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

Tiéle Lopes Cabral

DISTRIBUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE VOÇOROCAS POR MEIO DE INDICADORES MORFOMÉTRICOS EM SUB-BACIAS NO MUNICÍPIO DE CACEQUI - RS

Santa Maria, RS
2018

Tiéle Lopes Cabral

DISTRIBUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE VOÇOROCAS POR MEIO DE INDICADORES MORFOMÉTRICOS EM SUB-BACIAS NO MUNICÍPIO DE CACEQUI - RS

Tese de doutorado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração: Análise Ambiental e Dinâmica Espacial, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutora em Geografia**.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Andréa Valli Nummer

Santa Maria, RS

2018

Cabral, Tiéle Lopes
Distribuição e classificação de voçorocas por meio de indicadores morfométricos em sub-bacias no município de Cacequi - RS / Tiéle Lopes Cabral.- 2018.
191 p.; 30 cm

Orientadora: Andréa Valli Nummer
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2018

1. Classificação e evolução de Voçorocas 2. Indicadores Morfométricos 3. Erosão 4. Sub-bacias hidrográficas I. Nummer, Andréa Valli II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

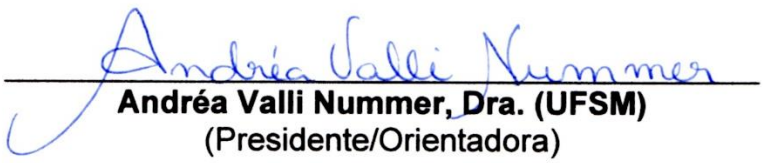
© 2018
Todos os direitos autorais reservados a Tiéle Lopes Cabral. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
Endereço: Avenida Roraima, 1000. Bloco:51. Apto: 5124. Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97105-900.
E-mail: tielecabral@gmail.com

Tiéle Lopes Cabral

DISTRIBUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE VOÇOROCAS POR MEIO DE INDICADORES MORFOMÉTRICOS EM SUB-BACIAS NO MUNICÍPIO DE CACEQUI - RS

Tese de doutorado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração: Análise Ambiental e Dinâmica Espacial, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutora em Geografia**.

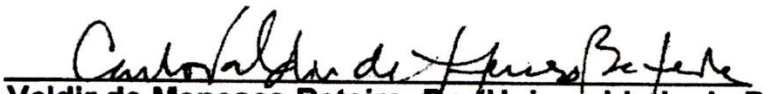
Aprovado em 18 de dezembro de 2018:



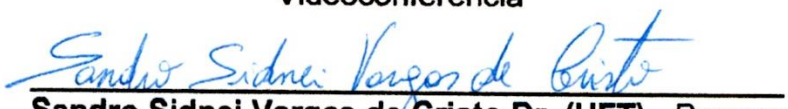
Andréa Valli Nummer, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Mauro Kumpfer Werlang, Dr. (UFSM)

Romario Trentin, Dr. (UFSM)



Carlos Valdir de Meneses Bateira, Dr. (Universidade do Porto) - Videoconferência



Sandro Sidnei Vargas de Cristo, Dr. (UFT) - Parecer

Santa Maria, RS
2018

Dedico esse trabalho a meus queridos conterrâneos cacequienses, na certeza de sua importância para esta terra que amei desde guria.

Tiéle Lopes Cabral

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, por possibilitar o uso de sua estrutura, aproveitando o conhecimento de seu corpo docente e por oferecer um ensino de qualidade e gratuito.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES-PDSE*)* pela concessão da bolsa de Doutorado Sanduíche no Exterior, na Universidade do Porto em Portugal, no ano de 2017.

À minha orientadora, Professora Andréa Valli Nummer, que acreditou em meu trabalho e aceitou o desafio desta orientação. Como orientanda, digo que é mais fácil acreditar em si mesma depois que alguém acreditou primeiro.

Ao Professor Carlos Valdir de Meneses Bateira, pela acolhida e orientação durante o período do doutorado sanduíche na Universidade do Porto - Portugal, com certeza suas contribuições foram além da tese, levarei para a vida, toda a dedicação e atenção que recebi durante a mobilidade.

Aos professores Romario Trentin, Mauro Kumpfer Werlang, Sandro Sidnei Vargas de Cristo e Carlos Valdir de Meneses Bateira pela disponibilidade em avaliar este trabalho, contribuindo para uma melhor qualidade do mesmo.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Geologia Ambiental, em especial a Indiara Moraes, Guilherme Cardoso, Vinicius Guareschi, Matheus Bolzan, Leonardo Aguiar e Wellerson Pessotto, pelas contribuições e coleguismo.

À meus pais João Amadeu Lazzarotto Cabral e Maria das Graças Lopes Cabral, sempre dispostos a ajudar, sem vocês os trabalhos de campo realizados na área de estudo seriam mais difíceis.

Aos meus irmãos Taíze Lopes Cabral e João Amadeu Lopes Cabral, pelo apoio e compreensão nos momentos em que não podia estar presente, não esquecendo da pequena Olívia Cabral Pacheco (sobrinha linda).

À minha avó Vicentina Nogueira Martins, a maior incentivadora dos meus sonhos, nossas conversas vão longe quando estamos juntas, sempre disposta a dar uma palavra de apoio.

À Rogério Junqueira Prado e Ivaniza Cabral, pelo apoio e direcionamento na organização dos dados da tese, além de tios, são exemplares colegas de profissão, que me acompanham desde o início da vida acadêmica, viveram minhas ansiedades

e crescimento. Nossas conversas foram muito importantes, pois me deram direção e inspiração.

Não posso deixar de agradecer aos amigos e amigas (Rodrigo Corrêa, Taís Nunes, Cleberson Ribeiro, Ingrid Santos, Alecsandra Cunha, Sara Carvalho, Greice Fonseca, Karina Merlo, Artálio Furtado e Paolla Mara) aos quais tive a oportunidade de conviver ao longo da vida, e que de alguma forma participaram desta etapa importante. Vocês fizeram a diferença!

Àqueles que não foram citados, mas que de alguma forma contribuíram para a construção desta pesquisa, sintam-se agradecidos, com certeza a pesquisa cientifica não se edifica sozinha e envolve diversas formas de contribuição.

O mundo é muito grande, ficar num só
lugar é um desperdício de espaço.

(Lin Chi)

RESUMO

DISTRIBUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE VOÇOROCAS POR MEIO DE INDICADORES MORFOMÉTRICOS EM SUB-BACIAS NO MUNICÍPIO DE CACEQUI – RS

AUTORA: Tiéle Lopes Cabral
ORIENTADORA: Prof.ª Dr.ª Andréa Valli Nummer

A região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul é uma das áreas onde ocorre os processos de erosão por voçorocamento, atrelados aos aspectos geológico/geomorfológico, e no seu contexto genético apresentam particularidades determinantes à instalação de tais processos. Neste contexto, a presente pesquisa buscou entender a distribuição geográfica das ocorrências de voçorocas em uma área amostral no município de Cacequi. A análise teve base nos resultados referente aos indicadores morfométricos que possibilitaram classificá-las em relação as suas formas, além de compreender os seus níveis de evolução e desenvolvimento, utilizando como unidade de análise as sub-bacias hidrográficas presentes na porção central do referido município, onde foram identificadas e mapeadas 298 eventos de voçorocas. Este procedimento levou em consideração os atributos morfométricos (área, perímetro, largura, profundidade, volume, índice de circularidade, hipsometria, declividade, formas de vertente, perfil e plano de curvatura, orientação de vertentes, comprimentos de vertentes e os lineamentos das falhas e fraturas geológicas). Os métodos utilizados na pesquisa partiram da análise qualitativa e quantitativa dos dados sobre as propriedades morfométricas, as quais foram submetidas à análise estatística possibilitando, deste modo, estabelecer a correlação entre os dados e a similaridade das sub-bacias, além da aplicação do Método do Valor Informativo para determinar os atributos físicos que mais contribuem para o desenvolvimento do processo erosivo em questão. O mapa da distribuição de voçorocas indicou os padrões das diferentes formas de voçorocas, possibilitando sua classificação a partir da análise dos indicadores morfométricos, permitindo identificar na referida área seis diferentes formas de voçorocas (Linear, Bulbiforme, Ramificada, Irregular Mista, Retangular e Irregular Retangular). Os lineamentos mapeados na orientação das voçorocas apresentaram predominância na orientação leste-oeste e nordeste-sudoeste, fato que evidencia a influência do controle estrutural nos referidos processos e as principais direções das voçorocas contribui em suas formas. Enfim, os resultados alcançados possibilitou propor um cenário de como ocorre a sistemática de desenvolvimento das diferentes formas de voçorocas nesta parte da Depressão Periférica no Estado.

Palavras-chave: Classificação e evolução de Voçorocas, Indicadores Morfométricos. Erosão. Sub-bacias hidrográficas.

ABSTRACT

DISTRIBUTION AND CLASSIFICATION OF GULLIES BY MORPHOMETRIC INDICATORS IN SUB-BASINS IN THE CACEQUI MUNICIPALITY

AUTHOR: Tiéle Lopes Cabral
ADVISOR: Profª. Drª. Andréa Valli Nummer

The southwest region of the state of Rio Grande do Sul is one of the areas where erosion processes by gullies occur, linked to the geological / geomorphological aspects, and in their genetic context they present particularities determining to the installation of such processes. In this context, the present research sought to understand the geographic distribution of occurrences of gullies in a sample area in the municipality of Cacequi. The analysis was based on the results referring to the morphometric indicators that made it possible to classify them in relation to their forms, in addition to understanding their levels of evolution and development, using as a unit of analysis the sub-basins present in the central portion of this municipality, where 298 gullies events were identified and mapped. This procedure took into account the morphometric attributes (area, perimeter, width, depth, volume, circularity index, hypsometry, slope, slope shapes, profile and plane curvature, slope orientation, slope lengths and fault geological fractures). The methods used in the research were based on the qualitative and quantitative analysis of the data on the morphometric properties, which were submitted to the statistical analysis, allowing to establish the correlation between the data and the similarity of the sub-basins, besides the application of the Method of Informative value to determine the physical attributes that contribute most to the development of the erosive process in question. The map of the gullies distribution indicated the patterns of the different forms of gullies, allowing their classification by analyzing the morphometric indicators, allowing identifying in the area six different forms of gullies (Linear, Bulbiform, Branched, Mixed Irregular, Rectangular and Irregular Rectangular). The lineaments mapped in the orientation of the gullies showed predominance in the east-west and northeast-southwest orientation, fact that evidences the influence of the structural control in these processes and the main directions of the gullies contribute in their forms. Finally, the obtained results allowed proposing a scenario of how the systematic development of the different forms of gullies occurs in this part of the Peripheral Depression in the State.

