	231
Figura 18 – Cultivo de milho associado ao feijão no município de Itapajé no Maciço de Uruburetama(CE) .....	232
Figura 19 – Bloqueio de estrada por queda de bloco na localidade de São Jerônimo no município de Itapipoca (CE) .....	232
Figura 20 – Escorregamentos associados a cortes de encostas em áreas de cultivo no município de Uruburetama .....	233
Figura 21 – Validação do mapa de vulnerabilidade ambiental a partir de inventário com registros de movimentos de massa e erosão acelerada.....	234

## LISTA DE GRÁFICOS

### CAPITULO II

Gráfico 1 – Participação dos setores da atividade econômica no Produto Interno Bruto dos municípios .....	93
Gráfico 2 – Produção e áreas destinadas a bananicultura na área de estudo nos anos 2007 e 2017 .....	95
Gráfico 3 – Evolução da colheita e das áreas destinadas a bananicultura em Uruburetama no período de 2007 a 2017.....	95
Gráfico 4 – Produção e áreas destinadas a cajulicultura na área de estudo nos anos de 2007 e 2017.....	98
Gráfico 5 – Evolução da colheita de castanha de caju e área destinada ao plantio em Trairi, Tururu e Uruburetama no período de 2007 e 2017.....	99
Gráfico 6 – Produção e áreas destinadas ao cultivo do mamão na área de estudo nos anos de 2007 e 2017.....	100
Gráfico 7 – Evolução da colheita de mamão e área destinada ao plantio em Itapajé, Pentecoste e Uruburetama no período de 2007 a 2017.....	101
Gráfico 8 – Produção e áreas destinadas ao cultivo de manga na área de estudo nos anos de 2007 e 2017.....	102
Gráfico 9 – Evolução da colheita de manga e área destinada ao plantio em Itapipoca, Tururu e Uruburetama no período de 2007 e 2017.....	103
Gráfico 10– Evolução da colheita de milho e área destinada ao plantio em Itapajé, Pentecoste e Uruburetama no período de 2007 a 2017.....	105
Gráfico 11– Evolução da colheita de milho e área destinada ao plantio em Itapajé e Itapipoca no período de 2007 e 2017.....	105
Gráfico 12– Evolução da colheita de milho e área destinada ao plantio em Umirim, Tururu e Uruburetama no período de 2007 e 2017.....	106
Gráfico 13– Evolução da colheita do feijão e área destinada ao plantio na área de estudo nos anos de 2007 e 2017.....	109

Gráfico 14– Evolução da colheita de feijão e área destinada ao plantio em Itapipoca e Trairi no período de 2007 a 2017.....	109
Gráfico 15– Evolução da colheita de feijão e área destinada ao plantio em Tejuçuoca, Umirim e Uruburetama no período de 2007 a 2017.....	110
Gráfico 16– Evolução da colheita de mandioca e área destinada ao plantio na área de estudo nos anos de 2007 e 2017.....	110
Gráfico 17– Evolução da colheita de mandioca e área destinada ao plantio em Itapajé e Uruburetama no período de 2007 a 2017.....	111
Gráfico 18– Evolução da colheita de mandioca e área destinada ao plantio em Tururu e Tejuçuoca no período de 2007 a 2017.....	112
Gráfico 19– Evolução da colheita de cana-de-açúcar e área destinada ao plantio na área de estudo nos anos de 2007 e 2017.....	112
Gráfico 20– Evolução da colheita de cana-de-açúcar e área destinada ao plantio em Itapipoca e Trairi no período de 2007 a 2017.....	113
Gráfico 21– Evolução da colheita e das áreas destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar em Uruburetama no período de 2007 a 2017.....	113

## **CAPITULO VI**

Gráfico 1 – Distribuição dos registros de ocorrências de movimento de massa e erosão acelerada por classe de vulnerabilidade ambiental em percentual.....	235
---	-----

## LISTA DE TABELAS

### CAPITULO I

Tabela 1 – Avaliação de estabilidade das categorias morfodinâmicas .....	24
Tabela 2 – Características dos instrumentos imageadores OLI e TIRS do Landsat-8 ....	51
Tabela 3 – Parâmetros do sensor MSI do satélite Sentinel-2.....	52
Tabela 4 – Datas das atividades de campo realizadas.....	55
Tabela 5 – Localização dos pontos de coletas das amostras de solo.....	57

