

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Lucas Krein Rademann

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MECANISMOS
EROSIVOS ATUANTES NA VOÇOROCA DO AREAL NO MUNICÍPIO
DE CACEQUI/RS COM AUXÍLIO DE VEÍCULO AÉREO NÃO
TRIPULADO**

Santa Maria, RS
2019

Lucas Krein Rademann

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MECANISMOS EROSIVOS
ATUANTES NA VOÇOROCA DO AREAL NO MUNICÍPIO DE CACEQUI/RS COM
AUXÍLIO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO), área de concentração Análise Ambiental e Dinâmica Espacial, na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Geografia.**

Orientador: Prof. Dr. Romario Trentin

Santa Maria, RS

2019

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001

Rademann, Lucas Krein
IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MECANISMOS
EROSIVOS ATUANTES NA VOÇOROÇA DO AREAL NO MUNICÍPIO DE
CACEQUI/RS COM AUXÍLIO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO /
Lucas Krein Rademann.- 2019.
158 p.; 30 cm

Orientador: Romário Trentin
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2019

1. Erosão por voçorocamento 2. Movimentos de massa 3.
Structure from Motion 4. Mapeamento em nível de detalhe
I. Trentin, Romário II. Título.

Lucas Krein Rademann

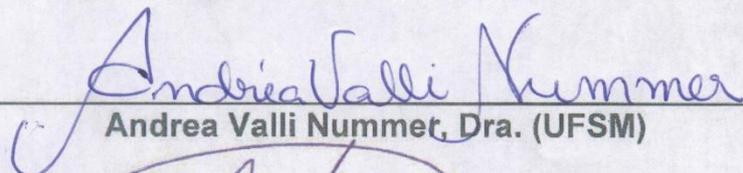
**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MECANISMOS EROSIVOS
ATUANTES NA VOÇOROCA DO AREAL NO MUNICÍPIO DE CACEQUI - RS
COM AUXÍLIO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO), área de concentração Análise Ambiental e Dinâmica Espacial, na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Geografia**.

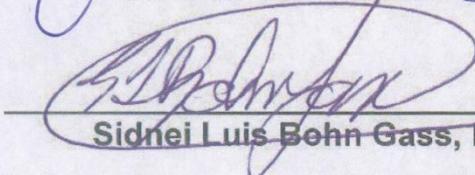
Aprovado em 12 de dezembro de 2019:



Romario Trentin, Dr.
(Presidente/Orientador)



Andrea Valli Nummer, Dra. (UFSM)



Sidnei Luis Bohn Gass, Dr. (Unipampa)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e que me conduziu pelos Seus caminhos, esta longa jornada até aqui.

A minha família por sempre me apoiar e estar presente nos momentos mais difíceis. Por incentivar os meus estudos e dar suporte em todas as minhas decisões.

A Universidade Federal de Santa Maria e ao PPGGEO por oferecer um ambiente público para a formação do conhecimento com professores qualificados e dedicados ao ensino da geografia.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fornecimento de bolsa de estudos permitindo dedicação exclusiva para a elaboração deste trabalho.

Ao professor e orientador Romario Trentin que sempre esteve disposto para ajudar quando foi solicitado, pelo seu companheirismo e dedicação, que nunca mediu esforços para transmitir o seu conhecimento.

Aos professores do LAGEOLAM/UFSM Luis Eduardo de Souza Robaina, Edgardo Ramos de Medeiros e Andrea Valli Nummer pela amizade de companheirismo. Agradeço aos seus conselhos e ensinamentos que contribuíram com a minha formação acadêmica e com a elaboração desta dissertação.

Ao professor Fabio Marcelo Breuning pelo auxílio no processamento dos dados. Aos laboratoristas Rômulo e Ronaldo que deram todo o apoio necessário para a elaboração dos ensaios de laboratório.

Aos amigos e colegas Daniéli Flores Dias, Eloisa Penna, Ricardo Vieira da Silva, Vinicius Silveira e aos demais integrantes do LAGEOLAM pelos auxílios prestados e sobretudo pela amizade.

Aos amigos que tive a oportunidade de conhecer durante o período de estudos que foram importantes para o convívio longe da família, formando grandes amizades importantes para a minha formação intelectual e para minha vida pessoal. Um grande abraço especial aos meus amigos Alan Mello, Cassio Wollman, Iago Turba, Nathan Mello, Patrícia Ziani, Richard Kohler Marczewski, Vagner Apollo Duarte e Wellerson Pessotto que nossa amizade continue sempre firme.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

“Sucesso é nunca ter pressa, mas sempre andar em alta velocidade. Não seja impaciente. O sucesso é um processo, e não algo imediato. Você não pode ter pressa para que as coisas aconteçam rápido, mas, isso não te impede de procurar, sempre que possível, apertar o passo.”

Thiago Nigro

RESUMO

IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MECANISMOS EROSIVOS ATUANTES NA VOÇOROCA DO AREAL NO MUNICÍPIO DE CACEQUI/RS COM AUXÍLIO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

AUTOR: Lucas Krein Rademann

ORIENTADOR: Romario Trentin

A temática da erosão tem sido amplamente estudada nas últimas décadas, tendo em vista o seu grande potencial de degradação do solo e da paisagem. Dentre as formas de erosão, a voçoroca é a com maior poder destrutivo, tornando importante o seu estudo e compreensão. Recentemente o surgimento de novas tecnologias, como os VANTs, tornou possível o mapeamento de detalhe de alta qualidade e com baixo custo, possibilitando uma análise mais completa do fenômeno. No município de Cacequi, são comumente encontradas áreas com processos de voçorocamento acelerado, dentre eles a Voçoroca do Areal, objeto de estudo desta dissertação. Frente aos aspectos da problemática da erosão e a necessidade de integrar a ciência geográfica às novas geotecnologias, o trabalho tem como objetivo principal analisar a distribuição e a atuação dos mecanismos de erosão na Voçoroca do Areal no município de Cacequi com o auxílio de VANT. Para isso foi realizado levantamento aéreo utilizando VANT e posteriormente processado utilizando a tecnologia Structure from Motion (SfM), gerando dados de altíssima resolução que permitem a análise morfométrica da voçoroca. A Voçoroca do Areal foi subdividida em quatro setores, que demonstraram possuir mecanismos de erosão distintos atuantes e em variadas intensidades. Os movimentos de massa, associados à erosão subsuperficial se mostraram o principal agente de desenvolvimento da voçoroca, atuando no avanço a montante e no avanço lateral da voçoroca. De modo geral, o trabalho realizado demonstra a complexidade da atuação dos mecanismos erosivos em uma voçoroca de grande extensão. A metodologia inovadora utilizada para estudo da erosão abre espaço para novos estudos de nível de detalhe em processos erosivos acelerados.

Palavras-chave: Erosão por voçorocamento. Movimentos de massa. Structure from Motion. Mapeamento em nível de detalhe.

ABSTRACT

IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF THE EROSION MECHANISMS ACTING IN THE AREAL GULLY IN THE CACEQUI MUNICIPALITY WITH UNMANNED AERIAL VEHICLE

AUTHOR: Lucas Krein Rademann

ADVISER: Romario Trentin

The issue of erosion has been widely studied in recent decades, given its great potential for soil and landscape degradation. Among the erosion forms, the gully is the one with the greatest destructive power, making its study and understanding important. Recently the emergence of new technologies such as UAVs has made it possible to make high-quality, detailed low-cost maps, enabling a more complete analysis of the phenomenon. In the municipality of Cacequi, areas with accelerated gulling processes are commonly found, including the Voçoroca do Areal, the object of study of this dissertation. Facing the erosion problematic aspects and the necessity of integrating the geographic science to the new geotechnologies, the main objective of this work is to analyze the distribution and the action of the erosion mechanisms in the Voçoroca do Areal in the municipality of Cacequi with the aid of UAV. For this, aerial survey was performed using UAV and later processed using the Structure from Motion (SfM) technology, generating very high-resolution data that allow the gully morphometric analysis. The Voçoroca do Areal was subdivided into four sectors, which demonstrated to have distinct erosion mechanisms acting and of varying intensities. The mass movements, associated with subsurface erosion provide the main gully development agent, acting on upstream and sidewall gully advancement. In general, the work demonstrates the complexity of the action of erosive mechanisms in a large gully. The innovative methodology used for erosion study open space for further studies of level of detail in accelerated erosion processes.

Keywords: Gully erosion. Mass movements. Structure from Motion. Detailed mapping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da Voçoroca do Areal.	28
Figura 2 - Classificação das formas das voçorocas.	38
Figura 3 - Classificação das voçorocas quanto sua relação com a rede de drenagem.	40
Figura 4 - Ocorrência de feições erosivas na Voçoroca do Areal (A - pedestais, ou <i>demoiselles</i> ; B – Alcovas de Regressão; C – Marmita; D – Duto ou <i>piping</i>).	44
Figura 5 - Ocorrência de feições erosivas na Voçoroca do Areal (A – Trincas ou fendas; B – Quedas de areia; C – Poça de ressurgência; D – Movimentos de massa).	46
Figura 6 - Comparação de VANT com sistemas aéreos e satélites.	50
Figura 7 - Representação esquemática das diferentes fontes de erro na geração automática de MDTs.	55
Figura 8 - Fluxograma geral da metodologia executada.	58
Figura 9 - Histograma de frequência da hipsometria da Bacia Hidrográfica Areal do Limeira.	60
Figura 10 - Histograma de frequência da declividade da Bacia Hidrográfica Areal do Limeira.	61
Figura 11 - Representação gráfica dos elementos geomorphons.	62
Figura 12 - Exemplificação do ensaio de Limite de Liquidez (A – Demonstração do sulco de 1cm realizado com cinzel; B – Ponto de encontro das duas porções da amostra quando é contado o número de golpes.).....	64
Figura 13 - Exemplificação do ensaio de Limite de Plasticidade (A - Realização de modelagem da amostra seguindo o corpo de prova, de 3mm de diâmetro; B - Ponto de fraturamento da amostra).	65
Figura 14 - Exemplificação do ensaio de Limite de Contração (A – Amostras preparadas para secar; B – Raspagem da amostra seca, tirando o excesso de mercúrio; C – Mercúrio excedente correspondente ao volume da amostra.).....	66
Figura 15 - Exemplo de VANT multirotor modelo Phantom 4 produzido pela DJI.	67
Figura 16 - Localização central da câmera e sobreposição de imagens no voo.	68
Figura 17 - Visualização de um GCP no <i>software</i> PhotoScan.	69
Figura 18 - Adensamento da nuvem de pontos através do algoritmo CMVS (A – Representação de porção da voçoroca com nuvem de pontos esparsa; B – Representação da mesma porção da voçoroca com nuvem de pontos adensada).	71
Figura 19 - Fluxograma de operações do algoritmo Structure from Motion.	73
Figura 20 - Classificação climática do estado do Rio Grande do Sul.	79
Figura 21 - Média de chuva nas estações meteorológicas estudadas entre os anos de 1960 a 1990.	80
Figura 22 - Mapa hipsométrico da Bacia Hidrográfica Areal do Limeira.....	81
Figura 23 - Declividade da Bacia Hidrográfica Areal do Limeira.	83
Figura 24 - Mapa dos elementos <i>geomorphons</i> da Bacia Hidrográfica do Areal do Limeira.	85
Figura 25 - Relação dos elementos geomorphons com a ocorrência de voçorocas.	87
Figura 26 - Ocorrência de rocha da Formação Pirambóia na Voçoroca do Areal.	88
Figura 27 - Ortomosaico da Voçoroca do Areal em Cacequi – RS.	91

Figura 28 - Comparação das curvas granulométricas dos diferentes horizontes da Voçoroca do Areal.	95
Figura 29 - Mapa hipsométrico da Voçoroca do Areal.	100
Figura 30 - Mapa de declividade da Voçoroca do Areal.	103
Figura 31 - Mapa de localização das áreas de avanço erosivo na Voçoroca do Areal em Cacequi - RS.	106
Figura 32 - Mapa dos parâmetros morfométricos das áreas de avanço da Voçoroca do Areal.	108
Figura 33 - Correlação da ocorrência de movimentos de massa com a largura (m) das áreas de avanço da Voçoroca do Areal.	110
Figura 34 - Correlação do volume erodido (m ³) com a ocorrência de movimentos de massa nas áreas de avanço da Voçoroca do Areal.	111
Figura 35 - Correlação das áreas de rebaixamento com a profundidade (m) das áreas de avanço da Voçoroca do Areal.	112
Figura 36 - Mapa dos setores da Voçoroca do Areal no município de Cacequi - RS.	114
Figura 37 - Mapa dos mecanismos erosivos atuantes no setor A da Voçoroca do Areal.	115
Figura 38 - Representação esquemática de rebaixamento no setor A da Voçoroca do Areal.	116
Figura 39 - Representação de <i>piping</i> como um processo geomorfológico complexo resultante de erosão hidráulica e movimentos de massa.	117
Figura 40 - Representação esquemática de ocorrência de erosão linear no setor A da Voçoroca do Areal.	118
Figura 41 - Representação esquemática de porção resistente à erosão no setor A da Voçoroca do Areal.	119
Figura 42 - Ocorrência de movimento de massa na porção resistente do setor A da Voçoroca do Areal.	120
Figura 43 - Representação esquemática de área de rebaixamento seguida de movimento de massa no setor A da Voçoroca do Areal.	121
Figura 44 - Mapa dos mecanismos erosivos atuantes no setor B da Voçoroca do Areal.	122
Figura 45 - Representação esquemática de linha resistente à erosão no setor B da Voçoroca do Areal.	123
Figura 46 - Representação esquemática de área de desenvolvimento vertical do setor B da Voçoroca do Areal.	124
Figura 47 - Representação esquemática de área resistente à erosão no setor B da Voçoroca do Areal.	125
Figura 48 - Representação esquemática de área de ocorrência de intensos movimentos de massa no setor B da Voçoroca do Areal.	126
Figura 49 - Ocorrência de movimento de massa no setor B da Voçoroca do Areal.	127
Figura 50 - Mapa dos mecanismos erosivos atuantes no setor C da Voçoroca do Areal.	128
Figura 51 - Representação esquemática da ocorrência de rebaixamento no setor C da Voçoroca do Areal.	129
Figura 52 - Representação gráfica da ocorrência de ramificações paralelas associadas às áreas de rebaixamento e formação de trincas no setor C da Voçoroca do Areal.	130

Figura 53 - Representação gráfica de área de rebaixamento no setor C da Voçoroca do Areal.	131
Figura 54 - Perfil da encosta em porção do setor C da Voçoroca do Areal (A – Área de contato de porção de roca mais arenosa com porção mais argilosa; B – Aspecto mosqueado de lâmina de rocha argilosa alterada; C – Porção arenosa da encosta com perda de coloração).	132
Figura 55 - Mapa dos mecanismos erosivos atuantes no setor D da Voçoroca do Areal.	134
Figura 56 - Representação esquemática da ocorrência de movimento de massa no setor D da Voçoroca do Areal.	135
Figura 57 - Representação esquemática de pequenos movimentos de massa e trincas associadas no setor D da Voçoroca do Areal.	136
Figura 58 - Representação esquemática de área plana no setor D da Voçoroca do Areal.	137
Figura 59 - Alternância de lentes de rocha com diferentes características na Voçoroca do Areal.	139
Figura 60 - Ocorrência de interferências de árvores e sombra na Voçoroca do Areal.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo e profundidade para a coleta de material de granulometria fina. .63	
Tabela 2 - Distribuição dos elementos geomorphons na Bacia Hidrográfica Areal do Limeira.84	84
Tabela 3 - Limites de Atterberg dos horizontes do solo da Voçoroca do Areal.97	97
Tabela 4 - Erros encontrados nas coordenadas planialtimétricas.99	99
Tabela 6 - Distribuição das classes de declividade na área de estudo e na Voçoroca do Areal.104	104
Tabela 7 - Morfometria das áreas de avanço da Voçoroca do Areal..... 107	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ASF	Alaska Satellite Facility
BHAL	Bacia Hidrográfica do rio Areal do Limeira
CMVS	Clustering View for Multi-view Stereo
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
GCP	Ground Control Points
ha	Hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Ic	Índice de Circularidade
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LC	Limite de Contração
LIDAR	Light Detection and Ranging
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
MNT	Modelo Numérico do Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Norma Técnica
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
REM	Radiação Eletromagnética
SE	Sudeste
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIN	Triangular Irregular Networks
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1	EROSÃO E FATORES CONDICIONANTES	31
2.1.1	Fatores condicionantes à erosão	34
2.2	EROSÃO POR VOÇOROCAMENTO: MECANISMOS E FEIÇÕES	36
2.2.1	Mecanismos de erosão em voçorocas	41
2.2.2	Feições erosivas das voçorocas	42
2.3	GEOPROCESSAMENTO E GEOTECNOLOGIAS APLICADAS A ANÁLISE AMBIENTAL	47
2.4	USO DE DADOS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA O MAPEAMENTO DE EROSÃO	52
3	METODOLOGIA	57
3.1	LEVANTAMENTO E PRODUÇÃO DE DADOS	59
3.1.1	Elaboração da Caracterização da área de estudo	59
3.1.2	Ensaio de laboratório	62
3.1.3	Levantamento planialtimétrico com uso de VANT	66
3.2	PROCESSAMENTO DOS DADOS E PRODUÇÃO DE MAPAS	69
4	RESULTADOS	77
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	77
4.1.1	Aspectos gerais do município de Cacequi e da Bacia hidrográfica do rio Areal do Limeira	77
4.1.2	Características gerais da Voçoroca do Areal e seu entorno	89
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO: GRANULOMETRIA, TEXTURA E LIMITES DE ATTERBERG	93
4.2.1	Granulometria e textura do solo	93
4.2.2	Limites de Atterberg	96
4.3	MORFOMETRIA DA VOÇOROCA DO AREAL	98
4.3.1	Hipsometria	98
4.3.2	Declividade	102
4.3.3	Morfometria das áreas de avanço erosivo	105
4.4	MECANISMOS DE EROSÃO NOS DIFERENTES SETORES DA VOÇOROCA DO AREAL	112
4.4.1	Setor A – Cabeceira de drenagem	115
4.4.2	Setor B – Desenvolvimento vertical	122
4.4.3	Setor C – Desenvolvimento lateral e <i>piping</i>	127
4.4.4	Setor D – Estabilização da drenagem	133

4.4.5 Discussão geral dos mecanismos erosivos	138
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	143
REFERÊNCIAS	145

1 INTRODUÇÃO

Os estudos dos processos erosivos têm se tornado mais frequente nos dias de hoje devido a sua importância, pois acarretam na perda de solo de forma acelerada, contribuem na diminuição da sua fertilidade e no assoreamento dos rios (ROBAINA e TRENTIN, 2004). Apesar da ocorrência de erosão ser um processo natural da dinâmica do relevo, a ação antrópica pode influenciar de maneira a acelerar os processos erosivos ou mitiga-los, o que torna importante o estudo e compreensão destes processos para a melhor intervenção em áreas afetadas.

Voçoroca é, entre as formas de erosão, a de maior poder destrutivo, indicando o avançado estágio de degradação dos solos, e um desequilíbrio do sistema hídrico e geomorfológico (ALBUQUERQUE, 2007; MATHIAS, CUNHA e CARVALHO, 2010). A formação de voçorocas acarreta na perda de solo, depositando sobre solos férteis de baixada, na colmatagem de canais de drenagem sendo necessária a realização de dragagem, bem como a drenagem da umidade dos solos circundantes ao processo, diminuindo a safra (BIGARELLA, 2003).

Devido ao grande impacto ambiental causado pelo processo de voçorocamento, este tem sido alvo de diversos estudos, como apontado na revisão bibliográfica realizada por Castillo e Gómez (2015). Os autores afirmam que houve um aumento considerável de publicações sobre o assunto principalmente após a década de 1990. Para os autores, a relevância deste processo como um dos principais propulsores da degradação do solo em escala global não pode ser subestimada à luz do número de países severamente afetados e da magnitude das taxas de erosão do solo, resultando em um significativo aumento de pesquisas sobre o tema.

Bergonse e Reis (2011) destacam que a ocorrência de voçorocas, mesmo que incipientes, e a sua conseqüente perda de solo é economicamente relevante se recorrentes em terras cultivadas justificando assim a atenção dada às voçorocas efêmeras, desencadeadas pelo escoamento superficial, em oposição aos relativamente poucos estudos sobre voçorocas maiores, frequentemente localizadas em áreas atualmente florestadas ou marginal em termos agrícolas. Assim, os autores chamam a atenção para a necessidade de estudos, do ponto de vista geomorfológico, de voçorocas complexas de grande porte, considerando a voçoroca como um produto da mudança de combinações de processos ao longo do tempo.

Desta forma, é possível afirmar que a erosão é um processo de busca de equilíbrio entre as forças de dinâmica superficial e subsuperficial, onde o processo só será estabilizado quando as forças predominantes tornarem-se equilibradas. Assim, cada um dos fatores condicionantes da erosão pode causar o desequilíbrio do ambiente e desencadear o início da erosão. Portanto, é importante entender qual o fator principal ou qual a associação de fatores está condicionando este desequilíbrio para realmente entender a ação erosiva.

Associado à ocorrência dos processos erosivos e aos problemas ambientais dele decorrentes, houve um aumento da demanda de estudos que auxiliam na compreensão desses problemas. Para tanto, a análise ambiental tem recebido auxílio de novas tecnologias, melhorando a qualidade e a disponibilidade de dados. Dentre as novas tecnologias, o geoprocessamento se destaca como uma importante ferramenta para os estudos ambientais e a compreensão dos processos atuantes no meio ambiente, se tornando produto para a tomada de decisões e a mitigação de impactos ambientais.

Uma das principais tecnologias que revolucionaram a aquisição de dados por sensoriamento remoto são os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), ou drones. Essa tecnologia permite que sejam obtidas informações espectrais e de altimetria de alta resolução espacial e temporal com alta precisão e tendo um baixo custo (COLOMINA e MOLINA, 2014; STÖCKER et al. 2015; VERDONK, 2015; GONG et al., 2019). Garret e Anderson (2018) destacam a contribuição dos drones para a evolução dos mapeamentos, salientando que antes dos drones, os pesquisadores eram relegados a provedores de dados externos, aceitando a temporalidade e resolução espacial destes provedores, e hoje os pesquisadores estão no controle da qualidade, resolução e temporalidade da aquisição dos dados. O drone mudou a forma e o método de pesquisa onde os pesquisadores são os provedores de dados.

De encontro a Garret e Anderson, Westoby et al. (2012) destacam que nas últimas décadas o avanço da revolução tecnológica na geomática têm transformado o modelamento de MDEs e a análise geomorfológica. Salientam que a aquisição de dados topográficos tem sido transformada principalmente pela nova geração de tecnologias de sensoriamento remoto, revolucionando a qualidade dos MDEs nos quesitos de recobrimento espacial, resolução e acurácia.

Os VANTs possuem um grande potencial para a análise geomorfológica, permitindo a obtenção de dados de alta qualidade e precisão das feições do terreno.

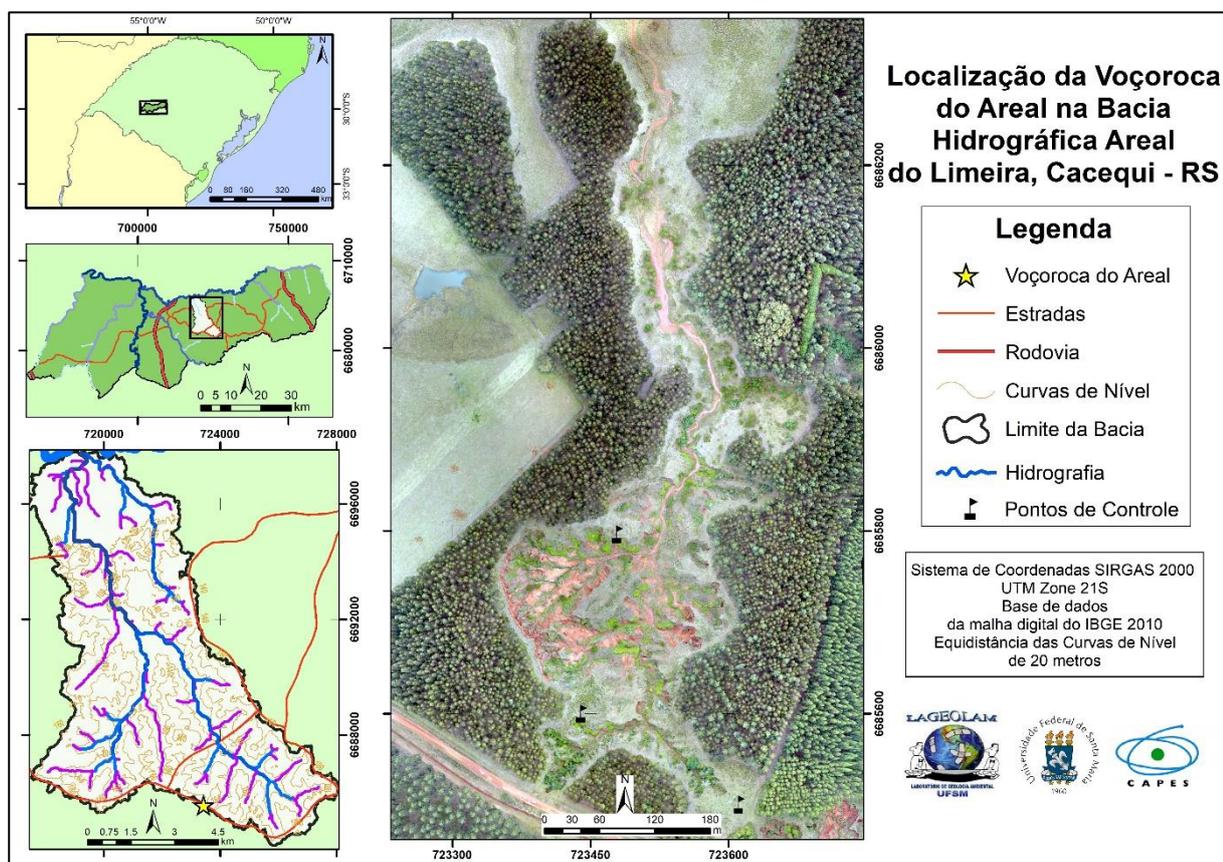
Na análise de erosão, e sobretudo de voçorocas, esta tecnologia tem sido amplamente utilizada para a parametrização das voçorocas e a extração de dados de avanço das cabeceiras e da perda de solo (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012; STÖCKER et al., 2015; VERDONK, 2015; LIU et al., 2016; GUTIÉRREZ et al., 2018; HOSSEINALIZADEH et al., 2019). Porém devido à grande quantidade de informações que podem ser obtidas através do uso de VANT ainda há diversos campos para explorar, como no reconhecimento de feições internas das voçorocas, que identificam os processos atuantes.

Ainda, Garret e Anderson (2018) ressaltam que os Drones (VANTs), abrigam um potencial geográfico profundo que merece um compromisso crítico sério, sendo necessário ampliar a discussão em tecnologias de drones como método geográfico. Desta forma, a utilização desta nova tecnologia para a análise da erosão é de extrema importância, considerando os impactos causados por uma feição erosiva de grande porte. Surge então na ciência geográfica a necessidade da apropriação das novas tecnologias para melhor compreensão dos processos atuantes na superfície, podendo se tornar uma importante ferramenta para a análise ambiental.

O município de Cacequi possui áreas com grande suscetibilidade a erosão e por este motivo apresenta muitas voçorocas em seu território. Este problema do município foi alvo de diversos estudos, dentre eles os de Robaina e Trentin (2004), que chama a atenção à degradação ambiental do Oeste do Rio Grande do Sul, o trabalho de Cabral (2004) que buscou descrever às voçorocas da porção Leste do município de Cacequi, o trabalho de Cabral et al. (2009), no qual levanta a hipótese de neotectônica na reativação das voçorocas do município, e o de Robaina et al. (2002) que buscou caracterizar o processo erosivo na Voçoroca do Macaco Branco, no município de Cacequi. Nesse contexto, a Voçoroca do Areal é uma das voçorocas mais ativas e em desenvolvimento vertical e lateral, é de grande extensão e com grandes perdas de solo, tipificando um dos maiores problemas ambientais de Cacequi. Diante destes fatos foi escolhida como área de estudo para esta dissertação.

A Voçoroca do Areal está localizada no município de Cacequi (Figura 1) associada a unidade geomorfológica da Depressão Periférica Sul-rio-grandense (CARRARO, 1974) que é constituída de litologias arenosas da sequência sedimentar da Bacia do Paraná, que formam solos bastante arenosos e pouco coesos, sendo assim suscetível ao processo de erosão.

Figura 1 - Mapa de localização da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

As novas tecnologias de mapeamento e obtenção de dados de sensoriamento remoto com uso de VANT facilitam a pesquisa em nível de detalhe, permitindo uma melhor compreensão do processo de voçorocamento. Desta forma torna possível associar qualidade e precisão aos trabalhos já realizados na área de estudo. Frente a esses aspectos do município de Cacequi, sobretudo da Voçoroca do Areal, a problemática da erosão e a necessidade de integrar a ciência geográfica às novas geotecnologias, essa dissertação tem como objetivo principal analisar a distribuição e a atuação dos mecanismos de erosão na Voçoroca do Areal no município de Cacequi, com o auxílio de VANT. Para tanto, possui como objetivos específicos:

- Analisar o contexto geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Rio Areal do Limeira, na qual está inserida a Voçoroca do Areal;
- Caracterizar os principais aspectos físicos do solo e da rocha da Voçoroca do Areal;

- Analisar os parâmetros morfométricos e os principais mecanismos responsáveis pelo avanço de algumas áreas da Voçoroca do Areal;
- Elaborar um mapa síntese dos principais mecanismos de atuação da erosão nos diferentes setores da Voçoroca do Areal.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o levantamento bibliográfico e os principais fundamentos teóricos que serviram de base conceitual para nortear a pesquisa. O capítulo está estruturado em quatro diferentes tópicos: Erosão e fatores condicionantes, erosão por voçorocamento: Mecanismos e feições, geoprocessamento e geotecnologias aplicadas a análise ambiental e uso de dados de alta resolução para o mapeamento de erosão.

2.1 EROSÃO E FATORES CONDICIONANTES

A evolução de uma vertente é consequência da ação dos processos deposicionais e denudacionais, dos quais compreendem duas fases, a de produção de detritos e a sua remoção. Os materiais alterados que se encontram na superfície do terreno, formando solo ou as formações superficiais, estão sujeitos à ação dos agentes do intemperismo. Esses materiais constituem a estrutura das vertentes, onde ocorrem em estado de equilíbrio metaestável (BIGARELLA et al., 2003). A evolução da forma da vertente se dá de diversas formas, estando relacionada com o material da encosta e os processos que atuam no desequilíbrio da vertente.

Um dos principais modeladores das vertentes são os movimentos de massa, que se constituem no deslocamento, em massa, de material constituído de solo e/ou rocha vertente abaixo sob a influência da gravidade, sendo desencadeado sob a interferência direta de agentes independentes, como água, gelo e ar (BIGARELLA et al. 2003; MACIEL FILHO e NUMMER, 2011). Os movimentos de massa são processos que atuam sobre um grande volume de material e, em muitos casos, ocorrem com grande velocidade.

A erosão é outro processo modelador da vertente, como destaca o IBGE (2009, p.106) em seu manual técnico de geomorfologia:

[...] o fenômeno da erosão constitui o conjunto de agentes dinâmicos através do qual atuam de maneira combinada todos os processos de degradação da superfície terrestre, incluindo intemperismo, transporte, ações mecânica e química da água corrente e de outros agentes erosivos, responsáveis pela destruição das saliências ou reentrâncias do relevo, sendo por isso mesmo um importante agente modelador da superfície terrestre.

Porém, a erosão se difere dos movimentos de massa, de acordo com Maciel Filho e Nummer (2011), por serem processos que ocorrem em pequenas partículas, grão a grão. Apesar de ser um processo mais lento, a erosão tem grande capacidade de remoção de material e degradação ambiental, possuindo três principais formas, os sulcos, que são, de acordo com Suertegaray et al. (2008), pequenas fissuras do solo causadas pelo escoamento superficial, ravinas, que são canais pouco profundos, causados pela concentração de fluxo d'água e as voçorocas que são grandes incisões erosivas causadas pelo escoamento superficial, ação subsuperficial da água e avançando em muitos dos casos através de movimentos de massa, sendo a forma mais destrutiva de erosão.

Diante deste problema, os estudos sobre processos erosivos têm recebido destaque nas últimas décadas, pois geram impacto econômico para atividade agrícola, causando perda de solo e de fertilidade, bem como, produzem alterações significativas na paisagem. Assim, Boardman (1999) afirma que a degradação dos solos pode ser considerada como um dos mais importantes problemas ambientais dos nossos dias e que atualmente a erosão acelerada dos solos, tanto pela água como pelo vento, é responsável por cerca de 84% da degradação dos solos no mundo.

Maciel Filho e Nummer (2011) destacam que a erosão tem como efeito imediato a perda de camadas de solo fértil, acarretando menores produções agrícolas e consequente desvalorização. É importante ressaltar que o material infértil desagregado a montante, transportado e depositado pela erosão nas áreas de baixada pode diminuir a fertilidade do solo nestas áreas (BIGARELLA, 2003; BERTONI e LOMBARDI NETO). Ainda é importante destacar que os processos erosivos mais acelerados causam significativos impactos visuais na paisagem à qual se associam, modificando as condições de relevo e fertilidade.

Pela degradação do solo e da grande incidência de erosão, a perda de solo é significativa, desta maneira Bertoni e Lombardi Neto (2012) observam:

[...] o Brasil perde, por erosão laminar, cerca de quinhentos milhões de toneladas de terra anualmente, [...] correspondendo ao desgaste uniforme de uma camada de 15 cm de espessura numa área de cerca de 280.000 hectares de terra. [...] esse prejuízo lento e continuado, que a erosão do solo tem ocasionado à nossa economia vem-se patenteando já de maneira inofismável na fisionomia depauperada de algumas de nossas regiões.

A erosão é um problema ambiental de grande relevância, pois acarreta diretamente na produtividade do solo. Apesar de ser um processo natural, associado a diversos fatores ambientais como tipo de solo, mudanças abruptas de textura no solo, material rochoso, relevo, erosividade da chuva, entre outros fatores, a erosão pode ser acentuada por uma ocupação antrópica indevida, aumentando a perda de solo e a degradação ambiental.

A ação antrópica pode influenciar de maneira a acelerar os processos erosivos ou mitigá-los, portanto se torna importante o estudo e análise dos processos erosivos e da intervenção antrópica. Nesse sentido Casseti (1995) observa que a partir do momento em que a vertente começa a ser ocupada pelo homem, processo iniciado com a retirada da cobertura vegetal, as relações processuais morfodinâmicas se alteram, os solos sofrem o efeito pluvioerosivo, com o aumento do fluxo superficial e a consequente redução da infiltração.

Quanto ao conceito de erosão, Guerra (1993) define como o trabalho mecânico de destruição exercido pelas águas correntes, carregadas de sedimentos, destruindo as saliências ou reentrâncias do relevo, tendendo a um nivelamento ou colmatagem. Já de acordo com Bigarella (2003) a erosão pode ser compreendida como o desgaste da superfície do terreno com a retirada e o transporte dos grãos minerais. Desta forma, implica na relação de fragmentação mecânica das rochas ou na decomposição química das mesmas, bem como a remoção superficial ou subsuperficial dos produtos do intemperismo.

A erosão pode ser dividida em erosão laminar (*sheetflow*) e erosão linear (*flowline*). A laminar é definida como a erosão de fluxo difuso, em um primeiro estágio do processo erosivo. Ocorre quando o solo já está saturado e começa a haver um escoamento difuso da água, podendo transportar algumas partículas de solo, mas sem força de cisalhamento. O fluxo linear é caracterizado por uma concentração do fluxo da água em pequenos canais na encosta, tomando como caminho as porções que oferecem menor resistência ao escoamento. Esse fluxo concentrado aumenta a velocidade e a energia e conseqüentemente vai aprofundando o canal, podendo evoluir para sulcos, ravinas e até voçorocas (GUERRA et al., 2005).

2.1.1 Fatores condicionantes à erosão

A erosão é um fenômeno natural, que ocorre com maior ou menor intensidade no espaço de acordo com alguns fatores que influenciam no processo de desagregação, transporte e deposição de material. Os principais fatores que influenciam na erosão podem ser considerados o clima, sobretudo o regime pluviométrico, o solo, a litologia, o relevo, a cobertura vegetal e as ações antrópicas.

Ireland et al. (1939) destacam que o clima é de grande importância para os processos erosivos pois não só influencia no tipo de agricultura que é praticado no local, como determina a variação térmica e pluviométrica durante as estações. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2012) a erosividade da chuva é um dos fatores climáticos de maior importância para a erosão, sendo a sua intensidade o fator pluviométrico mais relevante.

A chuva é o principal fornecedor de água na encosta, desta forma é o que desencadeia e inicia o processo erosivo. O primeiro impacto da gota no solo conhecido como *splash*, ou salpicamento, acaba despreendendo as partículas do solo no local de impacto, transportando as partículas despreendidas e imprimindo energia em forma de turbulência à água superficial (BIGARELLA et al. 2003; GUERRA, 2005; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012). Ainda, de acordo com Guerra (2005) as chuvas muito intensas quando excedem a capacidade de infiltração do solo possuem uma energia cinética maior e conseqüentemente uma erosividade maior, concentrando o fluxo de escoamento, aumentando a velocidade de fluxo, a capacidade de transporte de materiais e a capacidade de cisalhamento.

O substrato litológico é um importante fator ambiental relacionado à erosão, pois pode apresentar descontinuidades e pontos de fraqueza, no qual há escoamento preferencial da água, além de fornecer o material para a formação do solo, interferindo, segundo Branco (2014), na sua estrutura, mineralogia e textura. Casseti (1995) destaca que a natureza da rocha, além de responder pelo comportamento da formação do solo, intervém ainda no perfil da vertente, no seu declive médio e na velocidade de seu recuo ou evolução, e ainda, fornece material para formação do solo. Ao encontro disso Drumond (2006) salienta que os fatores geológicos que atuam como condicionantes do processo de voçorocamento estão vinculados às litologias e às estruturas geológicas planares (foliações, fraturas e falhas).

Pruski (2009) salienta que o comportamento do solo em relação à erosão conhecido como erodibilidade, constitui uma propriedade que depende da capacidade de infiltração e de armazenamento da água e das forças de resistência do solo à ação da chuva e do escoamento superficial. Para Rahmati et al. (2017) a textura do solo é comumente identificada como um mecanismo significativo no escoamento superficial, na infiltração e, conseqüentemente, no processo de voçorocamento. Nesse sentido Pruski (2009) chama a atenção quanto a textura do solo:

Solos ricos em silte e areia e com pouco material cimentante (matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio) são muito propensos ao processo erosivo, em razão da pequena resistência que oferecem ao desprendimento de partículas durante a precipitação.

Morgan (2005) destaca que muitas tentativas foram feitas para elaborar um índice simples de erodibilidade baseado nas propriedades do solo determinadas em laboratório ou em campo, ou baseado nas respostas à ação da chuva e do vento. Bastos (1999) destaca o ensaio de canal hidráulico de Inderbitzen, pela potencial capacidade de previsão da erodibilidade e simples aplicação para a obtenção do fator erodibilidade. A obtenção deste fator auxilia na compreensão dos processos erosivos e na comparação de amostras distintas.

Outro fator importante que influi na erosão são as condições do relevo, principalmente topográficas que dizem respeito a declividade, forma e comprimento das vertentes. Dessa forma Pruski (2009) e Bertoni e Lombardi Neto (2012) explicam que a declividade da vertente aumenta a velocidade e força cisalhante do escoamento superficial e que quanto maior o comprimento da vertente, mais água se acumula no escoamento e maior energia resultante.

Galeti (1984) buscou sintetizar a influência do relevo em três principais pontos, que são: a) a erosão é menor nos terrenos mais planos e cresce a medida que aumenta o declive; b) a erosão é maior em vertentes mais compridas e quanto mais longa a vertente maior a erosão; c) a regularidade da vertente influi, sobretudo na velocidade da água, sendo que em uma vertente regular, há um aumento constante e progressivo na velocidade de enxurrada, e conseqüentemente, maior erosão.

Frente a esses fatores que contribuem para a erosão, a cobertura vegetal é a defesa natural de um terreno contra a erosão (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012). A vegetação protege o solo contra o impacto das gotas de chuva, diminuindo o papel do *splash*, bem como algumas gotas são interceptadas pela vegetação evaporando

antes de chegarem no solo. A água que chega ao solo tem a sua infiltração facilitada pela vegetação e a sua serapilheira, bem como a velocidade de fluxo diminuída pelo aumento da rugosidade hidráulica. Ainda, com o tempo a vegetação fornece matéria orgânica para o solo, melhorando a sua estrutura e aumentando assim a sua capacidade de retenção de água (GALETI, 1984; BIGARELLA et al. 2003; PRUSKI, 2009; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

A proteção da vegetação para com a erosão do solo se dá de maneira distinta nos diferentes tipos de cobertura vegetal. Bertoni e Lombardi Neto (2012) evidenciam que a mata é a que possui menor perda de solo para a erosão e que os cultivos agrícolas, mesmo com grandes diferenças na taxa de erosão em toneladas por hectares entre os diferentes cultivos, é a cobertura vegetal que oferece menor proteção ao solo.

Assim como salienta Vieira (2008) os processos erosivos ocorrem de forma natural com variações no espaço e no tempo, dependendo de diversos fatores fisiográficos. A ação antrópica pode modificar os fatores atuantes na erosão, tanto em áreas urbanas quanto em áreas rurais. A intervenção antrópica pode, de diversas maneiras, tanto desencadear e acelerar os processos erosivos quanto desenvolver maneiras de minimizar a erosão, e principalmente evitar a erosão em sua forma mais destrutiva, a voçoroca.

2.2 EROSÃO POR VOÇOROCAMENTO: MECANISMOS E FEIÇÕES

Dentre as formas de erosão a voçoroca é a de maior impacto e destruição. Seu nome, voçoroca, tem origem na língua Tupi-guarani, *ibiçoroca*, *yby* = terra + *coroca* = romper; literalmente terra rompida (OLIVEIRA e MEIS, 1985). Outro termo comumente usado para este mesmo processo é “boçoroca”, porém é mais difundido o vocábulo “voçoroca”, portanto será este utilizado no trabalho.

A voçoroca é uma forma espetacular de erosão, com deslocamentos de grandes massas de solo e formando grandes cavidades em extensão e profundidade (BERTONI e LOMABARDI NETO, 2012). Bigarella (2003) define a voçoroca como um ravinamento acelerado constituindo um canal de drenagem de paredes abruptas com comprimento de centenas de metros e profundidades, podendo atingir o lençol freático. Semelhante aos autores já citados, Guerra (1993) considera voçoroca como

uma escavação ou rasgão do solo ou de rocha decomposta, ocasionado pela erosão do lençol de escoamento superficial.

O processo de voçorocamento é desencadeado por diversos mecanismos, tanto com o escoamento superficial quanto subsuperficial, se tornando um objeto de estudo complexo. Desta forma, além do processo de formação da voçoroca, o seu avanço se dá de forma dinâmica, como destaca Vanmaercke et al. (2016) que uma vez formada uma voçoroca, vários processos conduzem à expansão do canal como o desenvolvimento de trincas de tensão, *piping*, salpicamento e diversos tipos de movimentos de massa. Estes processos, contribuem em vários graus para o recuo da cabeceira da voçoroca. Neste mesmo sentido Trentin (2007) salienta que na voçoroca atuam além da erosão superficial, diversos fenômenos como a erosão subterrânea, solapamentos, desabamentos e escorregamentos que se conjugam aumentando o poder destrutivo desta forma de erosão.