Keywords: Classification and evolution of gullies, Morphometric Indicators. Erosion. Sub-basins.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização geográfica da área de estudo no município de Cacequi, RS. 23
Figura 2- Províncias Geomorfológicas do Rio Grande do Sul. 25
Figura 3- Coluna estratigráfica para a área de estudo no município de Cacequi.....27
Figura 4 - Cenas apresentando o aspecto da vegetação predominante na área de estudo e o contexto da intervenção antrópica sobre a mesma. 29
Figura 5 - Mapa da bacia hidrográfica do rio Ibicuí. 31
Figura 6 - Representação das formas de Voçorocas conforme (A) Bigarella (2003) e (B) Vieira (2008). 38
Figura 7 - Modelo de evolução do tipo de voçorocas. 39
Figura 8 - Esquema de diferentes tipos de formato da seção transversal de voçorocas. 41
Figura 9 - Fatores controladores da erosão. 45
Figura 10 - Modelos de curvaturas das vertentes. 50
Figura 11 - Síntese metodológica da pesquisa. 58
Figura 12 - Chave de identificação para localização mapeamento e classificação das voçorocas. 65
Figura 13 - Mapa de pontos verificados em campo. 75
Figura 14 - Distribuição da drenagem nas sub-bacias hidrográficas da área de estudo. 78
Figura 15 – Características hidrográficas do A) Curso principal da Sub-Bacia do Arroio Areal Grande, canal totalmente colmatado por material arenoso. B) Canal principal do Rio Ibicuí. 80
Figura 16 – Perfis longitudinais dos principais cursos d'água das sub-bacias hidrográficas da área de estudo. 82
Figura 17 - Arenito de coloração avermelhada em topos de colinas e fundos de vales - Voçoroca nº195. 84
Figura 18 – Conglomerado basal com seixos mal classificados (A) e angulosos (B) envoltos em matriz arenosa em vales em "U" - Sub-Bacia hidrográfica Sanga da Tapera. 84
Figura 19 – Mapa Geomorfológico da área de estudo. 86
Figura 20 – Compilação da distribuição de solos e ocorrências erosivas na forma de voçorocas na área de estudo. 88
Figura 21 – Aspecto de um Planossolo presente no baixo e médio curso no Arroio Areal Grande a 102 e 126 m de altitude. 89
Figura 22 – Argissolos em topo de colina com 174 e 169 metros de altitude, na sub-bacia do Arroio Areal Grande. 89
Figura 23 – Camada de concreção ferruginosa no interior da Voçoroca nº.44 - Arroio Areal Grande. 91
Figura 24 – Presença de sulcos (A) e filetes (B) nas cabeceiras das voçorocas 42 e 118. 92
Figura 25 – Erosão interna nas cabeceiras das voçorocas 206 e 118. 93

Figura 26 - Solapamento e ranhuras verticais nas cabeceiras das voçorocas 183 e 194. 93
Figura 27 - Mapa hipsométrico da área de estudo. 95
Figura 28 – Número de ocorrência de modalidades de voçorocas em relação ao nível altimétrico. 96
Figura 29 – Mapa de declividade da área de estudo. 98
Figura 30 – Mapa de orientação de vertentes da área de estudo. 100
Figura 31 – Mapa da distribuição do perfil de curvatura das vertentes na área de estudo. 102
Figura 32 – Distribuição do plano de curvatura das vertentes na área de estudo... 105
Figura 33 – Distribuição de curvatura das vertentes na área de estudo. 106
Figura 34 - Mapa de uso e ocupação das áreas com ocorrência de voçorocas. 111
Figura 35 - Mapa de distribuição das voçorocas na área de estudo por sub-bacia hidrográfica. 112
Figura 36 - Principais formas de voçorocas encontradas na área de estudo. 115
Figura 37 – Distribuição das voçorocas por forma na área de estudo. 116
Figura 38 – Histogramas de ocorrências das formas de voçorocas versus área. ... 120
Figura 39 - Histogramas de ocorrências das formas de voçorocas versus perímetro. 122
Figura 40 - Número de ocorrência de voçorocas em relação a sua modalidade e Índices de Circularidade. 124
Figura 41 - Número de ocorrências das diferentes modalidades de voçorocas versus Largura. 126
Figura 42 - Número de ocorrências das diferentes formas de voçorocas versus comprimento. 128
Figura 43 - Número de ocorrência das modalidades das voçorocas em relação e o volume de material erodido. 130
Figura 44 - Número de ocorrência das modalidades de voçorocas em relação a suas Profundidades. 132
Figura 45 – Distribuição dos Lineamentos estruturais do interior das voçorocas.... 141
Figura 46 - Voçoroca em pleno processo erosivo (nº. 165) - Sanga Areal da Limeira. 161
Figura 47 - Voçoroca em estágio de estabilização (nº. 248) – Sanga da Vaca Velha. 162
Figura 48 - Voçoroca em processo de reativação nas laterais (nº. 172) – Sanga da Tapera. 163
Figura 49 - Voçorocas nº 182 e 183 em processo de reativação nas cabeceiras e bordas - Sub-bacia Sanga da Vaca Velha. 164
Figura 50 – Canais artificiais para escoamento d'água às margens de estradas, em cabeceiras de voçorocas. 164
Figura 51 – Cenário de evolução das formas de voçorocas presentes na área de estudo em Cacequi-RS. 167

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de distribuição granulométrica de amostra de Argissolo extraída em campo (Ponto 12), cabeceira da sub-bacia Arroio Areal Grande. 90
Gráfico 2 – Quantificação das classes de orientação de vertentes na área de estudo. 101
Gráfico 3 - Distribuição das porcentagens da curvatura das vertentes na área de pesquisa. 107
Gráfico 4 - Classes de comprimentos de vertentes. 109
Gráfico 5 - Histograma de frequência representando as direções dos lineamentos da área de estudo. 135
Gráfico 6 – Histograma de frequência dos comprimentos dos lineamentos da área de estudo. 138
Gráfico 7- Diagrama de dispersão do comprimento versus azimute da área de estudo. 138
Gráfico 8 - Histograma da divisão em classes dos grupos de lineamentos extraídos no interior das voçorocas. 142
Gráfico 9 – Histograma de frequência relacionado aos comprimentos. 143
Gráfico 10 – Diagrama de dispersão comprimento e azimute no interior das voçorocas. 145
Gráfico 11 – Distribuição do grau de evolução de voçorocas em porcentagem. 162
Gráfico 12 - Número da ocorrência entre as formas de voçorocas e os seus respectivos níveis de desenvolvimento. 165

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos da análise morfométrica da rede de drenagem.....79
Tabela 2 - O contexto das classes hipsométricas na área de estudo. 94
Tabela 3 – Distribuição das classes de declividade na área de estudo. 97
Tabela 4 - Densidade de voçorocas por sub-bacia hidrográfica. 113
Tabela 5 - Quantificação e distribuição das formas de voçorocas por sub-bacia hidrográfica da área de estudo.....115
Tabela 6 - Valores de área e unidades de voçorocas por forma nas sub-bacias presentes na área de estudo.....117
Tabela 7 - Características métricas das voçorocas na área de estudo - Distribuição por Formas.....118
Tabela 8 - Família, orientação, número e comprimento médio dos lineamentos da área de estudo. 137
Tabela 9 - Orientação, número, comprimento médio dos grupos de lineamentos da área de estudo. 143
Tabela 10 - Relação entre o comprimento das formas de voçorocas e comprimento dos lineamentos. 152
Tabela 11 - Relação entre as formas de voçorocas e lineamentos. 153

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes hipsométricas utilizadas para delimitação do perímetro dos componentes topográficos da área de estudo. 61
Quadro 2 – Descrição do uso dos Indicadores Morfométricos. 74
Quadro 3 - Relação entre as variáveis morfométricas e as formas de voçorocas através do Cálculo do Valor Informativo. 158

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ArcGIS	Software para Sistemas de Informações Geográficas
BHRI	Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DSG	Diretoria de Serviços Geográficos
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
MDE	Modelo Digital de Elevação
MVI	Método do Valor Informativo
MNT	Modelo Numérico do Terreno
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
CVI	Cálculo do Valor Informativo
MVI	Método do Valor Informativo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19

1.1 APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 22

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 32

2.1 EROSÃO: CONCEITO E EVOLUÇÃO 33

2.2 FATORES CONTROLADORES DOS PROCESSOS EROSIVOS 44

2.3 GEOTECNOLOGIAS E ANÁLISE DE DADOS MORFOMÉTRICOS APLICADOS A PROCESSOS EROSIVOS 54

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 57

3.1 PRIMEIRA FASE METODOLÓGICA 59

3.2 SEGUNDA FASE METODOLÓGICA 65

3.3 TERCEIRA FASE METODOLÓGICA 70

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 77

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS FISICOS DA ÁREA DE ESTUDO 77

4.1.1 Análise das características da drenagem 77

4.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS 83

4.3 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS 85

4.4 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO 87

5. VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS 94

5.1 HIPSOMETRIA 94

5.2 DECLIVIDADE 97

5.3 ORIENTAÇÃO DAS VERTENTES 99

5.4. PERFIL E PLANO DE CURVATURA DAS VERTENTES 101

5.5 COMPRIMENTO DAS VERTENTES 108

6 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS VOÇOROCAS 110

6.1 DADOS MÉTRICOS DAS VOÇOROCAS 117

6.2 ANÁLISE DOS LINEAMENTOS 134

6.2.1 Análise dos dados gerais da área de estudo 134

6.2.2 Lineamentos extraídos no interior das voçorocas e sua relação com as formas 139

6.3 RELAÇÃO ENTRE OS DADOS MORFOMÉTRICOS E AS FORMAS DAS VOÇOROCAS ATRAVÉS DO VALOR INFORMATIVO 156

7 CENÁRIO DE EVOLUÇÃO DAS VOÇOROCAS 160
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS 169
REFERÊNCIAS 173
APÊNDICE A - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES MORFOLÓGICAS POR FORMA DE VOÇOROCA..... 183
APÊNDICE B - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES DE DECLIVIDADE POR FORMA DE VOÇOROCA..... 184
APÊNDICE C - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES DE ORIENTAÇÃO DE VERTENTES POR FORMA DE VOÇOROCA..... 185
APÊNDICE D - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES DE CURVATURA DAS VERTENTES POR FORMA DE VOÇOROCA..... 187
APÊNDICE E - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES DE PERFIL CURVATURA DAS VERTENTES POR FORMA DE VOÇOROCA..... 189
APÊNDICE F - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES DE PLANO CURVATURA POR FORMA DE VOÇOROCA..... 190
APÊNDICE G - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES HIPSOMÉTRICAS POR FORMA DE VOÇOROCA..... 191

1 INTRODUÇÃO

A percepção e o entendimento do meio e das suas inter-relações, derivam em revelações especificas, as quais determinam a dinâmica evolutiva da natureza. A Terra consiste num conjunto formado por diferentes subsistemas em interação, a hidrosfera, atmosfera, geosfera e a biosfera que interagidos possibilitam diversos produtos, muitos deles poucos estudados ou desconhecidos.