### CAPITULO II

Tabela 1 – Proporção de abrangência e percentual dos municípios na área de pesquisa .....	64
Tabela 2 – Distribuição das classes litológicas em percentuais.....	68
Tabela 3 – Unidades Geoambientais com abrangência de áreas em percentuais.....	73
Tabela 4 – Subdomínios do Clima Tropical de Zona Equatorial .....	76
Tabela 5 – Abrangência das classes de solos em percentual.....	80
Tabela 6 – Distribuição das classes de cobertura e uso da terra.....	86
Tabela 7 – População estimada dos municípios que compõem a área de estudo.....	88
Tabela 8 – População urbana e rural dos municípios que compõem a área de estudo...	89
Tabela 9 – Produção agrícola de culturas permanentes nos municípios que compõem a vertente úmida do Maciço de Uruburetama nos anos de 2007 e 2017.....	94
Tabela 10 – Área plantada de culturas permanentes nos municípios que compõem a vertente úmida do Maciço de Uruburetama nos anos de 2007 e 2017.....	94
Tabela 11 – Produção agrícola de culturas temporárias nos municípios que compõem a vertente úmida do Maciço de Uruburetama nos anos de 2007 e 2017.....	104
Tabela 12 – Área plantada de culturas temporárias nos municípios que compõem a vertente úmida do Maciço de Uruburetama nos anos de 2007 e 2017.....	104



### CAPITULO III

Tabela 1 – Parâmetros dos sensores OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2.....	126
Tabela 2 – Parâmetros utilizados no processamento das imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2.....	130
Tabela 3 – Classes e desempenho do Índice Kappa.....	131
Tabela 4 – Valores do coeficiente de correlação de Pearson (r) .....	133
Tabela 5 – Valores de correlação entre os produtos de NDVI dos sensores estudados...	134
Tabela 6 – Número de polígonos gerados na segmentação para cada NDVI e suas respectivas áreas médias.....	135
Tabela 7 – Matriz de erros de classificação da imagem NDVI/Landsat-8.....	137
Tabela 8 – Matriz de erros de classificação da imagem NDVI/Sentinel-2.....	138
Tabela 9 – Comparação das áreas das unidades de cobertura e uso da terra.....	141

### CAPITULO IV

Tabela 1 – Proporção de abrangência dos municípios na área de estudo .....	150
Tabela 2 – Avaliação a estabilidade das categorias morfodinâmicas .....	153
Tabela 3 – Pesos e notas atribuídas às classes temáticas.....	155
Tabela 4 – Classes de declividade.....	158
Tabela 5 – Classes de declividade e área de abrangência em percentuais.....	158
Tabela 6 – Classes de curvatura horizontal e área de abrangência em percentuais.....	160
Tabela 7 – Classes de curvatura vertical e área de abrangência em percentuais.....	160
Tabela 8 – Intervalos das classes de vulnerabilidade e abrangência em percentuais.....	164

### CAPITULO V

Tabela 1 – Valor do pixel no ponto pré-determinado nas quatro imagens com geometrias solares diferentes e na imagem fusão resultante da média das imagens.....	179
--	-----

Tabela 2 – Parâmetros de entrada (input) utilizados através do algoritmo LINE .....	179
---	-----

## CAPÍTULO VI

Tabela 1 – Classes e desempenho do Índice Kappa.....	203
Tabela 2 – Pesos e notas atribuídos às e classes temáticas.....	206
Tabela 3 – Distribuição dos postos da FUNCEME por município e Erosividade obtida.....	207
Tabela 4 – Taxas de erosividade das classes médias anuais.....	207
Tabela 5 – Classes e categorias de estrutura do solo.....	211
Tabela 6 – Classificação dos valores de permeabilidade do solo.....	213
Tabela 7 – Classificação de erodibilidade.....	213
Tabela 8 – parâmetros utilizados para construção do variograma.....	214
Tabela 9 – Parâmetros utilizados na Krigagem ordinária.....	216
Tabela 10 – Parâmetros de entrada utilizados no algoritmo LINE.....	217
Tabela 11 – Variáveis utilizadas na análise multicritério.....	218
Tabela 12 – Distribuição das classes de cobertura e uso da terra em percentual.....	219
Tabela 13 – Intervalos das classes de vulnerabilidade natural.....	221
Tabela 14 – Intervalos das classes de vulnerabilidade ambiental.....	230
Tabela 15 – Registros de ocorrências de movimentos de massa e erosão acelerada por classe de vulnerabilidade ambiental.....	235

**LISTA DE QUADROS****CAPITULO I**

Quadro 1 – Categorias de vulnerabilidade.....	23
Quadro 2 – Classificação dos movimentos de massa.....	36

**CAPITULO II**

Quadro 1 – Gerenciamento de riscos de desastres nos municípios do Maciço de Uruburetama.....	92
Quadro 2 – Registros de ocorrências de escorregamentos nos municípios da área de estudo.....	92
Quadro 3 – Ocorrências de legislação sobre o solo rural.....	115
Quadro 4 – Ocorrência de processos erosivos acelerados nos municípios da área de estudo.....	115