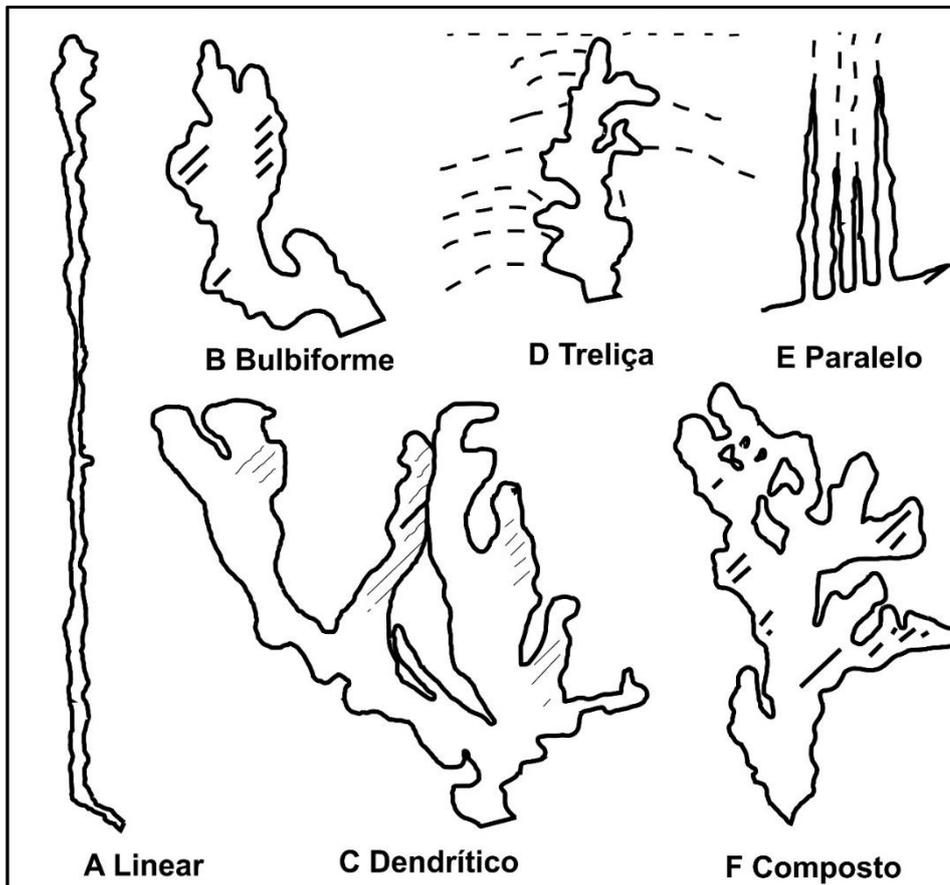
Mesmo com o consenso da comunidade acadêmica quanto ao processo de voçorocamento ser um processo erosivo avançado decorrente do agravamento da erosão já existente no local, há uma grande divergência literária quanto ao limiar que distingue ravinas de voçorocas. Alguns autores diferenciam de acordo com a profundidade da incisão, como a *Soil Science Society of America* (2008) e Guerra (1998) que definem voçoroca como incisões erosivas com mais de 50 cm de profundidade; Bergsma et al. (1996) consideram voçoroca como as incisões erosivas com profundidades superiores a 30cm; e ainda Vieira (1998) usando o limite a partir de 1,5 m; Outra forma de diferenciação de ravinas e voçorocas, e qual será utilizada neste trabalho, é com base na sua gênese, em que a voçoroca é considerada quando há uma contribuição subsuperficial ou do lençol freático na erosão (BIGARELLA, 2003; IERELAND et al., 1939; CANIL et al., 1995).

As voçorocas podem ser distinguidas e classificadas de diversas maneiras, as classificações mais utilizadas na literatura são referentes a sua forma, sua condição em relação a drenagem e ao seu tamanho (AUGINTIN e ARANHA, 2006; VIEIRA, 2008; CHEROBIN, 2012; MAGALHÃES et al. 2012; MARCHIORO et al. 2016).

Uma das classificações mais utilizadas é a proposta por Ireland et al. (1939) de acordo com a forma das voçorocas e representadas na Figura 2. De acordo com o autor as formas das voçorocas estão relacionadas às condições físicas e ao uso do solo na área de voçorocamento. Desta forma, a forma das voçorocas é controlada em

grande parte pela distribuição dos terraços, dos pontos de ruptura, da drenagem de estradas e outros canais que carregam água para a área de ocorrência de erosão.

Figura 2 - Classificação das formas das voçorocas.



Fonte: Adaptado de Ireland et al. (1939).

O mesmo autor explica que as voçorocas lineares (A) possuem poucos tributários e são estabelecidas em antigos ou atuais canais de drenagem e tendem a alargar próximo a cabeceira podendo evoluir para um padrão bulbiforme, dendrítico ou ainda composto. Quanto ao padrão bulbiforme (B) o autor salienta que possuem formas semicirculares ou de anfiteatro nas porções superiores e pode ter feição linear mais a jusante. Podem se estabelecer em antigos canais de drenagem, tendo a porção superior mais profunda e com contribuição de ravinas nas bordas.

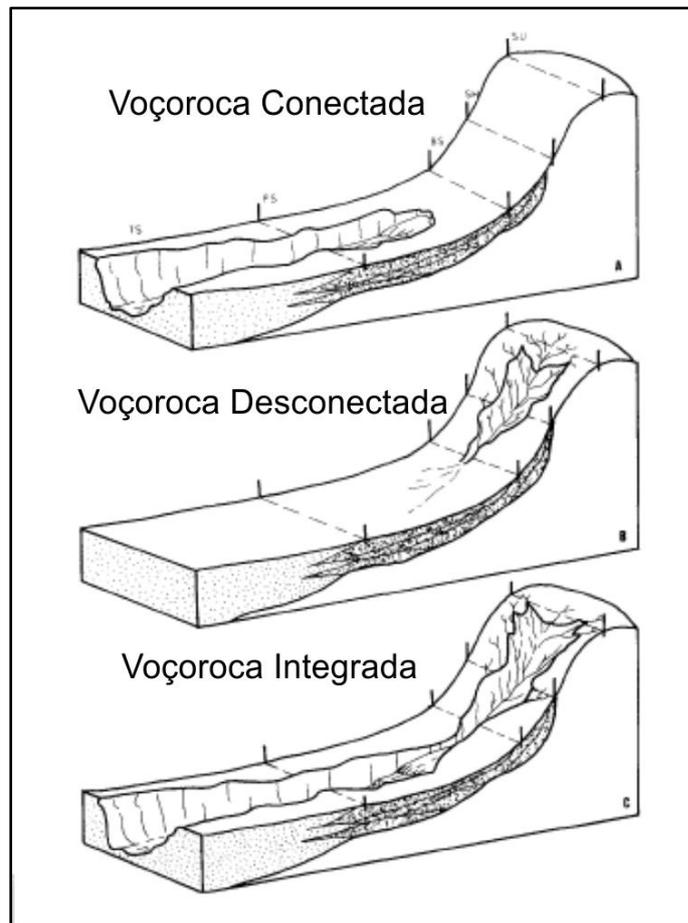
As voçorocas com formas dendríticas (C) são compostas por diversas ramificações, com a cabeceira em forma semicircular ou de anfiteatro, geralmente se desenvolvem em áreas de drenagem natural que receberem concentração de fluxo

por existência de terraços ou ainda drenagem de estradas. As de forma treliça (D) possui ravinas ou ramificações tributárias que chegam ao canal principal com um ângulo de aproximadamente 90° , se desenvolvem em áreas planas ou eventualmente declivosas, onde sistemas de terraços drenam para um terraço central, concentrando o fluxo de água.

O padrão paralelo (E) é composto por duas ou mais ravinas paralelas que se encontram na voçoroca central. É mais comumente encontrada em voçorocas próximas a estradas, que lançam água na encosta de forma paralela, mas também é possível ocorrer este padrão por controle estrutural. O desenvolvimento das ravinas na cabeceira da voçoroca pode unir os canais paralelos e modificar o padrão de forma da voçoroca. E por fim, a forma composta (F) que combina duas ou mais das formas anteriores, geralmente corresponde a voçorocas mais desenvolvidas.

A situação quanto a rede de drenagem e a porção da encosta que uma voçoroca se encontra pode interferir nos processos que atuam e a forma de evolução da feição erosiva. Desta forma Oliveira (1989) apresenta uma proposta de classificação das voçorocas quanto a sua relação com a rede de drenagem podendo ser classificada de três maneiras distintas (Figura 3). As conectadas são caracterizadas pela erosão subsuperficial com a contribuição das águas subterrâneas e a formação de um canal de primeira ordem, geralmente ocorrem na porção da base da encosta. As desconectadas são relacionadas ao escoamento superficial e aos movimentos de massa (VIEIRA, 2008), e não são considerados canais de primeira ordem. Por último as integradas que são uma junção das formas conectadas e desconectadas formando uma só incisão erosiva.

Figura 3 - Classificação das voçorocas quanto sua relação com a rede de drenagem.



Fonte: Adaptado de Oliveira (1989).

Outra forma bastante usual para classificar as voçorocas são quanto ao seu tamanho, levando em consideração diversos fatores, como comprimento, largura, profundidade, área de abrangência e área erodida (FREVERT et al. 1963; HOUGHTON e CHARMAN; 1986; BERGSMA et al. 1996; VIEIRA e ALBUQUERQUE, 2004). Uma das classificações de magnitude das voçorocas mais utilizadas foi desenvolvida por Vieira e Albuquerque (2004) ao analisar o fenômeno de voçorocamento em uma porção do estado do Amazonas próximo a Manaus onde distinguem as feições em muito pequenas (perda de material até 999m^3), pequena (perda de material até cerca de 9.999m^3), média (entre 10.000 e 19.999m^3) e as grandes incisões (perda de material entre 20.000 e 40.000m^3) e muito grande (perda de mais de 40.000m^3).

2.2.1 Mecanismos de erosão em voçorocas

Devido à complexidade do processo de voçorocamento (VANMAERCKE et al., 2016) são diversos os mecanismos que atuam para a formação e desenvolvimento de uma voçoroca (STARKEL, 2011), estando bastante relacionado à ação e condição dos fatores erosivos. Oliveira (2005) destaca os principais mecanismos que atuam no processo de voçorocamento, que são: o transporte de partículas de solo por fluxos concentrados, erosão por quedas d'água, solapamento da base de taludes, liquefação de materiais do solo, movimentos de massa e arraste de partículas por fluxos concentrados em túneis ou dutos.

O transporte de partículas de solo pelo fluxo concentrado ocorre através da convergência do escoamento superficial em microdepressões do terreno, formando sulcos e ravinas, podendo evoluir para voçorocas. A desagregação e o transporte das partículas ocorrem quando a energia do fluxo concentrado é maior do que a energia gravitacional, favorecendo a erosão (OLIVEIRA, 2005). Este mecanismo está associado à erosão superficial, resultando em feições lineares da voçoroca.

De acordo com Oliveira (2005) a erosão por quedas d'água se origina a partir da água do escoamento superficial que desemboca no interior das feições erosivas. Esse mecanismo ocorre em áreas onde há uma maior resistência a erosão e formam pequenos degraus, ocasionando a queda em cascata do fluxo de água e conseqüentemente a turbulência retira o material da zona de impacto e escava uma depressão na base da borda.

Em consequência da formação de depressões na base do canal devido a queda d'água ou pelo transporte de partículas pelo escoamento concentrado pode ocorrer o solapamento das bases do talude, formando alcovas de regressão (vide Figura 5 da seção 2.2.2) e podendo acarretar em movimentos de massa localizados (OLIVEIRA, 2005). O solapamento das bases do talude é um dos mecanismos de erosão de grande importância para o avanço da cabeceira da voçoroca aumentando o potencial erosivo da feição (BRYAN e POESEN, 1988; DONG et al. 2019).

Relacionado a coesão e textura do solo, o mecanismo de liquefação do solo ocorre quando os materiais inconsolidados são submetidos a fracas tensões cisalhantes. Isto ocorre devido a saturação do material, que pode estar relacionado à períodos de chuva intensos, bem como a alterações do lençol freático (OLIVEIRA, 2005).

O mecanismo de movimentos de massa é um dos mais estudados no avanço de voçorocas e a instabilização dos taludes internos da voçoroca (BRAYAN e POESEN, 1988; DRUMOND e BACELLAR, 2006; DRUMOND, 2006; STARKEL, 2011; LOPES PINTO, 2018; DONG et al. 2019). Oliveira (2005) salienta que são vários os tipos de movimentos de massa que podem ocorrer em uma voçoroca. Esses movimentos de massa ocorrem por diversos fatores, dentre eles a falta de coesão do material, diminuição da força cisalhante, mudança constante de umidade do pacote de alteração do solo, solapamento da base do talude e ainda erosão subsuperficial.

Outro mecanismo bastante comum em voçorocas é o arraste de partículas pela formação de tuneis ou dutos sob o efeito de água do escoamento superficial e subsuperficial que penetra em furos biogênicos ou fendas de diversas origens (OLIVEIRA, 2005). Esta forma de erosão subsuperficial ocorre com o transporte (ou dissolução) de material formando dutos internos na vertente, causando instabilidade estando associado a movimentos de massa (JAKIEL e POESEN, 2018).

O mecanismo de formação de dutos é complexo e abrange uma variedade de processos relacionados, tais como erosão por infiltração, erosão interna, solapamentos, movimentos de massa e recuo do talude (JAKIEL e POESEN, 2018). Desta forma Oliveira (2005) destaca que a erosão em dutos é um excelente exemplo de interação entre os diferentes mecanismos fundamentais que podem gerar feições erosivas.

2.2.2 Feições erosivas das voçorocas

As feições erosivas indicam os principais mecanismos que atuam na voçoroca dando ideia da maneira como os processos ocorrem no local e como será a evolução da feição erosiva. Oliveira (2005) ressalta que a identificação destas feições assume importância no cadastramento das voçorocas tornando mais preciso o dimensionamento de eventuais medidas corretivas a serem implantadas. As principais feições erosivas encontradas são:

Pedestais (*demoiselles*) que segundo Oliveira (2005) indicam a ocorrência de salpicamento intercalado com remoção das partículas pelo escoamento superficial. Em geral essas feições são esculpidas abaixo de partículas que não foram transportadas, devido a sua densidade ou tamanho de partícula (Figura 4A). Através

da análise da altura destas feições é possível estimar a quantidade de material erodido pela erosão difusa.

Figura 4 - Ocorrência de feições erosivas na Voçoroca do Areal (A - pedestais, ou *demoiselles*; B – Alcovas de Regressão; C – Marmita; D – Duto ou *piping*).



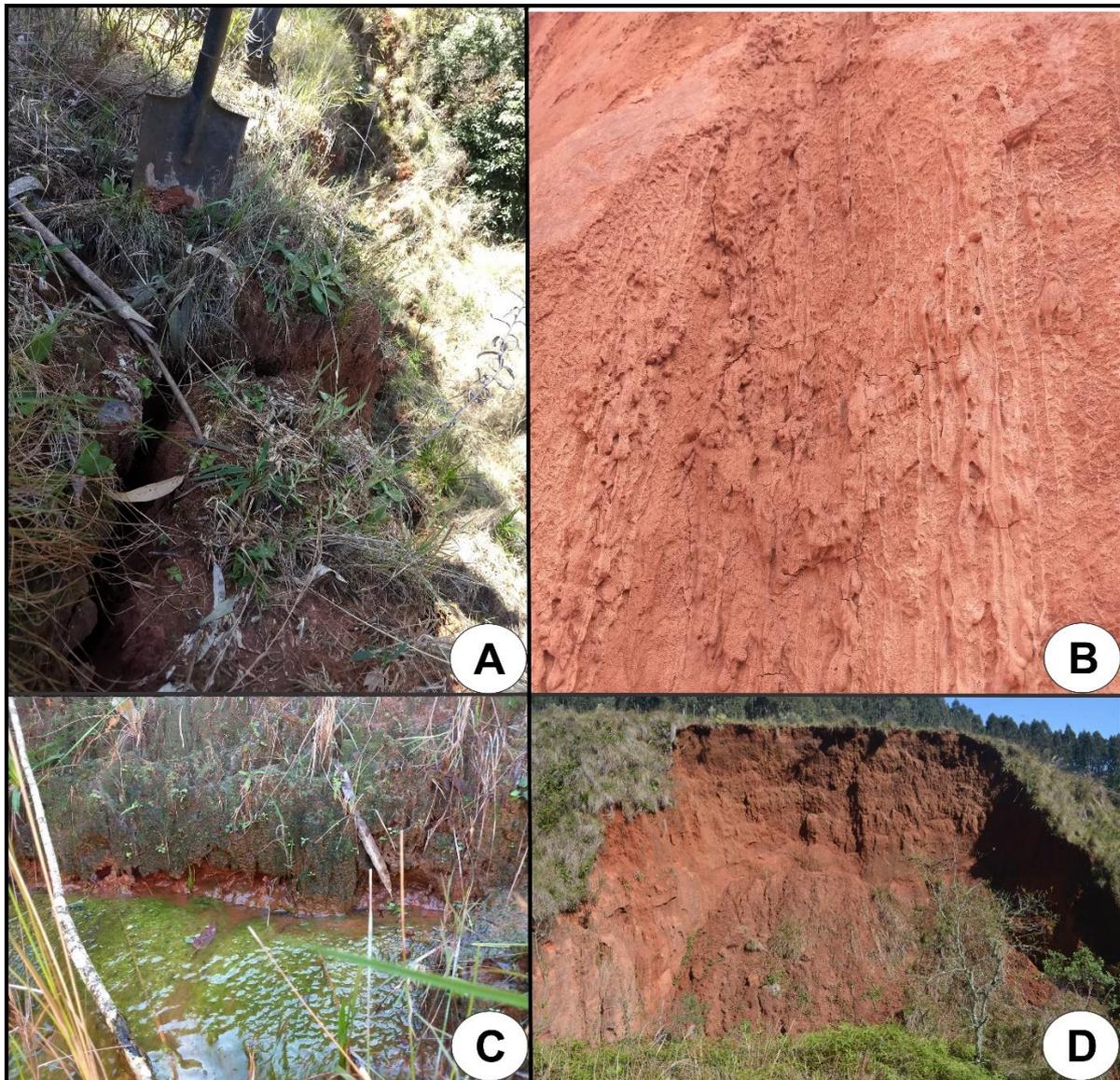
Alcovas de Regressão são descritas por Paisani e Oliveira (2001) como um entalhe mais ou menos profundo, geralmente na parede do talude, com aspecto de uma alcova, tendo o teto abobadado e o assoalho repleto de materiais inconsolidados que se desprendem da parte de cima do terreno (Figura 4B). De acordo com Oliveira (2005) podem ser esculpidas tanto pelo escoamento superficial quanto pela exfiltração do lençol freático, ou ainda pela combinação desses dois mecanismos. Para Vieira (2008) a expansão dessas feições resulta em desmoronamento das camadas superiores por perda de sustentação, sendo importantes na identificação dos materiais e mecanismos envolvidos na expansão das voçorocas.

Marmitas ou panelas (*plunging pool*) são buracos na base ou em degraus da encosta que são geralmente dissimétricos (Figura 4C). Estas formas segundo Oliveira (2005) indicam a atuação de erosão por quedas-d'água, e, também, de acordo com Guerra e Guerra (2007) pelo turbilhonamento da água.

Dutos ou *pipes* são tubos que se formam em subsuperfície em decorrência da ação das águas subterrâneas (Figura 4D). Para Bigarella et al. (2003) essas feições contribuem para a formação de depressões que causam colapso do solo na superfície. Ainda destaca que ação desse fluxo subterrâneo é um fator decisivo para a rápida evolução das voçorocas, bem como para o desenvolvimento de suas grandes proporções. Ao encontro disso Augustin e Aranha (2006), ao estudarem o fenômeno em Gouvêa no estado de Minas Gerais, concluíram que os dutos estão associados tanto ao processo de recuo das cabeceiras, quanto ao de alargamento das paredes, e ampliação do número de ramificações.

Fendas ou trincas (Figura 5A) indicam de acordo com Oliveira (2005) movimentos generalizados em torno da incisão erosiva. Podem ser formados por movimentos translacionais profundos ou pela tração nas bordas da incisão. Estas feições são importantes indicadores de movimentos de massa ocorrendo no entorno das voçorocas.

Figura 5 - Ocorrência de feições erosivas na Voçoroca do Areal (A – Trincas ou fendas; B – Quedas de areia; C – Poça de ressurgência; D – Movimentos de massa).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Quedas de areia são a concentração de material arenoso composto por areias finas, que são depositados no talude ou na base da voçoroca (Figura 5B). Segundo Oliveira (2005) resultam da liquefação espontânea de materiais inconsolidados e não coesivos.

Possas de ressurgência, para Oliveira (2005) indicam áreas de ressurgência do lençol freático ao longo das incisões erosivas (Figura 5C). É o principal indicativo de que a incisão atingiu o lençol freático e, portanto, é fundamental a sua identificação para o dimensionamento da incisão erosiva.

Além das feições já citadas ocorrem também diversos movimentos de massa nas voçorocas, sendo um dos principais mecanismos associados a alargamento das feições (Figura 5D). Os mais comuns são as quedas de torrões, relacionados ao solapamento de camadas menos resistentes na encosta da incisão.

Estas diversas feições que podem ser encontradas em áreas de ocorrência de processos erosivos acelerados ajudam a compreender os mecanismos atuantes no local. Estes mecanismos dão ideia de magnitude e potencial destrutivo do processo erosivo, tornando mais fácil a delimitação de medidas mitigadoras.

2.3 GEOPROCESSAMENTO E GEOTECNOLOGIAS APLICADAS A ANÁLISE AMBIENTAL

Os estudos ambientais têm se tornado cada dia mais importantes na ciência geográfica, pois a ação humana tem gerado diferentes impactos ambientais que precisam ser estudados para um planejamento ambiental e uso dos recursos naturais de forma mais sustentável. Desta forma, as geotecnologias, aliadas ao grande avanço tecnológico das últimas décadas surge como importante instrumento para a análise ambiental e o geoprocessamento.

A análise dos dados ambientais com característica locacional tem se dado nas últimas décadas através do geoprocessamento. Este é definido por Câmara e Medeiros (1998), como uma disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas. Ainda, este tratamento de dados espacializados apresentam um enorme potencial, levando em consideração o baixo custo desta tecnologia em que o conhecimento é adquirido localmente.

Como ferramenta de auxílio para o geoprocessamento é utilizado o Sistema de Informação Geográfica (SIG) que é definido por Fitz (2008) como um sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, o qual integra dados, equipamentos e pessoas com o objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido.

Robaina et al. (2009) salientam que a utilização de SIG possibilita a realização de análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de

dados georreferenciados, tornando possível automatizar a produção de documentos cartográficos e a tomada de decisão de maneira mais rápida e precisa.

Uma das principais formas de aquisição de dados no geoprocessamento é o sensoriamento remoto, que consiste, segundo Campbell e Wynne (2011) na obtenção de informações sobre a superfície terrestre usando imagens adquiridas de uma perspectiva aérea, usando a radiação eletromagnética de uma ou mais regiões do espectro eletromagnético, refletida ou emitida da superfície terrestre.

Essa obtenção de dados pelo sensoriamento remoto pode ser efetuada de duas formas distintas, conforme Piroli (2010). O sensoriamento remoto de forma orbital é quando as informações são coletadas por sensores localizados em órbitas ao redor do planeta, coletando informações a determinados intervalos de tempo e espaço. Já o sensoriamento remoto não-orbital é realizado por equipamentos aerotransportados não localizados em órbitas. Entre estes, destacam-se os sensores aerotransportados, que utilizam para deslocamento aviões, balões, ou veículos aéreos não tripulados. Um dos principais produtos do sensoriamento remoto não-orbital são as fotografias aéreas.

Através dos dados obtidos no sensoriamento remoto e modelados em ambiente SIG é possível obter diversos produtos que podem ser utilizados na análise ambiental, um dos mais importantes são os Modelos Numéricos do Terreno (MNT). Câmara e Medeiros (1998) associam o termo MNT a representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço, como a altimetria ou a pluviosidade. Esses MNTs são modelos matemáticos que reproduzem uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de pontos x e y com atributos denotados de z , que descrevem a variação contínua na superfície.

Os MNTs relacionados a altimetria podem ser de dois tipos diferentes, Modelo Digital do Terreno (MDT) ou Modelo Digital de Superfície (MDS). Campbell e Wynne (2011) explicam a diferença entre os dois produtos: o MDS é a resposta à radiação eletromagnética (REM) da primeira camada na superfície, considerando as obstruções como vegetação e construções e os MDTs são resultados da reflectância da linha topográfica do terreno, sem interferência de outros objetos. Para os fins da geomorfologia e morfometria do terreno os MDTs são mais úteis, pois possuem a informação do terreno real, porém as formas de aquisição de MDTs são mais complexas.

A obtenção de dados altimétricos de MDTs passou a possuir uma demanda cada vez maior nas últimas décadas. Esse aumento se deve pelos produtos que podem ser obtidos a partir dos MDTs, podendo ser gerado diversos parâmetros morfométricos para modelagem e análise de relevo e da topografia. Outro aspecto importante é a crescente demanda destes dados altimétricos em nível de detalhe, permitindo análises em escalas maiores e ampliando os seus usos.

Para atender esta demanda a NASA realizou a missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) que segundo Grohmann et al. (2008) foi realizada no ano de 2000 buscando a obtenção de dados topográficos do globo terrestre através de utilização de radar, possuindo resolução espacial de 90 e 30m. Mais recentemente, a partir do ano de 2006, foram lançados pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) satélites com sensores de radar acoplados, que de acordo com a JAXA (2006), possuem uma resolução espacial de 12,5m.

Associado ao avanço nas tecnologias para a obtenção de MDTs e às ferramentas de SIG, passou-se a utilizar, cada vez mais, a parametrização dos aspectos do relevo. Desta forma, Trentin e Robaina (2016) explicam que a parametrização da morfologia do relevo por meio de SIG é o processo de extração de atributos quantitativos da topografia. O estabelecimento de critérios com parâmetros fixos, utilização de MDTs para o cálculo de variáveis permitem o mapeamento do relevo diminuindo a subjetividade para a identificação e a delimitação das feições.

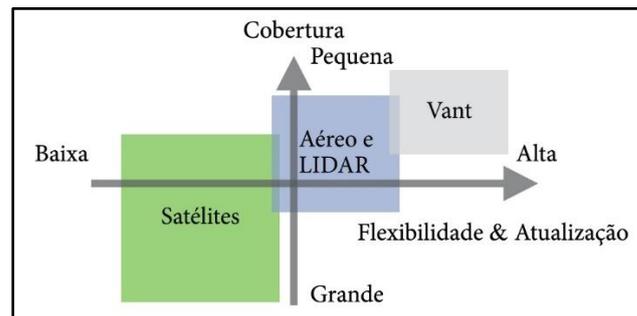
Wood (1996) destaca que a parametrização do relevo se refere à representação quantitativa das características morfológicas da paisagem descritas de forma contínua por meio de equações aplicadas a modelos numéricos de representação altimétrica, os MDTs, que derivam os atributos. Portanto, através das análises morfométricas é possível compreender alguns aspectos do relevo e indícios dos processos que ocorrem no local. Devido a isso, as análises de morfometria do relevo têm sido amplamente utilizadas como no caso do estado do Paraná, com o trabalho de Silveira et al. (2018), no Tocantins com a compartimentação feita por Robaina et al. (2017) e no Rio Grande do Sul apresentado no trabalho de Robaina, Trentin e Laurent (2016), Trentin e Robaina (2016) e Guadagnin e Trentin (2014), bem como no território uruguaio no trabalho de Robaina, Trentin e Achkar (2017).

Mais recentemente o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) tem se tornado mais comum para levantamentos topográficos, e para análise prática e precisa do relevo. Niethammer et al. (2012) destacam que os VANTs remotamente

controlados podem gerar dados de sensoriamento remoto de alta resolução. Portanto, o uso de sensoriamento remoto baseado em VANT mostra um potencial significativo para a produção de ortomosaicos de alta resolução e MDTs que permitem a análise topográfica em nível de detalhe.

Para a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2017) VANTs, ou popularmente Drones, são instrumentos aéreos remotamente pilotados, possuindo carga útil e de uso não-recreativo. Já para Medeiros (2007) os VANTS são aeronaves pilotadas sem qualquer tipo de contato físico que podem ser utilizados para diversas tarefas, como reconhecimento tático, monitoramento e mapeamento. Ainda Jorge e Inamasu (2014) ao compararem os VANTs com outras formas de aquisição de dado (Figura 6), salientam que apesar da área de cobertura ser menor, se ganha em flexibilidade de uso, tornando muito útil o uso desta tecnologia.

Figura 6 - Comparação de VANT com sistemas aéreos e satélites.



Fonte: Jorge e Inamasu (2014).

A geração de produtos através de obtenção de imagens de VANTs é baseado em um conjunto de cálculos e modelos que tem sua denominação de fotogrametria digital. Coelho e Brito (2007, p.16) definem a fotogrametria como:

[...] a ciência e tecnologia de se reconstruir o espaço tridimensional, ou parte do mesmo (espaço-objeto), a partir de imagens bidimensionais, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas (espaço-imagem), sem contato físico direto entre o sensor e o objeto ou alvo de interesse.

Ainda Baltsavias (1999) salienta que a fotogrametria é baseada no processamento de imagens, com os principais produtos os MDTs, MDSs, ortoimagens, reconstrução 2D e 3D, classificação de objetos para mapeamentos ou aplicações temáticas, e visualização de dados.

Para tanto, os VANTs capturam imagens que contêm coordenadas planialtimétricas permitindo o processamento das mesmas com precisão cartográfica (EISENBEISS et al., 2005; MEDEIROS 2007). Coelho e Brito (2007) explicam que o número de imagens envolvidas para o processamento é variável. É desejável que sejam ao menos duas (tomadas de ângulos diferentes), com área de sobreposição, a fim de viabilizar a visão estereoscópica, que possibilita maiores acurácias e precisões na restituição tridimensional do espaço-objeto.

As novas geotecnologias associadas aos veículos aéreos não tripulados têm permitido análises mais rápidas e precisas tendo diversas aplicações. Um dos campos que mais tem crescido a aplicação dos VANTs é a agricultura, com o advento da agricultura de precisão, como evidenciam os trabalhos de Medeiros (2007), Bernardi et al. (2014), Fernandes (2016) e Iersel et al. (2018). Também aos poucos tem sido aplicada tal tecnologia para auxiliar nas análises ambientais como Niethammer et al. (2012) ao estudar escorregamentos na França, Ritchie et al. (1993) ao utilizar *laserscan* a bordo de VANT para estudar a erosão nos Estados Unidos e Anweiler e Piwowarski (2016) ao desenvolver um protótipo para monitoramento ambiental.

Aliado ao desenvolvimento dos VANTs, o processamento digital de imagens e sobretudo a fotogrametria digital tiveram um grande avanço tecnológico. Com a ascensão da visão computacional, descrita por Kurz, Thormählen e Seidel (2011), que permite a obtenção da localização 3D de objetos através de fotografias, novos algoritmos de fotogrametria foram desenvolvidos. Uma das principais ferramentas desenvolvidas foi o algoritmo *Structure from Motion* (SfM) que permite a criação de modelos 3D a partir de uma série de fotos 2D com sobreposição tiradas de diferentes pontos de vista (TURNER, LUCIEER e WATSON, 2012; SCHÖNBERGER e FRAHM, 2016).

O método SfM utilizado na fotogrametria dos VANTs, se difere da fotogrametria digital tradicional devido ao fato de não necessitar conhecer *a priori* os parâmetros da câmera digital, como localização e posição da câmera, bem como pontos de controle 3D, para a construção do modelo digital. No método SfM a extração da posição da câmera e a geometria da cena é realizada automaticamente e simultaneamente, tornando mais fácil, rápido e prático o processamento de imagens (WESTOBY et al., 2012; VIANA, 2015; SCHÖNBERGER e FRAHM, 2016).

Sobre a tecnologia SfM, Westoby et al. (2012) descrevem como um método fotogramétrico de reconstrução topográfica de alta resolução emergente, de baixo

custo operacional e ideal para pesquisas com baixo orçamento e em áreas remotas. Nesse sentido Garrett e Anderson (2018) salientam que os drones (ou VANTs) mudaram a forma de ver o espaço, sendo possível a percepção do volume. Segundo os mesmos autores, a mobilidade do drone, associado ao processamento de dados SfM revolucionou e redefiniu como os dados topográficos são obtidos na geografia física pela alta qualidade e baixo custo operacional.

No Brasil, a tecnologia SfM têm sido utilizada principalmente em análise de taludes na geologia, com os trabalhos de Viana (2015) em uma mina em Santana do Parnaíba – SP, e Viana et al. (2018) em estudo de um dique no município de Limeira – SP. Também têm sido utilizada a tecnologia SfM no ramo da Arquitetura (PAOLI E TRINDADE, 2015; ARAUJO et al. 2018), mas associado ao uso de VANTs a tecnologia é empregada na Agricultura de Precisão, como nos casos de Fernandes (2016), Bernardi et al. (2014) e Medeiros (2007).

Portanto as novas tecnologias de VANTs tem proporcionado uma melhora na praticidade de obtenção de dados precisos, facilitando a obtenção de ortofotos e MDTs o que é de extrema importância para a análise ambiental, proporcionando dados precisos com boas escalas temporal e espacial por um baixo custo. Pegoraro et al. (2013) destacam que o uso do VANT para a tomada de imagens aéreas traz como principal benefício o acesso imediato das imagens e em escalas que definam o grau de detalhamento desejado. Ainda, salientam que o uso de dados oriundos de VANTs aliado aos recursos de geoprocessamento são um grande suporte para a tomada de decisões.

2.4 USO DE DADOS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA O MAPEAMENTO DE EROSÃO

O estudo de erosão é de caráter multiescalar, sendo possível uma análise regional, buscando compreender os condicionantes da erosão (CABRAL, 2004; VALENTIN, POESEN e LI, 2005; MUÑOZ-ROBLES et al., 2010), a tipologia dos processos (DOMINGUES et al., 1998; AUGUSTIN e ARANHA, 2006) e também a suscetibilidade de determinado local (XAVIER et al., 2010; RIBEIRO et al., 2016; RAHMATI et al., 2017). Também é possível uma análise de nível local, tendo um enfoque maior nas feições erosivas, buscando compreender as diferenças entre feições e mecanismos de erosão (PINHEIRO, NUMMER e SANGOI, 2009), bem como

os seus parâmetros morfométricos (KAISER et al., 2014; LI et al. 2017; CABRAL, 2018).

O método e técnica empregada nos trabalhos possui estreita relação com a disponibilidade de dados. Os métodos convencionais de Sensoriamento Remoto, como as imagens de satélite, fornecem dados espectrais de resolução próxima a um metro, como *GeoEye* com resolução de 41cm e *QUICKBIRD* com 67cm de resolução espacial (SATELLITE IMAGING CORPORATION, 2019). Já na obtenção de MDTs com imagens de radar, é possível obter dados com resolução de 12,5m (JAXA, 2006). Porém, com o avanço dos VANTs é possível obter informações altimétricas e espectrais com uma qualidade centimétrica com maior facilidade, abrangendo às possibilidades na pesquisa em nível de detalhe.

Até o início dos anos 2000 a grande maioria dos trabalhos em nível de detalhe em voçorocas era realizado com fotografias aéreas, através da fotogrametria tradicional ou com levantamentos de campo realizados de diversas maneiras (IRELAND, 1939; ROBAINA et al., 2002; DRUMOND, 2006; MATHAIS, 2016). Recentemente se popularizou o uso de VANTs para esses trabalhos, devido ao seu baixo custo e a capacidade de fornecer dados ainda melhores do que anteriormente (OLTMANS et al., 2012; VERDONK, 2015; LIU et al., 2016; HOSSEINALIZADEH et al., 2019). O uso desta nova ferramenta contribuiu para o aumento do estudo do fenômeno de voçorocamento, permitindo a análise precisa de volume erodido, avanço das cabeceiras das voçorocas e outros parâmetros das grandes feições erosivas.

Quanto ao uso das novas tecnologias para o estudo da erosão, Nobajas et al. (2017) salientam que o desenvolvimento de veículos aéreos não tripulados (VANTS), popularmente conhecidos como drones, fornece uma plataforma ideal capaz de adquirir as imagens de alta resolução necessárias para a compreensão de ravinas e voçorocas de grande escala em três dimensões dentro de áreas remotas. Eles, portanto, apresentam uma oportunidade de estender medições quantitativas sistemáticas para este componente anteriormente remotamente indetectável e inacessível. Nesse mesmo sentido, Smith e Vericat (p. 1657, 2015) chamam a atenção quanto a revolução do uso do SfM e VANTs na erosão, afirmando:

O SfM tem um potencial substancial para revolucionar a aquisição e acessibilidade de dados topográficos de alta resolução, permitindo potencialmente o estudo das taxas de erosão ao longo de uma gama de escalas espaciais com uma única técnica.

Ao encontro disso, Stöcker et al. (2015) afirmam que os VANTs permitem novas possibilidades sobre a avaliação de questões de pesquisa geomorfológica. Avanços simultâneos em visão computacional e fotogrametria digital, que permitem rápida e fácil geração de modelos digitais de superfícies (MDS) com alta resolução e precisão, impulsionam o estabelecimento de VANTs como um adequado método de pesquisa. Vários autores já adotaram o método de utilização de MDSs de alta resolução calculados a partir de imagens de VANTs para estimativas de volume, análise da erosão, análises morfológicas e monitoramento de voçorocas. Ainda Kaiser et al. (2014) destaca a importância do algoritmo SfM, permitindo uma visão 3D de alta resolução, na análise de voçorocas, tendo em vista às diferentes feições e condições que se associam a esse processo erosivo. Tais como, encostas íngremes, *pipes* e diferentes tipos de artefatos, como árvores.

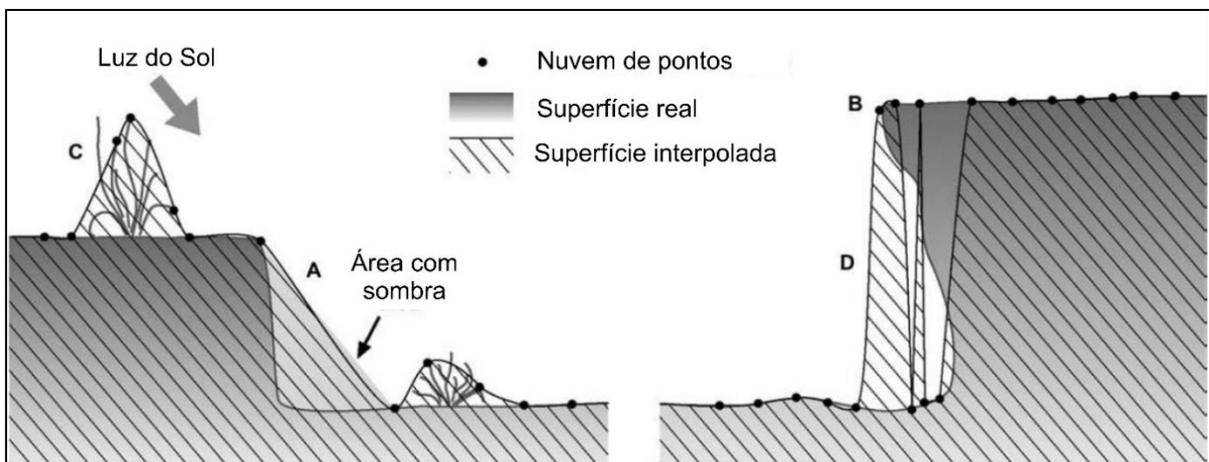
Frente a estes avanços na obtenção de dados detalhados se tornaram mais frequentes os trabalhos de morfometria de voçorocas. A obtenção de MDSs e MDTs com alta resolução, com levantamentos rápidos comparados às tecnologias existentes até então, fez emergir uma variedade de estudos em nível de detalhe em voçorocas, utilizando esses dados, focando na análise de modelos em nível centimétrico. Entre os principais aspectos estudados é o de volume erodido em diferentes períodos de tempo (KAISER et al., 2014; PETER et al., 2014; GLENDELL et al., 2017; GAFUROV, 2017), índice de avanço das cabeceiras das voçorocas (*Gully Headcut Retreat – GHR*) (GUTIÉRREZ et al., 2014; VANMAERCKE et al., 2016), morfometria ou morfologia das feições erosivas (NOBAJAS et al., 2017; GUTIÉRREZ et al., 2018), entre outras.

De modo geral os dados de elevação de alto detalhamento permitem o mapeamento de inúmeros detalhes espaciais, inclusive pequenas ravinas, que até então não eram possíveis observar em produtos de sensoriamento remoto tradicionais, sendo possível de observar apenas em trabalhos de campo (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012).

Para além da análise planimétrica, a visão computacional e o algoritmo SfM permitem uma visão 3D do fenômeno, possibilitando diferentes abordagens de análise que ainda são pouco exploradas. Frankl et al. (2015) destacam que a compreensão detalhada da dinâmica da erosão e dos processos envolvidos demanda uma produção de modelos 3D, no qual a topografia 3D é aproximada permitindo a modelagem de morfologias complexas, como *pipings* e blocos de solo com a base solapada que são importantes indicadores do avanço da voçoroca.

Apesar da qualidade e facilidade na obtenção dos dados com a utilização de VANTs, ainda existem alguns desafios para o aperfeiçoamento da técnica empregada. O algoritmo SfM fornece uma nuvem de pontos densa baseada na posição da câmera, capturando artefatos e distorções que podem prejudicar a qualidade do MDT gerado (VERDONK, 2015). Marzloff e Poesen (2009) após a realização de MDTs em diversas voçorocas indicaram quatro principais erros encontrados neste tipo de levantamento, representados na Figura 7.

Figura 7 - Representação esquemática das diferentes fontes de erro na geração automática de MDTs.



Fonte: Adaptado de Marzloff e Poesen (2009).

Os autores destacam quatro principais erros, representados na figura pelas letras de A a D. No caso da letra A, são erros relacionados às sombras no fundo da voçoroca que acaba causando a falta de pontos na nuvem, resultando na suavização das encostas. Já relacionado ao erro destacado em B, a escarpa onde recebe luz solar diretamente possui menos pontos na borda da voçoroca, tornando sua feição arredondada no modelo.

Outro erro bastante comum, representado pela letra C (Figura 7), é a ocorrência de ruídos em feições de vegetação. Marzloff e Poesen (2009) explicam que o processo de correspondência de imagens diferencia a superfície do solo e os objetos que cobrem essa superfície, resultando na representação do dossel fragmentado em vez da superfície do solo, necessitando muitas vezes de filtros para corrigir estes erros. Ainda em áreas onde a parede da voçoroca possui a base solapada, como no caso do exemplo D, são obtidos pontos do topo e da base, onde o algoritmo de

interpolação acaba criando picos e fossos na geração do modelo de elevação. De acordo com os autores, este erro é inevitável pois não existe a possibilidade de mais de um valor z para cada x / y , nas grades TIN ou em MDSs rasterizados.

Desta forma, a aquisição de dados com o uso de VANTs, aliada a tecnologia SfM aumentam a possibilidade de análise dos fenômenos de voçorocamento, permitindo novas perspectivas de análise e melhor qualidade de dados. Apesar de possuir algumas limitações, ainda é mais efetiva e barata do que outras tecnologias, sendo amplamente utilizada para a análise de voçorocas em nível de detalhe.