A formação de solos a partir de processos pedogenéticos e da alteração das rochas, conduzidos por agentes químicos, físicos e biológicos resulta em uma dinâmica na superfície terrestre. Em contraponto, a formação dos solos sofre com o processo de erosão, principalmente pela ação da água, que remove os constituintes do solo e contribui para a formação da paisagem (TOY, 2002).

Baseado nesta colocação percebe-se certo equilíbrio na natureza resultando em uma erosão considerada natural. Contudo, pode haver um desequilíbrio causado pelo processo de aceleração da erosão, mais intenso que os processos de formação de solos, causando a baixa regeneração dos mesmos e resultando na degradação do ambiente.

A erosão tem causas relacionadas à própria natureza, como a quantidade e distribuição das chuvas, a declividade, o comprimento e a forma das encostas, o tipo de cobertura vegetal e também a ação do homem, como o uso e o manejo da terra que na maioria das vezes, tende a acelerar os processos erosivos (MENDONÇA e GUERRA, 2004).

Pesquisadores como Cassetti(1991), Guerra (2005), Camapum de Carvalho et al.(2006), Pruski (2009) e Araujo (2010) vinculam o processo de erosão diretamente ao uso antrópico, devido a ocupação do solo e consequentemente a retirada da vegetação.

No entanto, na região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, o processo de erosão por voçorocamento ocorre devido à fragilidade ambiental atrelada aos aspectos geológico, geomorfológico e pedológico, que apresentam, dentro de seu contexto, variáveis especificas determinantes para a instalação dos processos superficiais de arenização e voçorocamento (Suertegaray, 1987; 1998).

A erosão ao longo do tempo traz significativos prejuízos para a sociedade advindos da perda de solo fértil, assoreamento dos cursos d´água, contaminação das águas superficiais e subterrâneas com fertilizantes e agrotóxicos utilizados nas

lavouras, redução das áreas disponíveis para cultivo, degradação de áreas urbanas ou em urbanização, e de investimentos públicos em obras de infra-estrutura (VIERO, 2004).

Neste contexto, a temática pesquisada surgiu devido à necessidade de análises em escalas de maior detalhe para ampliar o conhecimento sobre a dinâmica atrelada aos processos da evolução das formas do relevo e a relação com o desenvolvimentos de voçorocas localizadas em cabeceiras de drenagem, fato muito frequente em vários locais da região sudoeste do estado, dando ênfase a necessidade de se analisar as erosões de forma mais sistemática e detalhada.

Sendo assim, visando compreender melhor o desencadeamento destes processos e suas relações com os atributos físicos da área, fez-se necessário dar continuidade aos estudos e análises de voçorocas, complementando e preenchendo lacunas em relação aos estudos relativos ao comportamento das incisões.

Diferentes autores contribuíram consideravelmente em pesquisas realizadas nesta região como, Cordeiro e Soares (1977), Cabral (1993), Ab'Saber (1995), Marchiori (1995), Medeiros et al. (1995), Suertegaray (1998 e 2001), Robaina et. al (2002), Cabral (2004) e, Robaina e Trentin (2004).

Cabral (2004), destaca que nessa região do estado, os processos erosivos se caracterizam por uma série de eventos que, agindo em conjunto, respondem por uma "paisagem" regional composta por amplas colinas seccionada pela drenagem, onde as condições topográficas e os demais fatores relevantes à formação do relevo permitem as mais variadas formas de ação da água nos processos de modelação e remodelação do relevo. As principais manifestações que atualmente expressam a evolução do relevo constituído pelos materiais terrígenos da Bacia Sedimentar do Paraná são os processos de arenização e voçorocamento, que refletem a ocorrência de uma erosão acelerada.

O desafio deste trabalho não é discutir a forma de conter os processos erosivos nesta região, mas sim, compreender quais as principais variáveis dentre os agentes geológico e geomorfológico, que definem os processos de voçorocamento no município de Cacequi, uma vez que a erosão dos solos e seus respectivos materiais de origem é uma das preocupações do meio científico, especialmente em relação ao trato das questões ambientais em geral.

A escolha do tema teve como foco principal a busca de conhecimento sobre os padrões dos sistemas de voçorocas na área de pesquisa descrita anteriormente, já

que a erosão é um fato preocupante na região oeste do estado e junto a isso, atender a necessidade de compreender com maior detalhe a distribuição dessas incisões, considerando as variáveis físicas, isto é, entender o comportamento dos processos de voçorocamentos presentes na parte oeste do Rio Grande do Sul pois, de acordo Suertegaray (1987; 1998), essa região caracteriza-se por apresentar um conjunto paisagístico frágil no que se refere aos processos pedogenético e da cobertura vegetal recente, onde encontra-se também as áreas com processos de arenização.

Dessa forma, a importância de técnicas de Geoprocessamento eficientes para extração dos dados para as análises e classificação de voçorocas por forma especificamente para a área de estudo. É importante destacar a necessidade de desenvolver pesquisas que contribuam na compreensão sobre a distribuição de voçorocas, através de métodos que colaborem com a sua caracterização e indique os atributos desencadeadores dos processos erosivos, pois isto poderá auxiliar no entendimento de sua evolução.

Seguindo esta linha de raciocínio, esta pesquisa tem como objetivo geral detalhar e caracterizar as voçorocas localizadas nas sub-bacias hidrográficas Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande, presentes na porção central do município de Cacequi, por meio de atributos morfométricos bem como compreender sua distribuição e desenvolvimento por meio de variáveis físicas ligadas aos agentes geológicos e geomorfológicos.

Portanto, os objetivos específicos a serem atendidos na pesquisa são:

a) Identificar e entender a distribuição espacial e os fatores que promovem a ocorrência de voçorocas na área de estudo;
b) Classificar as formas e tipos de voçorocas através dos atributos morfométricos, métricos e dos lineamentos estruturais;
c) Avaliar o controle estrutural por meio da análise dos lineamentos da área e a relação destes com as voçorocas;
d) Entender a distribuição espacial e os fatores que promovem a ocorrência de voçorocas na área de estudo, procurando estabelecer um cenário de evolução de suas formas.

Todos os objetivos elencados acima buscam responder dentro da pesquisa questões ligadas aos principais agentes condicionantes das voçorocas e os parâmetros físicos determinantes para seu desenvolvimento.

Com base nestas informações, na literatura pesquisada e no conhecimento sobre a área de estudo, as questões condutoras de toda a pesquisa, permeiam os seguintes questionamentos: i) É possível classificar as formas de voçorocas utilizando atributos morfométricos? ii) As diferentes formas de voçorocas são algo inerente ao grau de desenvolvimento das mesmas? iii) É possível estabelecer um padrão para a evolução das voçorocas na área de estudo e sugerir uma teoria de evolução de suas formas?

A hipótese da tese fundamenta-se na suposição de que os parâmetros métricos ligados as voçorocas (profundidade, volume, largura e comprimento), são determinados pela interação entre os parâmetros morfométricos (hipsometria, declividade, morfologia, orientação de vertentes, plano e perfil curvatura das vertentes) e da configuração dos lineamentos estruturais presentes na área de pesquisa.