**CAPITULO V**

Quadro 1 – Classificação dos movimento de massa.....	178
--	-----

**APÊNDICE B – TABELA COM FATOR K E CLASSES DE  
ERODIBILIDADE DAS AMOSTRAS DE SOLOS COLETADAS EM  
CAMPO**

<b>Amostras</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Fator K</b>	<b>Classes de erodibilidade</b>
1	451908	9590907	0.0064036	Muito Baixa
2	451312	9585371	0.011712731	Baixa
3	441515	9585964	0.020845701	Moderada
4	436319	9593733	0.012596003	Baixa
5	436205	9593812	0.017587503	Baixa
6	439664	9596940	0.018533386	Baixa
7	437065	9613514	0.017222156	Baixa
8	432476	9605616	0.012683588	Baixa
9	442368	9609525	0.012800914	Baixa
10	447603	9599466	0.012188295	Baixa
11	454774	9582314	0.016614113	Baixa
12	451887	9581616	0.043091941	Alta
13	449830	9581320	0.026158598	Moderada
14	446707	9579706	0.032416231	Moderada
15	447023	9582277	0.012831432	Baixa
16	440039	9584093	0.022750719	Moderada
17	427559	9580323	0.018747151	Baixa
18	430927	9580633	0.029153503	Moderada
19	426362	9584683	0.021354979	Moderada
20	444796	9582111	0.012950877	Baixa
21	440731	9577686	0.019514642	Baixa
22	440496	9583237	0.0104818	Baixa
23	437178	9585590	0.010883769	Baixa
24	433621	9586423	0.011607419	Baixa
25	430402	9589064	0.014636243	Baixa
26	434515	9583856	0.012874733	Baixa
27	427990	9593247	0.012829137	Baixa
28	427468	9590539	0.011617154	Baixa
29	433437	9594194	0.019799389	Baixa
30	430709	9595442	0.018374868	Baixa
31	430794	9598209	0.020538762	Moderada
32	425736	9603969	0.021026959	Moderada
33	427636	9605637	0.020162244	Moderada
34	429161	9617635	0.002048683	Muito Baixa
35	426694	9614932	0.01717927	Baixa
36	434012	9616014	0.027868163	Moderada
37	429942	9611704	0.001216857	Muito Baixa
38	428303	9612746	0.002775098	Muito Baixa
39	424949	9613017	0.010679753	Baixa

40	455965	9594511	0.019366004	Baixa
41	454245	9598198	0.022770256	Moderada
42	453131	9600676	0.015747178	Baixa
43	456228	9600526	0.016413835	Baixa
44	451847	9601771	0.023079696	Moderada
45	455447	9602666	0.021873709	Moderada
46	452680	9607009	0.027773874	Moderada
47	456098	9607914	0.006572875	Muito Baixa
48	454545	9611865	0.013419352	Baixa
49	453555	9610197	0.007119144	Muito Baixa
50	455683	9613075	0.005222453	Muito Baixa
51	437550	9619065	0.002318053	Muito Baixa
52	439168	9616435	0.008304704	Muito Baixa
53	441925	9619034	0.02437661	Moderada
54	445313	9618603	0.000657335	Muito Baixa
55	443572	9615053	0.014500181	Baixa
56	445909	9611682	0.013130901	Baixa
57	449323	9614294	0.024804307	Moderada
58	452895	9617013	0.004881889	Muito Baixa
59	455600	9618635	0.005905735	Muito Baixa
60	452154	9618951	0.007340599	Muito Baixa
61	452392	9616534	0.008801174	Muito Baixa
62	444963	9609496	0.014298396	Baixa
63	456058	9586794	0.034051512	Moderada
64	452501	9578770	0.016613448	Baixa
65	447858	9592150	0.007741807	Muito Baixa
66	452067	9592044	0.014353946	Baixa
67	448668	9595695	0.030193438	Moderada
68	445694	9594386	0.01234929	Baixa
69	447095	9585837	0.014889704	Baixa
70	443989	9589497	0.021502234	Moderada
71	434579	9590663	0.012480041	Baixa
72	435698	9581128	0.013551634	Baixa
73	435782	9578457	0.007922447	Muito Baixa
74	439042	9590770	0.015768583	Baixa
75	442010	9593690	0.007187742	Muito Baixa
76	436085	9597106	0.010704575	Baixa
77	427590	9598585	0.00831208	Muito Baixa
78	434818	9609515	0.012725934	Baixa
79	438032	9607626	0.013588495	Baixa
80	437746	9605006	0.004110289	Muito Baixa
81	432047	9609171	0.007773932	Muito Baixa
82	429337	9602300	0.014024111	Baixa
83	432276	9599095	0.005857585	Muito Baixa
84	438640	9601290	0.007040462	Muito Baixa

85	433907	9602336	0.019250715	Baixa
86	448230	9603425	0.015358318	Baixa
87	447662	9607120	0.023879304	Moderada
88	451697	9611295	0.008608734	Muito Baixa
89	443461	9605642	0.013756878	Baixa
90	442714	9603108	0.014141442	Baixa
91	442573	9599612	0.017433982	Baixa
92	435905	9599909	0.015714336	Baixa

Fonte: dados da pesquisa.