3 METODOLOGIA

No espaço geográfico os elementos se comportam de forma que se integram e interagem entre si, formando um sistema. Esta compreensão dos processos ambientais foi proposta por Ludwig Bertalanffy em 1947, com a teoria geral dos sistemas, confrontando com o modelo mecanicista vigente nas ciências até então. A teoria geral dos sistemas baseia-se no conceito de sistema que pode ser entendido, de acordo com Tricart (1977), como um conjunto de fenômenos que se processam mediante um fluxo de matéria e energia que originam uma relação de dependência mútua entre os fenômenos. Em decorrência disso, o sistema apresenta propriedades que lhe são inerentes e que são diferentes da soma das propriedades de seus componentes.

Chorley (1962) salienta a importância dos sistemas na geomorfologia, pois permite a análise focando nas relações entre forma e processo, permite a análise multivariada dos fenômenos geomorfológicos, a análise mais flexível e holística, e também, uma aproximação maior da geografia humana, contemplando inclusive as ações antrópicas nos estudos.

Atualmente tem se desenvolvido diversos trabalhos na Geografia Física através do enfoque sistêmico, se mostrando uma abordagem pertinente para este tipo de estudos. Como exemplo disso são os trabalhos desenvolvidos na delimitação de geossistemas para a gestão da Bacia Hidrográfica do Rio São João/RJ por Cunha e Freitas (2004), a utilização da cartografia geomorfológica para a análise dos processos erosivos por Silveira e Lupinacci da Cunha (2010), a análise de toposequência como unidade para análise da suscetibilidade erosiva no Paraná por Nobrega e Cunha (2011) e os estudos geoambientais de Moreira Neves et al. (2015) e Trentin e Robaina (2012).

Portanto neste estudo utilizou-se da abordagem sistêmica para o estudo da erosão, tendo em vista que é amplamente e historicamente utilizada para as análises ambientais. Esta abordagem permite uma compreensão holística e integradora dos fatores condicionantes e do processo de erosão, o que é fundamental para o seu entendimento.

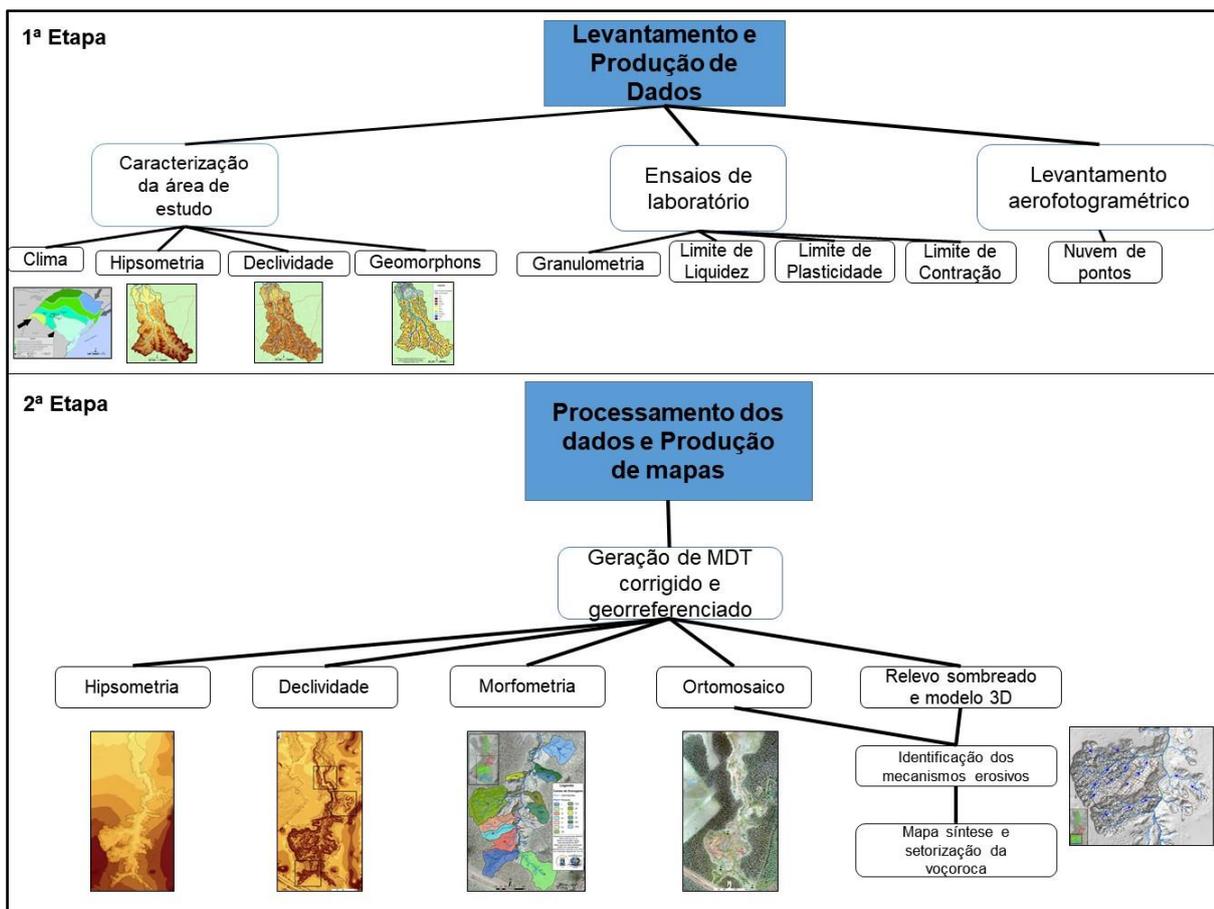
Anterior a execução do trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica dos estudos realizados na área para melhor contextualização e conhecimento prévio do problema de erosão no município. Após à compreensão do problema encontrado na

área de estudo foram realizadas revisões bibliográficas e fundamentação teórica dos principais temas referentes à erosão por voçorocamento e também no uso de VANTs na análise ambiental.

Foram realizados dois trabalhos de campo na Voçoroca do Areal. Em um primeiro momento, nos dias 24 e 25 de agosto de 2018, foram realizados os procedimentos de campo de reconhecimento, mapeamento e recolhidas as amostras dos perfis de solo. Em um segundo momento, nos dias 19 e 20 de setembro de 2019, o trabalho de campo foi voltado para a verificação dos dados mapeados, e análise no local dos mecanismos erosivos e suas formas atuação.

A metodologia aplicada no trabalho foi dividida em duas principais etapas, que são: levantamento e produção de dados, processamento dos dados e elaboração de mapas, representadas no fluxograma da Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma geral da metodologia executada.



3.1 LEVANTAMENTO E PRODUÇÃO DE DADOS

3.1.1 Elaboração da Caracterização da área de estudo

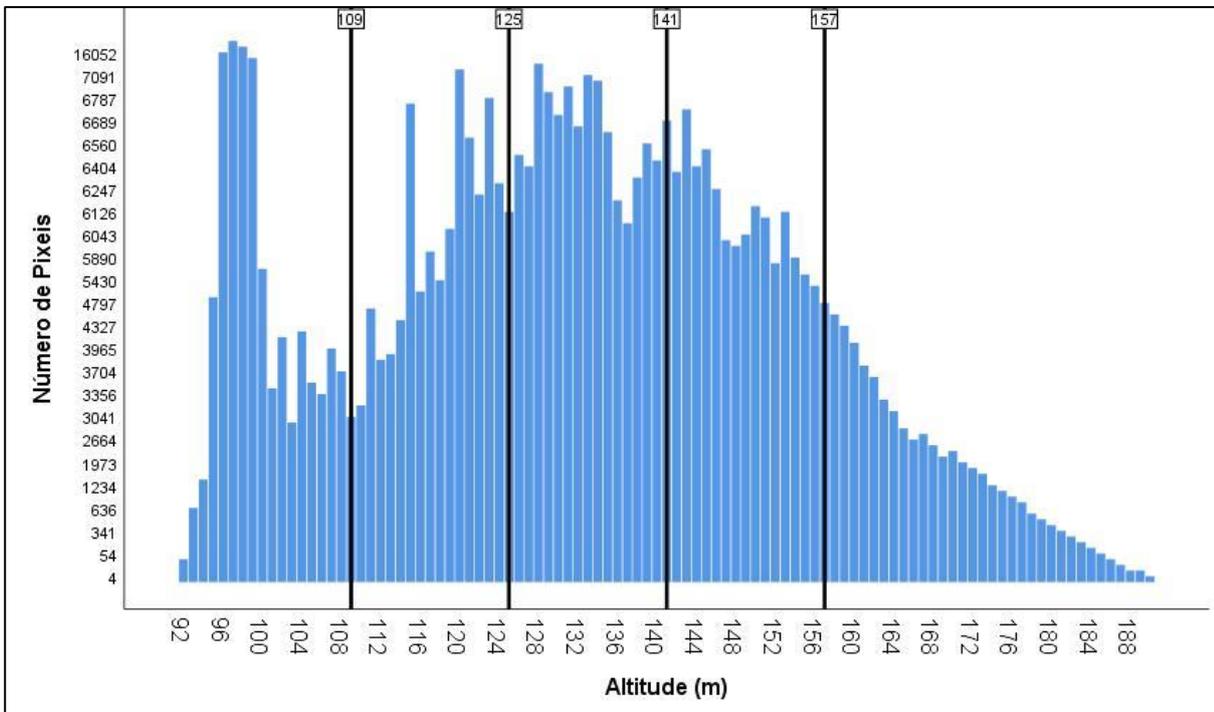
Na realização do mapa climático do estado do Rio Grande do Sul foi utilizado como base o mapa realizado por Rossato (2011) em seu estudo dos climas do Rio Grande do Sul. O mapa foi digitalizado, posteriormente georreferenciado e realizado o layout no software ArcGIS 10.5.

Os dados pluviométricos dos municípios de Alegrete, Santa Maria e São Gabriel, utilizados para a caracterização regional, foram obtidos a partir de trabalho realizado pelo INMET (2009), já os dados relacionados à estação pluviométrica de Cacequi foram obtidos através do portal *HidroWeb* da ANA (Agência Nacional de Águas). As estações selecionadas para análise pluviométrica foram de acordo com a proximidade da área de estudo e a disponibilidade dos dados. Para todas as estações pluviométricas foram utilizados como base o intervalo temporal de 1960 a 1990.

Para a elaboração dos mapas de relevo da BHAL foi utilizado o MDT obtido através de imagens do radar ALOS/PALSAR disponibilizadas pela *Alaska Satellite Facility* (ASF) com resolução espacial de 12,5m.

No mapa hipsométrico foram definidas cinco classes de acordo com o método de quebras naturais do histograma de frequência (Figura 9), sendo assim definidas: < 108m, que corresponde às áreas mais baixas próxima a foz; 108 – 125m, áreas baixas próximo ao canal principal de drenagem nas porções mais altas da bacia; 125 – 141m, que correspondem às porções de base das vertentes da bacia hidrográfica; 141 – 157m, que são as áreas de declive das colinas da área; e áreas maiores que 157m que são áreas de topo de colina, cabeceiras de drenagem e divisores de água na porção mais alta da bacia.

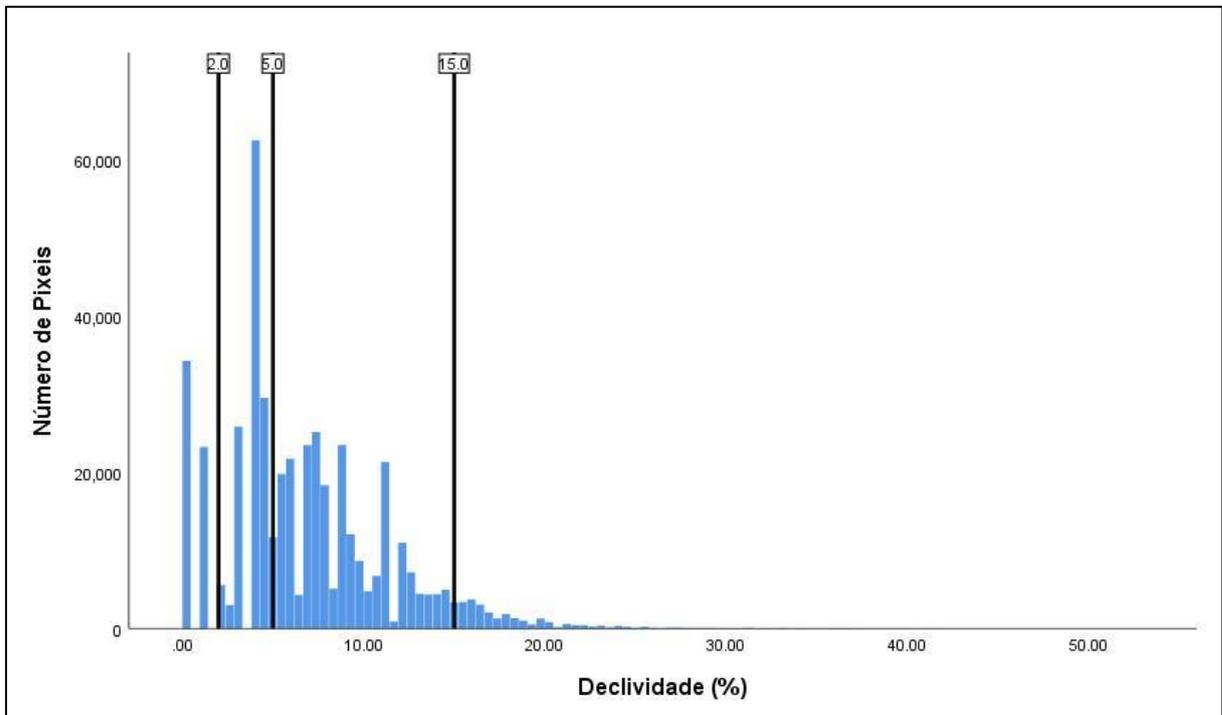
Figura 9 - Histograma de frequência da hipsometria da Bacia Hidrográfica Areal do Limeira.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

O mapa de declividade da BHAL foi elaborado com os limites de classe propostos pelo IPT (1981) e apresentado por Trentin e Robaina (2006), que são 2%, 5% e 15%. Desta forma as áreas com declividade de 2% são consideradas muito planas e presente o processo de deposição, áreas de declividade de 5% são áreas de transição entre processos de deposição e meteorização, e as declividades de 15% representam áreas propícias para movimento de massas de modo geral e limite para uso de maquinário agrícola. Foram assim definidas quatro classes (Figura 10), <2%, de 2 a 5%, de 5 a 15% e superior a 15%.

Figura 10 - Histograma de frequência da declividade da Bacia Hidrográfica Areal do Limeira.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

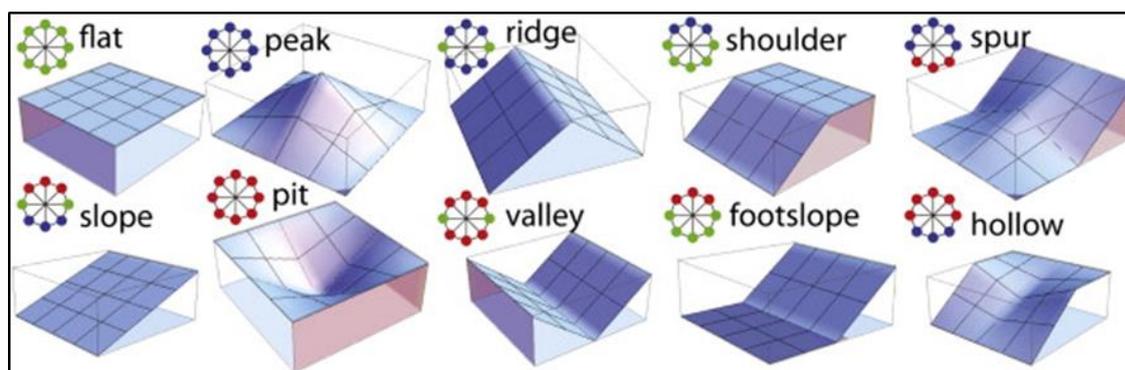
A obtenção dos *geomorphons* foi realizada através da metodologia proposta por Jasiewicz e Stepinski (2013) e amplamente utilizada em estudos do relevo (ROBAINA, TRENTIN e LAURENT 2016; ROBAINA, TRENTIN E ACHKAR 2017; ROBAINA et al. 2017; SILVEIRA et al. 2018), onde é considerado os níveis de cinza de um MDT e a diferença de altura entre os pixels do modelo de elevação formando os padrões dos elementos locais do relevo (LTP em inglês). Desta forma, considerando que se a célula for maior em relação a central, assume o valor de “1”, se é menor “-1” e se é igual, “0”. Esta informação é transferida para valores de elevação do terreno de maior, menor ou igual.

Além de considerar as diferenças de altitude das células é considerado o ângulo entre as células de interesse. Os ângulos medidos são o zenital e nadiral, ambos variando de 0° a 180°, sendo o zenital acima da linha do horizonte e o nadiral sendo medido abaixo da linha do horizonte. Com a determinação destes ângulos se tem uma ideia de textura do relevo, o que é importante para a determinação dos elementos.

Ainda a aplicação da ferramenta de *geomorphons* exige dois valores escalares livres como parâmetros. Os dois parâmetros livres são lookup “L” (distância em metros ou em unidades células) e thresholdt (nivelamento em graus). Para os parâmetros livres, aplicou-se valor de “L” igual a 50 pixels (625 metros) e graus “t” igual a 2°. Valores definidos de acordo com o relevo no local, sendo este bastante plano e com vertentes alongadas.

Através do uso da ferramenta dos *geomorphons*, com os parâmetros livres descritos anteriormente, foram obtidos 10 elementos do relevo predominantes, que estão representados na Figura 11.

Figura 11 - Representação gráfica dos elementos geomorphons.



Fonte: Adaptado de Jasiewicz e Stepinski (2013).

3.1.2 Ensaios de laboratório

Para a análise física do solo da Voçoroca do Areal foram coletadas amostras dos diferentes horizontes em um ponto da voçoroca, tendo em vista a caracterização geral das propriedades do solo da voçoroca. Foram coletadas amostras no horizonte A, a uma profundidade de 50cm, no horizonte de transição AB, a uma profundidade de 110cm, no horizonte B a uma profundidade de 150cm e em uma porção de rocha alterada, correspondente ao horizonte C a uma profundidade de 200cm.

No Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geociências da UFSM foi realizado o ensaio de granulometria de acordo com a NBR 7181 (1981). As amostras de solo foram secas ao ar, quarteadas e peneiradas nas peneiras de diâmetro de 8mm, 4,75mm e 2mm para separar as partículas mais grossas, da classe

de cascalho. Posteriormente foram peneiradas nas peneiras 1mm, 0,50mm, 0,250mm, 0,125mm e 0,062mm para obter o valor percentual na fração areia.

Após o peneiramento, o material passante da peneira de 0,062mm foi transferido para um béquer onde foi adicionado o defloculante hexametáfosfato de sódio em repouso por 12 horas, visando soltar as partículas mais finas da amostra. Após esta etapa o material do béquer é agitado e com a pipeta é retirado o material em suspensão, em diferentes tempos e profundidades de coleta (Tabela 1), levando em consideração a Lei de Stokes de sedimentação por tamanho de partícula.

Tabela 1 - Tempo e profundidade para a coleta de material de granulometria fina.

Tempo	Profundidade da Pipeta	Diâmetro da Partícula
1' 56"	10 cm	0,031mm
7' 44"	10 cm	0,016mm
31' 00"	10 cm	0,008mm
2h 03'	10 cm	0,004mm
8h 10'	10 cm	0,002mm
16h 21'	5 cm	0,001mm
65h 25'	5 cm	0,0005mm

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

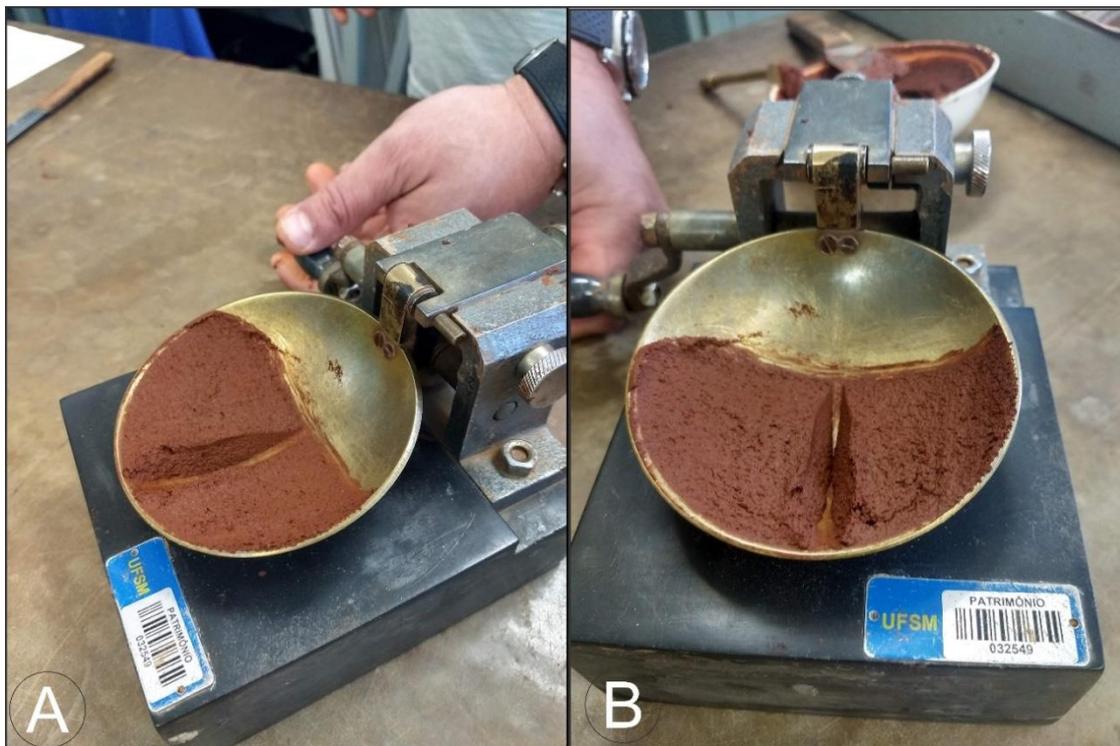
Os resultados finais são apresentados graficamente, dispendo-se na abscissa os diâmetros das partículas, em escala logarítmica, e na ordenada às porcentagens acumuladas das partículas menores do que os diâmetros considerados, em escala aritmética.

Tendo em vista a grande contribuição dos movimentos de massa no avanço lateral da voçoroca, foram realizados os ensaios dos Limites de Atterberg, sendo eles, o Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e o Limite de Consistência (LC). Desta forma o solo pode ser classificado em quatro estados de umidade diferentes, de acordo com Greco (2015): o estado líquido, quando a umidade do solo é maior do que o LL, o solo neste estado apresenta propriedades de um fluido, onde não possui forma e nenhuma resistência ao cisalhamento; estado plástico, quando a umidade é de valor entre o LL e o LP, neste estado o solo apresenta plasticidade e pode sofrer deformações rápidas sem que ocorra variação volumétrica significativa, ruptura ou fissuramento; estado semissólido, quando a umidade do solo está entre o LP e o LC,

o solo apresenta aspecto sólido, porém possui variação de volume quando diminui a umidade; estado seco, quando a umidade do solo é inferior ao LC, o solo apresenta aspecto sólido e o seu volume não varia.

O LL foi definido de acordo com ensaio descrito na NBR 6457 (1984) onde a amostra de solo é destorroada, homogeneizada e umedecida, colocada no aparelho de Casagrande com um sulco de 1cm de espessura no centro da amostra (Figura 12A). A amostra é golpeada com uma queda livre de 1cm no aparelho, até as duas porções da amostra se encontrarem no centro, sendo anotado o número de golpes aplicados e a umidade da amostra (Figura 12B). Posteriormente é aumentada a umidade e repetido o ensaio. Por fim, a umidade correspondente a 25 golpes é considerada o Limite de Liquidez.

Figura 12 - Exemplificação do ensaio de Limite de Liquidez (A – Demonstração do sulco de 1cm realizado com cinzel; B – Ponto de encontro das duas porções da amostra quando é contado o número de golpes.).

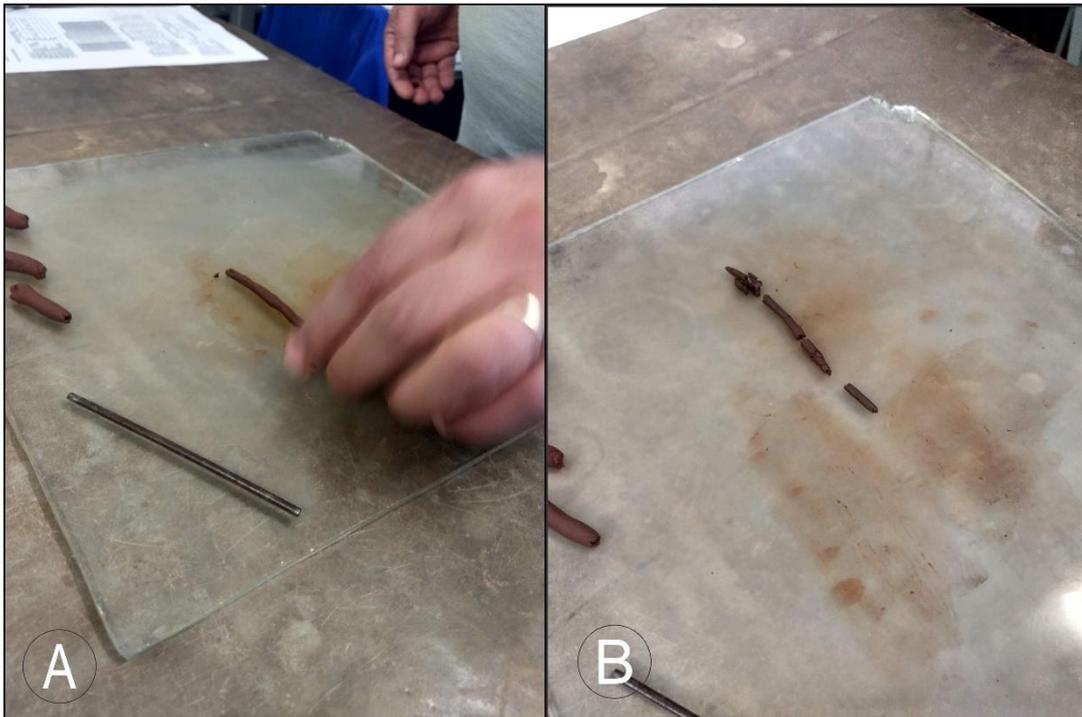


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para a determinação do LP das amostras foi realizado ensaio descrito na NBR 7180 (1984). Neste ensaio a amostra é umedecida e moldada em forma de uma amostra cilíndrica de 3mm que é rolada sobre um vidro fosco até o ponto onde inicia

o processo de fraturamento (Figura 13). Neste instante é separada a amostra, pesada e seca para obter a umidade da amostra para a determinação do LP.

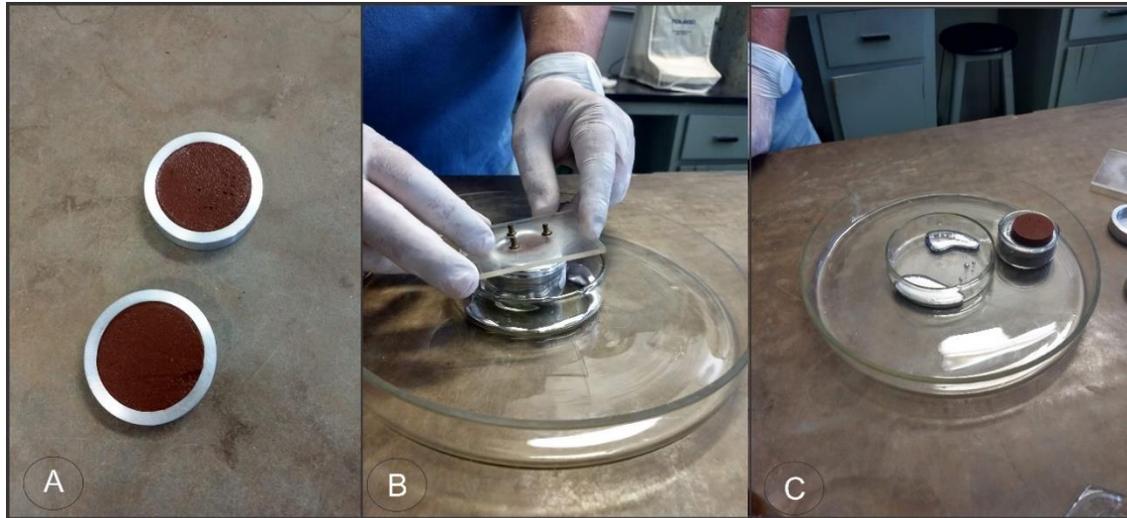
Figura 13 - Exemplificação do ensaio de Limite de Plasticidade (A - Realização de modelagem da amostra seguindo o corpo de prova, de 3mm de diâmetro; B - Ponto de fraturamento da amostra).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para a obtenção do LC das amostras foi utilizado o método apresentado na NBR 7183 (1982). Neste método é determinado o índice de umidade do solo, onde a amostra não perde mais volume. Para isto é preparada a amostra úmida, colocada em um recipiente de volume conhecido e colocado para secar (Figura 14A). Após seco, a pastilha de solo seca é mergulhada em mercúrio, em recipiente de volume de 25cm³ e rasado o recipiente (Figura 14B), o volume de mercúrio transbordado é corresponde ao volume da pastilha de solo seco (Figura 14C).

Figura 14 - Exemplificação do ensaio de Limite de Contração (A – Amostras preparadas para secar; B – Raspagem da amostra seca, tirando o excesso de mercúrio; C – Mercúrio excedente correspondente ao volume da amostra.).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Após conhecer os volumes seco e úmido do solo é conhecido o LC através da expressão:

$$LC = \left(\frac{V_2}{P_2} - \frac{1}{\delta} \right)$$

Onde: V_2 corresponde ao volume de solo seco;

P_2 é o peso de solo seco contido na pastilha;

δ é a massa específica dos grãos do solo.

3.1.3 Levantamento planialtimétrico com uso de VANT

Para a realização do levantamento planialtimétrico foi utilizado um VANT multirrotor modelo Phantom 4, desenvolvido pela empresa DJI (Figura 15). Acoplado ao VANT foi utilizado um sensor de uma câmera digital, modelo FC330 com resolução espectral RGB, desenvolvido pela mesma empresa, possuindo distância focal de 3.61mm e resolução aproximada de 12MP e um receptor GPS código C/A, com precisão aproximada de 5m.

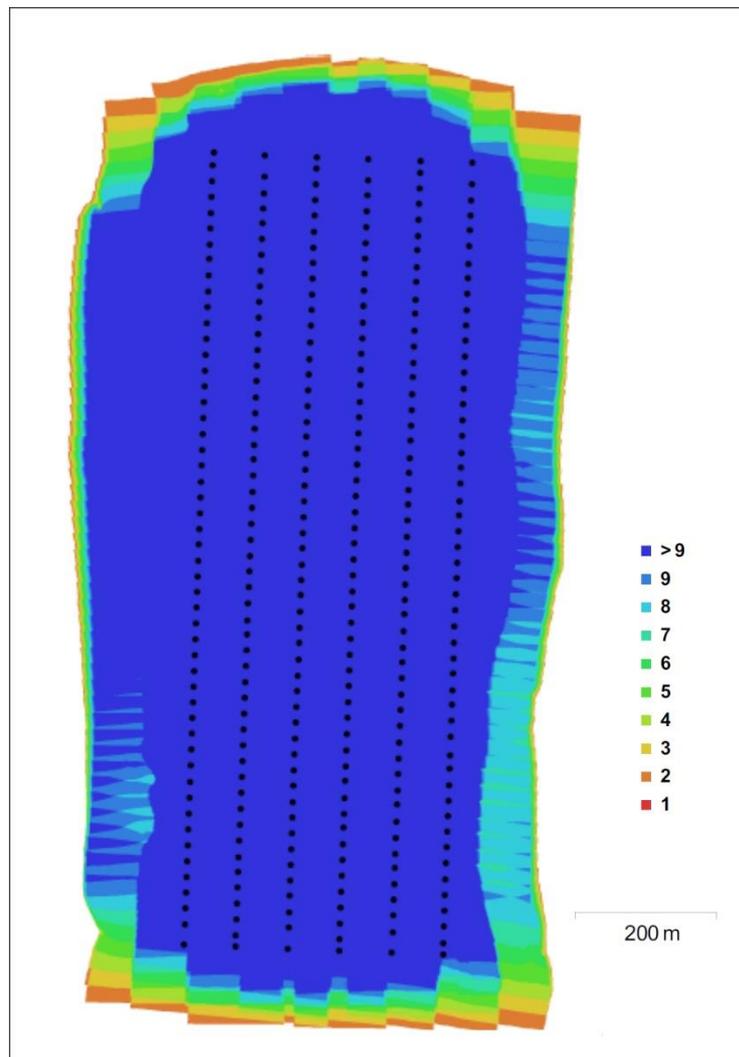
Figura 15 - Exemplo de VANT multirotor modelo Phantom 4 produzido pela DJI.



Fonte: DJI.

No *software* DroneDeploy foram informados os dados de altura de voo, recobrimento desejados das imagens e área de interesse a fim de realizar o plano de voo para a missão do VANT. O voo realizado, que teve duração aproximada de 14 minutos, recobriu uma área de 67ha, a uma altura de voo de 150m, sendo realizadas 306 imagens com sobreposição longitudinal e latitudinal de 85%. O recobrimento da área de interesse foi em quase toda a sua extensão de mais de 9 fotografias do mesmo ponto e de visadas diferentes, como observado na Figura 16.

Figura 16 - Localização central da câmera e sobreposição de imagens no voo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para auxílio do processamento dos dados foram coletados três pontos de controle, chamados de *Ground Control Points* (GCPs), com o uso de GPS geodésico, modelo Ruide 90, com receptor L1/L2 de precisão centimétrica, através do método relativo estático rápido, descrito por Seben et al. (2010), onde utilizou-se um tempo de 30 minutos de rastreamento para cada ponto. A demarcação dos GCPs foi realizada com a utilização de tinta branca, sendo desenhado um X de cerca de 1,5m (Figura 17) a fim de ser visualizado no *software* de processamento das imagens, para posterior correção dos modelos.

Figura 17 - Visualização de um GCP no software PhotoScan.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS E PRODUÇÃO DE MAPAS

Uma vez obtidas as imagens através do uso do VANT foram realizadas operações de fotogrametria digital, sobretudo da tecnologia *Structure from Motion* (SfM), que consiste, de acordo com Westoby et al. (2012) em uma nova tecnologia de baixo custo para reconstrução topográfica de alta resolução. Para tanto, essa tecnologia usa um procedimento de ajuste de imagens interativo baseado em um banco de dados de recursos extraídos automaticamente de um conjunto de imagens sobrepostas.

Para a utilização da tecnologia SfM é necessária a aquisição de imagens de diferentes ângulos com recobrimento das imagens. Desta forma é identificado em cada imagem feições individuais que são utilizadas para o cruzamento e correspondência das imagens. A aquisição destas feições individuais é realizada através do método *Scale Invariant Feature Transform*¹ (SIFT) que, segundo Lowe (2004), identifica feições em cada imagem que são constantes mesmo mudando a escala e rotação da imagem, e parcialmente invariável às mudanças de iluminação e

¹ Tradução livre para o português: Feição Invariável com Transformação de Escala.

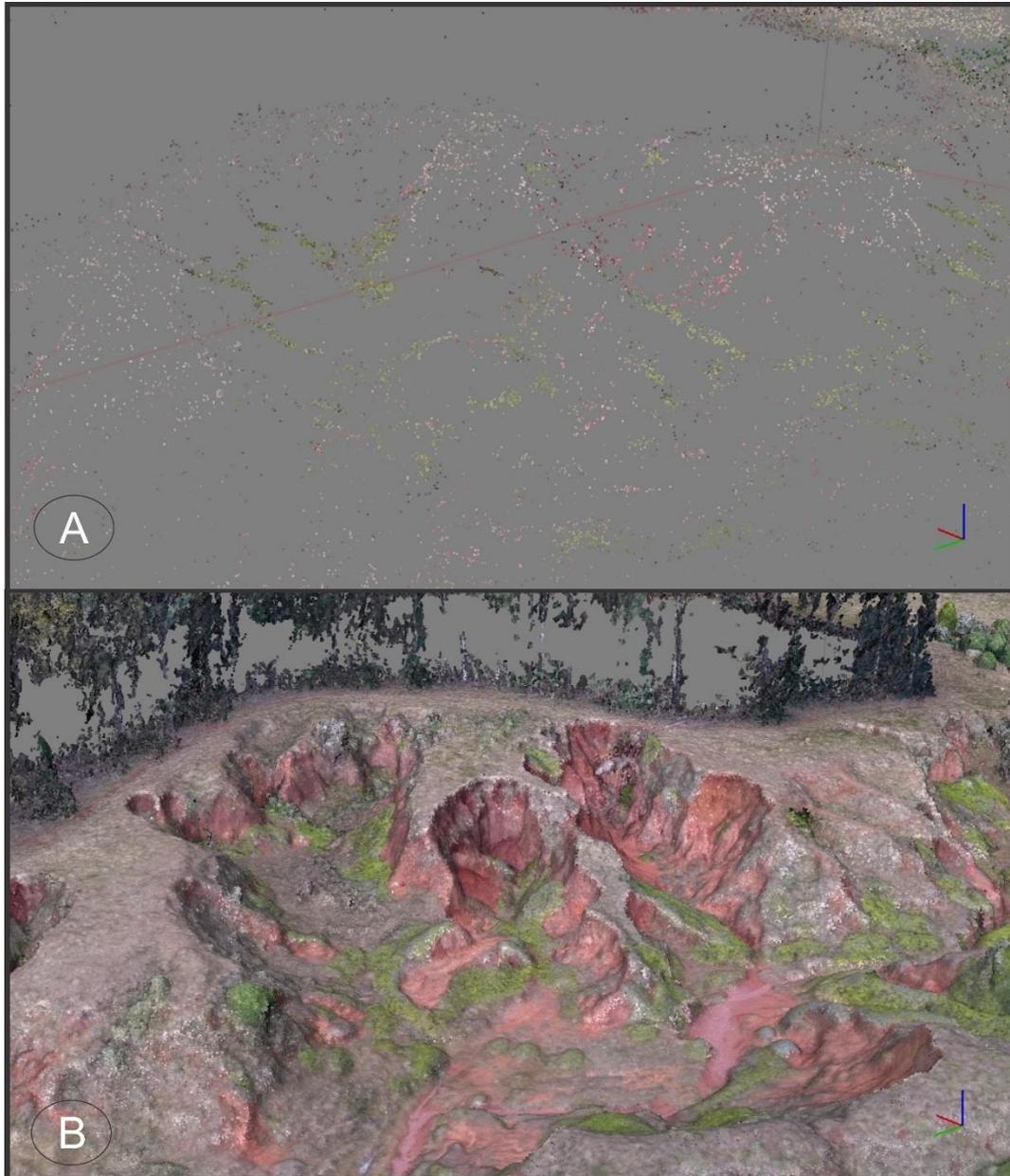
pontos de vista. Assim, pontos de interesse são identificados e extraídos automaticamente em todas as escalas e locais de cada imagem e posteriormente é criada uma representação, através do cálculo de todas as feições e gradientes, que é insensível a variações de iluminação e orientação. Esses pontos de interesses definidos até então, são suficientes para permitir que o recurso seja reproduzido em grande conjunto de dados, conectando e alinhando diversas fotos e definindo a posição e orientação das câmeras.

Após a identificação dos pontos chave estes são ligados em diversas imagens através de aproximação com o uso do algoritmo vizinho mais próximo, conforme descrito em Arya et al. (1998), onde são estabelecidas faixas que ligam pontos chave específicos em um conjunto de imagens. Faixas com um mínimo de dois pontos chave e três imagens são usadas para a reconstrução de nuvens de pontos, e aquelas que não atendem a esses critérios são automaticamente descartadas, gerando assim uma nuvem de pontos esparsa de baixa densidade. No caso do voo realizado na Voçoroca do Areal, com o processamento de 306 imagens foi obtido uma nuvem de pontos esparsa com 185.535 pontos.

Após a elaboração da nuvem de pontos esparsa foi realizado um detalhamento e enriquecimento da nuvem de pontos, gerado através do método *Clustering View for Multi-view Stereo*² (CMVS) que consiste, de acordo com Furukawa et al. (2010) em correlacionar medidas de diversas imagens para gerar uma informação 3D da superfície. Para isso, o algoritmo do CMVS separa as imagens sobrepostas em conjuntos, ou clusters, e detalha as faixas obtidas com o SIFT. Como resultado há um grande adensamento (Figura 18) da nuvem de pontos, que no caso da área de estudo resultou em 68.762.971 pontos no nível alto de detalhe do *software* PhotoScan.

² Visualização de Agrupamentos para Canais de Múltiplas Perspectivas, em tradução livre para o português.

Figura 18 - Adensamento da nuvem de pontos através do algoritmo CMVS (A – Representação de porção da voçoroca com nuvem de pontos esparsa; B – Representação da mesma porção da voçoroca com nuvem de pontos adensada).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Uma vez criada e adensada, a nuvem de pontos assume coordenadas relativas, com valores de coordenadas x, y e z, que não são atreladas à um sistema de referência de coordenadas, fazendo-se necessário o ajuste através das coordenadas obtidas dos GCPs, com método descrito por Turner, Lucieer e Watson (2012). Os pontos obtidos no campo foram processados no *software* Topcon Tools, e ajustados com o apoio das estações de Alegrete e Santa Maria da Rede Brasileira de

Monitoramento Contínuo (RBMC), devido às suas distâncias da área de estudo, de aproximadamente 50km.

Uma vez conhecido os valores reais dos GCPs estes são identificados na nuvem de pontos (vide figura 17) e manualmente plotados, onde então é realizada a correção do modelo 3D. Assim, é obtido uma nuvem de pontos com as coordenadas planas e a altimetria corretas. É importante ressaltar que somente após a correção do modelo com os GCPs que o modelo se torna um dado geográfico, possuindo informações espaciais atreladas a um sistema de coordenadas.