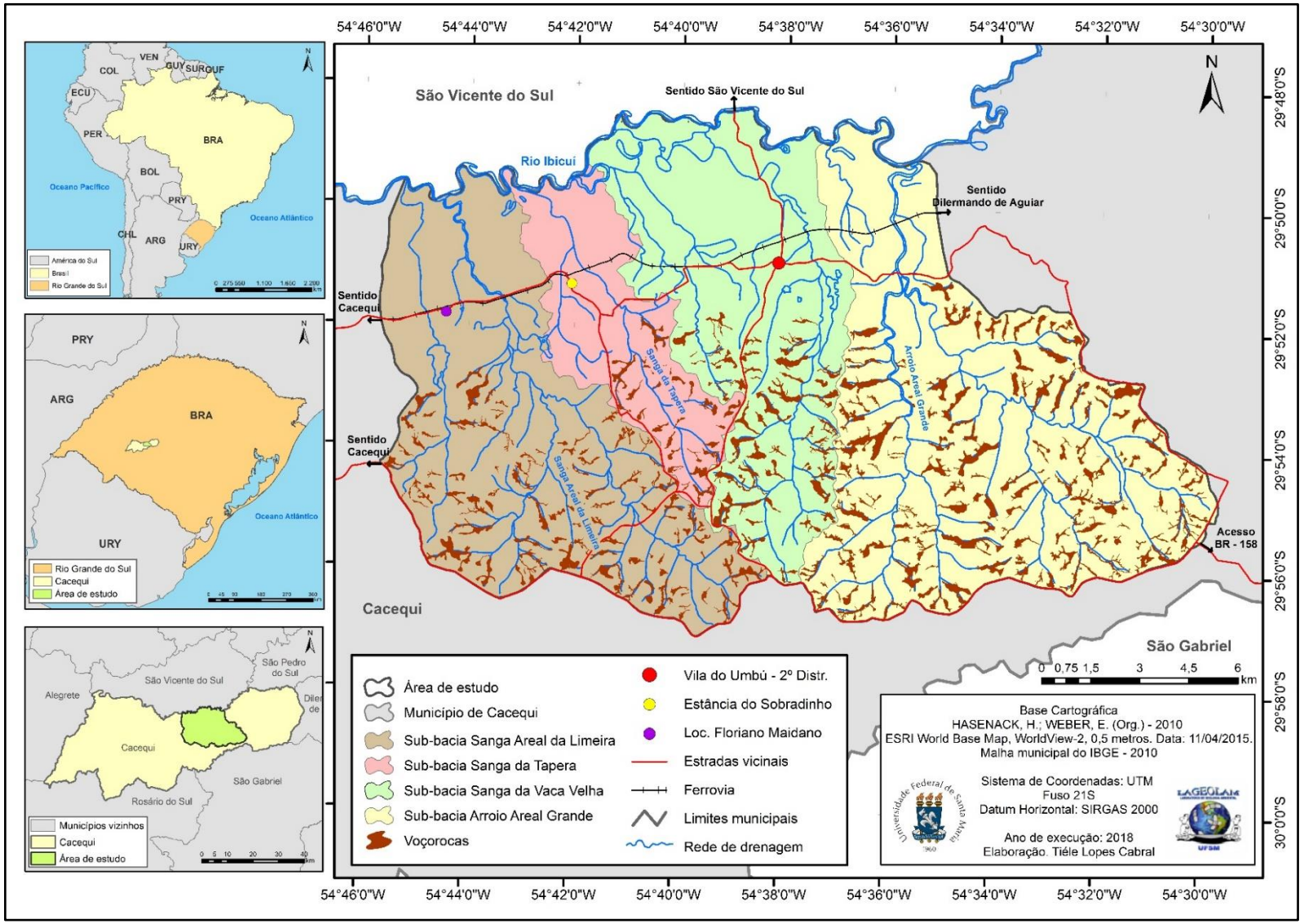
1.1 APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região sudoeste do Rio Grande do Sul apresenta características ambientais marcantes em relação ao desenvolvimento de processos da dinâmica superficial. Os processos erosivos vem sendo abordados em âmbito cientifico por meio de estudos cada vez mais detalhados do meio físico, destacando seu atributos de maior influência.

A área onde a pesquisa foi desenvolvida compreende parte do município de Cacequi. O mesmo possui uma área de 2.369,949km² e é banhado pelas bacias hidrográficas dos rios Ibicuí, Cacequi e Santa Maria. Encontra-se entre os paralelos 29º53’01’’ de Latitude sul e meridianos 54º49’30’’ de Longitude oeste e faz parte da Microrregião Geográfica de Santa Maria, mantém divisa com os municípios de São Vicente do Sul e São Pedro do Sul ao norte, Rosário do Sul e São Gabriel ao sul, Alegrete a leste e Dilermando de Aguiar a oeste.

No setor central do município de Cacequi foi delimitada a área de interesse deste estudo, localizada entre os paralelos 29°48'21.12"; 29°57'06.80" de latitude sul e os meridianos 54°45'38.67"; 54°29'45.44" de longitude oeste, como demonstra a Figura 1. Essa porção do município corresponde as superfícies das sub-bacias hidrográficas da Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande, perfazendo uma área aproximada de 280km².

Figura 1- Localização geográfica da área de estudo no município de Cacequi, RS.



Fonte: Elaborado pela Autora (2018).

Todas estas sub-bacias de drenagem fazem parte da bacia hidrográfica do rio Ibicuí, pequena parte da borda sul da Bacia Sedimentar do Paraná. A escolha dessa área levou em consideração a presença de inúmeras voçorocas no local e a temática desta pesquisa buscou elaborar estudos de maior detalhe destes processos.

Entretanto, embora existam voçorocas em outros setores pertencentes à Cacequi e também em municípios vizinhos, foi neste perímetro que, encontrou-se a maior concentração de voçorocas e delimitou-se a área de pesquisa.

A área de estudo é uma pequena parte da região Geomorfológica denominada Depressão Central Gaúcha. Essa unidade corresponde à faixa que se estende de leste para oeste e também em parte do sudoeste do estado do Rio Grande do Sul. Esta província Geomorfológica faz limite com o Planalto Meridional a nordeste e noroeste, com o Escudo Sul-Rio-Grandense ao sudeste e a leste com a Planície Costeira (Figura 2). As características geomorfológicas da Depressão Central, expressam a evolução do relevo constituído pelos materiais terrígenos da Bacia Sedimentar do Paraná, que ao logo da sua história geológica, expressam as particularidades dos fatores da sua evolução.

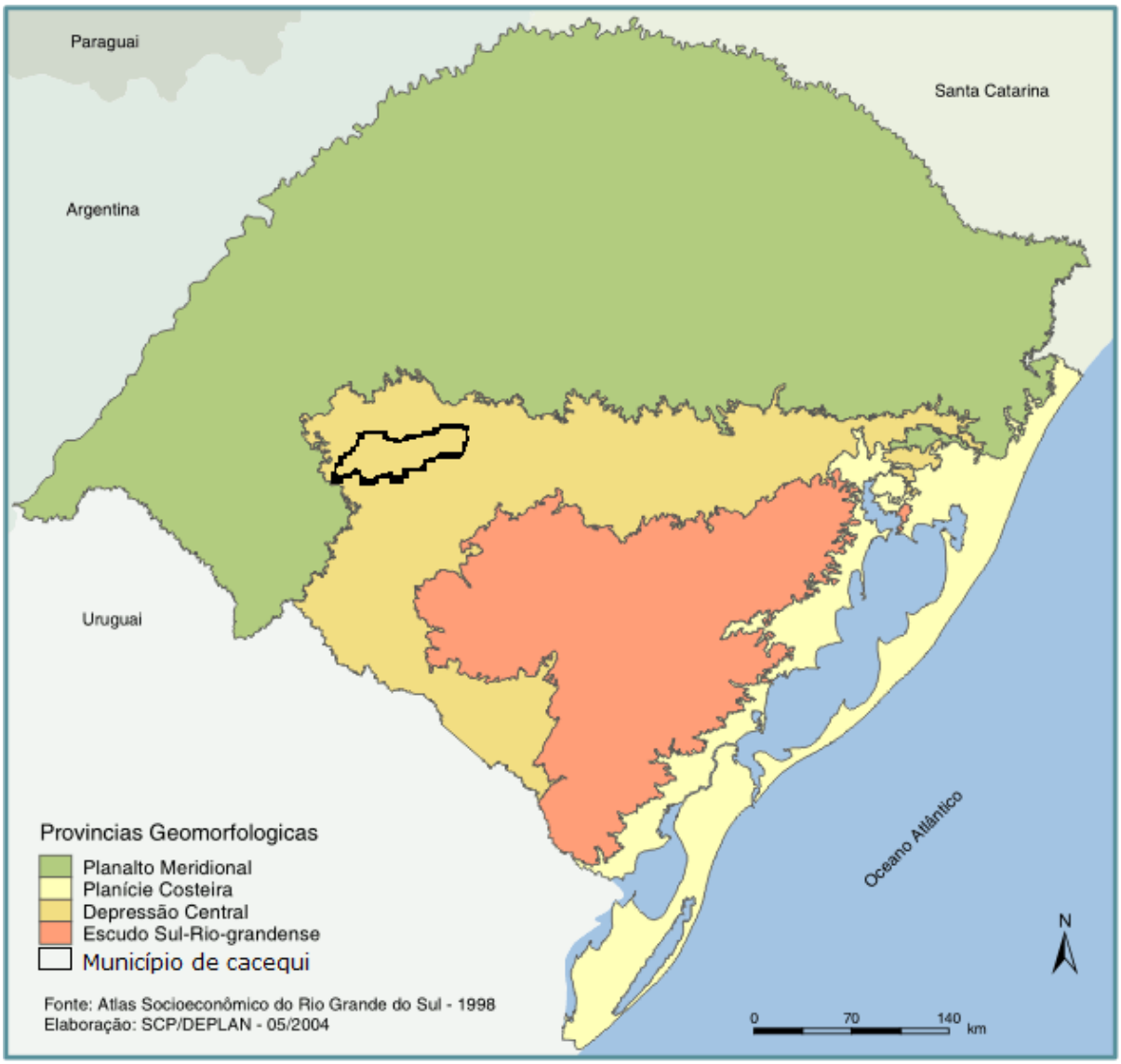
A Depressão Central Gaúcha, se estende do centro-leste ao centro-oeste do estado, como uma depressão de desnudação periférica interposta entre a Cobertura Basalto-Arenítica e a Borda Meridional do Escudo Sul-Rio-Grandense (RADAMBRASIL, 1986).

Os processos de arenização e voçorocamento, refletem os processos de erosão acelerada atuante nas superfícies devido o próprio contexto geológico/geomorfológico da mesma, ou seja, corresponde um dos setores da borda sul da Bacia Sedimentar do Paraná, um dos fatores que oferece informações sobre a condição de fragilidade local/regional destas superfícies. Essa condição se manifesta diferentemente ao longo da Depressão Central, pois, de acordo com Cabral (2004), esses processos erosivos se diferenciam espacialmente, sendo que, do centro para o oeste do Rio Grande do Sul, até o município de Cacequi, junto ao rio Santa Maria, os processos erosivos mais significativos estão representados por sulcos e voçorocas, enquanto que a arenização é caracterizada mais para oeste-sudoeste.

Morfologicamente a área apresenta relevo com topografia ondulada em forma de colinas com baixas altitudes, 80 a 160m e vertentes de rampas suaves, intercaladas por extensas planícies aluviais que se distribuem ao longo dos cursos d´água dos principais eixos de drenagem (CABRAL, 2004). Nessa área, as voçorocas,

objeto de pesquisa desta tese, mostram-se mais presentes nas cabeceiras de drenagem das sub-bacias hidrográficas, com e sem a presença de vegetação, fato que dificulta sua identificação nas imagens de satélites.