Para a análise da acurácia do produto gerado, foram calculados no mesmo software a diferença da coordenada do modelo e da coordenada real, estipulando o erro para cada coordenada planimétrica e altimétrica. Com o erro de cada ponto calculado foi utilizada a função do erro médio quadrático para as coordenadas planimétricas (X, Y) e para as coordenadas altimétricas (Z), e calculado o erro total através da expressão:

$$\sqrt{(\sum_{i=1}^n [(X_{i, \text{est}} - X_{i, \text{in}})^2 + (Y_{i, \text{est}} - Y_{i, \text{in}})^2 + (Z_{i, \text{est}} - Z_{i, \text{in}})^2] / n)}$$

Onde: $X_{i, \text{in}}$ = Valor de entrada para a coordenada X;

$X_{i, \text{est}}$ = Valor estimado para a coordenada X;

$Y_{i, \text{in}}$ = Valor de entrada para a coordenada Y;

$Y_{i, \text{est}}$ = Valor estimado para a coordenada Y;

$Z_{i, \text{in}}$ = Valor de entrada para a coordenada Z;

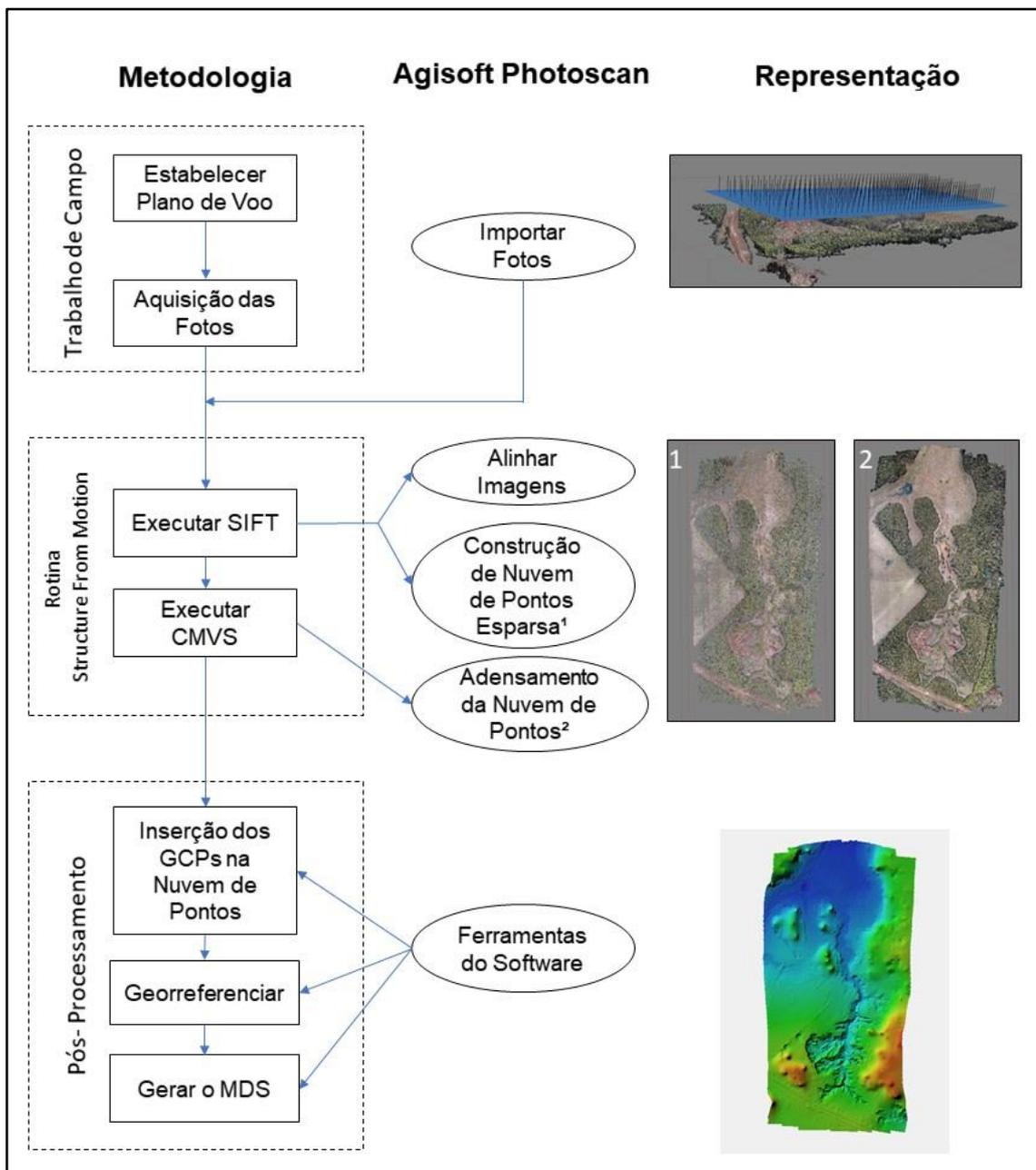
$Z_{i, \text{est}}$ = Valor estimado para a coordenada Z;

N = Número de pontos de coordenadas.

Após conhecer as coordenadas reais do modelo, é possível realizar o Modelo Digital de Superfície (MDS) onde é realizada a interpolação dos pontos da nuvem de pontos através da criação de uma superfície de rede irregular de triângulos (TIN). Na área de estudo, foi obtido um MDS com resolução de 12,6 cm/pixel com uma média de 63,3 pontos por metro quadrado.

As operações referentes à metodologia SfM foram todas realizadas no *software* Agisoft PhotoScan, com os procedimentos para cada etapa representados no fluxograma da Figura 19.

Figura 19 - Fluxograma de operações do algoritmo Structure from Motion.



Fonte: Adaptado de Westoboy et al. (2012).

Com a obtenção do MDS da área de estudo ainda estão presentes feições que não correspondem ao terreno, como a vegetação. Estas feições precisam ser removidas para a obtenção do MDT, que corresponde às condições reais do terreno, sendo um modelo mais recomendável para estudos geomorfológicos.

Visando remover a vegetação e gerar um MDT com maior fidelidade à realidade, foi utilizada a ferramenta *Classify Ground Points* do software Agisoft

Photoscan que consiste em classificar os pontos da nuvem de pontos que correspondem a superfície. Nesta ferramenta foram utilizados os parâmetros de ângulo máximo do terreno como 30°, a variação de elevação máxima de 0,2m em um espaço determinado do terreno e o tamanho máximo de célula onde não possui pontos de superfície no valor de 60 metros.

Com a nuvem de pontos classificada foram ainda realizados alguns ajustes manuais na classificação, devido às condições do relevo peculiar da voçoroca, com encostas íngremes e presença de pináculos. Posteriormente a esta etapa, foi realizada novamente a interpolação dos valores de altitude da nuvem de pontos, utilizando apenas os pontos classificados como terreno, gerando assim o MDT da área de estudo, desconsiderando os artefatos.

Uma vez obtido o MDT com a maior qualidade possível, sendo removida a vegetação de maneira satisfatória de forma a preservar a feição da encosta se torna possível a obtenção de diversos produtos morfométricos. Assim, foi realizado uma divisão em oito classes do MDT, de acordo com as quebras naturais do histograma de frequência da altitude e obtido o mapa hipsométrico da Voçoroca do Areal. As classes foram divididas em < 139m, de 139 a 146m, 146 a 153m, 153 a 159m, 159 a 165m, 165 a 170m, 170 a 175m e superior a 175m.

Para a obtenção do mapa de declividade foi realizada a divisão em seis classes, de maneira a representar melhor as diferentes feições da voçoroca. As classes são: menor que 2%, onde há áreas planas de deposição; de 2 a 5%, áreas de transição entre deposição e início da erosão; de 5 – 15%, áreas com grande potencial erosivo; de 15 - 30%, que correspondem a áreas de transição entre erosão por escoamento superficial e áreas suscetíveis a escorregamentos; 30 – 45%, áreas com grande potencial para escorregamentos; e áreas com mais de 45%, que correspondem a áreas de escarpas acentuadas da voçoroca.

Para a análise morfométrica da voçoroca foram definidas 13 áreas de avanço erosivo, delimitadas pela bacia de captação delas. Foram definidas estas áreas por se tratar das principais feições de avanço passíveis de uma delimitação de acordo com a área de captação.

Nestas áreas foram analisados diversos parâmetros. Dentre eles, foram extraídos diretamente da calculadora de campo do SIG a área e perímetro. Ainda foram medidos, do ponto mais a montante ao ponto mais a jusante o comprimento das áreas de avanço e a largura medida na porção de maior distância de uma margem

lateral para a outra. Também foram traçados perfis topográficos em todas as áreas de avanço para a determinação da profundidade máxima, observando a amplitude altimétrica do topo e da base das feições.

Ainda foi calculado o índice de circularidade (I_c), que busca medir a relação da forma geométrica da área de avanço com a de um círculo. Para tanto, foi calculada a relação da extensão da área de avanço com a área de um círculo de perímetro igual ao da área de avanço, de acordo com a expressão:

$$I_c = \frac{A}{A_c}$$

A = Extensão da área de avanço (m^2)

A_c = Área do círculo (m^2)

Para a análise da profundidade média das áreas de avanço foi criado uma superfície plana considerando os pontos de limite das áreas de avanço. Após este procedimento, foi calculada a diferença entre o MDT original obtido com o VANT e da superfície do topo da feição que foi gerada. Como resultado é obtido um *raster* com a profundidade, e posteriormente foi calculada a média destes valores para cada área de avanço.

Ainda com o uso do MDT foi realizado o cálculo do volume erodido das áreas de avanço. Para tanto, foi utilizada a ferramenta de cálculo de volume do *software* Global Mapper 18, onde é projetada uma superfície plana sobre a área de avanço, considerando a sua borda e então calculado o volume de diferença entre a superfície criada e a superfície real.

A avaliação dos parâmetros morfométricos se deu com o auxílio de dados obtidos na análise de correlação de Pearson, realizado no *software* Minitab 19. Este coeficiente de correlação mede a dependência de duas variáveis, podendo ser positiva ou negativa e quanto mais distante o valor de 0, maior a correlação dos dados.

Visando facilitar a compreensão dos mecanismos erosivos da Voçoroca do Areal, foi realizada a compartimentação em quatro diferentes setores, de acordo com as suas características morfométricas e de processos atuantes. O limite dos diferentes setores foi estabelecido buscando compreender dentro dos setores as áreas de avanço, sem dividir a mesma área de avanço em mais de um setor.

Por fim, foram analisadas a nuvem de pontos, ortoimagem e os parâmetros morfométricos da voçoroca e foram delimitadas através de interpretação sobre a imagem e com apoio de trabalho de campo as áreas com diferentes mecanismos de

erosão e processos atuantes. Foram delimitados os pontos de surgência na voçoroca, marcas de movimento de massa, marcas de rebaixamento, trincas, áreas com predomínio de erosão linear, áreas resistentes à erosão e ainda áreas de deposição de material.

Cada setor da voçoroca foi analisado individualmente buscando compreender os principais mecanismos atuantes. Foram detalhadas as principais feições que caracterizam cada setor através da apresentação do modelo texturizado 3D, do mapa do relevo sombreado e perfil topográfico.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo tem como objetivo caracterizar a área de estudo de modo que auxilie a compreensão do trabalho. Serão abordados aspectos históricos e populacionais gerais de Cacequi, o clima da região, e alguns aspectos fisiográficos da Bacia Hidrográfica do Rio Areal do Limeira na qual está inserida a Voçoroca do Areal, objeto de estudo dessa dissertação, bem como as características gerais da voçoroca e do seu entorno.

4.1.1 Aspectos gerais do município de Cacequi e da Bacia hidrográfica do rio Areal do Limeira

A região do município de Cacequi foi, de acordo com o IBGE (2018), de domínio dos jesuítas durante um longo tempo, estando por vezes em território espanhol e em outros momentos em território português, devido aos acordos realizados entre as coroas. Em 1816 teve uma sesmaria concedida pela coroa portuguesa em seu território, o qual foi o início do município de Cacequi. De acordo com a Prefeitura Municipal de Cacequi (2018), a primeira sede foi nas margens do Rio Saicã na localidade de Saicã.

A transferência da sede do município de Cacequi para o local atual, próximo ao Rio Cacequi, se deu apenas após a instalação das linhas férreas que passam em seu território. Em seu auge, próximo ao ano de 1907, Cacequi possuía linhas férreas que ligavam às cidades de Santa Maria, Alegrete, Uruguaiana e Bagé, se constituindo em importante entroncamento ferroviário.

Devido a sua formação territorial com concessão de sesmarias o município de Cacequi é constituído por grandes propriedades com o cultivo de gado de corte, e de ovinos, que são, de acordo com Zarth e Gerhardt (2009), historicamente cultivados na região, e contribuem para a concentração fundiária. Ao longo dos anos, houve avanços da agricultura sobre as áreas de pastagens e também declínio das áreas agrícolas no município de Cacequi, como é evidenciado no trabalho de Rademann (2017). Mais recentemente, a partir dos anos 2000 e com maior intensidade após o

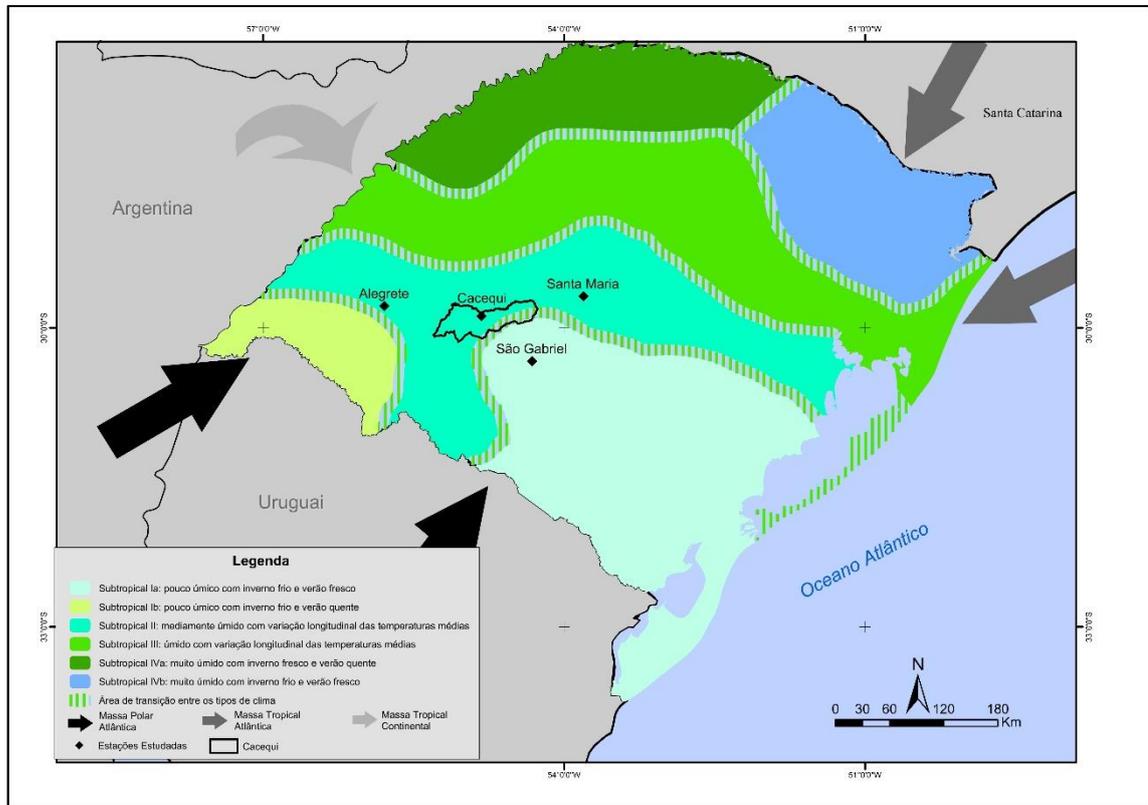
ano de 2006, também foi implantado na região, e em Cacequi a monocultura da silvicultura, buscando aproveitar áreas pouco produtivas (SUERTEGARAY, 2011).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) atualmente o município de Cacequi possui uma área de 2.369,949 km² e uma população de 13.676 habitantes, sendo que 87% moram na zona urbana. Têm sua economia pouco diversificada, baseada no cultivo de arroz e soja, e na pecuária de gado de corte. Na última década teve maiores investimentos com a recente instalação de multinacionais para a produção de eucalipto para celulose, porém voltadas para o cultivo do eucalipto através de florestas plantadas, não na instalação de indústrias de beneficiamento da celulose.

De modo geral o município de Cacequi teve períodos de diferentes usos do solo, mas sempre com predomínio da pecuária. Este uso de forma intensa pode ter acelerado diversos problemas ambientais que ocorrem no município, dentre os principais a erosão.

O clima predominante da área de estudo é definido por Rossato (2011), na sua classificação climática do estado do Rio Grande do Sul (Figura 20), como subtropical mediantemente úmido, tendo uma variação longitudinal da temperatura em função da maritimidade e continentalidade. Cacequi também possui uma porção de seu território na área de transição do tipo climático subtropical mediantemente úmido e subtropical pouco úmido.

Figura 20 - Classificação climática do estado do Rio Grande do Sul.

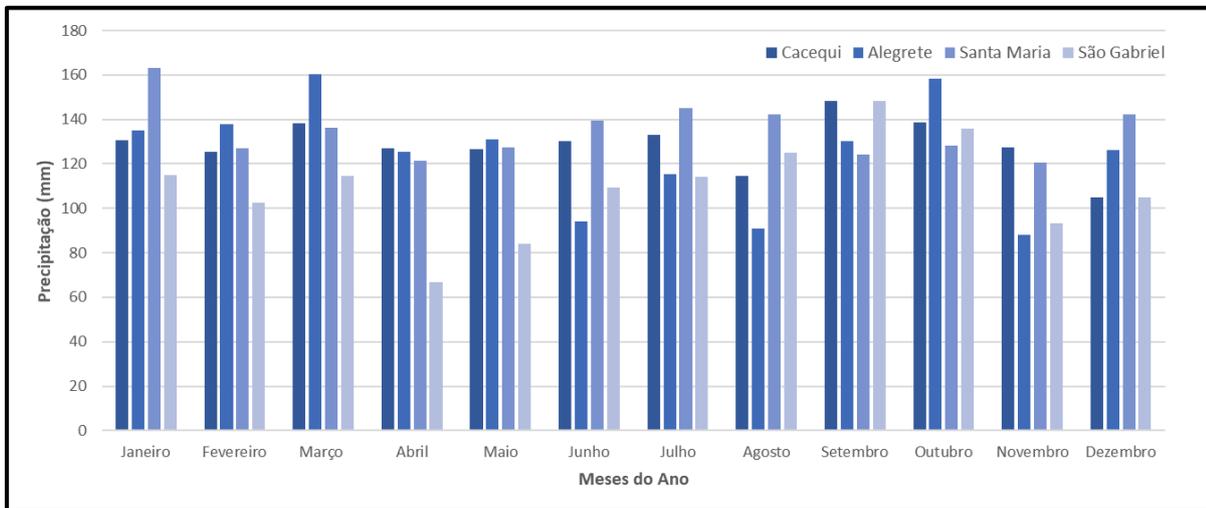


Fonte: Adaptado de Rossato (2011).

Rossato, na mesma obra, descreve este tipo climático pela sua característica de predomínio de sistemas polares (45 – 48% dos dias do ano) onde os sistemas frontais são responsáveis pela maior parte das precipitações. As precipitações anuais variam de 1.500 – 1.700 mm e as temperaturas têm médias anuais de 17 – 20°C, com maior amplitude no setor Oeste do estado, devido a continentalidade.

Através dos dados de precipitação analisados dos municípios de Alegrete, Cacequi, Santa Maria e São Gabriel, é possível observar que Cacequi, apesar de possuir uma porção de seu território em área de transição climática, possui mais características do tipo climático subtropical mediantemente úmido do que subtropical pouco úmido, com precipitação média anual de 1544mm. No gráfico da figura 21 é possível observar que os municípios de Alegrete, Cacequi e Santa Maria possuem precipitação semelhante, e o município de São Gabriel apresenta precipitação mais baixa.

Figura 21 - Média de chuva nas estações meteorológicas estudadas entre os anos de 1960 a 1990.



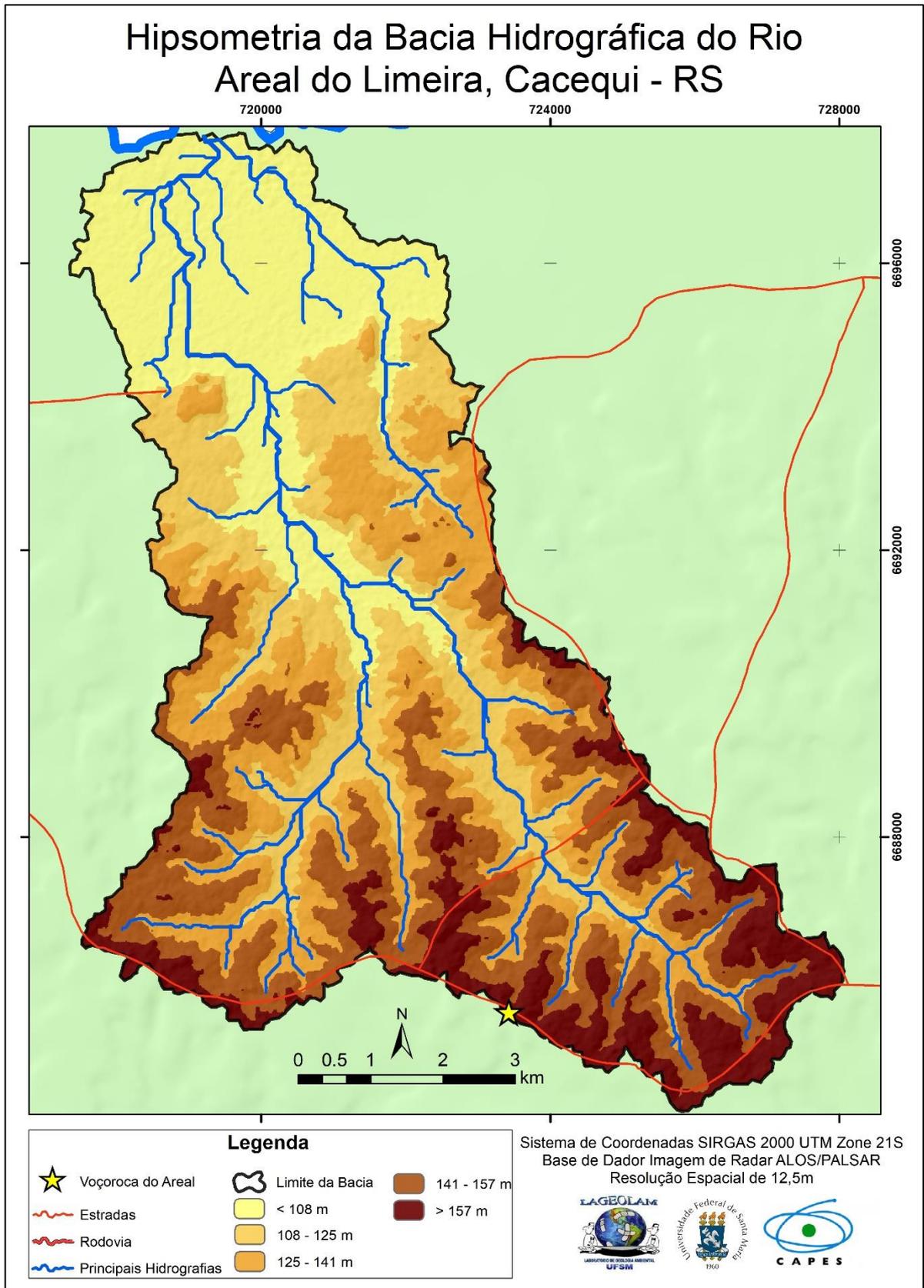
Fonte: INMET (1990) e ANA (2018).

Observa-se que de modo geral há uma boa distribuição das chuvas durante o ano, com uma média ligeiramente maior nos meses de setembro e outubro. A maior parte das chuvas que ocorrem no estado do Rio Grande do Sul são causadas pela Frente Polar Atlântica, que proporciona chuvas bem distribuídas espacialmente e com menor intensidade de chuvas convectivas (MONTEIRO, 1963; ROSSATO, 2011). A ocorrência destas chuvas frontais de longa duração e com volumes moderados, podem facilitar a erosão subsuperficial na área de estudo, visto que o solo recebe mais água, e permanece saturado por um maior período, podendo desencadear os processos de *piping* e também de movimentos de massa.

O relevo e Cacequi de acordo com os trabalhos de Rademann, Trentin e Robaina (2016) e Rademann (2017) é constituído de colinas, colinas suaves, planícies e alguns morrotes, estando a Bacia Hidrográfica do Rio Areal do Limeira (BHAL) em uma área de colinas em sua maior parte e com áreas de planície na foz do rio principal, próximo ao rio Ibicuí e também associado ao canal principal.

A BHAL possui 71,14 km² situadas em áreas de colinas e planícies com baixas altitudes e amplitudes altimétricas. Na foz da BHAL a altitude é de 92 metros, e na porção mais alta chega a valores de altitude de até 190 metros, marcando uma amplitude altimétrica na bacia de 98 metros, como representado no mapa da figura 22.

Figura 22 - Mapa hipsométrico da Bacia Hidrográfica Areal do Limeira.

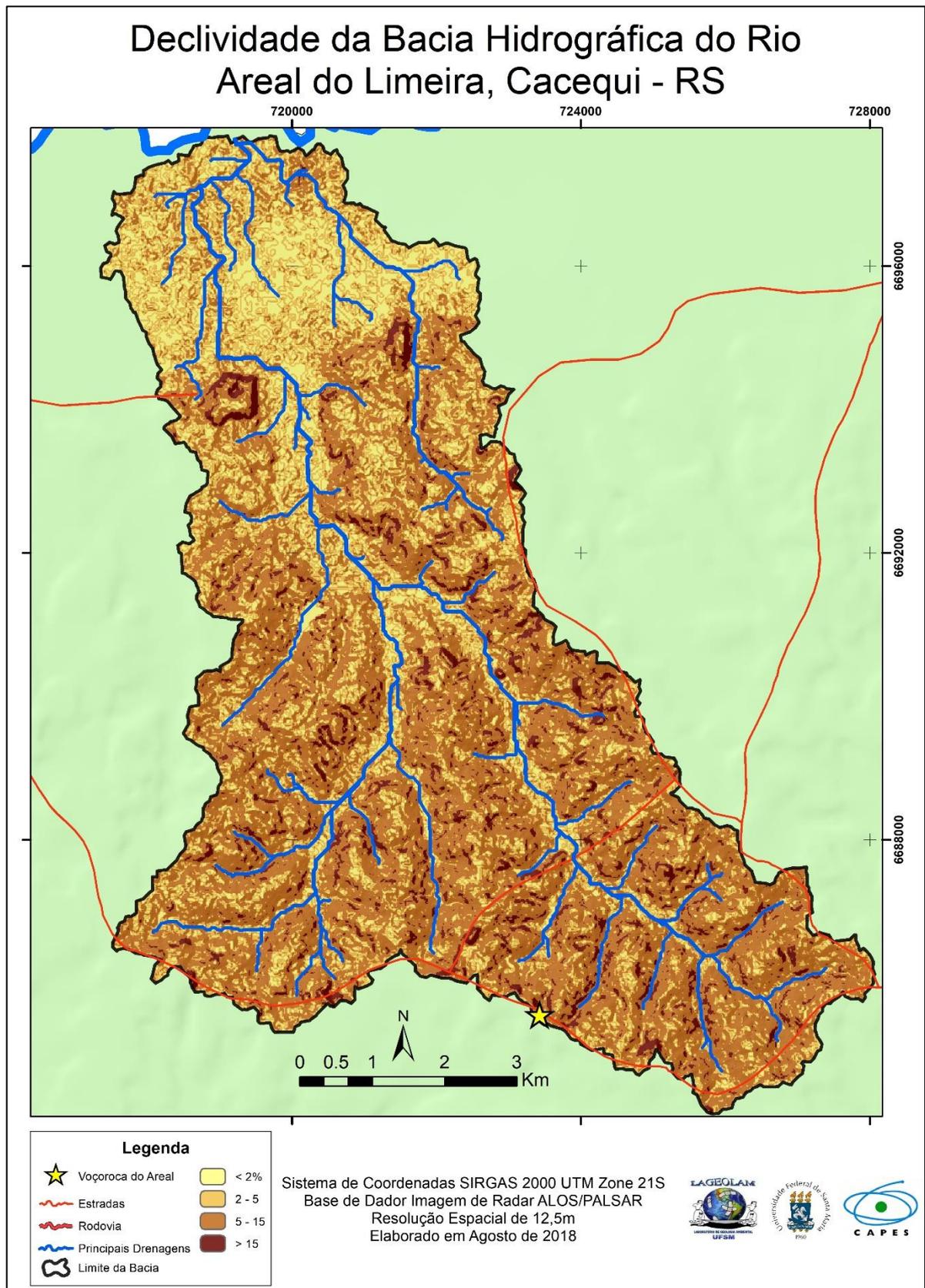


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Dentre as classes hipsométricas definidas, a com maior ocorrência, com 23,83% da área, é a de áreas inferiores a 108 metros, associada a área de planície do Rio Ibicuí, próximo a foz da bacia e também aos canais principais. As áreas onde há a ocorrência de voçorocamento na bacia, na porção Sul, predominam as classes de maiores altitudes, de 141 a 157 metros e superiores a 157 metros, que correspondem a 21,10% e 11,59% da área de estudo, respectivamente.

Associado às baixas altitudes e as baixas amplitudes altimétricas, a classe de declividade predominante, com 53,71%, é entre 5 a 15%, estas áreas correspondem às vertentes das colinas da área de estudo, conforme o mapa da Figura 23. As áreas de planície apresentam declividades até 2%, estando associadas as partes baixas da bacia hidrográfica e o canal de drenagem principal, correspondendo a 13,84% da área total. De modo geral a área de estudo possui declividades médias em torno de 6,9%, característico de relevo suave ondulado.

Figura 23 - Declividade da Bacia Hidrográfica Areal do Limeira.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Outra forma de análise do relevo foi apresentada por Jasiewicz e Stepinski (2013) onde realizaram uma proposta de classificação dos elementos do relevo de forma automatizada levando em consideração a textura do relevo buscando padrões que caracterizem elementos do relevo. Para isso, são analisados os valores dos pixels do MDE e o arranjo espacial das células, identificando os principais elementos fundamentais do relevo, classificados em dez classes, denominadas *geomorphons*.

Através da aplicação da metodologia de Jasiewicz e Stepinski (2013) foi realizado o mapeamento dos elementos *geomorphons* na Bacia Hidrográfica do rio Areal do Limeira onde foi possível observar um predomínio da classe *slope*, com cerca de 30% da área da bacia hidrográfica, como é possível observar na Tabela 2.

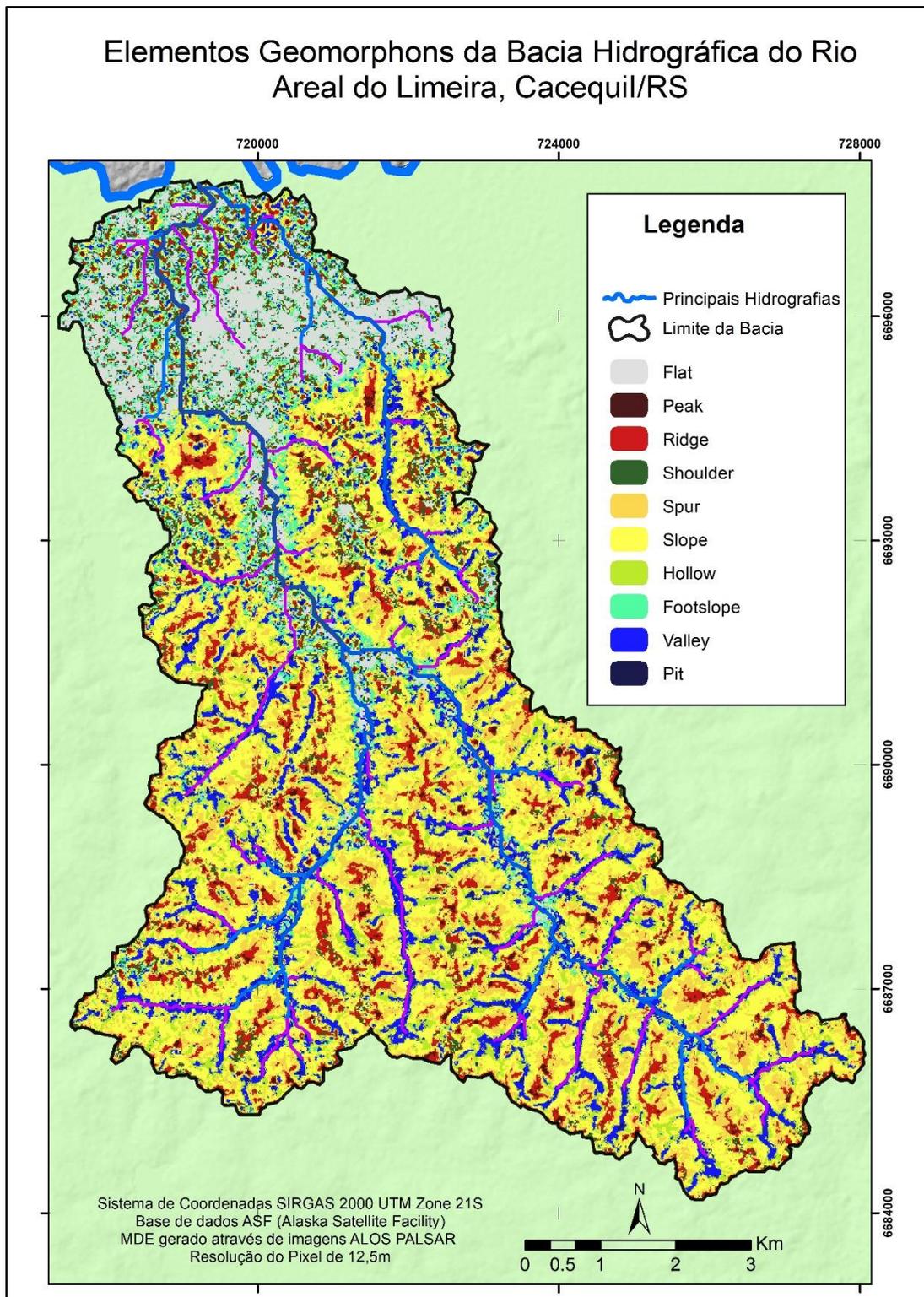
Tabela 2 - Distribuição dos elementos geomorphons na Bacia Hidrográfica Areal do Limeira.

Unidade	Área(km ²)	Porcentagem
Flat	6,37	8,95
Peak	0,66	0,93
Ridge	6,9	9,70
Shoulder	3,64	5,12
Spur	10,91	15,34
Slope	21,47	30,18
Hollow	7,36	10,35
Footslope	4,34	6,10
Valley	9,04	12,71
Pit	0,45	0,63

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A classe de *slope* é caracterizada por encostas das colinas da área de estudo. Apesar de possuírem uma grande área de abrangência não possuem grandes declividades, geralmente entre 5 a 15%. Constituem a maior classe de *geomorphons* pelo fato de o relevo no local possuir encostas longas e pouco declivosas. Estão localizadas nas áreas de interflúvio na bacia hidrográfica e por quase toda a sua extensão, excetuando as áreas planas à jusante, como é possível observar no mapa da Figura 24.

Figura 24 - Mapa dos elementos *geomorphons* da Bacia Hidrográfica do Areal do Limeira.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

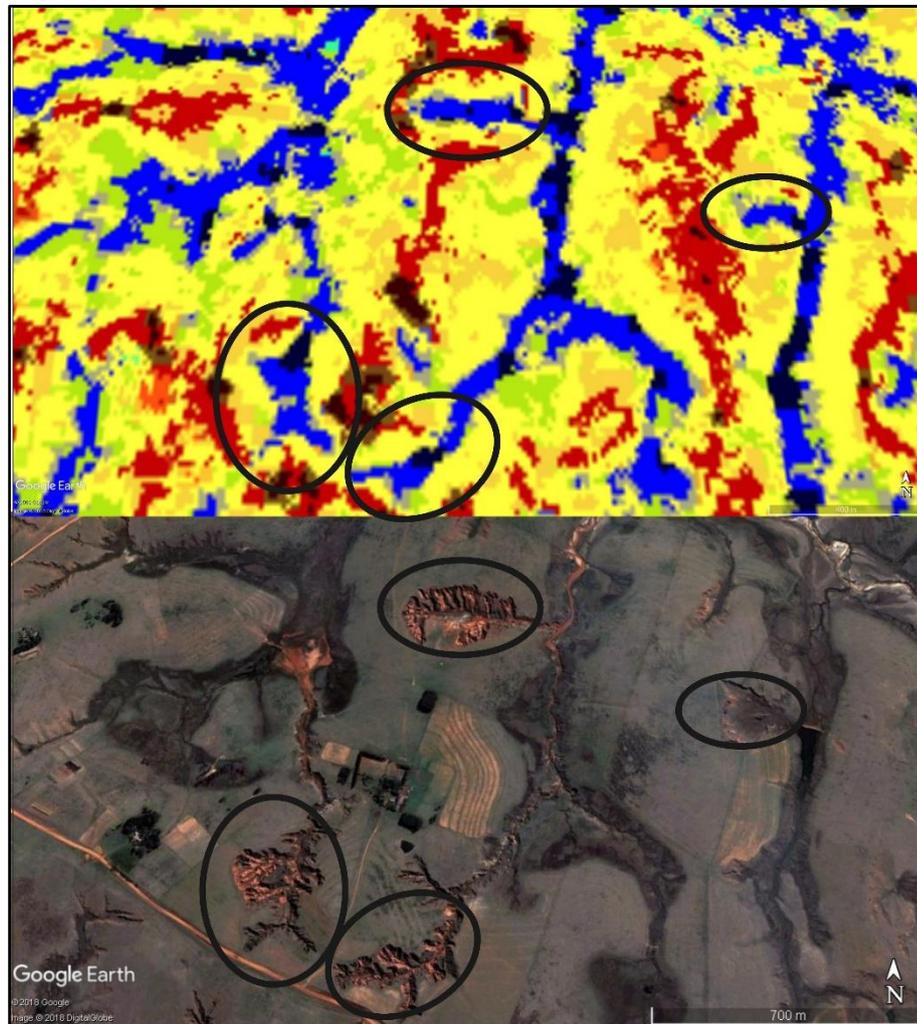
Como observado no mapa, as áreas mais baixas da bacia, próximo a foz do rio Areal do Limeira junto ao rio Ibicuí, e nas áreas próximas ao canal principal há um

grande predomínio das classes de *Flat* (Plano) e *Footslope* (base de encosta). Já nas porções mais altas e nos divisores de água, à montante da bacia hidrográfica se concentram os elementos *Ridge* (crista) e *Shoulder* (ressalto), marcando os principais divisores d'água nesta bacia.

Outros elementos do relevo bastante comuns na BHAL são *Spur* (crista secundária), *Valley* (vale) e *Hollow* (escavado). A classe de *Spur* representa as áreas divergentes das encostas, marcando pequenos divisores de água nas colinas. Já as classes de *Valley* e *Hollow* são associadas aos canais de drenagem em um substrato litológico composto por arenitos bastante friáveis, formando anfiteatros na porção mais altas da encosta (*Hollows*) e vales nas porções mais baixas da bacia, no caso das classes *Valley* e *Pit*.

Também é possível observar que nas áreas de associação dos elementos *Valley* e *Hollow* em áreas de canais de primeira ordem há, frequentemente, a ocorrência de voçorocamento, um dos grandes problemas ambientais da área de estudo. Observa-se na imagem da Figura 25 que estes elementos marcam a presença de voçorocas na área de estudo. Essa relação é possivelmente devida a essas feições estarem relacionadas à concentração de fluxo convergente na encosta e áreas com ocorrência de rebaixamento pela erosão subterrânea, comum nas áreas com voçorocas.

Figura 25 - Relação dos elementos geomorphons com a ocorrência de voçorocas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Também relacionado à conformação do relevo, a litologia da área de estudo é constituída, de acordo com mapeamento realizado pela CPRM (2006), por depósitos aluviais nas áreas mais baixas próximo às principais drenagem e arenitos eólicos na porção de colinas.

A ocorrência de voçorocas se dá nas áreas de arenitos eólicos, pertencentes a Formação Pirambóia (CPRM, 2006). A Formação Pirambóia é constituída predominantemente por arenitos finos a grossos moderadamente selecionados, avermelhados, com estratificações cruzadas de grande porte (Figura 26), interpretados como depósitos de dunas eólicas com um sentido de mergulho dos

forsets para SE (LAVINA et al., 1993). São arenitos bastante friáveis, com poucos ligantes e, portanto, são suscetíveis a erosão acelerada, como ressaltam Robaina, Scoti e Trentin (2013) que as porções eólicas, da Formação Pirambóia, estão sujeitas a processos erosivos acelerados, que geram ravinas e voçorocas.

Figura 26 - Ocorrência de rocha da Formação Pirambóia na Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Os solos que ocorrem na área de estudo, de acordo com mapeamento realizado pelo IBGE (2013) na escala 1:250.000, são os planossolos e argissolos. Nas áreas mais baixas e planas próximo aos canais de drenagem ocorrem os planossolos, com Horizonte A de cores acinzentadas, com permeabilidade lenta ou muito lenta e incremento de argila no Horizonte B.

Já nas porções de colina da bacia hidrográfica há a ocorrência de Argissolos Alumínicos, sendo solos moderadamente profundos e moderadamente drenados, possuindo um Horizonte B textural com incremento de argila. São solos, que devido a mudança textural entre os horizontes, apresentando um Horizonte A arenoso e um B

argiloso, são bastante suscetíveis à ocorrência de erosão. Nas áreas deste tipo de solo que se encontram diversas voçorocas com grande desenvolvimento vertical e lateral, inclusive a Voçoroca do Areal.

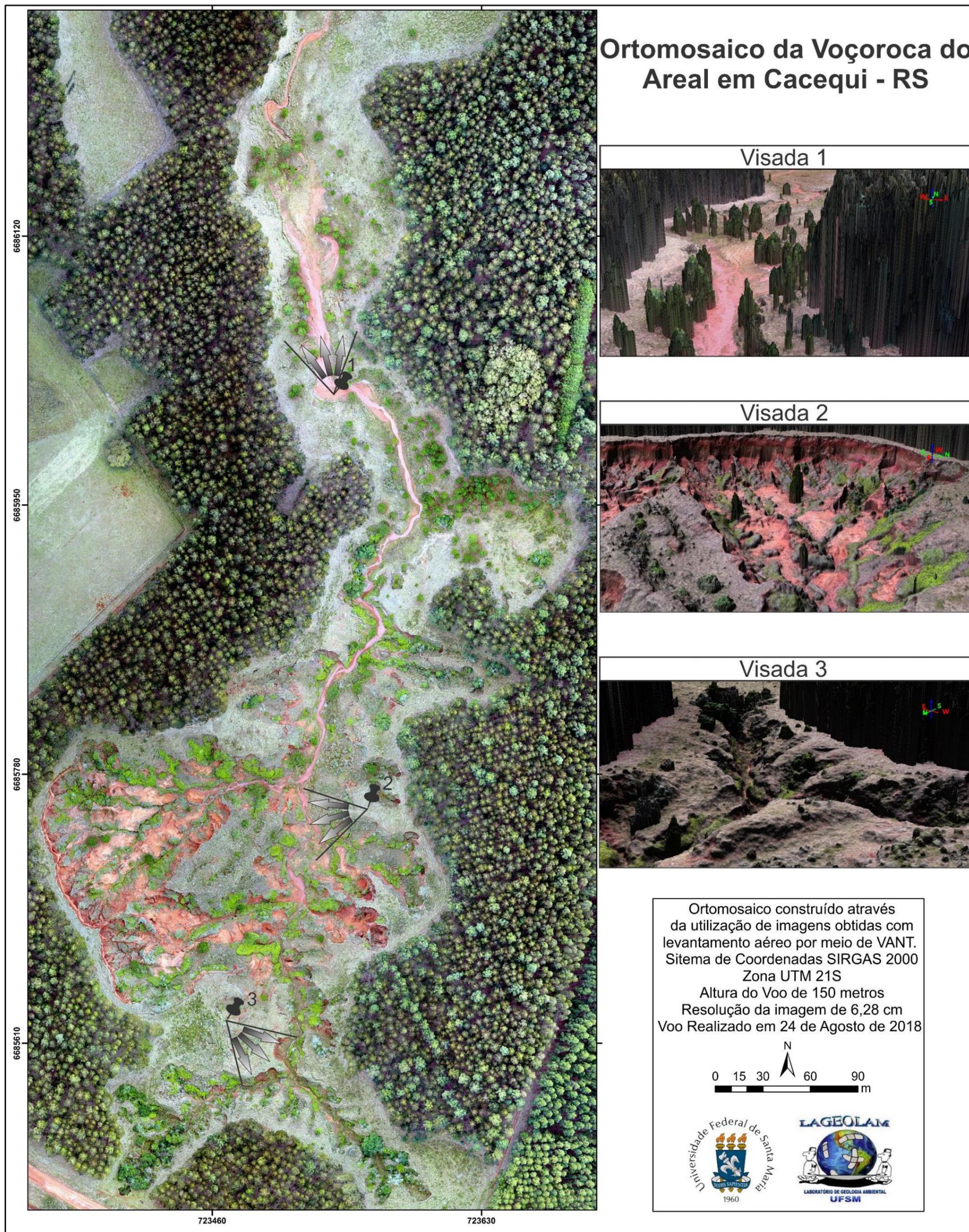
De modo geral, a BHAL apresenta características de relevo, solos e litologia suscetíveis a erosão nas porções do terço médio e superior da bacia. Estas áreas apresentam litologias friáveis, com poucos ligantes, solos com mudança textural significativa entre os horizontes e ainda declividades predominantes de 5 – 15%, propícia para a ocorrência da erosão. Ainda somado a este conjunto de fatores, a região climática onde se localiza a BHAL possui chuvas bem distribuídas durante o ano, com média superior a 1.500mm por ano. Este conjunto de fatores fisiográficos da bacia hidrográfica, acaba desencadeando diferentes mecanismos de ação erosiva tanto superficiais como subsuperficiais e resultando em feições erosivas de diversas magnitudes, como sulcos, ravinas e sobretudo voçorocas.

4.1.2 Características gerais da Voçoroca do Areal e seu entorno

No aerolevanteamento realizado foram mapeados 67,78ha, sendo que 6,53ha correspondem a área do limite da Voçoroca do Areal e o restante constitui o seu entorno. A voçoroca possui aproximadamente 920 metros de comprimento e 250 metros de largura, sendo uma feição de grande proporção e causadora de grande impacto ambiental.

A voçoroca está situada próximo ao divisor de águas da BHAL em uma área de colina onde tradicionalmente era recoberta de campos nativos voltados para a criação de gado. Recentemente, a partir do ano de 2004 (SILVA, 2012), com o ingresso das empresas de papel e celulose no sul do Brasil grande parte das áreas de campo foram ocupadas pela silvicultura. As áreas escolhidas para a plantação de espécies exóticas foram as de maior fragilidade ambiental, devido ao seu preço mais baixo, como as áreas de ocorrência de voçorocas (MARCHIORI e ALVES, 2010; SUERTEGARAY e MORELLI, 2010) a exemplo da área de estudo representada no ortomosaicos da Figura 27.

Figura 27 - Ortomosaico da Voçoroca do Areal em Cacequi – RS.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

É possível observar na imagem a floresta plantada em quase todo o entorno da Voçoroca do Areal, e por vezes sendo encontradas árvores dentro da voçoroca. O impacto deste tipo de floresta em feições erosivas de grande porte ainda é pouco conhecido, porém trabalhos realizados na Nova Zelândia (PARKNER et al., 2006; MARDEN et al., 2012; MARDEN et al., 2018) apontam que a plantação de árvores exóticas, são pouco efetivas no controle de grandes voçorocas ou ainda podem estar relacionadas ao aumento da magnitude das mesmas necessitando de mais trabalhos sobre o real impacto deste tipo de vegetação em áreas suscetíveis à erosão no sudoeste do Rio Grande do Sul.

Quanto a forma da voçoroca, pode ser definida como composta de acordo com a classificação proposta por Ireland et al. (1939). A morfologia da Voçoroca do Areal possui aspectos lineares em algumas ramificações mais a montante, forma bulbiforme nas áreas com maior desenvolvimento vertical e ainda algumas ramificações com forma paralela, sendo assim, no âmbito geral, possui uma forma composta.

De acordo com a classificação de Oliveira (1989), a voçoroca estudada pode ser considerada uma voçoroca integrada, onde ocorrem tanto processos subsuperficiais relacionados a água subterrânea, quanto processos superficiais e movimentos de massa em toda a porção da vertente, desde a base até o divisor topográfico. Ainda, devido a sua extensão e magnitude, possui um canal de drenagem em seu interior que é conectado à rede de drenagem da bacia hidrográfica, podendo ser considerado um canal de primeira ordem.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO: GRANULOMETRIA, TEXTURA E LIMITES DE ATTERBERG

A compreensão dos aspectos físicos e morfométricos gerais da voçoroca auxiliam no entendimento da dinâmica dos processos que atuam na área. Deste modo foram analisados alguns parâmetros em nível de detalhe da Voçoroca do Areal que visam subsidiar sua análise.

4.2.1 Granulometria e textura do solo

Conforme detalhado no capítulo 3.1.2 foram coletadas amostras para a análise granulométrica em quatro pontos do perfil de solo na voçoroca. No horizonte A, houve

uma distribuição granulométrica de 76% na fração areia, 9% na fração silte e 15% de fração argila, classificado como textura franco arenosa. A grande quantidade de materiais da fração areia torna este horizonte menos resistentes à erosão, visto que a coesão desse material é menor sendo principalmente composto por Quartzo resultante da decomposição da rocha matriz. A fração argila possui contribuição da matéria orgânica, devido a cobertura de vegetação rasteira na área da voçoroca.

Outro aspecto importante sobre o horizonte A é a quantidade significativa de partículas no tamanho areia média (0,250mm) e areia fina (0,125mm), representando 37,5% e 29,8% da amostra. A grande quantidade de partículas na faixa de silte muito fino até areia média, cerca de 82% da amostra, e a pequena quantidade de material da fração argila (15%), torna evidente a fragilidade e a suscetibilidade do solo para a erosão através do escoamento superficial.

Quando analisado os dados granulométricos do horizonte AB é possível observar um aumento das frações areia e silte em relação ao horizonte A, tendo a distribuição granulométrica em 78% areia, 10% silte e 12% argila, caracterizando um horizonte de textura franco arenosa.

O incremento da fração areia em relação ao horizonte A se deu principalmente na porção de areia fina, com 33,06% da amostra no Horizonte AB, porém a forma da curva granulométrica se manteve semelhante à do horizonte A. Desta forma, o horizonte AB é tão suscetível à erosão quanto o horizonte A, sem grandes aglutinantes e grande porcentagem de areia fina e silte.

O horizonte B apresenta características granulométricas distintas dos horizontes superiores, contendo 31% de material na fração areia, 10% na fração silte e 59% na fração argila, caracterizando uma textura argilosa. Devido à grande concentração de argila este horizonte é bastante resistente à erosão, tendo a argila como o principal ligante para a manutenção da estrutura do solo.

Esse grande incremento de argilas do horizonte AB para o B caracteriza uma mudança textural abrupta, com um B textural característico de argissolos. A mudança textural influencia no comportamento hidrodinâmico da infiltração da água no solo, apresentando maiores resistências para a infiltração no horizonte B, podendo formar um ponto de ruptura do movimento vertical da água no solo, para um ponto de escoamento subsuperficial no contato entre os horizontes AB e B.

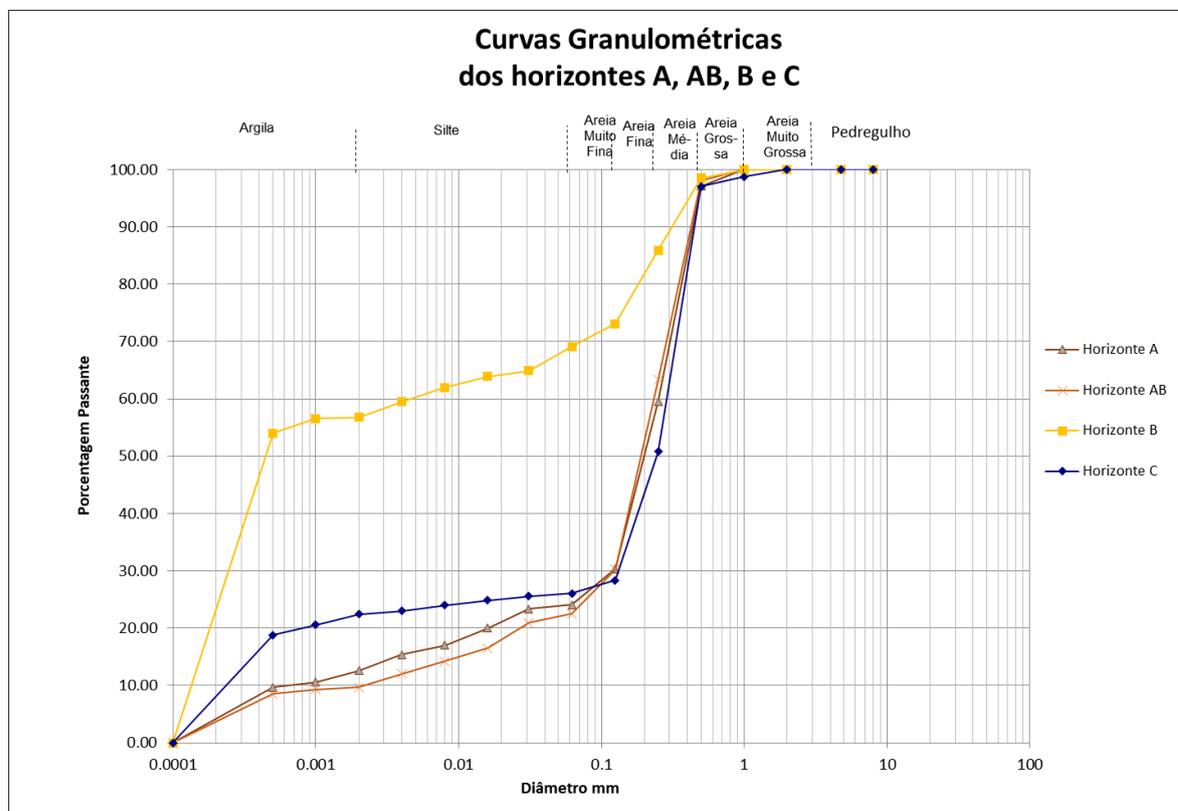
Já o horizonte C, o horizonte mais próximo da rocha matriz, apresentou uma distribuição granulométrica de 23% de argila, 3% de silte e 76% de areia, tendo uma

textura franco argilo-siltosa. Essa composição granulométrica com grande predomínio de areias, principalmente areia média (46,25%), é relacionado à composição da rocha matriz, um arenito eólico da Formação Pirambóia.

A maior ocorrência de material da fração argila do horizonte C em comparação com os horizontes A e AB é devido à alteração da rocha, com a transformação dos feldspatos em argilominerais. Porém, mesmo com a ocorrência de 23% de partículas da fração argila, o horizonte C tem significativa presença de areias (76%), o que o torna ainda bastante suscetível a erosão superficial, no entanto, por estar em profundidades superiores a 150cm, só está exposto na superfície onde a erosão está bastante avançada.

Quando comparadas as curvas granulométricas dos quatro horizontes analisados (Figura 28) é possível observar que os horizontes A e AB têm curvas bastante semelhantes, com acentuado crescimento na frequência acumulada de areias médias e finas, marcando a característica de textura franco arenosa dos horizontes e a pequena quantidade de grãos na fração argila.

Figura 28 - Comparação das curvas granulométricas dos diferentes horizontes da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Já o horizonte B possui uma característica diferente dos demais, com uma grande concentração de partículas da fração argila, que se deve à migração das argilas dos horizontes mais superficiais (A e AB). Desta forma os horizontes A e AB fornecem argila para o horizonte B, causando a ocorrência de horizontes superficiais mais arenosos e o logo abaixo, um B textural, com alta concentração de argila.

Mais abaixo no perfil de solo, o horizonte C possui algumas características da rocha, com a alteração de material formando alguns minerais de tamanho argila, mas ainda uma grande concentração da fração areia fornecido pelo substrato arenítico. Desta forma sua curva se situa entre os horizontes mais superficiais e o horizonte B, ficando evidente a sua característica mais argilosa que os horizontes A e AB e mais arenosa que o horizonte B.

Portanto, ao observar o perfil de solo na Voçoroca do Areal é possível constatar uma mudança textural abrupta no contado de AB com B, que quando associado ao solo bastante arenoso, pode ocorrer erosão subsuperficial, transportando partículas do horizonte AB, causando um rebaixamento na superfície e podendo iniciar um processo erosivo linear no topo do perfil de solo, removendo as camadas superficiais. Porém quando as camadas superficiais são erodidas e o horizonte B é exposto à erosão superficial, a tendência é uma diminuição da erosão, devido à alta concentração de argila neste horizonte.

4.2.2 Limites de Atterberg

A realização dos ensaios referentes aos Limites de Atterberg tiveram como objetivo compreender a consistência do solo, permitindo a sua análise de acordo com a variação da umidade. O horizonte AB, que é o horizonte com maior concentração de areia, apresentou o menor limite de contração e de liquidez (Tabela 3), bem como uma pequena diferença entre os limites, evidenciando sua característica de solo arenoso, apresentando característica fluida com pouco incremento de umidade.

Tabela 3 - Limites de Atterberg dos horizontes do solo da Voçoroca do Areal.

Horizonte	Limite de Contração	Limite de Plasticidade	Limite de Liquidez
A	12%	Não Plástico	15,80%
AB	11,38%	Não Plástico	13,50%
B	18,57%	22,04%	45%
C	16,45%	Não Plástico	25%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Ao analisar os limites de contração, plasticidade e liquidez dos quatro perfis de solo, é possível observar uma relação com a granulometria dos horizontes, sendo os perfis com granulometria mais grossa com LL mais baixos e os perfis com granulometria fina LL mais altos. Ainda, devido à alta concentração de argila e silte, o único perfil de solo que apresentou plasticidade foi o horizonte B, com o LP em aproximadamente 22%. O horizonte B, apresenta também o maior LL, mostrando que é um horizonte estável, onde as argilas funcionam como aglutinante do solo.

O horizonte A, semelhante ao horizonte AB, possui LC e LL muito próximos e baixos, sendo um horizonte bastante instável, podendo atingir facilmente o estado de fluido com o Limite de Liquidez em 12%, pois é o horizonte mais superficial e mais exposto a infiltração da água. Já o horizonte C, apresenta LC e LL abaixo do horizonte B porém, como está em profundidades superiores a 200 cm, têm menor umidade em estado natural, portanto apesar de ser mais instável que o horizonte B e menos instável que os horizonte A e AB, ele se mantém em estado semissólido na maior parte do tempo.

Desta forma se analisado o perfil de solo, através da sequência dos horizontes, é possível observar o horizonte mais instável, o AB, logo acima do mais estável, o B. Esta diferença de consistência dos materiais dos horizontes pode acarretar em uma instabilidade da vertente, com o horizonte B, devido a sua granulometria e características hidrológicas, dificultar a infiltração de água, aumentando absorção de água no horizonte AB e facilitando o alcance do índice de umidade crítico para o Limite de Liquidez do horizonte AB, desencadeando a saturação do material deste horizonte. Assim, com a liquefação do material, ou de parte do material, do horizonte AB, ele pode ser transportado deixando um espaço vazio entre a camada superficial e o

horizonte B, caracterizando a erosão subsuperficial no perfil de solo, com a formação de *pipings* e degraus de abatimento na superfície.

Portanto se observa que há uma fragilidade à erosão no solo da Voçoroca do Areal, tanto nos aspectos de escoamento superficial, observados na análise da granulometria, quanto no âmbito subsuperficial através do comportamento do solo com a variação da umidade. Ainda, devido ao limite de plasticidade no horizonte B, cerca de 22%, e o limite de liquidez baixo, de 22% no horizonte C, torna possível a ocorrência de movimentos de massa em eventos climáticos de chuva intensa, potencializando a capacidade de desenvolvimento vertical e lateral nas cabeceiras da voçoroca.

4.3 MORFOMETRIA DA VOÇOROCA DO AREAL

A Voçoroca do Areal possui aproximadamente 920 metros de comprimento e 250 metros de largura, abrangendo dentro do seu limite uma área de 6,53ha. Para fins de análise foram divididas as áreas de voo, correspondente a área total do entorno da voçoroca, totalizando 67,78ha e a área dentro do limite da voçoroca, 6,53ha. Esta separação visa compreender de forma distinta o contexto da ocorrência da voçoroca na colina e as feições no seu interior.

4.3.1 Hipsometria

Na análise da hipsometria foi utilizado o MDT gerado no procedimento detalhado na seção 3.1.3, onde foram obtidos pontos de controle para maior acurácia do modelo. Os três pontos de controle obtidos através do rastreamento com GPS geodésico apresentaram uma grande precisão visto que quando comparadas as suas coordenadas reais com as coordenadas calculadas apresentam diferença inferior a 1 metro, como representado na Tabela 4.

Tabela 4 - Erros encontrados nas coordenadas planialtimétricas.

	Erro X (cm)	Erro Y (cm)	Erro Z (cm)	Total (cm)
Ponto 1	-49,5111	39,2611	8,7394	63,79
Ponto 2	26,6284	-89,083	3,79444	93,0551
Ponto 3	18,6314	52,7183	-3,43637	56,0192
Total	34,1933	63,9178	5,84761	72,7245

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

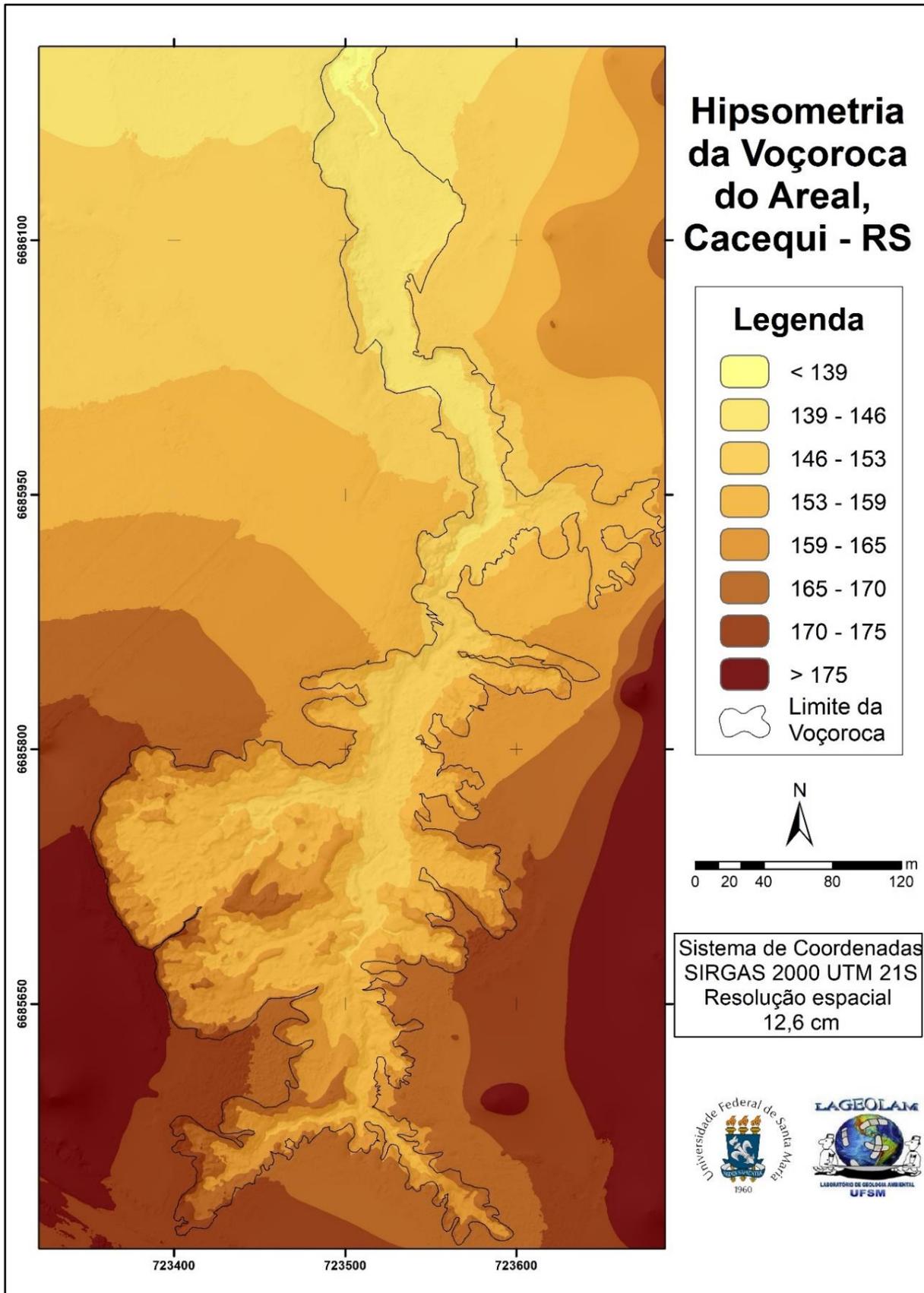
Como exposto na tabela, os erros encontrados nos pontos de controle variam de 89,08 cm a 18,63 cm nas coordenadas planimétricas com um erro aproximado de 34 cm na coordena X e 64 cm na coordena Y. Já na coordena Z, que corresponde a elevação, os erros variam de 3 a 8 cm. Considerando que a área mapeada é de 67Ha, o erro encontrado é bastante satisfatório para os pontos de controle.

Quando aplicada a fórmula do erro médio quadrático, considerando as coordenadas obtidas por rastreamento GPS e as coordenadas calculadas do modelo, o erro planimétrico é de 72,489 cm, e o erro altimétrico de 5,84 cm, tendo um erro padrão total calculado de 72,7245 cm.

Deste modo, o MDT gerado da Voçoroca possui uma acurácia excelente, que quando enquadrado no padrão de exatidão cartográfico brasileiro (Decreto n. 89.817 de 20 de jun. de 1984) atinge a classe A, a de maior qualidade. Desta forma, é possível afirmar que a qualidade e acurácia dos dados permite uma análise consistente das características e feições da voçoroca.

A hipsometria da área de estudo possui como menor cota altimétrica o valor de 133,7 m próximo ao ponto onde a voçoroca já se estabelece como um canal de drenagem de primeira ordem. O ponto mais elevado está em uma altitude de 204,2m no divisor de água da BHAL e próximo às cabeceiras da Voçoroca do Areal. Sendo assim, a área de estudo possui uma amplitude altimétrica total de 70,5 m que foi dividida em oito classes distintas conforme o mapa da Figura 29.

Figura 29 - Mapa hipsométrico da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Na área de estudo a classe hipsométrica com maior ocorrência (Tabela 5) é no intervalo de 139 a 146 metros, representando 14,51% da área (ou 9,83 ha) marcando um patamar plano, de predomínio de deposição de material, já na porção mais baixa da área e o fundo da voçoroca no terço mais baixo da Voçoroca do Areal. Já na área que compreende o limite da voçoroca, a classe de 139 a 146 metros se apresenta em 15,87% da área, porém não é a de maior ocorrência.

Classe	Área Total (ha)	Porcentagem Total	Área na Voçoroca (ha)	Porcentagem na Voçoroca
< 139	9.09	13.42%	0.26	3.96%
139 -146	9.83	14.51%	1.04	15.87%
146 - 153	8.19	12.09%	1.20	18.33%
152 - 159	7.00	10.33%	2.00	30.57%
159 - 165	8.49	12.53%	1.47	22.50%
165 - 170	8.22	12.12%	0.47	7.15%
170 - 175	9.49	14.00%	0.10	1.60%
> 175	7.46	11.01%	0.00	0.03%
Total	67.78	100%	6.53	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

No interior da voçoroca a classe hipsométrica que predomina, com cerca de 30,57% da área (2 ha) é de 153 a 159 metros, que representa um patamar intermediário na voçoroca, presente nas áreas de encosta da porção mais baixa, áreas de ocorrência de sulcos e patamares na porção central e o fundo da voçoroca na porção mais próxima a cabeceira.

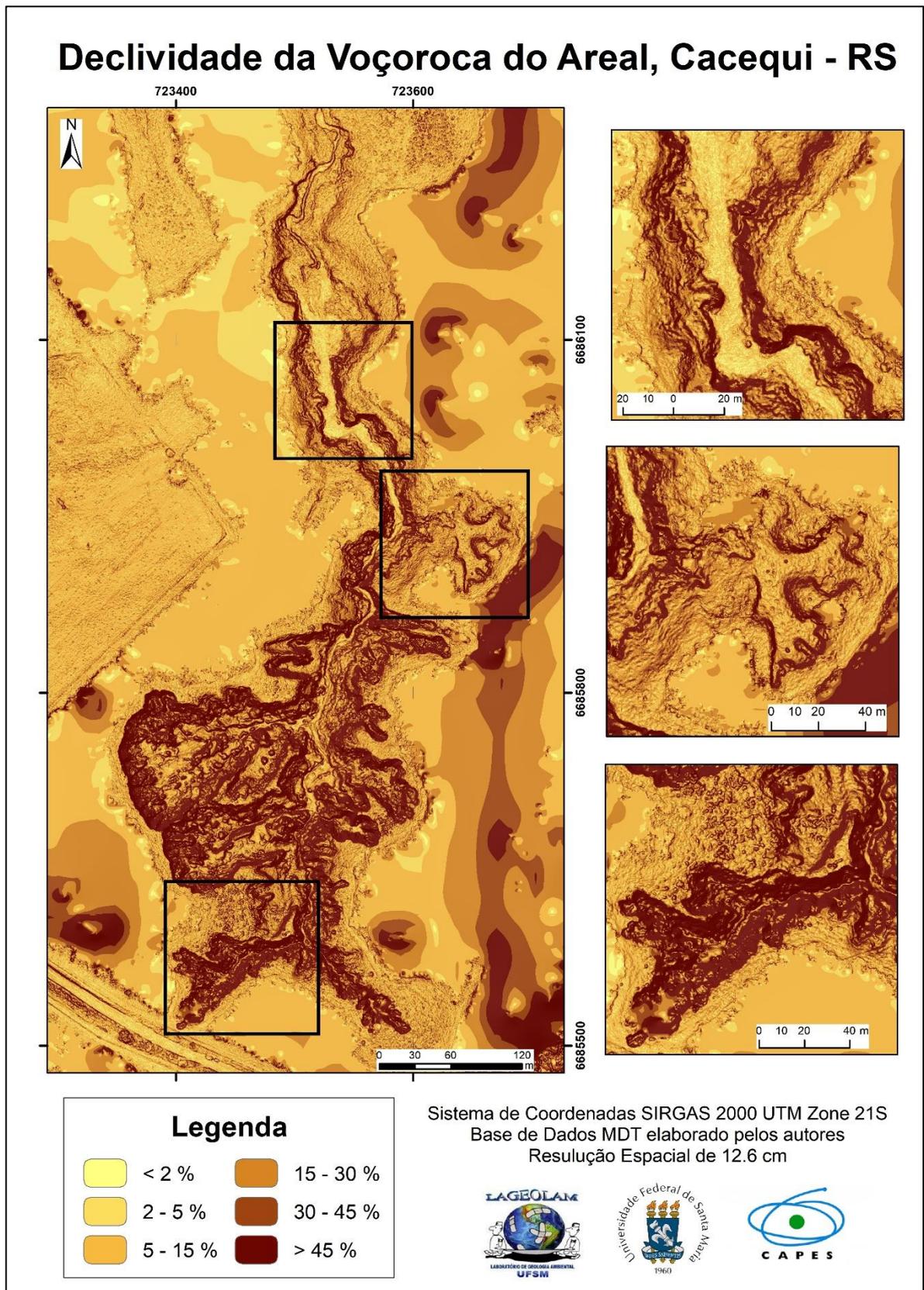
A segunda classe com maior ocorrência na voçoroca é de 159 a 165 metros, representando cerca de 22,5% da área, ou 1,47 ha, representando em sua maior parte a porção de borda e encostas da voçoroca nas porções médias e superiores.

As porções mais altas, superiores a 175 metros se concentram nos divisores topográficos da área mapeada, tendo uma porcentagem de 11,01% da área total, porém dentro do limite da voçoroca esta classe representa apenas 0,03%, ocorrendo apenas na porção oeste da voçoroca junto ao seu limite, evidenciando que a ocorrência da voçoroca está abaixo do topo das colinas.

4.3.2 Declividade

Localizada em uma área de colinas, a área de estudo possui um predomínio de declividade de 15,02% devido a vertente alongada e a conformação do relevo no entorno da voçoroca. Na área que corresponde a Voçoroca do Areal a declividade média é de 56,07% pelo fato da grande concentração de encostas íngremes e declivosas da voçoroca, como observado na Figura 30.

Figura 30 - Mapa de declividade da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

De modo geral a declividade que se apresenta em maior quantidade na área de estudo é de 5 a 15%, representando mais de 40% da área total (Tabela 6). Esta classe está bem distribuída, com concentração apenas em porções da colina próximo à voçoroca. Já dentro da voçoroca, essa classe representa apenas 13,15% da área total, estando presente nas áreas onde ocorrem sulcos dentro da voçoroca na porção oeste, nas transições mais sutis entre o topo do limite da voçoroca e o seu fundo e, ainda em algumas porções do fundo.

Tabela 5 - Distribuição das classes de declividade na área de estudo e na Voçoroca do Areal.

Classe	Área total (ha)	Percentagem Total	Área na Voçoroca (ha)	Percentagem na Voçoroca
< 2%	2,32	3,43%	0,05	0,79%
2 - 5%	8,06	11,89%	0,19	2,98%
5 -15%	27,22	40,16%	0,86	13,15%
15 - 30%	16,60	24,50%	1,23	18,87%
30 - 45%	6,46	9,53%	1,01	15,43%
> 45%	7,12	10,50%	3,18	48,78%
Total	67,78	100%	6,53	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Dentro do limite da voçoroca a classe que predomina é a de declividades superiores a 45%, estando presente em 48,78% (ou 3,18 ha) da Voçoroca do Areal. Estas declividades estão associadas às feições das encostas laterais da voçoroca em toda a sua extensão, porém com maior concentração na porção oeste onde há uma escarpa mais acentuada e nas porções mais altas das cabeceiras.

Em ambos os casos, na área total mapeada e dentro da voçoroca, a classe com menor expressão é inferior a 2% de declividade, correspondendo a 3,43% e 0,79%, respectivamente. Essa classe está relacionada com as porções mais baixas da voçoroca, nas áreas onde há deposição do material erodido e no fundo mais plano da voçoroca.

A segunda classe com maior ocorrência dentro da Voçoroca do Areal é de 15 a 30%, equivalente a 18,87% da área da voçoroca. A sua ocorrência é bem dispersa, com pequena concentração nas áreas de rebaixamento, causadas possivelmente pela

ocorrência de *piping*, onde as paredes da voçoroca são menos íngremes e o fundo mais achatado.

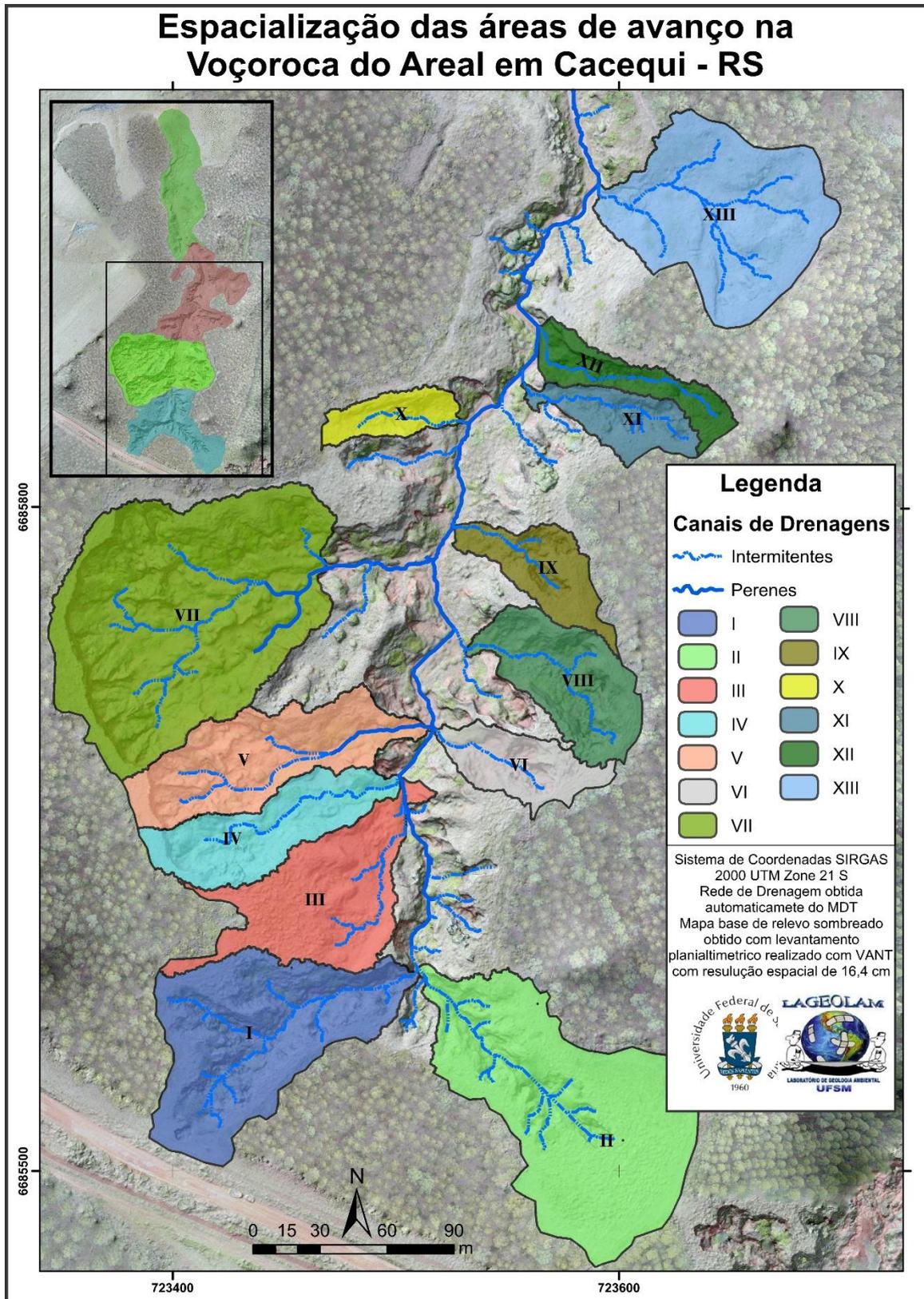
As declividades de 30 a 45% representam 15,43% da área da voçoroca e se apresentam bastante dispersas na voçoroca tanto em áreas de encosta quanto em áreas da base mais declivosas. Já as áreas de 2 a 5%, que correspondem a 2,98% da área da voçoroca se concentram na porção mais baixa, em áreas de fundo plano, com material de deposição, próximo ao pequeno canal que se estabelece na voçoroca.

De forma geral as declividades mais acentuadas estão associadas às cabeceiras da voçoroca, e quanto mais a montante maior a concentração de declividades acima de 30%. A porção central e superior da voçoroca possui um fundo com mais ressaltos, como sulcos e ravinas, resultando em maiores declividades, já na porção mais baixa e em áreas de rebaixamento o fundo tende a ser mais plano, com ocorrência das classes mais baixas de declividade. As paredes laterais da voçoroca se apresentam de forma bastante homogênea quanto a declividade, com predomínio das classes de 30 a 45% e, principalmente, superior a 45%, desde às porções mais a montante e até mesmo na porção mais baixa, até o ponto onde a voçoroca se conecta ao canal de drenagem e as declividades mais baixas predominam.

4.3.3 Morfometria das áreas de avanço erosivo

De acordo como descrito na metodologia, foram definidas 13 diferentes áreas de avanço da voçoroca, localizadas principalmente na metade superior e na porção central da voçoroca (Figura 31). Estas são as áreas da voçoroca com maior potencial erosivo e conseqüentemente onde os diferentes mecanismos estão mais ativos.

Figura 31 - Mapa de localização das áreas de avanço erosivo na Voçoroca do Areal em Cacequi - RS.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

As áreas de avanço apresentam diferentes formas, mas com o predomínio de formas alongadas, possuindo paredes abruptas indicando a ocorrência de erosão linear e cabeceiras semicirculares indicando a existência de movimentos de massa. Esta característica predominantemente alongada se reflete nos baixos valores de IC, com o valor mínimo de 0,13 na área III, seguido da área XII e XI, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 6 - Morfometria das áreas de avanço da Voçoroca do Areal.

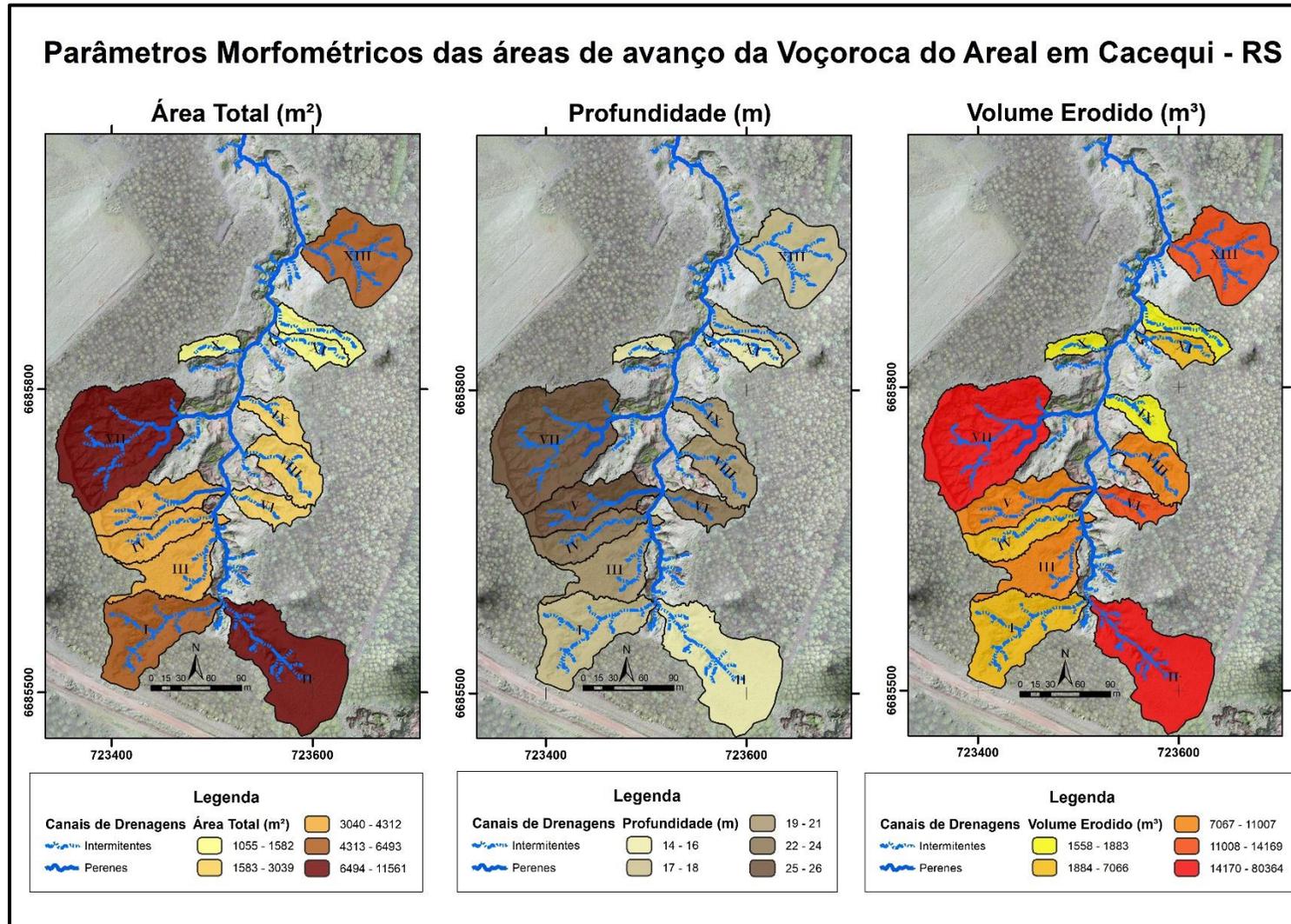
Área de Avanço	Área (m ²)	IC	Comprimento (m)	Largura (m)	Prof. Max. (m)	Profundidade Média (m)	Volume Erodido (m ³)
I	6.492,81	0,34	137,50	75,54	18,0	2,88	4.288,38
II	9.096,19	0,42	155,00	99,99	16,0	1,04	18.970,92
III	4.311,83	0,13	137,22	63,57	20,0	1,01	8.280,30
IV	3.063,86	0,22	116,63	37,24	23,5	2,51	7.065,89
V	4.206,09	0,21	139,38	48,44	25,0	3,37	11.007,45
VI	1.785,14	0,26	82,59	37,76	22,0	3,95	14.168,79
VII	11.561,00	0,38	136,33	127,88	25,5	4,11	80.363,83
VIII	3.039,23	0,31	88,15	46,50	21,0	3,63	11.007,45
IX	1.792,54	0,23	96,92	42,12	19,5	1,04	1.883,07
X	1.055,11	0,24	62,69	21,22	14,0	1,47	1.557,68
XI	1.539,33	0,21	85,10	33,19	14,5	1,75	2.706,76
XII	1.581,98	0,16	99,56	29,72	16,5	1,15	1.823,04
XIII	6.306,46	0,51	108,53	100,10	17,5	0,43	13.098,71

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Já as áreas de avanço associadas aos maiores valores de IC correspondem às porções da voçoroca onde há maior ocorrência de movimentos de massa que são na sua maioria circulares, formando uma cabeceira semicircular como nos casos da área VII com IC de 0,38. Também ocorrem valores maiores de IC em áreas de rebaixamento como no caso da área XIII, com o maior valor da voçoroca, de 0,51.

A extensão das áreas de avanço da voçoroca varia de 1.055,1 m² (X) a 11.561 m² (VII), tendo como média 4.294,7 m². Algumas grandes áreas de avanço são à montante da voçoroca, as quais possuem uma área de captação maior, como nos casos das áreas I e II, representadas no mapa da Figura 32. Já a maior área é a VII a qual corresponde a porção central da voçoroca, onde ocorrem movimentos de massa de grande magnitude, avançando a montante e aumentando a sua área.

Figura 32 - Mapa dos parâmetros morfométricos das áreas de avanço da Voçoroca do Areal em Cacequi - RS.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

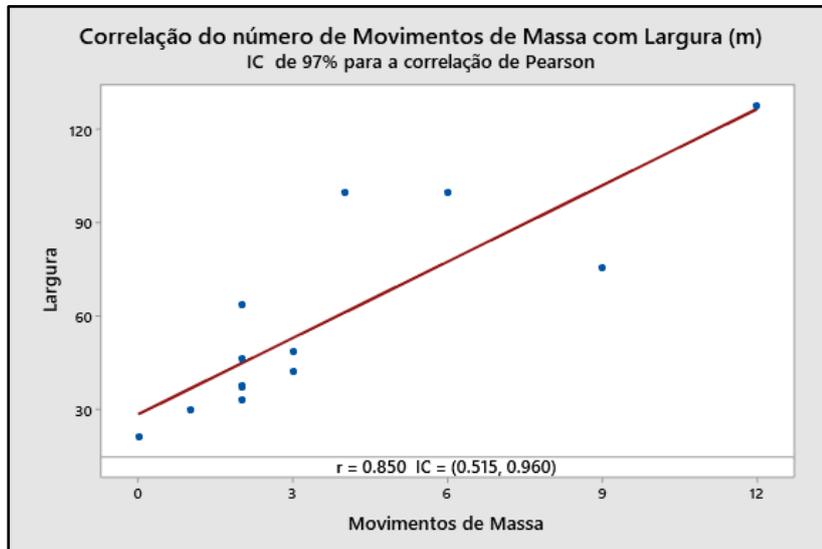
As áreas de avanço mais profundas se localizam na porção central da voçoroca atingindo 25,5 metros na área VII, seguido das áreas V e IV com 25 e 23,5 metros, respectivamente. Esta porção da Voçoroca do Areal é onde os movimentos de massa são mais intensos, conseqüentemente são as áreas onde também há um grande volume erodido, sendo a área VII a maior de toda a voçoroca, com mais de 80.000 m³ de solo erodido.