Figura 2- Províncias Geomorfológicas do Rio Grande do Sul.



Fonte: SCP/DEPLAN (2004).

Em temos morfoestruturais a Depressão Central Gaúcha corresponde à borda da Bacia Sedimentar do Paraná, onde o material que constitui as superfícies e subsuperfícies derivam de sedimentos depositados por diferentes agentes ao longo de várias épocas geológicas (CABRAL, 1998).

As rochas sedimentares das Formações geológicas encontradas na área de estudo pertencem a Bacia do Paraná que está localizada no centro leste da América do Sul, sobre um embasamento cristalino (Plataforma Sul Americana) constituído de rochas metamórficas e ígneas. Sua forma é alongada para NE e está relacionada à reativação de antigas estruturas tectônicas do embasamento que promoveram, localmente, uma maior subsidência nas direções NNE, NE e NW.

Segundo Melfi *et al*. (1988), a forma de **J** da bacia do Paraná tende para NE e está relacionada a reativações de estruturas tectônicas antigas do embasamento que promovem localmente uma subsidência ao longo de NNE, NE e NW. As feições tectônicas mais importantes são estruturas positivas alongadas (arcos) que rodeiam a bacia, exceto na margem continental. As estruturas NNE e NE, paralelas aos lineamentos do embasamento cristalino, são semelhantes àquelas relacionadas aos cinturões móveis do ciclo Brasiliano.

Em relação a tectônica frágil, (fraturas e falhas representadas pelos lineamentos estruturais), Zalán *et al.* (1990) demonstraram que os *trends* NW e NE ocorrem em toda a Bacia do Paraná, tendo também confirmado a existência de um terceiro grupo de lineamentos com orientação E-W. As orientações mais importantes são as NW-SE e NE-SW, que representam zonas de fraqueza antigas, recorrentemente reativadas durante a evolução da bacia.

Ao sistema NW foi atribuída uma origem do Arqueano ao Proterozóico Inferior, passando por inúmeras reativações até o Mesozóico. Estas fraturas são profundas e teriam servido de condutos alimentadores para o magmatismo Mesozóico e estariam associadas com o desenvolvimento do Arco de Rio Grande (Ribeiro, 1980). Estas estruturas, transversais ao eixo principal da bacia, são representadas por arcos (Ponta Grossa, Campo Grande, Rio Grande), lineamentos tectônicos e/ou magnéticos (Guapiara, Rio Piquiri, Rio Uruguai) e pela sinclinal de Torres.

O sistema NE (mais jovem), desenvolveu-se no Proterozóico Inferior a Superior e com importantes reativações no Brasiliano. As zonas de falhas NE segundo Zalán et al. (1990), são constituídas ou por uma falha larga ou por uma zona de falha retilínea. No Mesozóico, as estruturas NE permitiram a ascensão dos magmas toleíticos da Fm. Serra Geral. As reativações mais recentes são marcadas por grandes lineamentos no pacote vulcânico da bacia do Paraná e, pelo condicionamento da sedimentação Cenozóica.

As estruturas EW são registradas no Mesozóico como estruturas de natureza rúptil, acarretando o desenvolvimento de drenagens retilíneas e paralelas, marcadas pelo Rio Jacuí e Camaquã – Sistema de fratura Porto Alegre – Alinhamento do Camaquã e Rio Uruguai (Asmus, 1978) e Arroio Basílio – Lineamento Jaguarão (Costa e Ramgrab, 1989).

Os movimentos das zonas de falha NE e NW tiveram componentes horizontais e verticais e influenciaram na sedimentação das várias unidades estratigráficas da Bacia do Paraná.

De acordo com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2005) a unidade geológica mais antiga corresponde à Formação Pirambóia (Grupo Passa Dois), composta por arenitos médios a finos, geometria lenticular bem desenvolvida, ambiente continental eólico, com intercalações fluviais. Destaca CPRM (2005) que na Formação Pirambóia ocorrem os depósitos aluviais relacionados a barreiras holocênicas compostos por areia grossa a fina, cascalho e sedimento síltico-argiloso, em calhas de rio e planícies de inundação, isto é, depósitos relacionados à barreiras-holocênicas, como apresentado na coluna estratigráfica resumida para a área de estudo (Figura 3).

Figura 3- Coluna estratigráfica para a área de estudo no município de Cacequi.

<table>
<tr><th>ÉON</th><th>ERA</th><th>PERÍODO</th><th>ÉPOCA</th><th>LITOTIPOS/AMBIENTES DE SEDIMENTAÇÃO</th></tr>
<tr><td rowspan="2">FANEROZÓICO</td><td>CENOZÓICO</td><td>NEÓGENO</td><td>HOLOCENO</td><td>Depósitos Aluviais: composto por areia grossa a fina, cascalho e sedimento síltico-argiloso, em calhas de rio e planícies de inundação.</td></tr>
<tr><td>PALEOZÓICO</td><td>PERMIANO</td><td></td><td>GRUPO PASSA DOIS

Formação Pirambóia: arenito médio a fino, geometria lenticular bem desenvolvida, ambiente continental eólico com intercalações fluviais.</td></tr>
</table>

Fonte: Adaptado a partir de CPRM (2005).

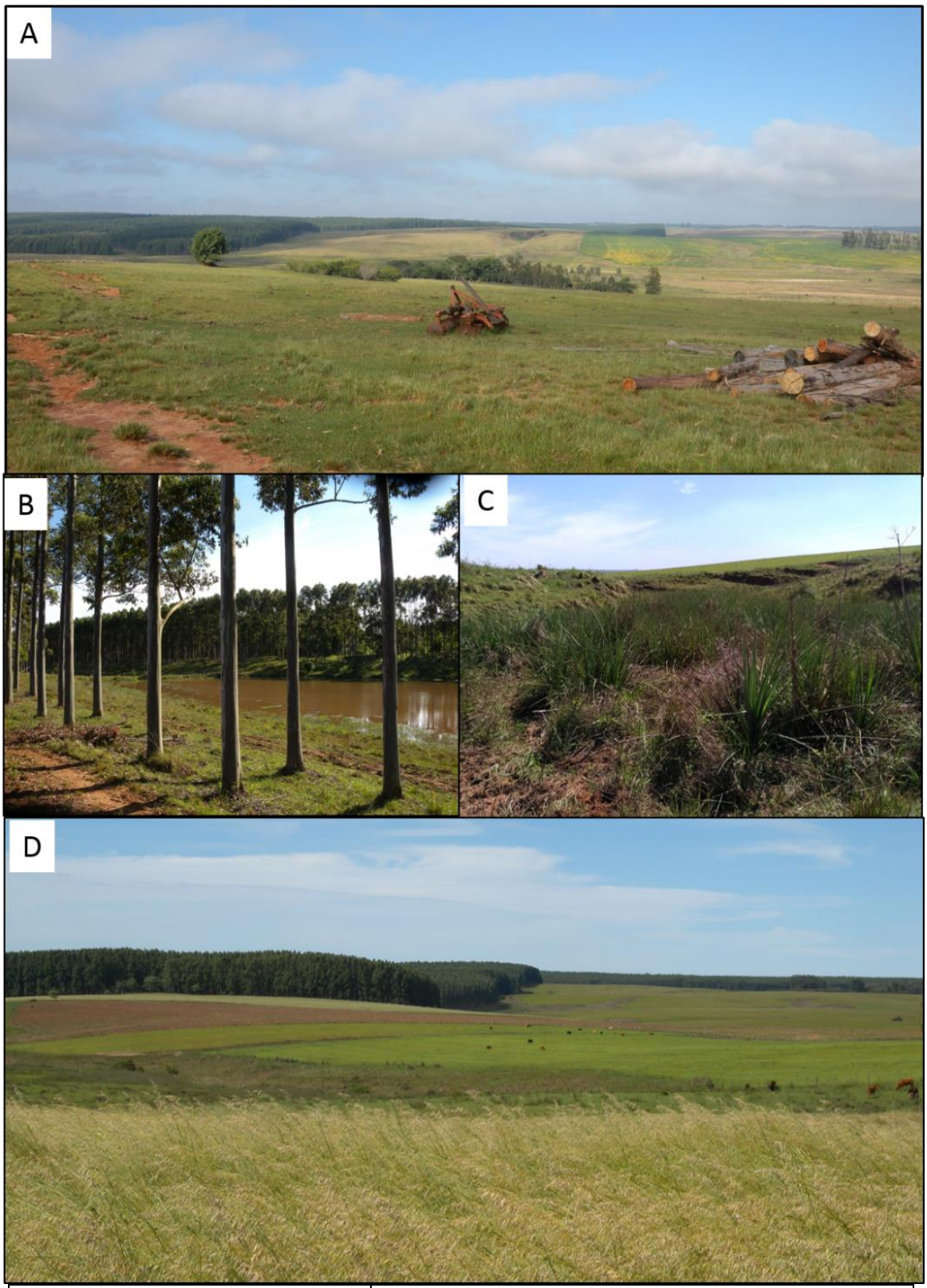
A vegetação predominante nessa área é de campos de pradarias, ocupando áreas compostas de solos arenosos com e sem floresta de galeria (Marchiori, 1995),

correspondendo a um conjunto de herbáceas e gramíneas que constituem, em muitos municípios da fronteira oeste do Rio Grande do Sul, a base da criação extensiva do gado. A intervenção humana nestes ambientes se dá pelo uso predominante da pecuária e às culturas agrícolas diversificadas, como a orizicultura irrigada praticada nas superfícies da planície de inundação e terraços dos rios de maior ordem, silvicultura e soja (Figura 4).

Em relação à vegetação original, o município de Cacequi compreende extensas áreas de savana estépica cobertas de gramíneas típicas dos campos do Bioma Pampa e espécies arbóreas de pequeno e médio porte que configuram as florestas ciliares ou de galeria localizadas, principalmente, ao longo dos rios de maior porte. A recente introdução da silvicultura em grande parte no Bioma Pampa é responsável pela descaracterização da paisagem original em escala local e regional (Secretaria Estadual do Meio Ambiente - SEMA, 2006).