As menores profundidades são encontradas na porção a jusante da voçoroca, onde o relevo do entorno da voçoroca possui declividades mais suaves e menor amplitude altimétrica, estando mais próximo do nível de base e conseqüentemente as incisões erosivas são menos profundas. Também na porção a montante as áreas de avanço possuem profundidades máximas mais baixas. Essas áreas possuem um predomínio do processo de erosão linear que ainda não atingiu o nível de base, sendo uma possível área de reativação da voçoroca.

Em média as áreas de avanço têm um volume erodido de 13.556 m³, sendo os maiores valores na porção central e nas áreas de avanço com maior valor de área, como nos casos II e XIII. As áreas com menor valor erodido são a IX, X e XII que são porções onde ocorrem movimentos de massa associados a áreas de rebaixamento. Esta associação de processos resulta em feições menos incisivas, explicitadas pela profundidade média, sendo inferior a 1,5 metros nas três áreas de avanço.

Assim como observado por Marden et al. (2018) em voçorocas de grande porte na Nova Zelândia, por Wijdenes et al. (1999) em voçorocas no sudeste da Espanha e comprovado por testes realizados por Dong et al. (2019), os movimentos de massa são um dos principais fatores que contribuem para o avanço de voçorocas. Nas áreas de avanço encontradas na Voçoroca do Areal, existe uma forte correlação entre a ocorrência de movimentos de massa e a largura das áreas de avanço (Figura 33). Esta relação se deve pelo fato de os movimentos de massa atuarem no alargamento da voçoroca, uma vez que tendem a ocorrer quando o desenvolvimento vertical já está em estágio mais avançado (WIJDENES et al., 1999).

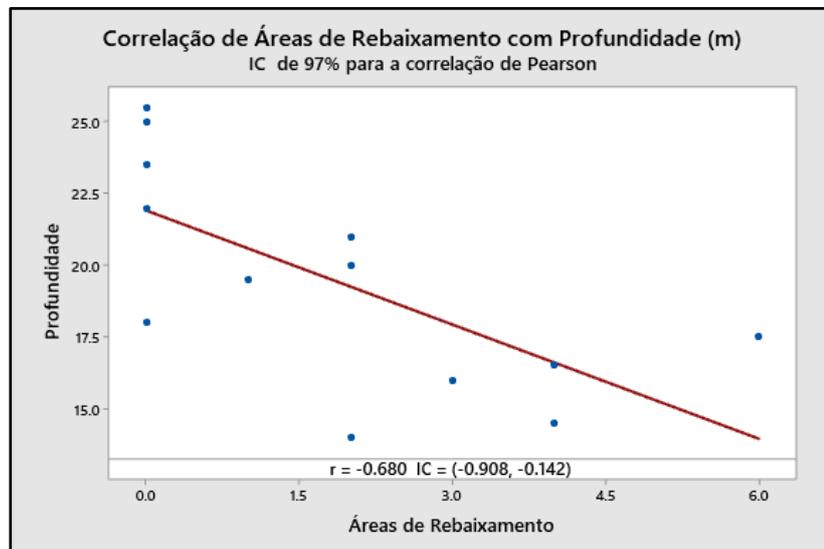
Figura 33 - Correlação da ocorrência de movimentos de massa com a largura (m) das áreas de avanço da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Ainda é importante salientar que os movimentos de massa são um dos grandes contribuintes no volume de material erodido de uma voçoroca, sendo, por muitas vezes, o maior fornecedor de material. Nas áreas de avanço da Voçoroca do Areal, existe uma forte correlação entre o material erodido e a ocorrência de movimentos de massa (Figura 34), sendo que estes ocorrem em grande intensidade, atingindo mais de dez metros de profundidade, principalmente nas áreas de avanço de IV a IX.

Figura 35 - Correlação das áreas de rebaixamento com a profundidade (m) das áreas de avanço da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

De modo geral a morfometria das áreas de avanço permite distinguir três principais áreas da voçoroca com características distintas. A primeira abrange as áreas I, II e III, que possuem uma grande área, tendo formas largas e alongadas, porém com baixa profundidade em relação ao restante da voçoroca. Outra área abrange as unidades de IV a IX, localizada na porção mais central da voçoroca, onde estão as áreas com maior profundidade máxima e média, bem como onde se encontram as áreas de avanço com maior volume erodido.

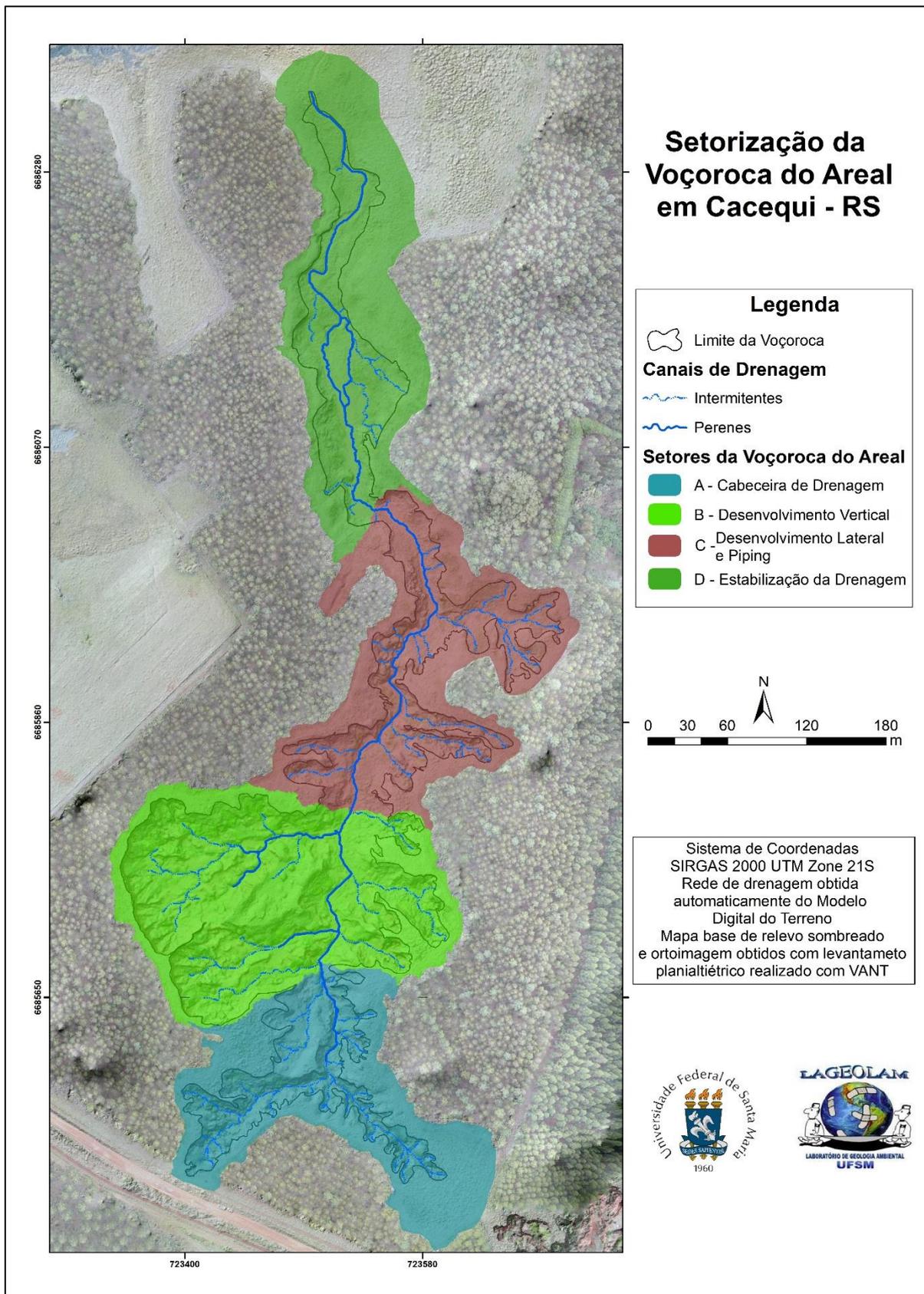
Por fim, é possível distinguir um conjunto de áreas de avanço de X a XIII que possuem características de áreas relativamente grandes, com baixas profundidades máximas e médias e conseqüentemente menor valor erodido. Isto se deve principalmente ao fato do predomínio de áreas de rebaixamento nessas porções da voçoroca. Possuem também de modo geral ICs baixos, com exceção da XIII, que com o valor de 0,51.

4.4 MECANISMOS DE EROSÃO NOS DIFERENTES SETORES DA VOÇOROCA DO AREAL

Uma vez identificadas diferenças entre as áreas de avanço, foram delimitados quatro setores na Voçoroca do Areal possuindo diferentes características. Os setores

foram delimitados respeitando as áreas de avanço e considerando os principais mecanismos atuantes, sendo assim distinguidas: A – Cabeceira de drenagem, que compreende as áreas de avanço I a III, localizada na porção a montante da voçoroca (Figura 36); B – Desenvolvimento Vertical, sendo um setor na porção central da voçoroca, onde se localizam as áreas de avanço de IV a IX; C – Desenvolvimento lateral e piping, compreende as áreas X ao XIII, situando-se mais a jusante dos demais setores; e D – Estabilização da drenagem, que é a porção mais a jusante da voçoroca, onde o canal de drenagem da base da voçoroca já está bem desenvolvido.

Figura 36 - Mapa dos setores da Voçoroca do Areal no município de Cacequi - RS.

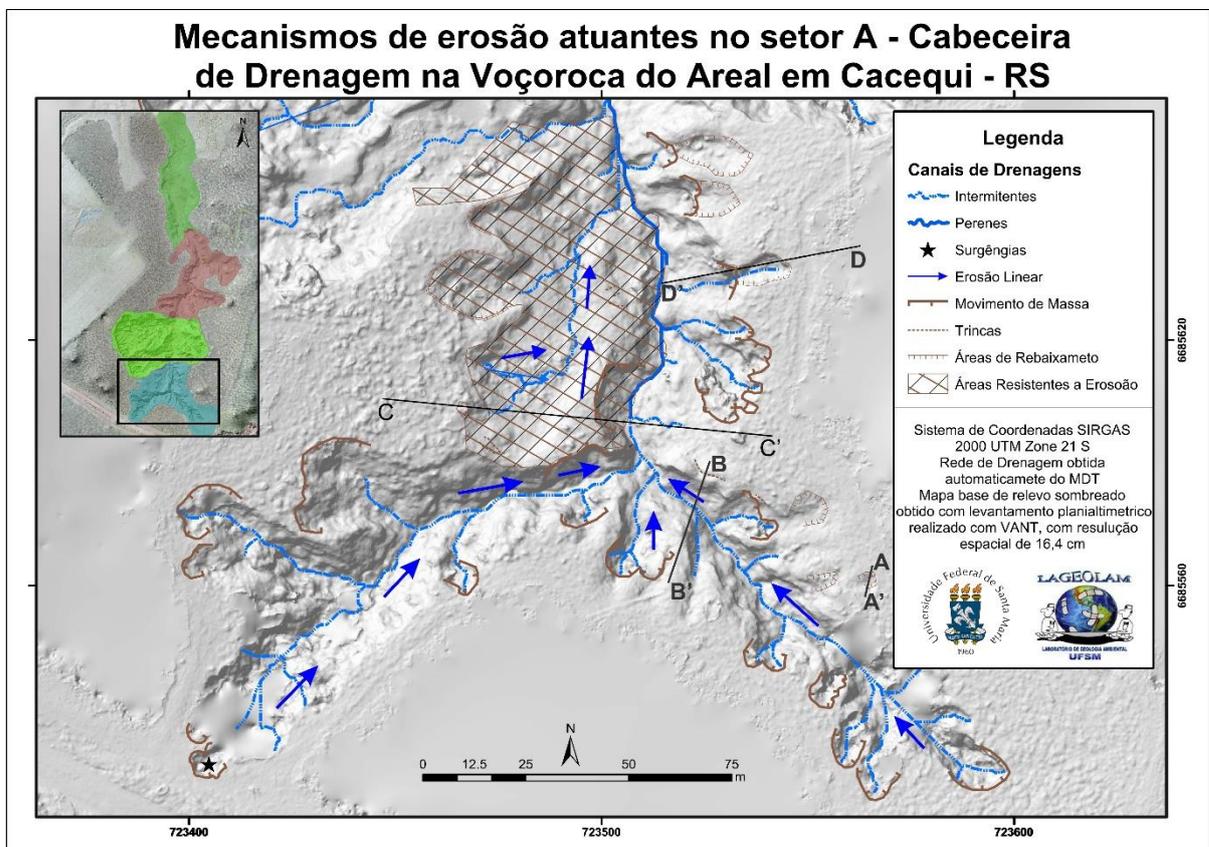


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.4.1 Setor A – Cabeceira de drenagem

O setor de cabeceira de drenagem está localizado na porção montante da voçoroca, com o predomínio de movimentos de massa nas áreas de avanço e de erosão linear na calha formada na base. Também se destaca uma área de resistência à erosão no lado oeste da voçoroca, representado no mapa da Figura 37.

Figura 37 - Mapa dos mecanismos erosivos atuantes no setor A da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

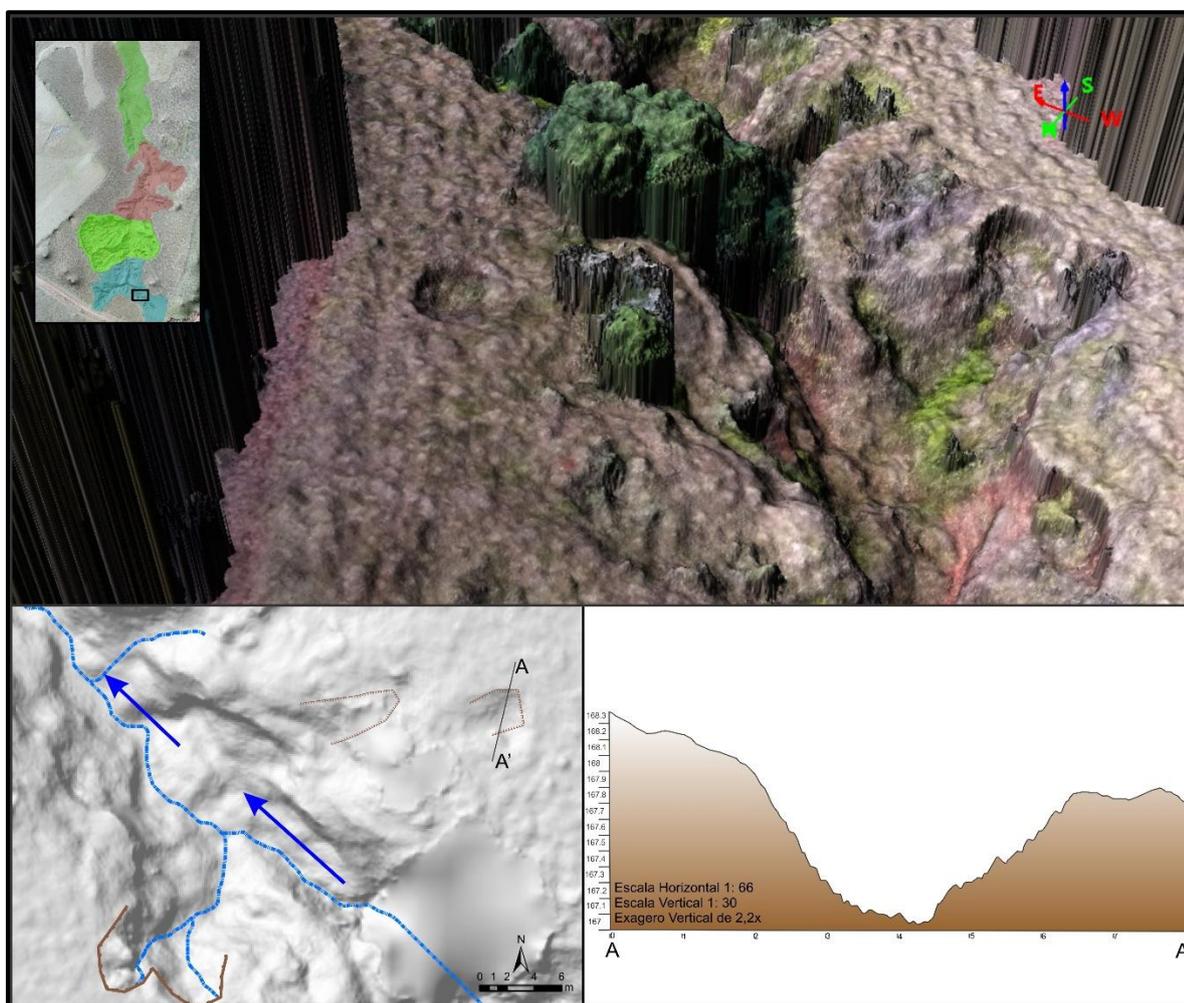
Ao todo, este setor possui 23 marcas de movimentos de massa, 7 trincas e 9 áreas de rebaixamento. É um setor onde existem duas ramificações principais, onde ambas têm um predomínio dos movimentos de massa como forma de avanço lateral, sendo que na ramificação do lado direito da voçoroca é mais comum a ocorrência de áreas de rebaixamento.

Na junção das duas ramificações do setor é possível observar uma porção resistente à erosão no lado esquerdo. Apresenta declividades mais suaves, uma área

de rebaixamento e uma área de movimento de massa próximo ao canal principal da voçoroca. Nas áreas onde há um rebaixamento há o favorecimento do escoamento superficial, predominante nestas áreas.

Na ramificação do lado leste do setor, é possível observar a ocorrência de rebaixamento com formato semicircular e desconectada da rede de drenagem da voçoroca como observado na Figura 38, representado pelo perfil A-A'.

Figura 38 - Representação esquemática de rebaixamento no setor A da Voçoroca do Areal.

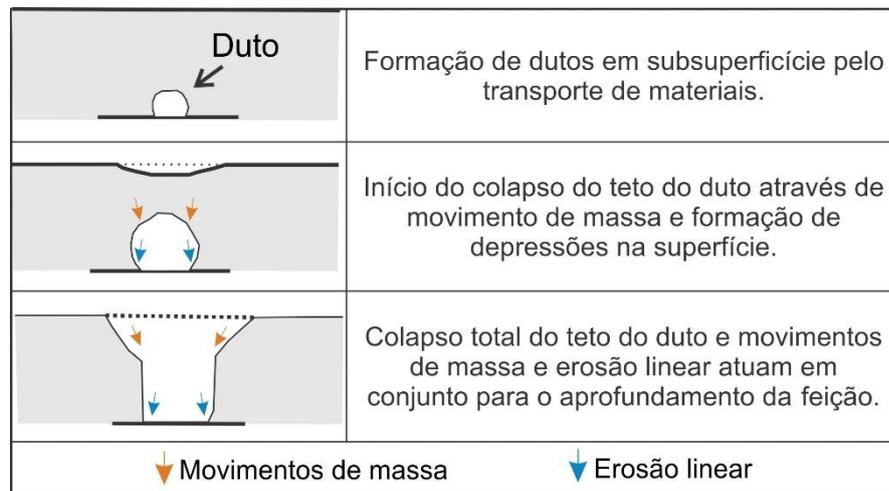


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Devido à remoção de material em subsuperfície, chamado de *piping*, há a formação de depressões podendo, de acordo com Jakiel e Poesen (2018), evoluir para pequenas dolinas e até estar associado a movimentos de massa (Figura 39). No caso encontrado na Voçoroca do Areal, há a formação um degrau de abatimento que

possui pouco mais de um metro de profundidade e indica a existência de processos erosivos subsuperficiais, com o início do colapso do teto do duto subterrâneo. Portanto, a feição representada pelo perfil A-A', indica um avanço da voçoroca com a atuação de erosão subterrânea, o que aumenta a perda de solo, pois está associado a ocorrência de movimentos de massa.

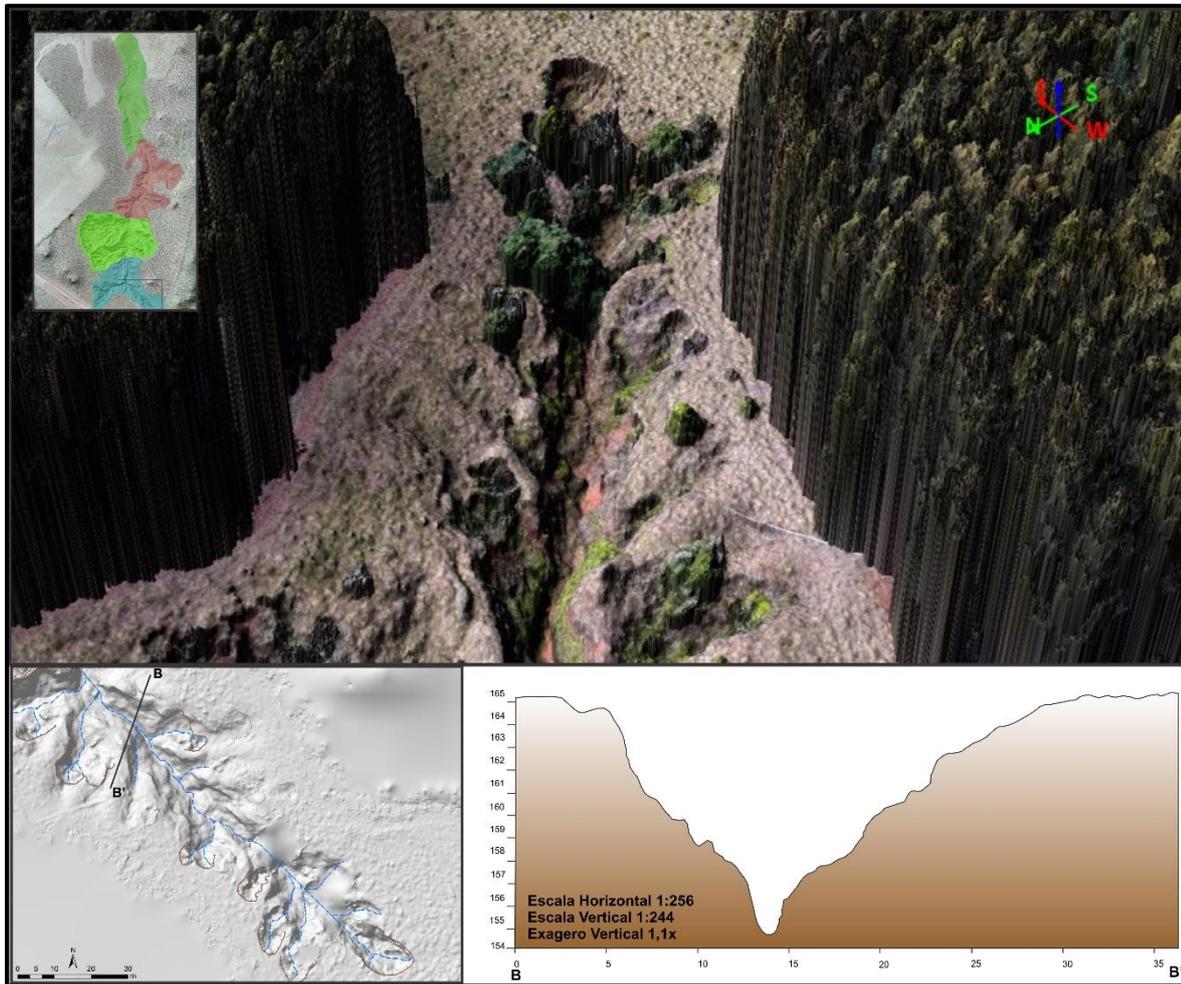
Figura 39 - Representação de *piping* como um processo geomorfológico complexo resultante de erosão hidráulica e movimentos de massa.



Fonte: Adaptado de Jakiel e Poesen (2018).

Outro mecanismo bastante comum neste setor é a erosão linear. A erosão linear ocorre de forma intermitente neste setor, relacionado aos eventos de chuva, concentrando o fluxo nas áreas mais baixas e carregando o material erodido para a jusante, representado na secção transversal da Figura 40.

Figura 40 - Representação esquemática de ocorrência de erosão linear no setor A da Voçoroca do Areal.

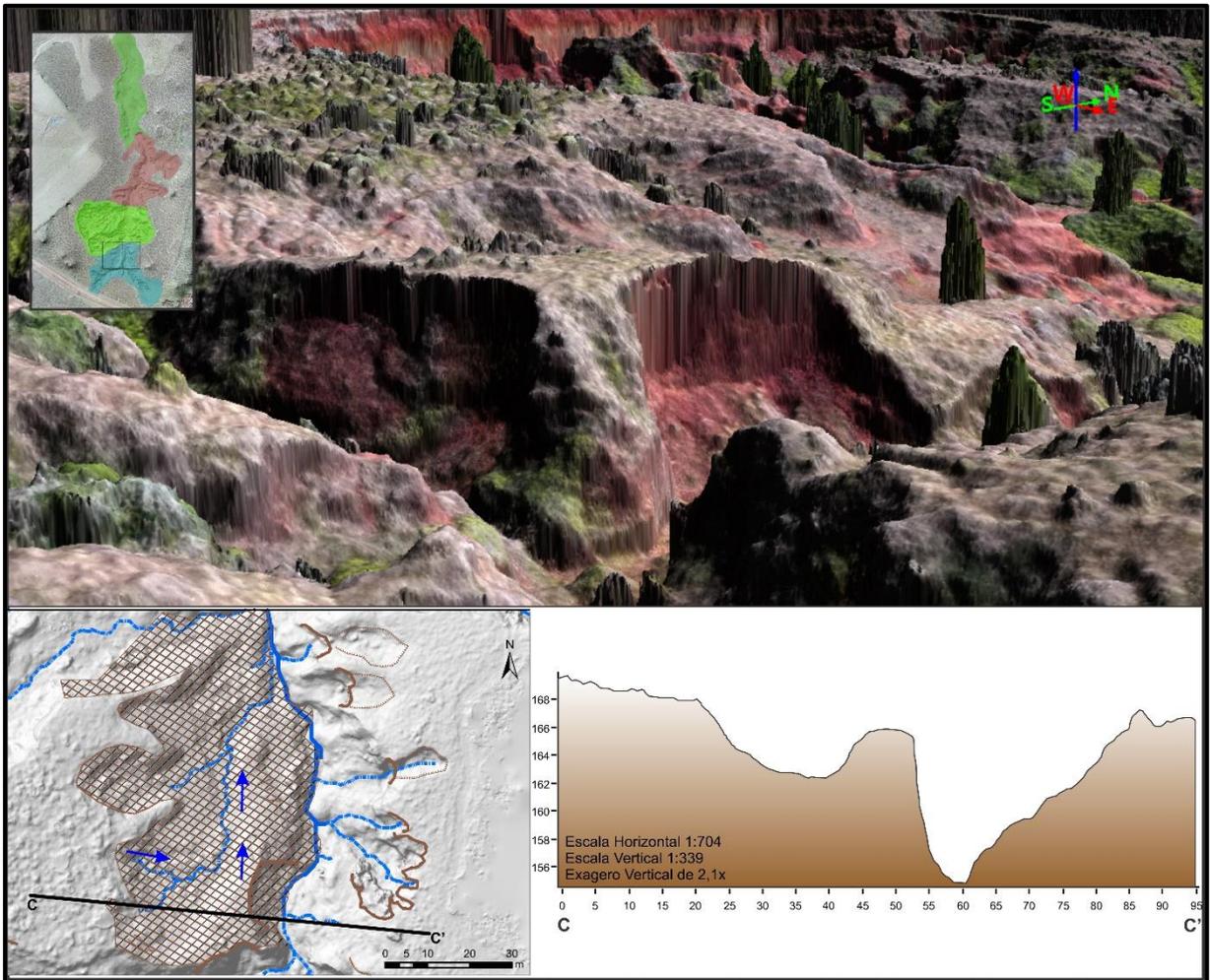


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A erosão linear neste setor ocorre com a formação de vales em V, com paredes abruptas com mais de 10 metros de altura, seguindo orientação preferencial, sugerindo controle estrutural nessas áreas. As paredes verticais dessa porção da voçoroca também facilitam movimentos de massa, evidenciados pela ocorrência de trincas no topo da voçoroca.

Junto a confluência das duas ramificações do setor existe a formação de uma porção resistente à erosão no lado esquerdo da voçoroca (Figura 41). Nesta porção há uma continuidade do relevo e da vegetação em relação ao entorno da voçoroca com declividades mais baixas, até próximo ao canal principal, onde já é possível observar movimentos de massa e paredes abruptas.

Figura 41 - Representação esquemática de porção resistente à erosão no setor A da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Este patamar mais resistente a erosão possui algumas áreas mais rebaixadas no centro, formando porções côncavas convergentes, como observado no perfil topográfico C-C' da figura 41. Estas porções favorecem o escoamento superficial e a concentração de fluxo, aumentando a erosão e aumentando a incisão na vertente.

Próximo ao canal principal da voçoroca ainda ocorrem movimentos de massa de grande intensidade (Figura 42), formando paredes verticais com mais de 10 metros de altura, tendo como base o nível do lençol freático da voçoroca. Estes movimentos de massa avançam sobre a área resistente a erosão sendo uma possível área de avanço futuro da voçoroca.

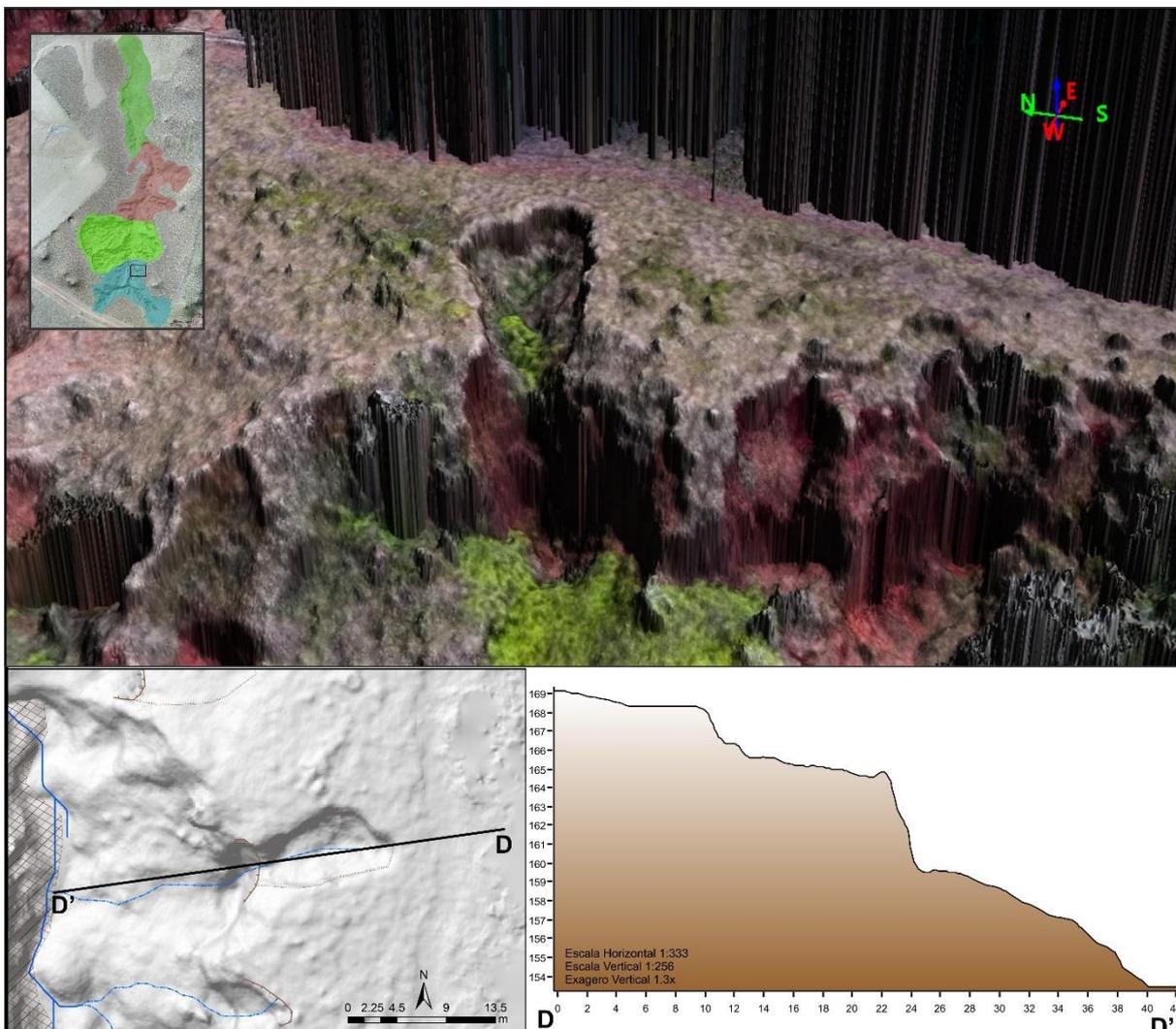
Figura 42 - Ocorrência de movimento de massa na porção resistente do setor A da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Ainda no setor A, principalmente no lado direito do canal principal, é comum a ocorrência de áreas de rebaixamento seguida de movimento de massa, como representado no esquema da Figura 43.

Figura 43 - Representação esquemática de área de rebaixamento seguida de movimento de massa no setor A da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

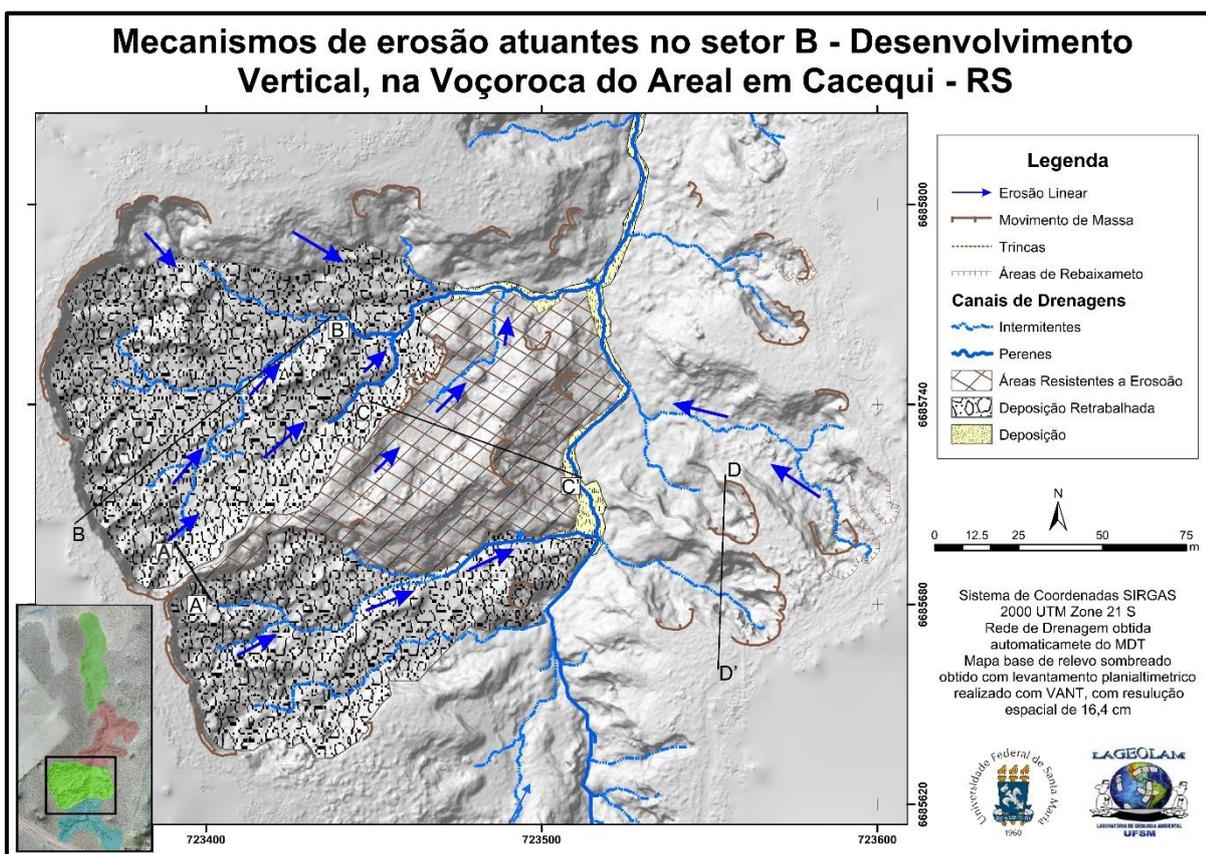
Próximo à linha de topo da voçoroca ocorrem rebaixamentos semicirculares, com profundidades de 1 a 3 metros. Estes rebaixamentos podem estar associados a mudança textural do solo, onde há um incremento de argilas no horizonte B. Mais abaixo, um novo degrau é formado com a presença de lâminas argilosas na rocha sedimentar, marcando a base dos movimentos de massa.

De modo geral o processo erosivo no setor A está bastante ativo, apresentando uma grande variedade de mecanismos atuantes, tanto superficiais quanto subsuperficiais. É umas das áreas mais ativas da voçoroca, excetuando a porção mais resistente ao processo erosivo, possuindo uma capacidade de avanço erosivo bastante significativa tanto lateralmente quanto no avanço da cabeceira da voçoroca.

4.4.2 Setor B – Desenvolvimento vertical

O setor B da Voçoroca do Areal, localizado na porção central da voçoroca, apresenta 31 feições de movimentos de massa, 3 trincas e 4 áreas de rebaixamento, sendo a parte da voçoroca com o maior volume erodido, com grandes ocorrências de movimentos de massa de grande intensidade. Devido ao grande material erodido e depositado na base, o setor possui uma grande área de depósitos retrabalhados, também possui áreas de deposição de material e no centro do setor uma área mais resistente à erosão (Figura 44).

Figura 44 - Mapa dos mecanismos erosivos atuantes no setor B da Voçoroca do Areal.

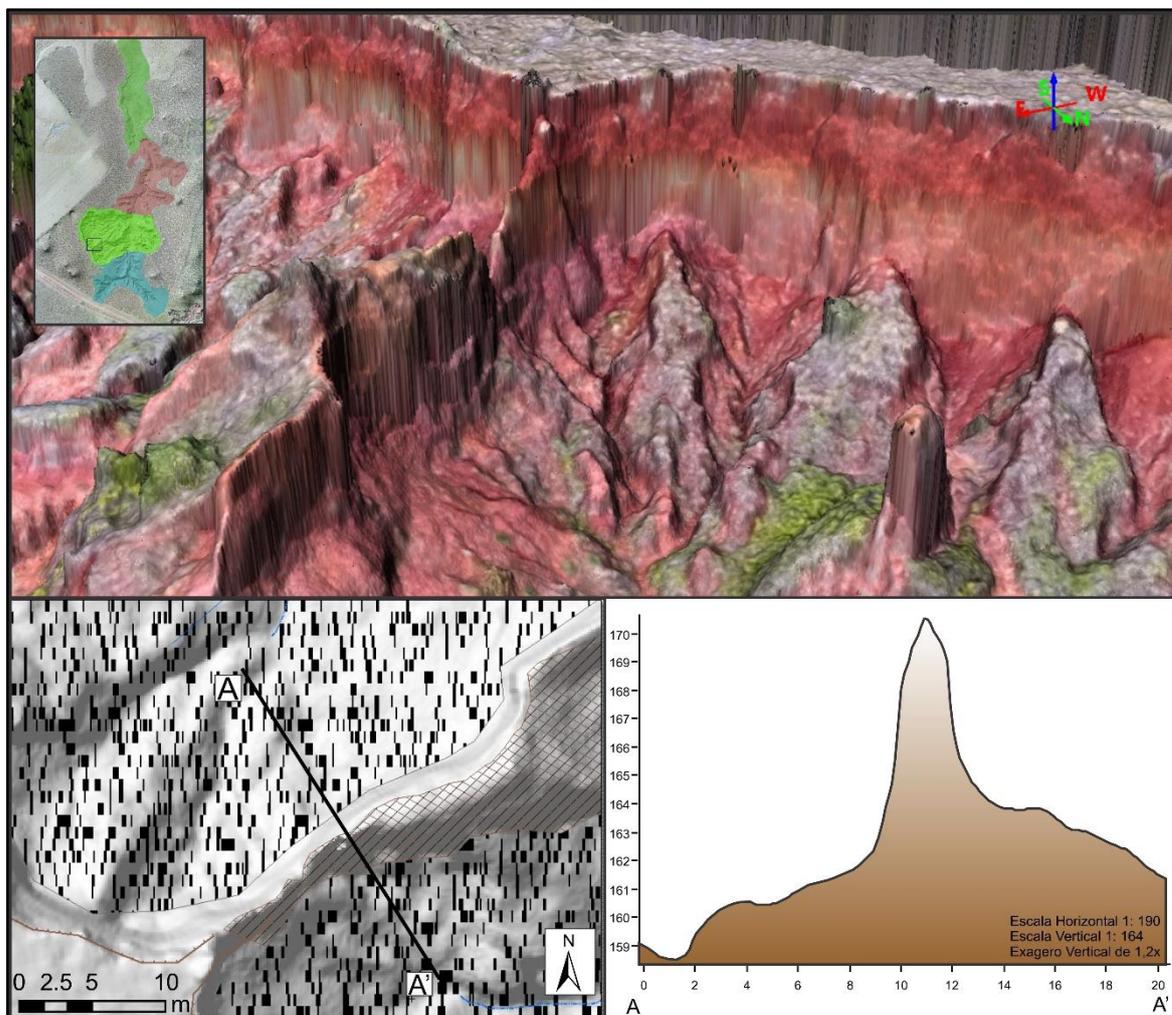


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Apesar do predomínio de mecanismos de erosão com desenvolvimento vertical neste setor, há a ocorrência de linhas resistentes a erosão, representados no esquema da Figura 45. Forma-se entre duas grandes áreas de avanço vertical, tendo

mais de 9 metros de altura e cerca de 2 metros de largura. Esta feição liga a porção central do setor que é mais resistente a borda da voçoroca, evidenciando a existência de um material menos erodível.

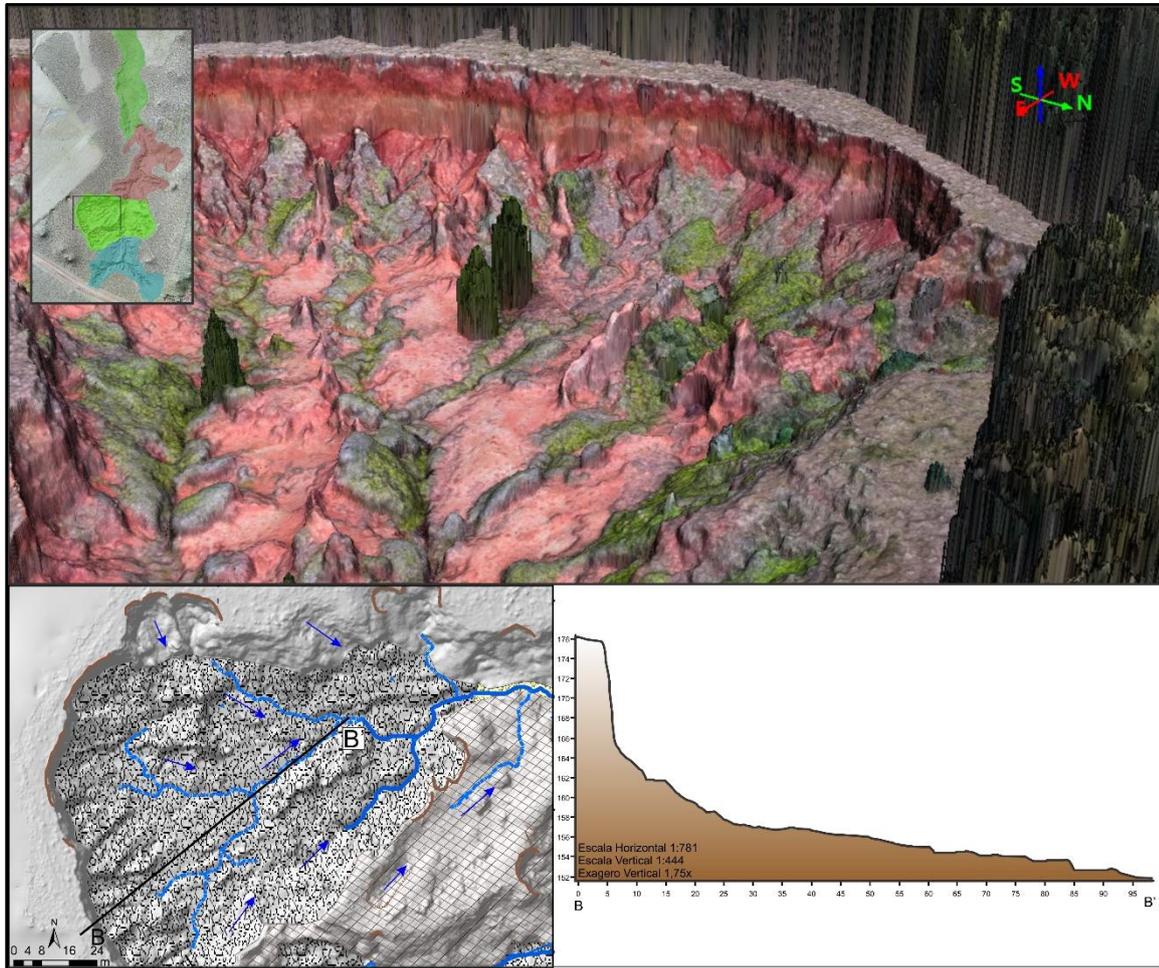
Figura 45 - Representação esquemática de linha resistente à erosão no setor B da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A principal característica deste setor é o desenvolvimento vertical da voçoroca, tendo profundidade de aproximadamente 25 metros, apresentando paredes abruptas com grande declividade, como representado na Figura 46.