O clima característico dessa área é Subtropical medianamente úmido com variações das temperaturas médias, possui uma região com maior influência dos sistemas polares e tropicais continentais, porém com interferência crescente dos sistemas tropicais marítimos, influenciando até mesmo no relevo da Depressão Central. Os sistemas frontais são responsáveis pela maior parte das precipitações, as chuvas oscilam entre 1500-1700mm anuais distribuídas entre 90 a 110 dias, ocorrendo entre 6 a 9 dias por mês. A temperatura média anual varia entre 17ºC e 20ºC, onde a temperatura do mês mais frio oscila entre 11ºC e 14ºC e a temperatura média do mês mais quente varia entre 23-26ºC (ROSSATO, 2011).

Figura 4 - Cenas apresentando o aspecto da vegetação predominante na área de estudo e o contexto da intervenção antrópica sobre a mesma.



(A) pastagem e cultivo de soja (B) silvicultura,	(C) gramíneas mais densa em área úmida (D) pecuária extensiva com eucaliptos ao fundo.

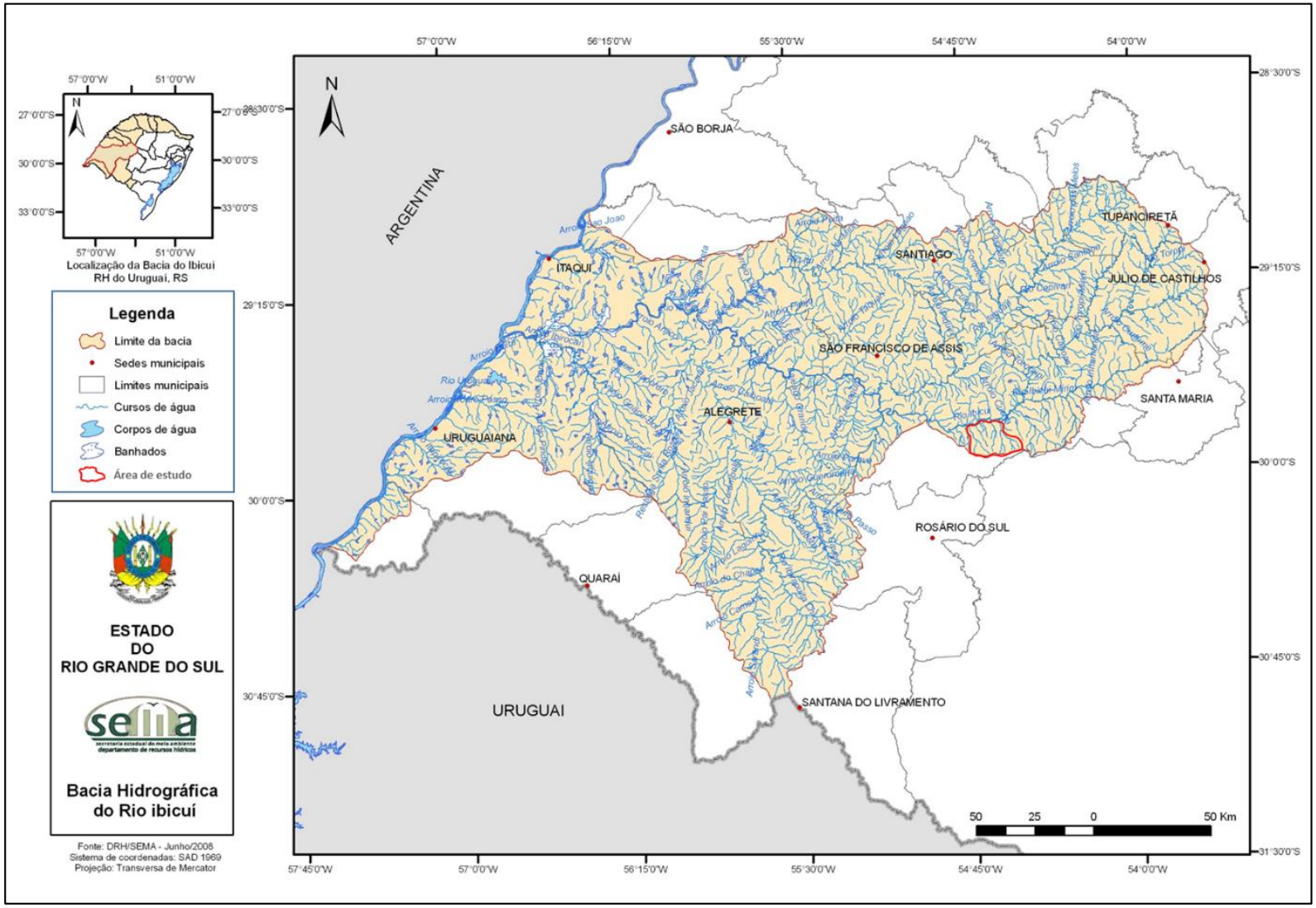
Fonte: Trabalho de campo, 2018. Fotografias: Tiéle Lopes Cabral.

Em termos hidrográficos a área de estudo pertence a bacia hidrográfica do rio Ibicuí, responsável por drenar a porção central e oeste do Rio Grande do Sul, sendo uma das principais bacias de drenagem do Estado, englobando uma área total ou parcial de 30 municípios (Figura 5). Faz parte da Região Hidrográfica do rio Uruguai, com os rios tributários a margem esquerda, Cacequi, Santa Maria e o Ibirapuitã e à margem direita como os rios Toropi, Jaguari e Itu.

De acordo com o Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do rio Ibicuí (SEMA, 2010) a área da bacia possui cerca de 36.397,69km² e compreende parte das regiões fisiográficas da Campanha, Missões e Depressão Central. Os principais cursos d'água desta bacia são os Rios Ibicuí Mirim, Toropi, Jaguarí, Itu, Jaguarizinho, Ibirapuitã e os arroios Caverá, Miracatu, Pai Passo, Inhandui, Ibirocai, Touro Passo e Bororé. Ao todo são 55 arroios desaguando no Rio Ibicuí. Vale ressaltar, que para este Comitê de Gerenciamento, os rios Cacequi e Santa Maria que também banham o município de Cacequi, pertencem à mesma região hidrográfica do Uruguai, porém fazem parte da bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria.

O sentido de escoamento das águas na área de estudo dá-se para o norte pelos tributários da margem esquerda do Rio Ibicuí (sub-bacias Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande), onde o padrão de drenagem predominante é do tipo dendrítica, principalmente nos rios de primeira e segunda ordem.

Figura 5 - Mapa da bacia hidrográfica do rio Ibicuí.



Fonte: SEMA (2008).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conhecimento intrínseco sobre as teorias que sustentam os processos de evolução do relevo voltados a eventos de erosões, se mostra quase sempre com a insustentável perspectiva de analisá-los sob forma fragmentada, ou seja, a medida que é admissível caracterizar individualmente as variáveis que compõem estes processos, é impraticável analisá-las da mesma forma. Neste sentido, o estudo sobre os fatos que explicam as formas do relevo, tomando como foco o sistema de voçorocamentos em Cacequi/RS, necessita sempre da busca pela integração dos diversos aspectos do ambiente, pois, desta forma a resposta sobre as questões que envolvem os eventos relacionados aos processos de erosão é holística.

De acordo com Christofoletti (2011), a partir dos anos de 1960 difundiu-se amplamente o enfoque ao método sistêmico em muitas disciplinas cientificas. A visão sistêmica incorporada à Nova Geografia, através da aplicação da Teoria Geral dos Sistemas, serve ao Geógrafo como instrumento conceitual que lhe promove tratar dos conjuntos complexos, como os da organização espacial, contribuindo ainda para direcionar as pesquisas.

Sotchava (1962) propôs na década de 1960, o termo geossistema (Sistema Geográfico ou Complexo Natural Territorial) e sugeria o estudo da dinâmica e estrutura das paisagens pelo prisma sistêmico, levando em consideração a delimitação e hierarquização de características homogêneas de uma determinada unidade de paisagem. Entretanto, o termo passou a ter mais consistência a partir de estudos de Bertrand a partir da década de 1970.

Nesta mesma linha, Bertrand (1972) destaca que o geossistema corresponde a um modelo de interpretação do ambiente, e como tal, busca seu entendimento a partir de elementos que o compõem, resultando na combinação de um potencial ecológico, uma exploração biológica e uma ação antrópica.

Para Rodriguez et al. (2010), a concepção sistêmica consiste em uma abordagem em que qualquer diversidade da realidade estudada envolvendo objetos, propriedades, fenômenos, relações, problemas e situações, pode-se considerar como um sistema, regulado mediante a algumas categorias sistêmicas como, estrutura, elemento, meio, relações, intensidade e entre outras. Desta forma, pode-se definir como sistema todo conjunto de elementos que encontram em relação entre si, e que formam uma determinada unidade e/ou integridade.

Mantendo a conjuntura de integração, Christofoletti (1986) acresce quanto ao cuidado em estudar o quadro natural como um meio integrado e dinâmico na análise sistêmica. É reforçado por este autor, que a Geografia não deve estudar de maneira fragmentada os componentes da natureza, mas investigar a unidade da integração e os elos existentes nesse conjunto.

A Geografia se ampara na análise sistêmica, como subsídio para uma melhor compreensão das análises realizadas, em especial nos estudos ambientais. Esse interesse é provocado a medida que se acumulam conhecimentos e as investigações vão evoluindo, descobrindo novos objetivos de pesquisas e estudadas as relações entre eles, conduzindo à necessidade de analisar uma grande quantidade de variáveis, sendo impossível estudar tais situações complexas por métodos tradicionais (RODRIGUEZ, et al. 2010).

2.1 EROSÃO: CONCEITO E EVOLUÇÃO

De modo geral, o termo erosão é sinônimo de desgaste e provém do latim (*erodere*) que significa “corroer”. Nos estudos ligados à ciência da terra, o termo é aplicado aos processos de desgaste da superfície terrestre (solo ou rocha) pela ação da água, do vento, de queimadas, do gelo e de organismos vivos (plantas e animais), além da ação do homem (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006).