Figura 46 - Representação esquemática de área de desenvolvimento vertical do setor B da Voçoroca do Areal.

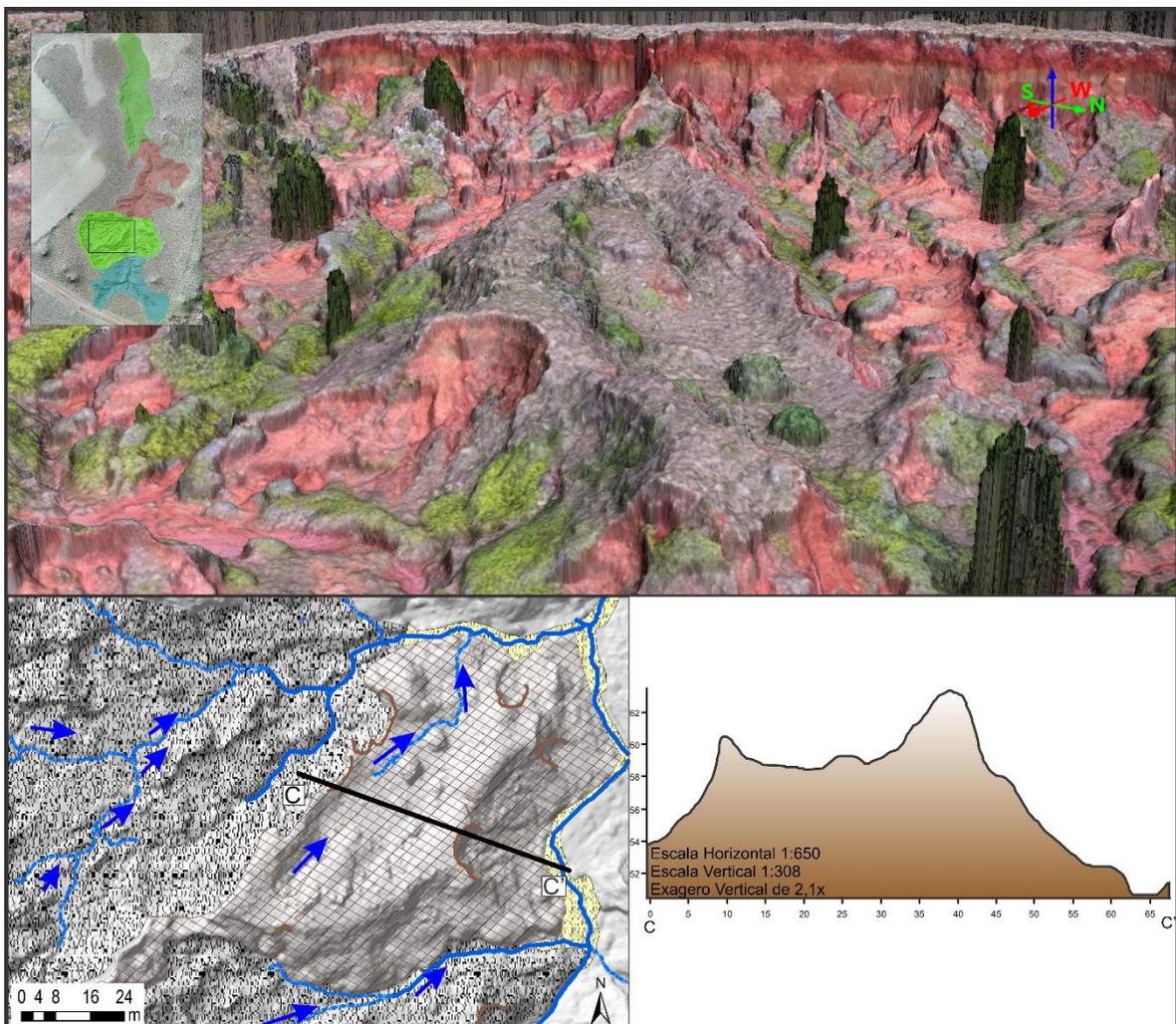


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Estas paredes abruptas representam um grande avanço erosivo, onde a borda da voçoroca é marcada por uma sequência de semicírculos evidenciando a ocorrência de movimentos de massa, tendo como resultado um grande volume erodido de material. Em consequência disto, na base da encosta é possível observar uma grande quantidade de sedimentos oriundos dos movimentos de massa pretéritos. O material desprendido por movimentos de massa é depositado na base da encosta, porém a erosão linear não consegue carregar todo o material, formando áreas de depósitos. Ainda, devido à característica bastante friável destes depósitos, estes são retrabalhados pela erosão linear formando canais bastante incisivos no material inconsolidado.

Assim como no setor A, ocorre no centro da voçoroca uma porção mais resistente a erosão (Figura 47). Esta porção forma uma feição de resalto em relação ao entorno devido à erosão diferencial, onde ocorrem processos menos intensos, predominando a erosão linear na parte central da feição, onde ocorre um pequeno rebaixamento, formando uma encosta convergente. Próximo ao canal principal da voçoroca é possível observar alguns movimentos de massa atuando como mecanismo erosivo.

Figura 47 - Representação esquemática de área resistente à erosão no setor B da Voçoroca do Areal.

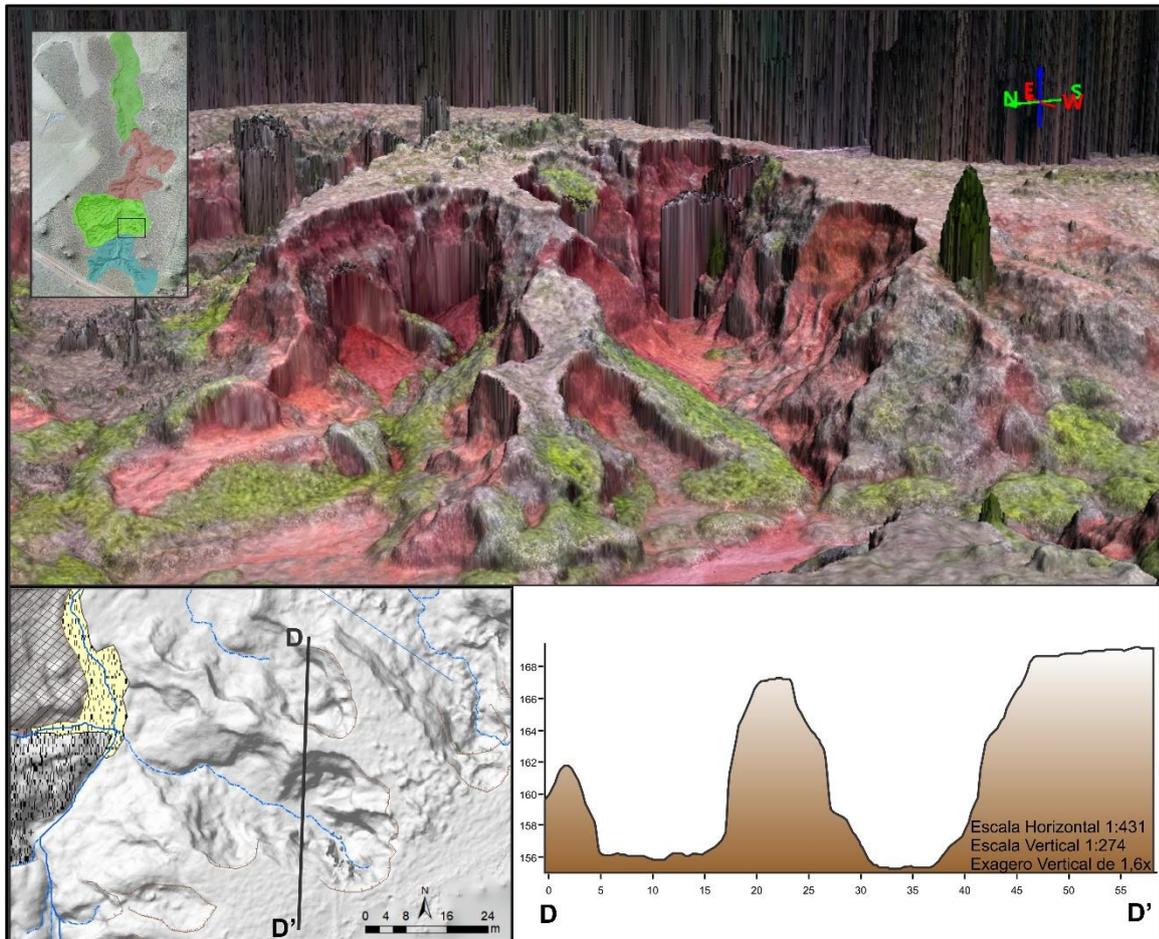


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

No lado direito do setor ocorrem movimentos de massa de grande magnitude, formado pequenas ramificações da voçoroca, com encostas de mais de 12 metros,

com paredes abruptas e pequenos canais de drenagens intermitentes na base do canal, como representado na Figura 48.

Figura 48 - Representação esquemática de área de ocorrência de intensos movimentos de massa no setor B da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Esta porção do setor possui um grande avanço erosivo, onde os movimentos de massa estão bastante ativos, marcando uma área tanto de avanço lateral como de avanço vertical. Como é possível observar na Figura 49, a constante ocorrência de movimentos de massa torna difícil o estabelecimento de vegetação na base e nas paredes da ramificação. As atividades dos mecanismos de erosão também se tornam evidentes pela grande quantidade de material inconsolidado na base.

Figura 49 - Ocorrência de movimento de massa no setor B da Voçoroca do Areal.



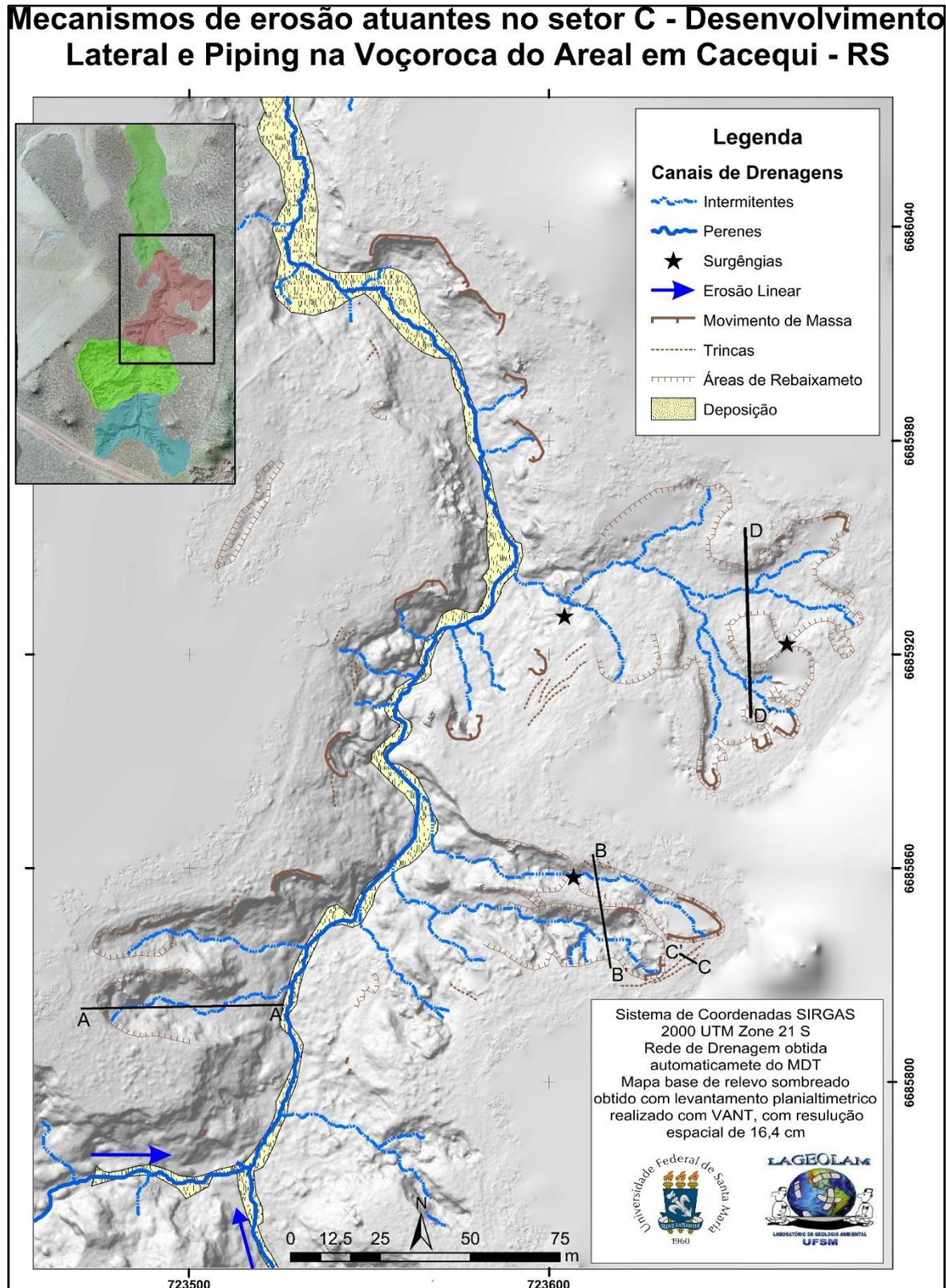
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Desta forma, o setor B da voçoroca apresenta grandes amplitudes altimétricas, com os mecanismos erosivos atuando de forma acentuada resultando em grande volume de material erodido. Parte deste material se deposita na base da voçoroca formando áreas de material inconsolidado que é retrabalhado pela erosão linear, cercado por pequenos pináculos de porções de rocha mais resistentes. É um setor onde há avanço da voçoroca, com uma característica de desenvolvimento vertical, formando paredes abruptas. Ainda há uma porção mais resistente onde os processos são ligeiramente mais brandos.

4.4.3 Setor C – Desenvolvimento lateral e *piping*

O setor C da voçoroca está localizado no terço inferior da voçoroca (Figura 50), possui diversas ramificações e áreas de avanço lateral, com 19 áreas de movimentos de massa, 22 trincas e 18 áreas de rebaixamento. A grande quantidade de áreas de rebaixamento em relação aos outros setores é um indicativo de maior ação do mecanismo de *piping* responsável pela retirada do material em subsuperfície e consequentemente formando áreas de rebaixamento.

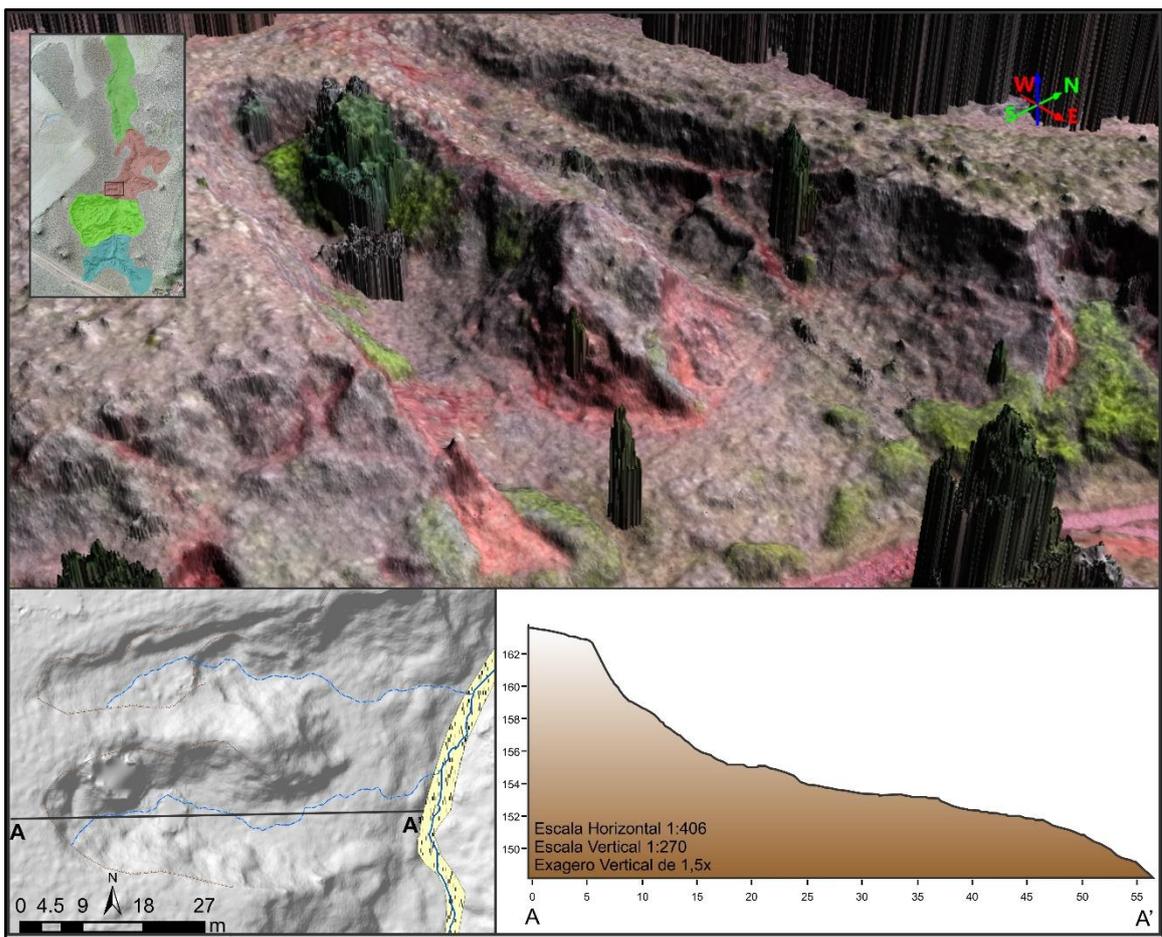
Figura 50 - Mapa dos mecanismos erosivos atuantes no setor C da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Um dos mecanismos erosivos mais comuns neste setor da voçoroca são os rebaixamentos (Figura 51), onde uma grande área com borda semicircular sofre solapamento, formando uma área convergente, com perfil suavizado, sem a ocorrência de paredes verticais, e estabelecimento de canais intermitentes no centro.

Figura 51 - Representação esquemática da ocorrência de rebaixamento no setor C da Voçoroca do Areal.

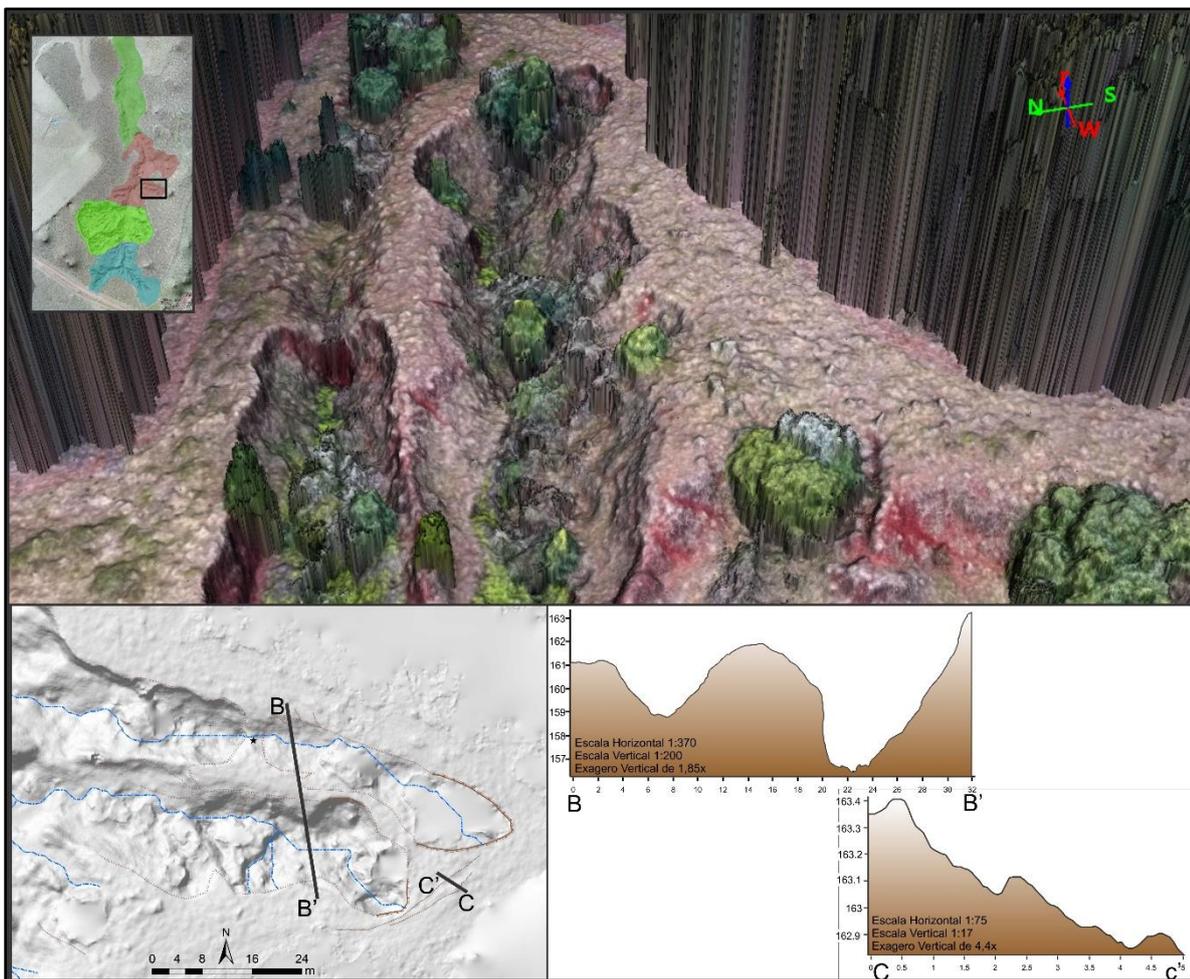


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A ocorrência destes rebaixamentos pode estar associada a existência de lentes de rocha mais argilosas na base, favorecendo a erosão subterrânea nestes pontos. Esses pontos de rebaixamento, formam uma feição convergente na qual favorece o escoamento superficial da água, concentrando a umidade e tornando mais comum, o estabelecimento de vegetação nestas áreas, como observado na Figura 51.

No lado direito do setor, é possível observar a ocorrência de duas ramificações paralelas e de formato linear (Figura 52), as quais possuem entre 3 e 7 metros de profundidade. As duas ramificações são divididas por uma pequena faixa do terreno de menos de 10 metros de largura (Perfil B-B', Figura 56), onde ocorrem processos de erosão hídrica e pequenos movimentos de massa, contribuindo para o recuo desta porção de terra e para uma possível junção das ramificações.

Figura 52 - Representação gráfica da ocorrência de ramificações paralelas associadas às áreas de rebaixamento e formação de trincas no setor C da Voçoroca do Areal.



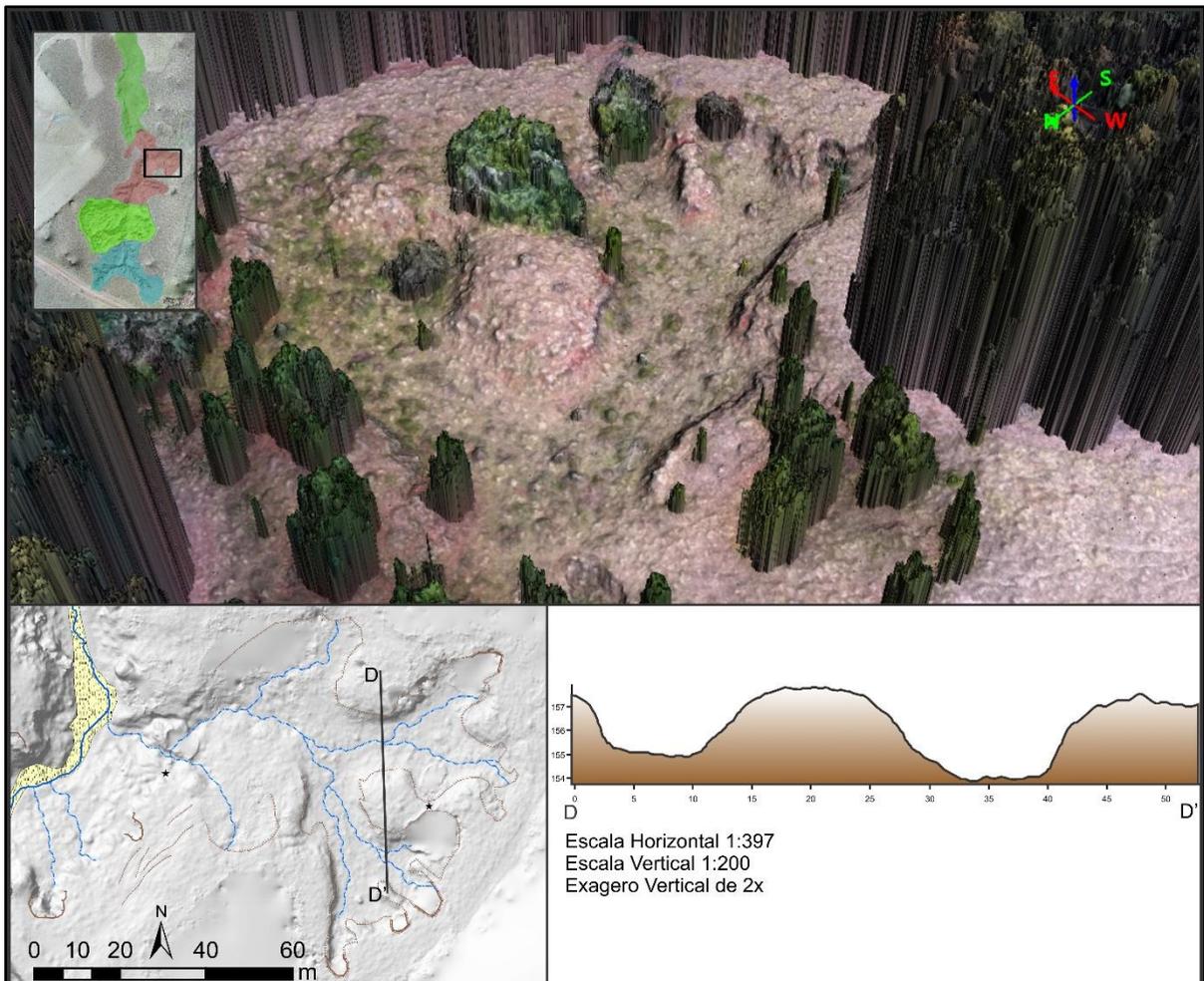
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

O formato linear e paralelo das duas ramificações podem indicar algum controle estrutural na formação destas ramificações. São áreas onde ocorrem um rebaixamento do terreno e na cabeceira ocorrem movimentos de massa que atuam no desenvolvimento à montante das ramificações. A atividade dos movimentos de

massa nesta área é observada também na formação de trincas à montante da feição, representadas no perfil topográfico C-C' da Figura 52. Também é possível observar nessa porção do setor da voçoroca a ocorrência de surgência, o que torna evidente a ação da erosão subterrânea.

Mais a jusante na voçoroca ocorre uma ramificação de características distintas, onde há um maior alargamento da feição e menor profundidade, atingindo cerca de 3 metros de profundidade, como exposto na Figura 53. Conforme demonstrado no perfil topográfico D-D' da Figura 53, a base da voçoroca nesta porção tem fundo plano, sem um grande desenvolvimento vertical, possivelmente devido a presença de lâminas de litologia mais argilosa próxima a superfície, impedindo o maior desenvolvimento destas feições. Na área de cabeceira se observa também um pequeno avanço da ramificação através de pequenos movimentos de massa.

Figura 53 - Representação gráfica de área de rebaixamento no setor C da Voçoroca do Areal.



Outro aspecto comumente encontrado nesta porção da voçoroca é de surgências na meia encosta, devido ao fato de mudança de litologias no local. Nesta porção da voçoroca há uma lâmina mais argilosa no substrato litológico relativamente próximo à superfície, formando áreas de contato entre litologias com texturas diferentes, sendo a mais arenosa no topo e logo abaixo uma lâmina argilosa, como representado na Figura 54 A.

Figura 54 - Perfil da encosta em porção do setor C da Voçoroca do Areal (A – Área de contato de porção de roca mais arenosa com porção mais argilosa; B – Aspecto mosqueado de lâmina de rocha argilosa alterada; C – Porção arenosa da encosta com perda de coloração).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Nas áreas de contato da litologia mais arenosa com as lentes argilosas é possível verificar a perda da coloração avermelhada da rocha na porção mais arenosa

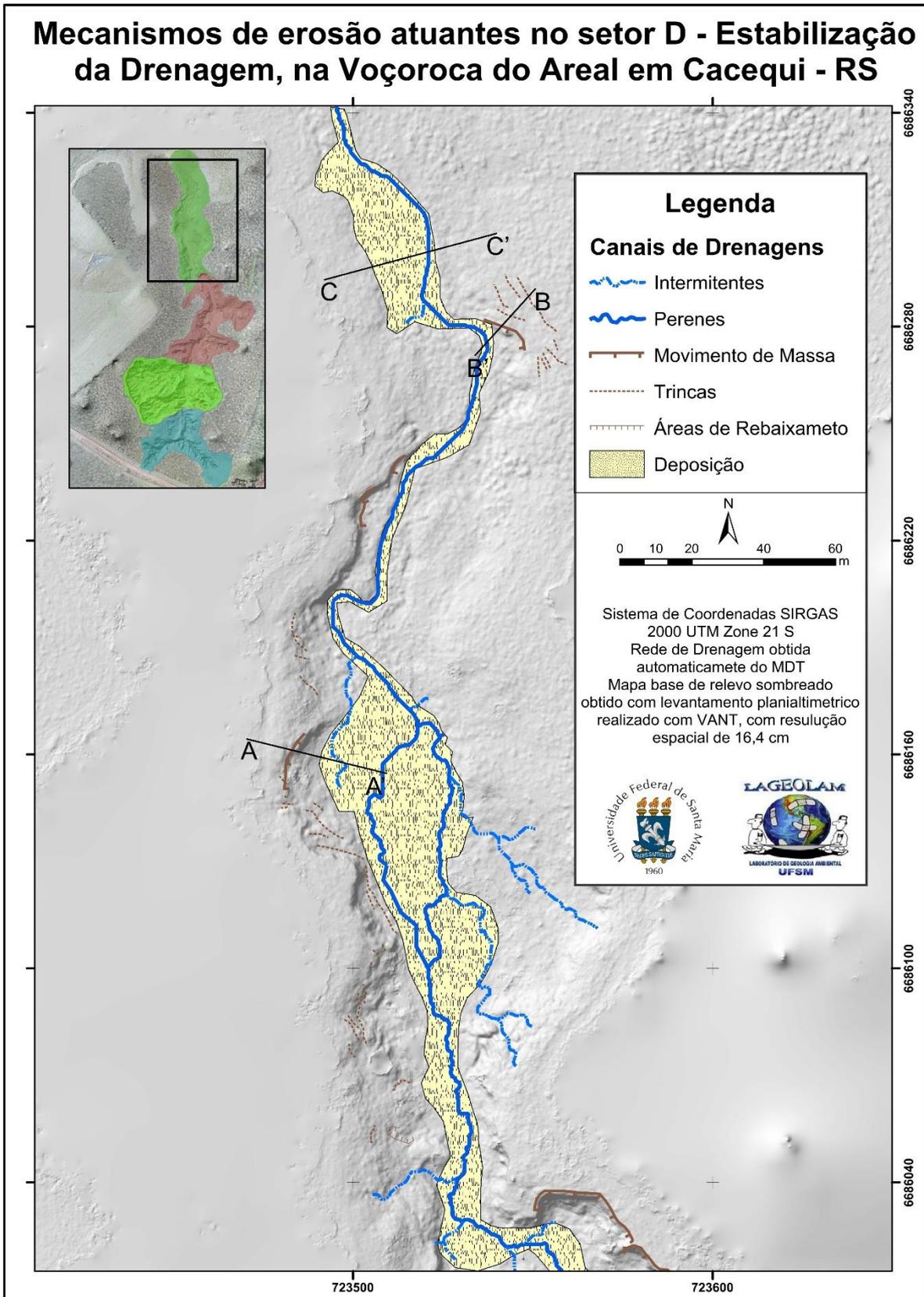
(Figura 54, C) resultado da lixiviação de material mineral nas áreas de surgência durante um longo período de tempo. Já na porção mais argilosa é possível identificar uma característica mosqueada (Figura 54, B) devido a grande disponibilidade hídrica nesta porção.

Deste modo, este setor possui uma grande atividade da erosão subsuperficial com ocorrência do mecanismo de rebaixamento e evidenciado pelas surgências. Há um maior desenvolvimento lateral da voçoroca do que vertical, tanto pela localização de terço inferior da vertente, mais próximo do nível de base, diminuindo o poder erosivo, quanto pela existência de lentes argilosas mais impermeáveis que dificultam a expansão vertical.

4.4.4 Setor D – Estabilização da drenagem

O setor D está localizado na porção mais a jusante da voçoroca (Figura 55), caracterizado pela maior estabilização da voçoroca, contendo apenas cinco evidências de movimentos de massa, e uma de rebaixamento, porém com maior ocorrência de trincas, somando 33. É o setor onde o canal principal já está bem estabelecido, com áreas de deposição próxima ao canal e os principais mecanismos atuantes são o de deposição, porém nas paredes laterais ainda ocorrem alguns mecanismos de erosão.

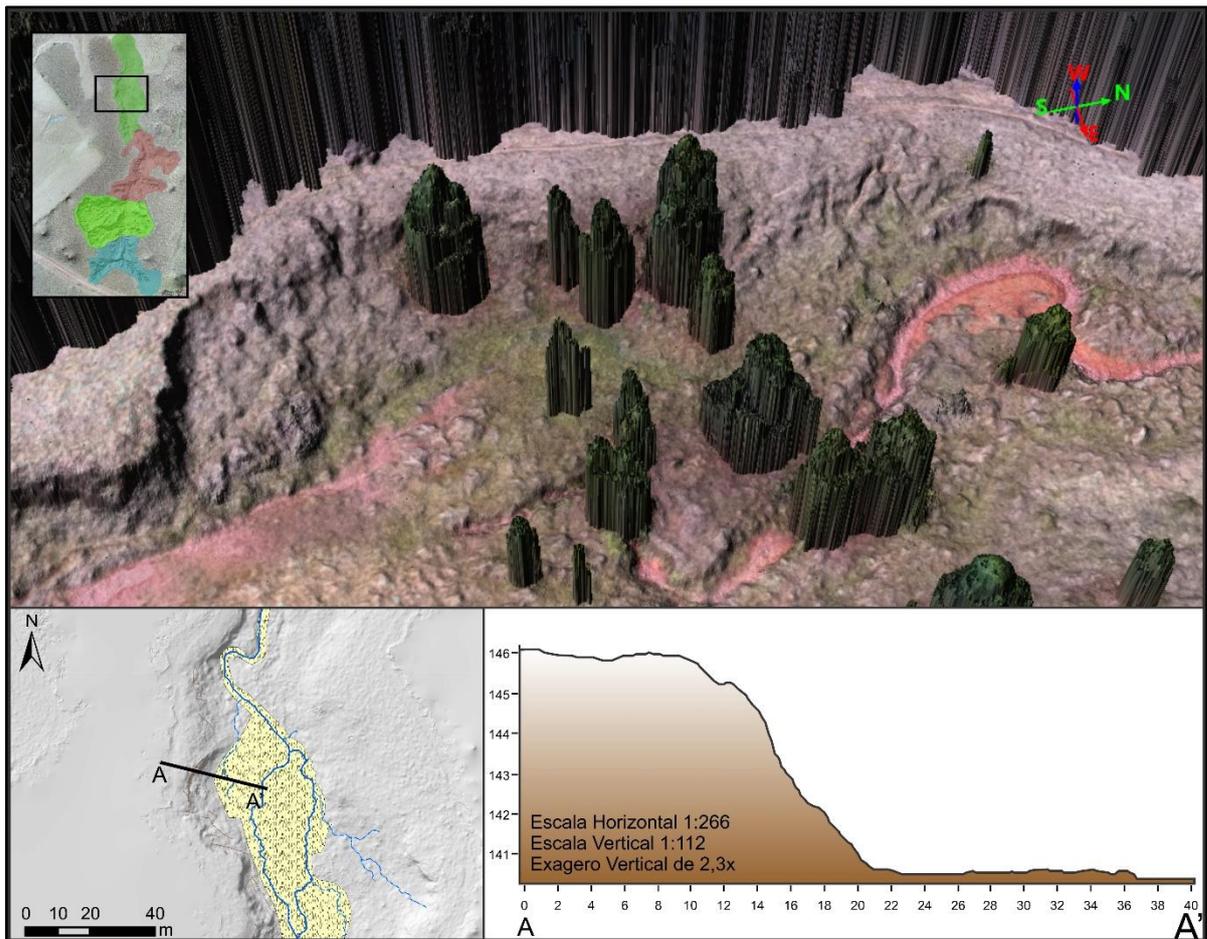
Figura 55 - Mapa dos mecanismos erosivos atuantes no setor D da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Apesar do setor ser caracterizado pela estabilização da voçoroca e se localizar na porção mais baixa, ainda é possível observar o mecanismo de movimento de massa atuando no desenvolvimento da voçoroca. Esses movimentos de massa ocorrem junto a parede da voçoroca, próximo ao canal principal com cerca de cinco metros de altura (Figura 56) tendo na sua base uma grande quantidade de material depositado resultante da erosão à montante. São movimentos de massa mais brandos, devido à proximidade com o nível de base, porém contribuem para o avanço da voçoroca. Muitas vezes esses movimentos de massa estão associados ao solapamento da base da encosta.

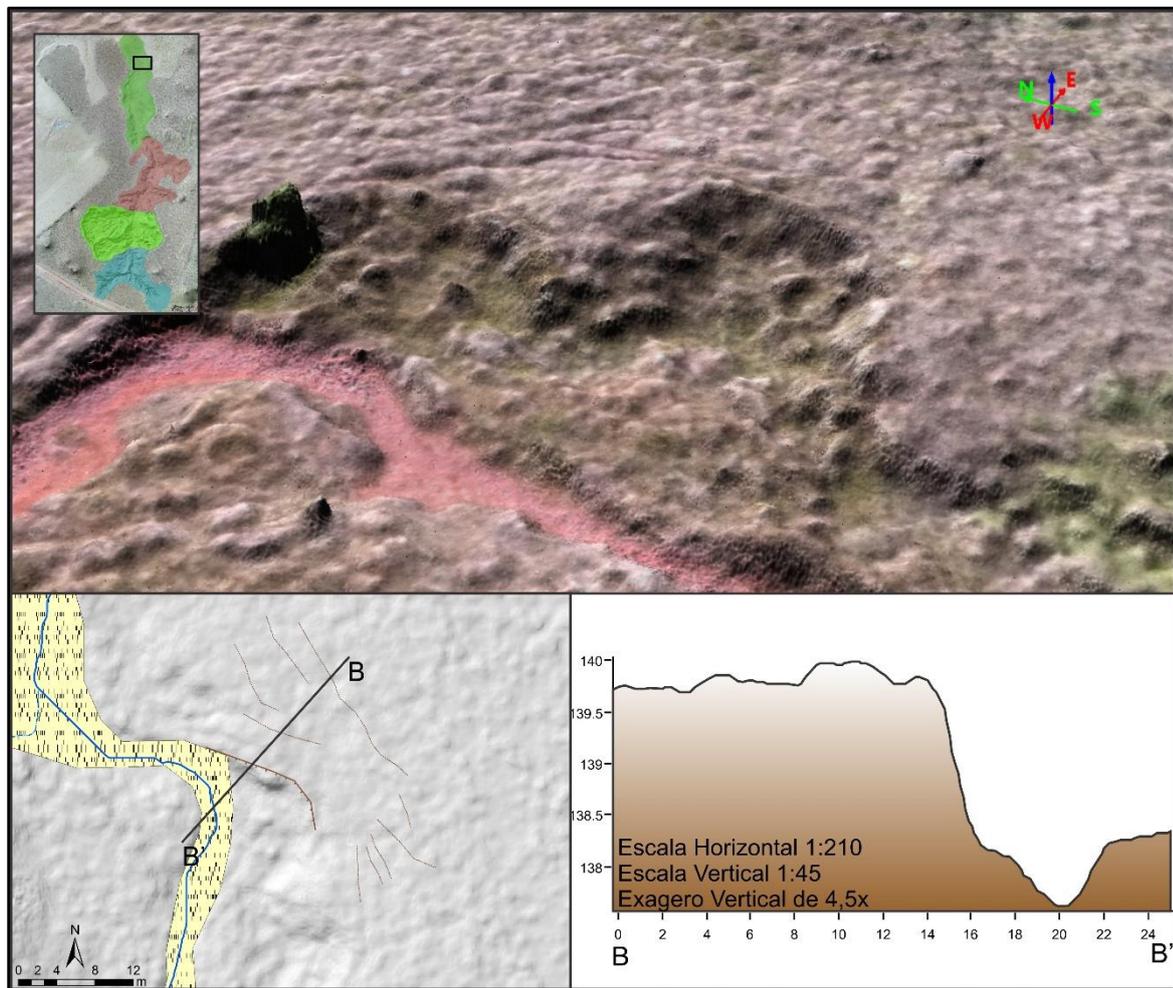
Figura 56 - Representação esquemática da ocorrência de movimento de massa no setor D da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Mais a jusante no setor há a ocorrência de pequenos movimentos de massa, com aproximadamente dois metros de altura, conforme mostra o perfil B-B' da Figura 57. Junto a esses movimentos de massa também ocorrem diversas trincas e pequenos ressaltos no relevo, de algumas dezenas de centímetros. Estas marcas podem estar relacionadas ao avanço da parede, com rachaduras de tensão em decorrência dos movimentos de massa rotacionais que ocorrem, ou ainda, relacionados a movimentos de massa mais lentos, como rastejo.

Figura 57 - Representação esquemática de pequenos movimentos de massa e trincas associadas no setor D da Voçoroca do Areal.