De acordo com Bigarella (2003) a água é a principal responsável pelas mudanças morfológicas da paisagem, contribuindo significativamente para sua evolução. Desse modo, é importante analisar a erosão hídrica, que atua de forma direta, através do impacto das gotas de chuva na superfície do solo – *splash* e indireta, promovendo o escoamento superficial mediante a saturação do perfil de solo e o selamento da sua superfície.

O termo erosão entra em discussão em âmbito cientifico com vários conceitos e definições. Para Corrêa (1959) a erosão do solo agrícola é definida pelo arrastamento das partículas de solo produzido pela ação da água das chuvas e do vento, colocando este solo, em lugar onde, dificilmente pode ser utilizado. Esse carregamento apresenta ritmo maior que o alcançado pelos processos naturais para efetuar a reposição de novo solo.

Segundo LIMA (1987), o estabelecimento de qualquer processo erosivo requer, antes de tudo, um agente (água ou vento) e o material (solo), sobre o qual agirá,

desprendendo e desagregando as partículas e transportando-as. A interação entre material e agente consiste na busca de um estado de maior equilíbrio, antes desfeito de forma natural ou devido a efeitos antrópicos.

Bertoni e Lombardi Neto (1990) afirmam que erosão é o processo do desprendimento e consequentemente do arraste acelerado das partículas do solo causado pela água e pelo vento, causando o depauperamento acelerado das terras.

De forma mais sucinta, para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (1986) e Salomão e Iwasa (1995), erosão é o processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou fragmentos de rocha, pela ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo ou organismos.

A erosão hídrica ou erosão do solo pela água, segundo Cooke e Doornkamp (1990), envolve dois importantes eventos sequenciais: a desagregação de partículas provocada notadamente pela erosão do impacto das gotas da chuva na superfície do solo e o seu subsequente transporte principalmente através da erosão por escoamento superficial. A remoção e transporte dos horizontes da superfície do solo pela água, começa pelas primeiras gotas de chuvas que tocam diretamente o solo no descoberto, pela vegetação, se completa com a formação de enxurrada que formam os sulcos de várias proporções (LEPSCH, 1991).

Salomão e Iwasa (1995) distinguem duas formas de abordagem para os processos erosivos, uma delas considera a erosão “natural” ou “geológica”, que se desenvolve em condições de equilíbrio com a formação do solo; a outra trata da erosão “acelerada” ou “antrópica”, cuja intensidade, sendo superior à da formação do solo, não permite a sua recuperação natural, é um processo rápido e destrutivo, induzido sobretudo pela ação humana, gerando desequilíbrio nas fases de erosão natural e sedimentação.

Para alguns autores como Cunha (1997) e Mauro e Lollo (2004) a erosão dos solos é considerada “normal”, quando ocorre um equilíbrio entre os processos de formação do solo e seu desgaste natural. Porém, quando o processo erosivo é mais intenso, ou seja, sendo mais veloz que a formação do solo, ocorre à erosão acelerada. Vieira (1978) indica diferentes fatores que compõem a erosão acelerada, dentre eles, os mais significativos são: o clima, a topografia, as variáveis físicas do solo e a influência humana.

De acordo com Ribeiro (2015) existe vários tipos e formas de se classificar e dividir as erosões, variando conforme a sua velocidade, esfera de influência, agente

causador ou a sua localidade geográfica. Conhecido o fato que em regiões tropicais ou subtropicais úmidas, como o Brasil, os processos erosivos são provocados, principalmente, pela ação da chuva.

Autores como Bertoni e Lombardi Neto (1990), IPT (1991), Maciel Filho (1997), entre outros, classificam as erosões quanto ao grau de intensidade, isto é, superficial (laminar) que compreende as feições erosivas oriundas de escoamento difuso das águas, resultando na remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais do solo e erosão linear (concentrada), é consequência do fluxo de água que se torna concentrado originando sulcos, ravinas e voçorocas.

As principais formas de erosão hídrica pluvial podem ser classificadas como: a) Erosão pelo impacto da chuva ou *splash*; b) Erosão em lençol ou laminar; c) Erosão em ravinas; d) Erosão em voçorocas. Usando essa classificação, será mantido a atenção, de maneira mais específica, na análise dos processos erosivos em voçorocas, termo que provém etimologicamente do tupi-guarani "*ibiçoroc*" e tem o significado de terra rasgada (PICHLER, 1953 citado por FACINCANI, 1995).

Carvalho et. al (2001), afirma que a erosão superficial provocada pela água de chuva, associada ou não aos processos de erosão interna e estrutura, tem início com a erosão laminar, podendo em seguida e em ordem cronológica passar pelas fases de formação de sulcos, ravinas e voçorocas. O estudo referente aos processos erosivos demanda uma conceituação visando à distinção entre sulcos, ravinas e voçorocas. Para isso é necessário buscar uma fundamentação teórica dos autores que trabalham na área de erosão de solos e assim tornar mais claro o que se entende por tais processos. A erosão em sulcos é um processo de erosão em campos inclinados onde numerosos canais aleatórios se formam com apenas alguns centímetros de profundidade (CARVALHO et. al, 2001).

Para Magalhães (2001), o ravinamento corresponde ao canal de escoamento pluvial concentrado, apresentando feições erosionais com traçado bem definido. Com o passar do tempo, o canal se aprofunda devido à erosão das enxurradas podendo atingir até alguns metros de profundidade. Esse é o estágio mais avançado de erosão acelerada correspondendo à passagem gradual do processo de ravinamento, até atingir o lençol freático, com o aparecimento de surgências d'água.

A erosão por voçoroca pode ser definida por dois critérios, ou seja, a dimensão espacial e a participação das águas do lençol freático. Na Geografia o critério mais utilizado pela comunidade cientifica é a dimensão espacial, considerando como

voçorocas, incisões lineares maiores que 50 cm de largura e profundidade (GUERRA, 2003).

Para Poesen (1993), voçoroca é um canal resultante da erosão causada pelo fluxo intermitente d'água geralmente durante ou logo após o fluxo de fortes chuvas. Segundo o dicionário geológico-geomorfológico (GUERRA e GUERRA, 2006) voçoroca quer dizer:

> [...] escavação ou rasgão do solo ou de rocha decomposta, ocasionada pela erosão do lençol de escoamento superficial. Nas regiões desmatadas como no vale do Paraíba (RJ e SP), por exemplo, observa-se, por vezes, o aparecimento de grandes desbarrancamentos de material decomposto, e de solos que são carregados pelas enxurradas. As voçorocas, quando em grande número e relativamente paralelas, dão aparecimento a verdadeiras áreas de badland, ou ainda área voçorocada. As voçorocas podem também ser formadas pelo escoamento subsuperficial. (GUERRA e GUERRA, 2006, p. 637)

O conceito de voçoroca é muito discutido na área da geomorfologia, pois a dinâmica de fluxos de energia e matéria que ocorrem em áreas erosivas é complexa, obrigando o pesquisador efetivar em campo uma observação minuciosa dos processos erosivos para sua devida classificação. A feição erosiva voçoroca é um dos estágios do processo erosivo que ocorre geralmente na sequência: canal preferencial, sulco, ravina e voçoroca (CAMPOS, 2008).

A dificuldade em estabelecer a classificação de uma feição erosiva está muitas vezes atrelada ao fato de diversos processos estarem ocorrendo simultaneamente. Para Vieira (1975), a voçoroca é caracterizada como uma forma de relevo gerada por um conjunto de processos morfogenéticos, os quais estão subordinados tanto a fatores climáticos, litológicos, pedológicos, topográficos, fitogeográficos e antrópicos, como à dimensão, à forma e ao estágio evolutivo em que se encontra essa forma erosiva. Sendo assim, à medida que ela aumenta de tamanho e modifica a sua forma, os processos atuantes tendem, também, a mudar qualitativa e quantitativamente.

A definição utilizada nesta pesquisa segue a proposta dos pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). Sob essa ótica a terminologia voçoroca se refere ao estágio de desenvolvimento da ravina, ou seja, considera-se voçoroca, a ravina que atinge o lençol freático. Esta definição é baseada na profundidade do escoamento da água, pois enquanto as ravinas são formadas pelo

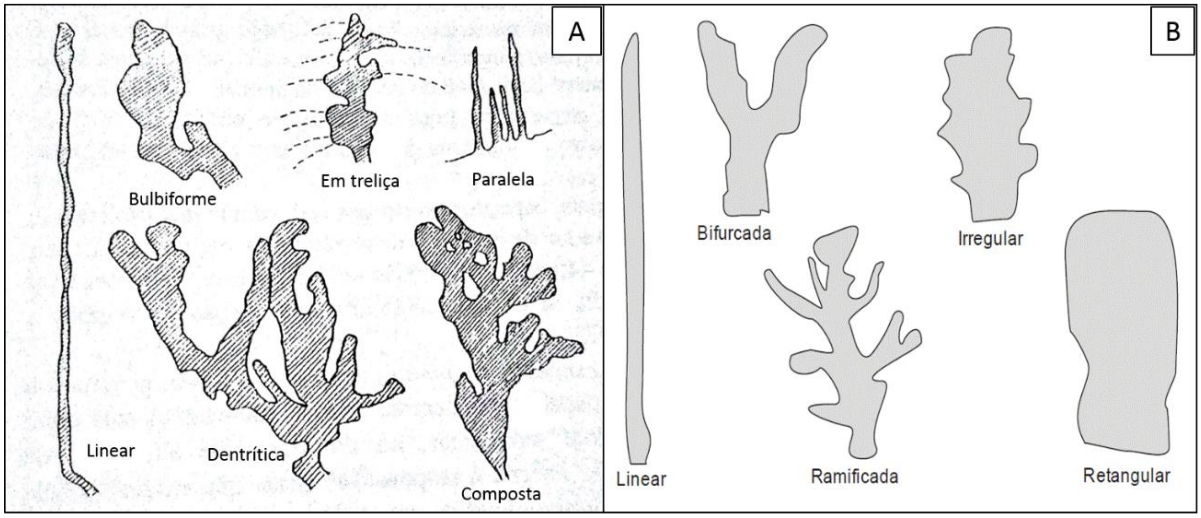
escoamento superficial, as voçorocas são consequências também das ações hídricas subsuperficiais.