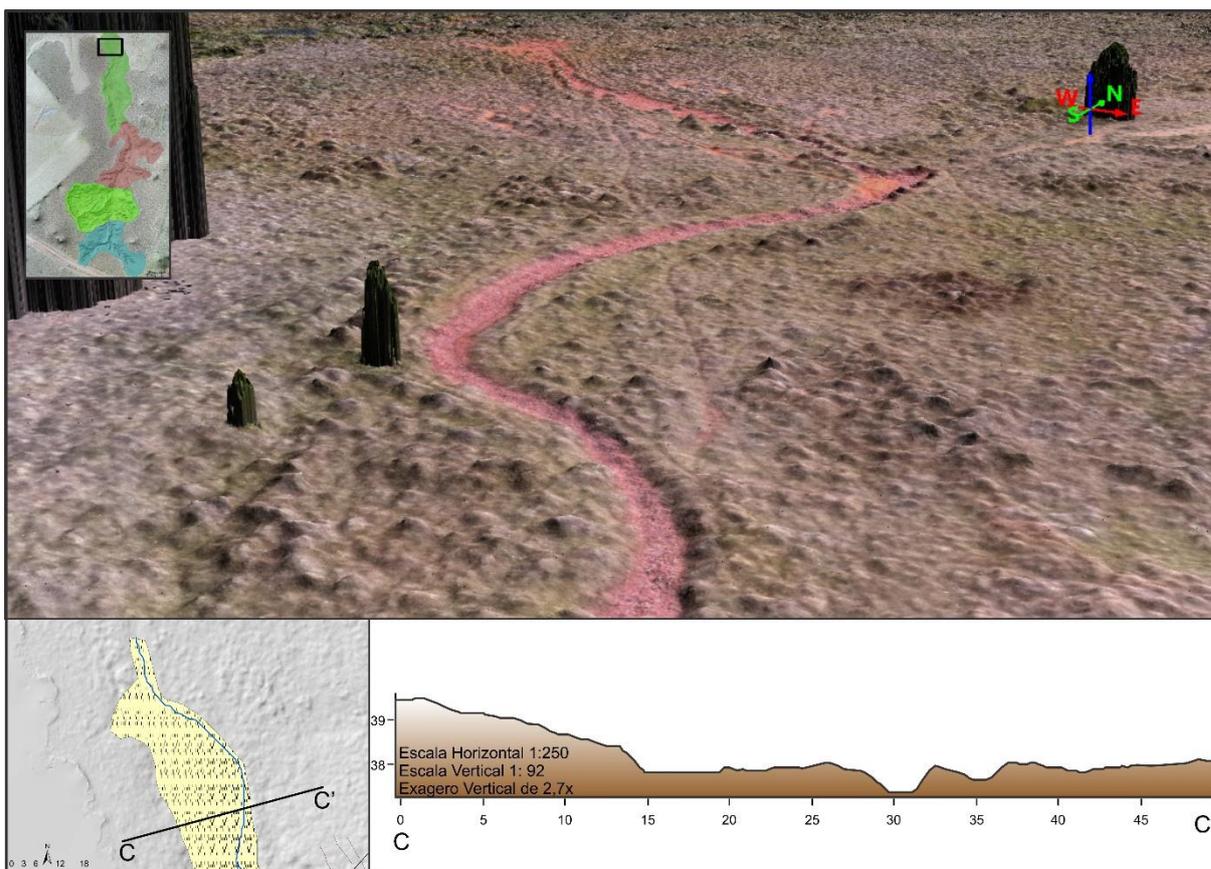


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Ainda cabe ressaltar que sendo este setor o mais baixo da Voçoroca do Areal é onde os processos de agradação predominam, com a deposição de material e aplainamento do relevo, como é possível observar na Figura 58. Na porção final da

voçoroca se estabelece um canal perene de drenagem, cercado de áreas de deposição de material e de áreas planas ao redor, sem a presença de paredes abruptas, se caracterizando como um canal de primeira ordem e assim sendo o fim da área de voçorocamento.

Figura 58 - Representação esquemática de área plana no setor D da Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Sendo assim, o setor D da voçoroca apresenta movimentos de massa mais brandos, de menor expressão e menor material erodido, devido, principalmente, pela proximidade com o nível de base. Predomina no setor a deposição de material fino decorrente da erosão à montante e a estabilização do canal de drenagem, se conectando com a rede fluvial da bacia hidrográfica do Rio Areal do Limeira.

4.4.5 Discussão geral dos mecanismos erosivos

A Voçoroca do Areal possui uma dinâmica complexa, com uma variedade de mecanismos de erosão atuantes e com diferentes intensidades nos diversos setores. O mapeamento e a compreensão desses mecanismos se tornaram possíveis somente com a obtenção de dados de altíssima resolução, permitindo diferenciar pequenas alterações na dinâmica da voçoroca.

A dinâmica de avanço de uma voçoroca se dá de três maneiras principais, através do recuo da cabeceira, através do alargamento do canal ou com o aprofundamento do canal erosivo (WIJDENES et al., 1999). Os mecanismos que determinam qual a forma de avanço mais atuante em uma voçoroca variam durante o tempo e também nas diferentes porções da voçoroca, se tornando um objeto complexo de mapear e compreender.

Durante muito tempo, e em diversos estudos, o conceito de voçorocamento esteve ligado à atuação da erosão hidráulica, sendo a erosão superficial o principal agente erosivo destas feições (BERGONSE e REIS, 2011). Recentemente, novos estudos sugerem que os mecanismos de erosão em voçorocas são mais complexos, tendo como principal agente os movimentos de massa (MARTINEZ-CASANOVA et al., 2003; BETTS et al., 2003; BACELLAR et al., 2005; BERGONSE E REIS, 2011; MARDEN et al., 2018).

De acordo com o trabalho realizado na Voçoroca do Areal, fica evidente que o principal mecanismo de erosão atuante nos dias de hoje é o movimento de massa associado à erosão subsuperficial e a formação de *piping*. Esses mecanismos atuam na voçoroca tanto no alargamento da feição quanto no recuo da cabeceira à montante na vertente, gerando um grande volume de material erodido. De acordo com Betts et al. (2003), em algumas voçorocas os movimentos de massa podem ser responsáveis por até 90% do sedimento gerado.

Esta intensa produção de sedimentos na área da voçoroca afeta diversos fatores ambientais, desde o nível local até a bacia hidrográfica. Localmente, a perda de solo em grande quantidade afeta os mecanismos de erosão, como no caso da formação de áreas de depósitos retrabalhados (Figura 46), e também na forma próxima às áreas de instabilidade, com a queda de material, entulhando a base da voçoroca e modificando o comportamento do escoamento superficial na sua base. Já na bacia hidrográfica, devido à conexão da Voçoroca do Areal com a rede de

drenagem, há um assoreamento dos canais de drenagem, causando uma mudança na dinâmica fluvial e facilitando a ocorrência de inundações.

A grande ocorrência de movimentos de massa e de áreas de rebaixamento na voçoroca ainda não estão bem compreendidos. Em diferentes porções da voçoroca é possível observar lentes de rocha mais argilosa em meio a litologia arenosa (Figura 59), formando descontinuidades e podendo desencadear diferentes mecanismos erosivos. Ainda, conforme observado por Wijdenes et al. (1999) em voçorocas no sudoeste da Espanha, as que possuíam solos contendo horizonte B textural, assim como a Voçoroca do Areal, se mostraram mais propensas para a ocorrência de movimentos de massa e alcovas de regressão. Desta forma, há indícios de grande interferência dos fatores litopedológicos nos mecanismos de erosão da área de estudo, necessitando de mais estudos para maiores esclarecimentos.

Figura 59 - Alternância de lentes de rocha com diferentes características na Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A utilização de VANT e do algoritmo SfM permitiram a identificação, mapeamento e compreensão dos mecanismos erosivos na área de estudo. Estas ferramentas de análise possuem grandes potencialidades no uso para o mapeamento

de erosão, sendo uma técnica de fácil aquisição de dados com baixo custo e que abre possibilidades para uma análise extremamente detalhada dos fenômenos.

A disponibilidade dos dados de forma mais detalhada permite diversas interpretações em ambientes erosivos. Uma das principais vantagens é a identificação de pequenas feições, permitindo, como no caso deste trabalho, a identificação de setores de uma voçoroca e relacionar com os mecanismos atuantes.

Apesar da grande potencialidade, estas ferramentas ainda possuem algumas limitações e desafios quanto ao seu uso. A necessidade de *hardwares* de grande capacidade de processamento é um dos principais obstáculos, demandando máquinas de alto desempenho ou um elevado tempo para o processamento do grande volume de dados gerado.

Outra limitação da utilização destas ferramentas é a interferência de artefatos nos modelos gerados. Na Voçoroca do Areal é comum a ocorrência de vegetação arbustiva, e em alguns pontos, sobretudo nas cabeceiras onde há maior concentração de umidade, há a ocorrência de árvores de grande porte (Figura 60) que causam interferências no modelo gerado com o algoritmo SfM, demandando correções. O problema da vegetação é possível de mitigar mediante a utilização de filtros, removendo os pixels de vegetação, porém em áreas onde há uma intensa nuvem de pontos de vegetação se faz necessário o cuidado para não remover demasiadamente os pontos e alterar a feição do terreno no MDT resultante.

Figura 60 - Ocorrência de interferências de árvores e sombra na Voçoroca do Areal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Também é comum, e possível de se observar na Figura 64, a ocorrência de sombra próximo às paredes da voçoroca, dependendo da posição do sol, sendo este um problema de difícil solução que causa ruídos no modelo. Uma das formas de suavizar este erro é a realização de voos na hora do meio dia, quando a incidência de luz solar se dá mais próxima de zênite.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos para a correção ou ajuste destes erros e limitações do uso de VANT e do algoritmo SfM. As principais soluções encontradas pelos pesquisadores é a realização de mais de um voo em que a câmera acoplada ao VANT possua diferentes angulações zenitais. Ou, ainda, a realização de tomadas de fotos no chão com equipamentos fotográficos em áreas de difícil cobertura do voo e alimentando o software com estas informações (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012; STÖCKER et al., 2015; STUMPF et al., 2015; FRANKL et al., 2015). Ainda se torna necessário mais estudos da aplicação destes métodos no estudo de voçorocas.

De modo geral as ferramentas forneceram dados com qualidade suficiente para o estudo dos mecanismos erosivos da Voçoroca do Areal que tornaram possível a setorização da voçoroca. O mapeamento e a identificação dos mecanismos erosivos

fornecem dados para posteriores estudos de gênese e de mitigação do processo de voçorocamento que ocorre no local.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar a distribuição e a atuação dos mecanismos erosivos na Voçoroca do Areal utilizando ferramentas de alta resolução para a análise com alto grau de detalhamento. Para tanto, foram utilizados dados obtidos com VANT que quando processados com o algoritmo SfM em *software* específico, proporcionaram alta resolução para o mapeamento, tornando possível a identificação até mesmo das menores feições. Desta forma se tornou possível a delimitação de setores dentro da voçoroca, morfometria dos mesmos e indicar os principais mecanismos e feições de cada setor.

As ferramentas utilizadas permitiram um nível de detalhamento com grande acurácia e baixo custo, que até então não era possível com as técnicas disponíveis para mapeamentos. Este nível de detalhe das informações tem ainda muito a contribuir na ciência geográfica com seu amplo uso nos mapeamentos em escalas maiores. Na análise de erosão, permite o mapeamento e interpretação de feições que antes não eram possíveis, abrindo espaço para estudos de morfologia, avanço erosivo, gênese, e diversas outras possibilidades.

A análise dos parâmetros do solo foi realizada com apenas uma amostra, fornecendo informação suficiente para o diagnóstico geral da feição, objetivo desta dissertação, possibilitando estabelecer relações entre as diferentes situações dos processos na voçoroca. Para estudos posteriores cabe a amostragem de mais perfis de solo em diferentes porções da voçoroca para a melhor identificação dos agentes pedogenéticos e sua influência no processo erosivo.

É importante ressaltar a existência de floresta plantada de eucalipto no entorno da Voçoroca do Areal. Esta cobertura vegetal possui impactos na dinâmica da voçoroca, diminuindo o escoamento superficial e aumentando a infiltração da água no solo. Porém é necessário um estudo mais aprofundado dos reais impactos da silvicultura nos mecanismos erosivos.

O trabalho realizado deixa evidente que a atuação dos mecanismos erosivos em uma voçoroca é complexa. Os diferentes setores possuem diversos fatores que influenciam nos mecanismos que atuam na erosão, bem como a sua intensidade. O mapeamento dos mecanismos erosivos da Voçoroca do Areal faz o uso de novas tecnologias para o mapeamento da erosão, abrindo espaço para diversos estudos e

abordagens sobre o assunto com uma nova perspectiva metodológica, ainda pouco explorada.

Os produtos gerados neste trabalho fornecem um banco de dados que possui potencial para auxílio em trabalhos a serem desenvolvidos, servindo de base para o estudo da gênese da voçoroca, para a identificação das melhores medidas mitigatórias, ou ainda como marco inicial para o estudo da evolução desta feição erosiva.

Aliado às tecnologias já empregadas neste trabalho há a possibilidade de utilização em trabalhos futuros de técnicas complementares, que podem ter impacto positivo na qualidade do produto gerado. Entre as técnicas propostas estão a utilização de fotos tiradas no nível do solo, para enriquecimento do modelo sob nova perspectiva e a realização de voos com diferentes angulações da câmera.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil**. Resolução 419, 2 de maio de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Hidroweb: Série histórica das estações. Disponível em: <
http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>. Acessado em 15 de setembro de 2018.

ALBUQUERQUE, F. N. B.; Agentes, Processos e Feições Erosivas em Voçoroca Conectada à Rede de Drenagem do Rio Coreaú, em Coreaú Ceará. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, Sobral, v.8/9, n.1, p. 11-20, 2007.

ANWEILER, S. PIWOWARSKI, D. Multicopter platform prototype for environmental monitoring. **Journal of Cleaner Production**, v. 155, p. 204 – 211, 2016.

ARAUJO, A. B.; GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. Use of Dense Stereo Matching for Existing Building Documentation: Comparative Analysis of Tools. In: **22th conference of the iberoamerican society of digital graphics**. São Paulo, 2018.

ARYA, S.; MOUNT, D. M.; NETANYAHU, N. S.; SILVERMAN, R.; WU, A. Y. An Optimal Algorithm for Approximate Nearest Neighbor Searching in Fixed Dimensions. **Journal of the ACM**, v. 45, n. 6, p. 891–923, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. ABNT, agosto de 1986, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. ABNT, outubro de 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. ABNT, dezembro 1984, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7183**: Determinação do limite e relação de contração de solos. ABNT, fevereiro de 1982, 3p.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. A ocorrência de voçorocas em Gouveia, MG: características e processos associados. **Revista Geonomos**, v. 14, p. 75-86, 2006.

BACELLAR, L. A. P.; COELHO NETTO, A. L.; LACERDA, W. A. Controlling factors of gullying in the Maracujá Catchment, Southeastern Brazil. **Earth Surface and Processes Landforms**, v. 30, p. 1369–1385, 2005.

BALTSAVIAS, E. P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, p. 83–94, 1999.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BERGONSE, R. V.; REIS, E. J. Theoretical constraints to gully erosion research: time for a re-evaluation of concepts and assumptions?. **Earth Surface and Processes Landforms**, v. 36, p. 1554–1557, 2011.

BERGSMA, E., CHARMAN, P., GIBBONS, F., HURNI, H., MOLDENHAUER, W., & PANICHAPONG, S.. **Terminology for soil eroion and conservation**. Wageningen : Grafisch Service Centrum, 1996.

BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, Embrapa, 2014.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. São Paulo: Ícone, 8ª ed., 2012.

BETTS, H. D.; TRUSTRUM, N. A.; DE ROSE, R. C. Geomorphic changes in a complex gully system measured from sequential digital elevation models, and implications for management. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 28, p. 1043–1058, 2003.

BIGARELLA, J. J.. **Estrutura e Origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis : Ed. da UFSC, 2003.

BOARDMAN, J.. **Erosão e Conservação dos Solos - Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

BRYAN, R. B.; PEOTEN, J. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. **Earth Surface Processes and Landforms**, vol. 14, p. 211-231, 1989.

CABRAL, I. L. L. **Depressões interfluviais e voçorocas articuladas à rede de drenagem: o exemplo das bacias dos rios Ibicuzinho, Areal do Paredão, Cacequi, Santa maria e Ibicuí**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CABRAL, I. L. L.; PRADO, R. J.; CABRAL, T. L. Indicadores morfodinâmicos que sugerem movimentos neotectônicos no divisor de águas dos rios Ibicuí/Jacuí - depressão periférica-RS. XII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. **Anais...** La Plata, 2009.

CABRAL, T. L. **Distribuição e classificação de voçorocas por meio de indicadores morfométricos em sub-bacias no município de Cacequi – RS**. Tese

(Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2018.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios Básicos de Geoprocessamento In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: Aplicações na Agricultura**. Brasília, Embrapa, 2.ed., 1998.

CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. **Introduction to remote sensing**. New York: Guildford Press, 5th ed., 2011.

CANIL, K.; IWASA, O.Y; SILVA, W.S.; ALMEIDA, L.E.G. Mapa de feições erosivas lineares do estado de São Paulo: uma análise qualitativa e quantitativa. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, 5., 1995, Bauru. **Anais....** ABGE Bauru (SP), 1995. p. 249-251.

CARRARO, C.C. **Mapa Geomorfológico do Estado do Rio Grande do Sul**. FAPERGS – UFRGS/Instituto de Geociências. 1974, 1: 1.000.000.

CASSETI, V.. **Ambiente e apropriação do relevo** (2ª ed.). São Paulo: Contexto, 1995.

CASTILLO, C.; GÓMEZ, J. A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. **Earth-Science Reviews**, v. 160, p. 300–319, 2016.

CHEROBIN, S. F. **Estimativa de erosão e sua relação com os diferentes mecanismos erosivos atuantes: Estudo da Voçoroca Vila Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

CHORLEY, R. J. **Geomorphology and general systems theory**. Washington: United States government printing office, 1962.

COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014.

CUNHA, S. B., FREITAS, M. W. D. Geossistemas e Gestão Ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio São João/RS. **Revista Geographia**, Ano. 6. Nº12, 2004.

D'OLEIRE-OLTMANN, S.; MARZOLFF, I.; PETER, K. D.; RIES, J. B. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. **Remote Sens**, v.4, p. 3390-3416, 2012.

DOMINGUES, E. N.; ROSSI, E.; MATTOS, I. F. A.; ABE, K.; KITADA, M. Tipologia e distribuição dos processos erosivos na microbacia do Ribeirão Água da Cachoeira, em Paraguaçu Paulista, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 141-149, 1998.

DONG, Y.; XIONG, D.; SU, Z.; DUAN, X.; LU, X.; ZHANG, S.; YUAN, Y. The influences of mass failure on the erosion and hydraulic processes of gully headcuts based on an in situ scouring experiment in Dry-hot valley of China. **Catena**, v. 176, p. 14–25, 2019.

DRUMOND, F. N. **Caracterização e Quantificação dos Processos Erosivos de uma Voçoroca na bacia do Riacho Manoel Félix no Complexo Metamórfico do Bação, Quadrilátero Ferrífero – MG**. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

DRUMOND, F. N.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização hidrossedimentológica e dos processos evolutivos de voçoroca em área de rochas gnáissicas do alto Rio das Velhas (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 7, v. 2, 2006.

EISENBEISS, H.; LAMBERS, K.; SAUERBIER, M. Photogrammetric recording of the archaeological site of Pinchango Alto (Palpa, Peru) using a mini helicopter (UAV). In: 33RT CONFERENCE OF COMPUTER APPLICATIONS AND QUANTITATIVE METHODS IN ARCHAEOLOGY. **Anais...** Tomar, 2005.

FERNANDES, P. **Estimativa de produtividade de milho (Zea Mays L.) através de imagens multiespectrais obtidas por veículo aéreo não tripulado**. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão), Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

FITZ, P.R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FRANKL, A.; STAL, C.; ABRAHA, A.; NYSSSEN, J.; ZAPP, D. R.; DE WULF, A.; POESEN, J. Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling. **Catena**, v.127, p. 92–101, 2015.

FREVERT, R. K. **Soil and Water Conservation Engeniring**. New York: John Wiley & Sons, 1963.

FURUKAWA, Y; CURLESS, B.; SEITZ, S. M; SZELISKI, R. Towards Internet-scale Multi-view Stereo. In: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. **Anais...** San Francisco, CA, 2010.

GAFUROV, A. M. **Utilização de Veículo Aéreo Não-Tripulado para a avaliação de erosão de uma voçoroca**. Registros Acadêmicos da Universidade de Kazan, série Ciências Naturais, v. 159, p. 654 – 667, 2017.

GALETI, P. A. **Práticas de Controle à Erosão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1984.

GARRETT, B; ANDERSON, K. Drone methodologies: Taking flight in human and physical geography. **Transactions of the Institute of British Geographers**, 1-19, 2018.

GLENDALL, M.; MCSHANE, G.; FARROW, L.; JAMES, M. R.; QUINTON, J.; ANDERSON, K.; EVANS, M.; BENAUD, P.; RAWLINS, B.; MORGAN, D.; JONES, L.; KIRKHAM, M.; DEBELL, L.; QUINE, T. A.; LARK, M.; RICKSON, J.; BRAZIER, R. E. Testing the utility of structure-from-motion photogrammetry reconstructions using small unmanned aerial vehicles and ground photography to estimate the extent of upland soil erosion. **Earth Surface and Processes Landforms**, v. 42, p. 1860–1871, 2017.

GONG, C.; LEI, S.; BIAN, Z.; LIU, Y.; ZHANG, Z.; CHENG, W. Analysis of the development of an Erosion Gully in an Open-Pit Coal Mine Dump During a Winter Freeze-Thaw Cycle by Using Low-Cost UAVs. **Remote Sensing**, v.11, 2019.

GRECO, J. A. S. Solos – **Conceitos e ensaios da mecânica dos solos: Classificação dos solos para fins rodoviários**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/260693-Solos-conceitos-e-ensaios-da-mecanica-dos-solos-classificacao-dos-solos-para-fins-rodoviaros.html>>. Acessado em 05 de abril de 2019.

GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S. S.; Aplicações dos Modelos de Elevação SRTM em Geomorfologia. **Revista Geografia Acadêmica**, v.2 n.2, 2008.

GUADAGNIN, P. M. A., TRENTIN, R. Compartimentação Geomorfométrica do Arroio Caverá – RS. **Geo UERJ**. Rio de Janeiro, Ano 16, nº. 25, v. 1, pp.183-199, 2014.

GUERRA, A. T.; **Dicionário Geológico Geomorfológico**. Rio de Janeiro: IBGE, 8ed, 1993.

GUERRA, A. J. Processos erosivos nas encostas. Em A. J. GUERRA, & S. B. CUNHA, **Geomorfologia: Uma atualização dos conceitos** (pp. 149 - 177). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

GUERRA, A. J., DA SILVA, A. S., & BOTELHO, R. G. **Erosão e Conservação dos solos: Conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

GUERRA, A. J. T; GUERRA, A. J. **Novo dicionário geológico geomorfológico**.6 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

GUTIÉRREZ, A. G.; SCHNABEL, S.; CONTADOR, F. L.; SANJOSÉ, J. J.; ATKINSON, A. D. J.; FERNANDÉS, M. P.; FERNANDÉS, M. S. Studying the influence of livestock pressure on gully erosion in rangelands of SW Spain by means of the UAV+SfM workflow. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles**, v. 78, p. 66–88, 2018.

GUTIÉRREZ, A. G.; SCHNABEL, S.; SEMPERE, F. B.; CONTADOR, F. L.; DELGADO, J. L. Using 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion. **Catena**, v. 120, p. 91–101, 2014.

HOSSEINALIZADEH, M.; KARIMINEJADA, N.; CHEN, W.; POURGHASEMI, H. Z.; MOHAMMAD ALINEJA, M.; BEHBAHANI, A. M.; TIEFENBACHER, J. P. Spatial modelling of gully headcuts using UAV data and four best-first decision classifier

ensembles (BFTree, Bag-BFTree, RS-BFTree, and RF-BFTree). **Geomorphology**, v. 329, p. 184–193, 2019.

HOUGHTON, P. D., & CHARMAN, P. E. **Glossary of Terms used in Soil Conservation**. Sydney: Soil conservation Service of New South Whales, 1986.

IERSEL, W.; STRAATSMA, M.; ADDINK, E.; MIDDELKOOP, H. Monitoring height and greenness of non-woody floodplain vegetation with UAV time series. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.14, p. 112–123, 2018.

INDERBITZEN, A. L. An erosion test for soils. **Material Research and Standards**, Philadelphia, v.1, n.7, p.553 – 554, 1961.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **História**. Disponível em < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/cacequi/historico> > . Acessado em 08/10/2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de geomorfologia / IBGE**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. ed. Rio de Janeiro : IBGE, 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil 1961 – 1990**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e abastecimento, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo. Escala 1:500.000, v. 2, 1981.

IRELAND, H. A., SHARPE, C. F., & EARGLE, D. H. **Principles of gully erosion in the piedmont of South Carolina**. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, 1939.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. Advanced Land Observing Satellite "Daichi" (ALOS): start of operations phase and data provision to the public. Disponível em: <http://www.jaxa.jp/press/2006/10/20061023_alos_e.html>. Acesso em: 13 set. 2018.

JAKIEL, A. B.; POESEN, J. Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 1107–1128, 2018.

JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons a Pattern Recognition Approach to Classification and Mapping of Landforms. **Geomorphology**, v.182, pag. 147–156, 2013.

JORGE, L. A., & INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. Em A. C. BERNARDI, **Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar** (pp. 109-156). Brasília: EMBRAPA, 2014.

KAISER, A.; NEUGIRG, F.; ROCK, G.; MÜLLER, C.; HAAS, F.; RIES, J.; SCHMIDT, J. Small-Scale Surface Reconstruction and Volume Calculation of Soil Erosion in

Complex Moroccan Gully Morphology Using Structure from Motion. **Remote Sens**, v. 6, 2014.

KURZ, C; THORMÄHLEN, T.; SEIDEL, H. P. Visual Fixation for 3D Video Stabilization. **Journal of Virtual Reality and Broadcasting**, v.8, 2011.

LAVINA, E. L.; FACCINI, U. F.; RIBEIRO, H. J. S. A Formação Pirambóia (permotriássico) no estado do Rio Grande do Sul. **Acta Geológica Leopoldensia**, v. 38, p. 179 – 197, 1993.

LI, Z.; ZHANG, Y.; ZHU, Q.; YANG, S.; LI, H.; MA, H. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area. **Catena**, v. 148, p. 195–203, 2017.

LIU, K.; DING, H.; TANG, G.; NA, J.; HUANG, X.; XUE, Z.; YANG, X.; LI, F.; Detection of Catchment-Scale Gully-Affected Areas Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau. **Internation Journal of Geo-Information**, v. 5, 2016.

LOPES PINTO, B. **Dinâmica geomorfológica de voçorocas no município de Tucano – Bahia**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, 2018.

LOWE, D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Key points. **International Journal of Computer Vision**, v. 60, n.2, p. 91–110, 2004.

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V.; **Introdução à Geologia de Engenharia**. 4 ed. Santa Maria: Editora da UFSM, 2011.

MAGALHÃES, R. C.; VIEIRA, A. S. F. G.; AQUINO, R. N. A.; GLÓRIA. S. A.; CAVALCANTE, D. G. Monitoramento e caracterização de duas voçorocas no bairro Vila Buriti, Manaus (AM). **Revista Geonorte**, V.1, N.6, p.84 –100, 2012.

MARCHIORI, J. N. C.; ALVES, F. S. Campos de areia e silvicultura no oeste do Rio Grande do Sul: enfoque fitogeográfico. **BALDUINIA**, n. 23, p. 01-20, 2010.

MARDEN, M.; ARNOLD, G.; SEYMOUR, A.; HAMBLING, R. History and distribution of steepland gullies in response to land use change, East Coast Region, North Island, New Zealand. **Geomorphology**, v. 153, p. 81–90, 2012.

MARDEN, M.; FULLER, I. C.; HERZIG, A.; BETTS, H. D. Badass gullies: Fluvio-mass-movement gully complexes in New Zealand's East Coast region, and potential for remediation. **Geomorphology**, v. 307, p. 12-23, 2018.

MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A.; RAMOS, M. C.; GARCÍA-HERNANDÉS, D. Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedés region (northeast Spain). **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1927–1937, 2009.

MARZOLFF, I. POESEN, J. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system.

Geomorphology, v. 111, p. 48–60, 2009.

MATHIAS, D. T.; CUNHA, C. M. L.; CARVALHO, P. F. Avaliação de técnicas de monitoramento de processos erosivos acelerados em área peri-urbana – São Paulo. In: VI Seminário Latino Americano de Geografia Física. **Anais...** Coimbra, 2010.

MEDEIROS, F. A. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2007.

MONTEIRO, C. A. F. O clima da região Sul. In: CATALDO, D. M. (Org.). **Geografia do Brasil, Grande Região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, p. 117- 169, 1963.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and Conservation**. Malden, USA: Bleckwell Publishing, Third edition, 2005.

MUÑOZ-ROBLES, C.; REID, N.; FRAZIER, P.; TIGHE, M.; BRIGGS, S. V.; WILSON, B. Factors related to gully erosion in woody encroachment in south-eastern Australia. **Catena**, v. 83, p. 148–157, 2010.

NEVES, C. E.; MACHADO, G.; HIRATA, C. A.; STIPP, N. A. F. A importância dos geossistemas na pesquisa geográfica: uma análise a partir da correlação com o ecossistema. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 26, p. 271-285, 2014.

NIETHAMMER, U. et al; UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. **Engineering Geology**, v. 128, p. 2 – 11, 2012.

NÓBREGA, M. T.; CUNHA, J. E. A paisagem, os solos e a suscetibilidade à erosão. **Espaço Plural**, ano XII, n. 25, 2011.

NOBAJAS, A.; WALLER, R. I.; ROBINSON, Z. P.; SANGONZALO, R. Too much of a good thing? the role of detailed UAV imagery in characterizing large-scale badland drainage characteristics in South-Eastern Spain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38:8-10, p. 2844-2860, 2017.

NOLLA, D. **Erosão do Solo, o Grande Desafio**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1982.

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V. **Introdução à geologia de engenharia**. Santa Maria: Editora da UFSM, 2011.

MARCHIORO, E.; ANDRADE, E. E.; OLIVEIRA, J. C. Evolução espaço-temporal de voçorocas no Espírito Santo: estudo de caso nos municípios de Afonso Cláudio e Alegre. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. São Paulo, v.17, n.1, (Jan-Mar) p.191-204, 2016.

MOREIRA NEVES, S.; BARBOSA, A. M. F.; SOUZA, R. M. Análise Geoambiental do Município de Uruçuí – PI. **Revista de Geografia (UFPE)**. V. 32, No. 1, 2015.

- OLIVEIRA, M. A. T. Erosion disconformities and gully morphology: a threedimensional approach. **Catena Journal**, Cremlingen, v. 16, p. 413 – 423, 1989.
- OLIVEIRA, M. A. T. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas . Em A. T. GUERRA, **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos Temas e Aplicações** (pp. 57-101). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.
- OLIVEIRA, M. A. T. de; MEIS, M. R. M. de. Relações entre Geometria do relevo e formas de erosão linear acelerada. (Bananal, SP) **Geociências**, 4:87-99, 1985.
- PAISINI, J. C.; OLIVEIRA, M. A. T. Desenvolvimento de incisão erosiva (voçoroca) descontínua e desconectada da rede hidrográfica em área de cabeceira de drenagem: O caso da colônia Quero-quero (Palmeira – PR). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, p. 51 – 58, 2001.
- PAIVA, L. E. V. **A influência do diâmetro representativo do material do leito nas fórmulas de cálculo do transporte de sedimentos em escoamentos com superfície livre**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Campinas, Unicamp, 2007.
- PAOLI, B. L.; TRINDADE, C. A. Boas práticas para o uso da técnica Structure from Motion. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** João Pessoa, p. 6566 – 6571, 2015.
- PARKNER, T.; PAGE, M. J.; MARUTANI, T.; TRUSTRUM, N. A. Development and controlling factors of gullies and gully complexes, East Coast, New Zealand. **Earth Surface Processes Landforms**, v. 31, p. 187–199, 2006.
- PEGORARO, A. J.; GUBIANI, J. S.; PHILIPS, J. W.; Veículo Aéreo não Tripulado: Uma Ferramenta de Auxílio na Gestão Pública. **Simposio Argentino de Informatica y Derecho**, p. 176 – 187, 2013.
- PETER, K. D.; D'OLEIRE-OLTMANN, S.; RIES, J. B.; MARZOLFF, I.; HSSAINE, A. A.; Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data. **Catena**, v. 113, p. 24–40, 2014.
- PINHEIRO, R. J. B.; NUMMER, A. V.; SANGOI, D. S. Caracterização de processo erosivo tipo voçoroca no Oeste do estado do Rio Grande do Sul. In: V Conferência brasileira de estabilidade de encostas, **Anais...** São Paulo, 2009.
- PIROLI, E. L. **Introdução ao Geoprocessamento**. Ourinhos: Editora da Universidade Estadual de São Paulo, 2010.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CACEQUI. **História do município**. Disponível em <<http://www.cacequi.rs.gov.br/municipio/historia.html>>. Acessado em 08/10/2018.
- PRUSKI, F. F. **Conservação do Solo e Água**. Viçosa: Editora da UFRV, 2009.
- QIN, R.; GRÜN, A.; HUANG, X. UAV project – building a reality-based 3D model. **Coordinates**, v.9 p. 18-26, 2013.

RADEMANN, L. K. **Zoneamento geoambiental do município de Cacequi – RS.** Trabalho de Graduação em Geografia, Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2017.

RADEMANN, L. K., TRENTIN, R., ROBAINA, L. E. S.; Análise das formas de relevo do município de Cacequi – RS. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, v.38, n.1, p. 179-188, 2016.

RAHMATI, O., TAHMASEBPOUR, N., HAGHIZADEH, A., POURGHASEMI, H. R., & FEIZIZADEH, B. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. **Geomorphology**, 118-137, 2017.

RETCHIE, J. C.; JACKSON, T. J.; GARBRECHT, J. D.; GRISSINGER, E. H.; MURPHEY, J. B.; EVERITT, J. H.; ESCOBAR, D. E.; DAVIS, M. R.; WELTZ, M.A. Studies using an airborne laser altimeter to measure landscape properties, **Hydrological Sciences Journal**, v. 38, p. 403-416, 1993.

RIBEIRO, A. S.; MINCATO, R. L.; CURI, N.; KAWAKUBO, F. S. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, p. 16-31, 2016.

ROBAINA, L. E. S.; NETO, S. F.; PAULA, P. M.; PEREIRA, V. P. Processo Erosivo acelerado no RS: Voçorocamento no município de Cacequi. **Revista Geografia**. Rio Claro, v. 27(2), p. 109-120, 2002.

ROBAINA, L. E. S.; SCCOTI, A. A. V.; TRENTIN, R. Zoneamento morfolitológico no Município de Manoel Viana – RS. **Geografia (Londrina)**. V.22, n.1, p.27-37, 2013.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; Degradação dos solos: Problema ambiental no Sudoeste Gaúcho. **Interface**, Porto Nacional, TO. v.1, n.1, p. 29-41, maio 2004.

ROBAINA, L. E. S., TRENTIN, R., ACHKAR, M. Distribuição e identificação de elementos do relevo, gerados automaticamente, no território do Uruguai. **Anais... XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA**, Campinas, 4741-4749, 2017.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; de CRISTO, S. S. V.; SCCOTI, A. A. V. Aplicação de geomorphons para a classificação do relevo no estado do Tocantins, Brasil. **Revista Ra'E Ga**, Curitiba, v.41 Temático de Geomorfologia, p.37-48, 2017.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; DE NARDIN, D.; DE CRISTO, S. S. V.; Método e Técnicas Geográficas Utilizadas na Análise e Zoneamento Ambiental. **Revista Geografias**, Belo Horizonte, v. 5, p. 36-49, 2009.

ROBAINA, L.E.S., TRENTIN, R., LAURENT, F. Compartimentação do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, Através do uso de Geomorphons obtidos em classificação topográfica automatizada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.17, n.2, (Abr-Jun) p.287-298, 2016.

RODRÍGUEZ, J. M. M.; DA SILVA, E. V.; VICENS, R. S. O legado de Sochava. **GEOgraphia**, ano 17, v. 33, 2015.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: Variabilidade, tendências e tipologia**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SATELLITE IMAGING CORPORATION. **QuickBird satellite image gallery and satellite specifications**. Disponível em: <<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/quickbird.html>>. Acesso em: 16 de agosto de 2019.

SCHÖNBERGER, J. L.; FRAHM, J. M. Structure-from-Motion Revisited. In: **Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, Las Vegas - USA, 2016.

SEBEN, E.; TEN CATEN, A.; ROBAINA, A. D.; MOREIRA, A. L. L.; PELLEGRINI, G. C. **Fundamentos de Cartografia e o Sistema de Posicionamento Global GPS**. Editora da UFSM: Santa Maria – RS, 2010.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Radam – D**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Sensoriamento-Remoto-e-Geofisica/RADAM-D-628.html>>. Acessado em 25 de outubro de 2017.

SILVEIRA, A.; CUNHA, C. M. L. A Mensuração da capacidade de Infiltração em Sistemas Vertentes e sua Relação na Dinâmica Erosiva. In: VII Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO) e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia. **Anais...** Belo Horizonte – MG, 2008.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of Soil Science Terms**. U. S. Government, Madison, 2008.

SOUSA, A. T. **Caracterização de voçorocas em bordas de relevo residual tabular em Quirinópolis-GO**. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal de Goiás, 2010.

SILVA, M. D. Os cultivos florestais do pampa, no sul do Rio Grande do Sul: desafios, perdas e perspectivas frente ao avanço de novas fronteiras agrícolas. **FLORESTA**, v. 42, n. 1, p. 215 – 226, Curitiba, 2012.

SILVEIRA, A.; LUPINACCI DA CUNHA, C. M. Cartografia Geomorfológica Como Subsídio Para a Análise Das Interferências do Uso da Terra no Desencadeamento dos Processos Erosivos: Um Estudo em Área Canavieira. **RA'E GA**, p.365-391, Curitiba, Departamento de Geografia – UFPR, 2010.

SILVEIRA, C. T.; SILVEIRA, R. M. P.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Classificação automatizada de elementos de relevo no estado do Paraná (Brasil) por meio da aplicação da proposta dos geomorphons. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.19, n.1, (Jan-Mar) p.33-57, 2018.

STARKE, L. Paradoxes in the development of gullies. **Landform Analysis**, vol. 17, 2011.

STÖCKER, C.; ELTNER, A.; KARRASCH, P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close-range photogrammetry — A case study from Andalusia, Spain. **Catena**, v. 132, p. 1–11, 2015.

STUMPF, A.; MALET, J. P.; ALLEMAND, P.; PIERROT-DESEILLIGNY, M.; SKUPINSKI, P. Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. **Geomorphology**, v. 231, p. 130–145, 2015.

SMITH, M. W.; VERICAT, D. From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. **Earth Surface Process and Landforms**, v. 40, p. 1656–1671, 2015.

SUERTEGARAY, D. M. A. Erosão nos campos sulinos: arenização no Sudoeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 3, 2011.

SUERTEGARAY, D. M. A.; MORELLI, L. A.; Conflitos da silvicultura em áreas em processo de arenização: Sudoeste do Rio Grande do Sul. Em MOREIRA, I.; TRAGINO, I., **Desertificação, desenvolvimento sustentável e agricultura familiar: Recortes no Brasil, em Portugal e na África** (p. 193-200). João Pessoa: Editora da Universidade da Paraíba, 2010.

SUERTEGARAY, D. M. A.; ROSSATO, M. S.; BELLANCA, E. T.; FACHINELLO, A.; CÂNDIDO, L. A.; DA SILVA, C. R. **Terra: Feições Ilustradas**. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS, 2008.

TATTO, J. **Análise dos parâmetros geológico-geotécnicos que condicionam erosão por voçoroca no município de São Francisco de Assis - RS**. Trabalho de Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria: UFSM, 2007.

TRENTIN, R. **Definição das unidades geoambientais na bacia hidrográfica do Rio Itú – Oeste do RS**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2007.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Mapeamento Morfológico Da Bacia Hidrográfica Do Rio Itú. **Anais... VI Simpósio Nacional de Geomorfologia**, Goiânia – GO, 2006.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Unidades Geoambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Itú – Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, Volume 23, p. 267-287, 2012.

TRENTIN, R., ROBAINA, L. E. S. Classificação das Unidades de Relevo Através de Parâmetros Geomorfométricos. **Mercator**, Fortaleza, v. 15, n.3, p. 53-66, jul./set., 2016.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: Fundação IBGE/SUPREN, 1977.

TURNER, D.; LUCIEER, A.; WATSON, C. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. **Journal of Remote Sensing**, v. 4, p. 1392 – 1410, 2012.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, p. 132–153, 2005.

VANMAERCKE, M.; POESEN, J.; VAN MELE, B.; DEMUZERE, M.; BRUYNSEELS, A.; GOLOSOV, V.; BEZERRA, J. F. R.; BOLYSOV, S.; DVINSKI, D.; FRANKL, A.; FUSEINA, Y.; GUERRA, A. J. T.; HAREGEWEY, N.; IONITA, I.; IMWANGANA, F. M.; MOEYERSONS, J.; MOSHE, I.; SAMANI, A. M.; NIACSUI, L.; NYSSSEN, J.; OTSUKI, Y.; RADOANE, M.; RYSIN, I.; RYZHOV, Y. V.; YERMOLAEV, O. How fast do gully headcuts retreat?. **Earth-Science Reviews**, v.154, p.336–355, 2016.

VERDONK, S. C. **Gully volume estimates using UAV Photometry in the Salagou area**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Utrecht, 2015.

VIANA, C. D. **Análise estrutural de descontinuidades baseada em técnicas de Structure From Motion: Aplicação em mina a céu aberto**. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica), São Paulo, Universidade de São Paulo, 2015.

VIANA, C. D.; GROHMAN, C. H.; BUSARELLO, M. S. T.; GARCIA, G. P. B. Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion - Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 48, p. 839-852, 2018.

VIEIRA, A.F.G. **Erosão por voçorocas em áreas urbanas: o caso de Manaus (AM)**. Dissertação (Mestrado). Florianópolis: UFSC, 1998.

VIEIRA, A. F. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VIEIRA, A. F. G.; ALBUQUERQUE, A. R. C. Cadastramento de voçorocas e análise do risco erosivo em estradas: BR - 174 (trecho Manaus-Presidente Figueiredo). In: V Simpósio Nacional de Geomorfologia. **Anais...** Santa Maria, 2004.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300–314, 2012.

WIJDENES, D. J. O.; POESEN, J.; VANDEKERCKHOVE, L.; NACHTERGAELE, J.; DE BAERDEMAEKER, J. Gully-head morphology and implications for gully development on abandoned fields in a semi-arid environment, Sierra de Gata, southeast Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 24, p. 585-603, 1999.

WOOD, J. **The geomorphological characterisation of digital elevation models.** Leicester, UK. 185p. PhD Thesis - University of Leicester, 1996. Disponível em: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>.

XAVIER, F. V.; CUNHA, K. L.; SILVEIRA, A.; SALOMÃO, F. X. T. Análise da suscetibilidade à erosão laminar na Bacia do Rio Manso, Chapada dos Guimarães, MT, utilizando Sistemas de Informação Geográficas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, 2010.

ZARTH, P. A.; GERHARDT, M. Uma história ambiental do pampa do Rio Grande do Sul. In: TEIXEIRA FILHO, A. **Lavouras da destruição: a (im)posição do consenso.** Pelotas, 2009.