O processo desde a formação até a extinção de uma voçoroca passa por quatro estágios ou fases, sendo eles: i) o primeiro estágio é aquele da formação dos sulcos, passando por ravinas; ii) no segundo, ocorre a formação dos saltos, o aprofundamento da voçoroca e a erosão regressiva; iii) no terceiro acontece o alargamento da voçoroca e o encontro do nível de base, resultando na formação de fundo plano; iv) neste último estágio, ocorre a extinção da voçoroca, como abrandamento dos taludes e a implantação da vegetação (GORSHKOV e YAKUSHOVA, 1970 citado por MACIEL FILHO e NUMMER, 2014).

Ravinas e voçorocas são derivadas da tendência de sistemas naturais buscarem atingir um estado de equilíbrio. Tomando os solos como exemplo, a mudança na quantidade de energia disponível (frequência e intensidade de precipitações, teor de umidade interno aos solos, entre outros) e na modificação das características do sistema (cobertura vegetal, uso do solo, grau de estruturação do solo, entre outros) pode levar a um desequilíbrio de energia no sistema em questão onde as ravinas e voçorocas podem ser definidas como incisão natural resultante de desequilíbrios naturais ou induzidas pelo agente antrópico (VIERO, 2004).

Com relação à classificação das voçorocas, os critérios mais utilizados em analises erosivas, envolvem a dimensão e formato da seção transversal do canal formado, área de abrangência, forma e localização (rural ou urbana) e tipo (ponderando a rede de drenagem e evolução do processo). Para esta pesquisa a classificação da forma e a localização se baseou nos trabalhos de Bigarella (2003) e Vieira (2008), deixando evidente que as incisões podem sofrer variações de forma influenciadas pelo relevo, solos e geologia. O primeiro autor, propõe a classificação das voçorocas nas seguintes formas: linear, bulbiforme, dentrítica, em treliça, paralela e composta (Figura 6-A). Já o segundo autor, baseia-se em Bigarella (2003) para adaptar uma nova classificação para as voçorocas em Manaus, sendo elas: linear, bifurcada, ramificada, irregular e retangular (Figura 6-B).

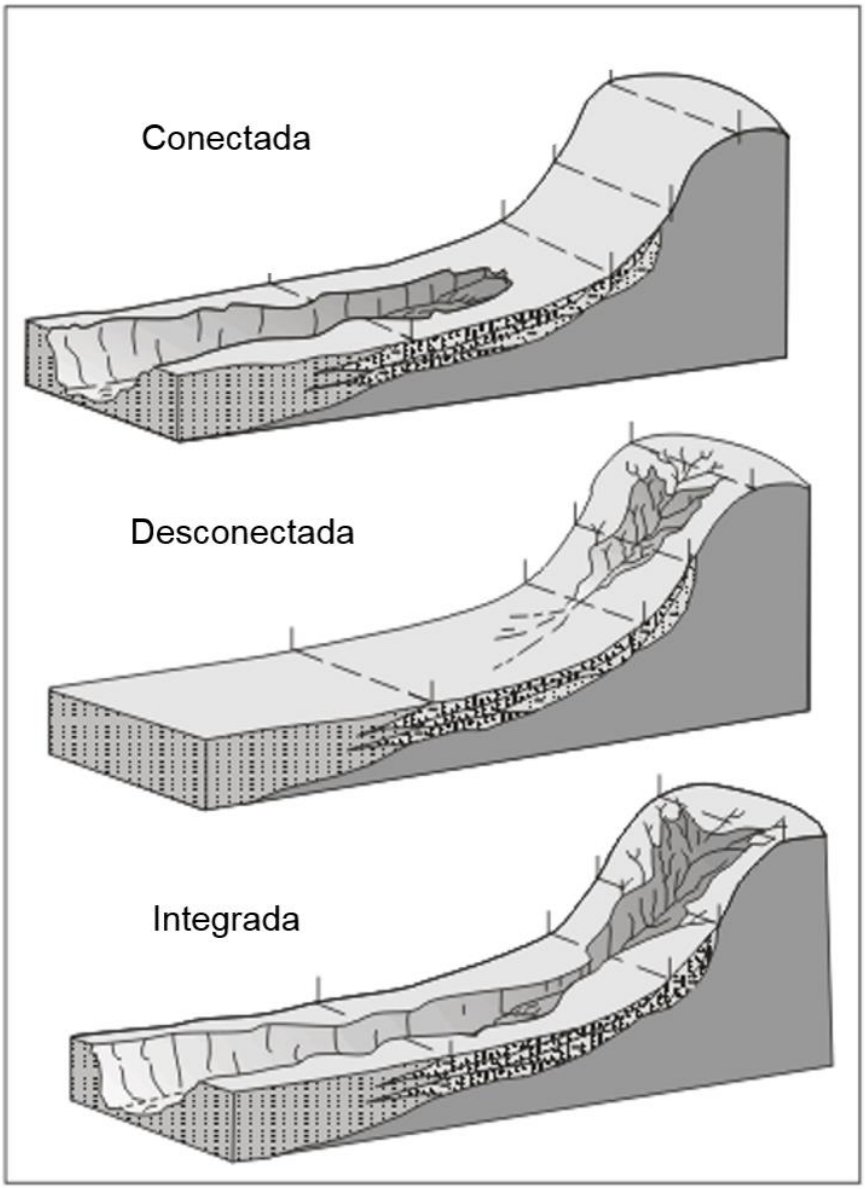
Figura 6 - Representação das formas de Voçorocas conforme (A) Bigarella (2003) e (B) Vieira (2008).



Fonte: (A) Bigarella (2003) e (B) Vieira (2008).

Em se tratando da classificação por tipo, Oliveira (1989), propõe um agrupamento abreviado em voçorocas conectadas, desconectadas e integradas a área de drenagem (Figura 7). O primeiro grupo (conectadas) se associa ao escoamento hipodérmico e/ou subterrâneo nas partes baixas da encosta, podendo ser consideradas canais de primeira ordem; as desconectadas, encontram-se na parte superior da encosta, estão ligadas ao escoamento superficial e/ou a movimentos de massa e não poderiam ser consideradas canal de primeira ordem por não estarem ligadas a nenhuma rede de drenagem; as integradas, são a união entre as duas formas anteriores (conectadas e desconectadas), formando uma só incisão.

Figura 7 - Modelo de evolução do tipo de voçorocas.



Fonte: Adaptado a partir de Oliveira (1989).

Autores como Fendrich et al. (1991) classificam as voçorocas de acordo com o formato da seção transversal (formato em U e em V). A voçoroca com formato em “U” é encontrada normalmente em regiões onde o solo e subsolo são mais facilmente erodíveis, não significando necessariamente um perfil mais estabilizado. Neste caso, as paredes são quase verticais e a ampliação lateral é realizada por erosão superficial ou por descalçamento da base da parede devido à ação da água subterrânea.

A voçoroca com formato em “V” está relacionada a solos que apresentam maior resistência à erosão, na área onde a pesquisa se desenvolve, este formato é

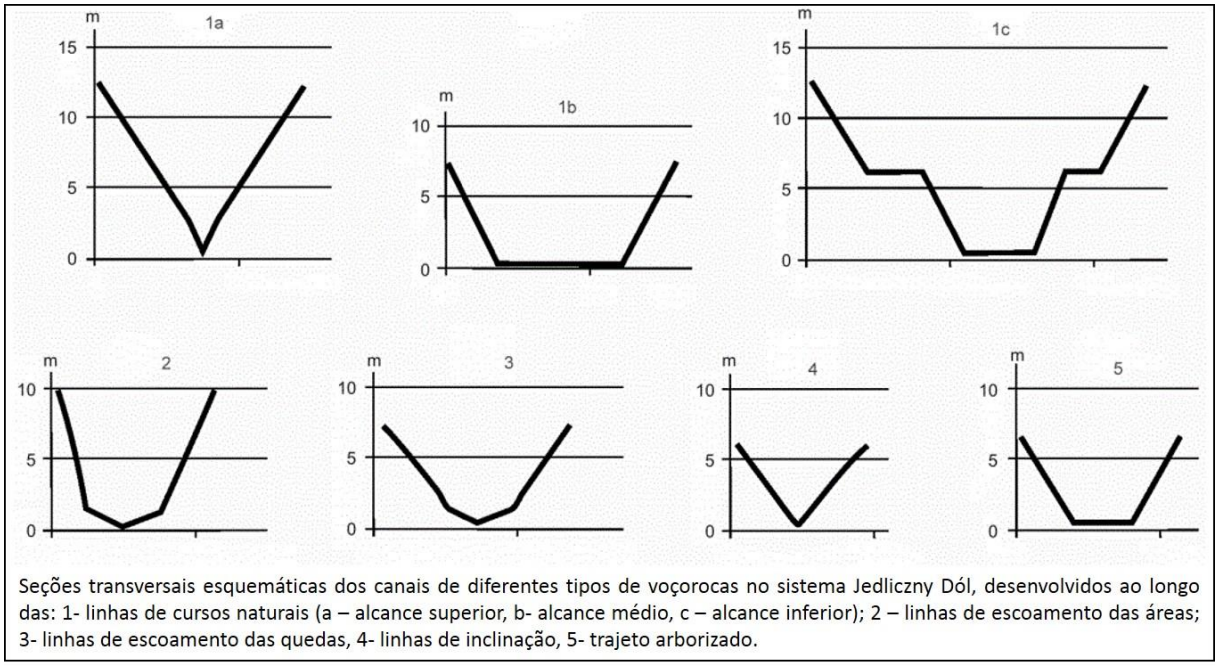
percebido em voçorocas mais estreitas, com erosão concentrada em linhas principais com pouca abertura, relaciona-se a voçorocas onde o escoamento superficial concentrado atua preponderantemente à ação da água subterrânea. Este formato é mais comum no início do processo erosivo, muito embora seja frequente encontrar ambos os formatos numa mesma voçoroca, independentemente de sua idade ou estabilização.

Camapum de Carvalho et al. (2006) afirmam que tanto as ravinas, quanto as voçorocas, podem assumir forma linear, quando estão associadas às características geológico-geotécnicas e estruturais da região, apresentando inicialmente a forma de “V” e podendo evoluir para a forma “U” ou trapezoidal; forma de anfiteatro, quando a feição assume forma mais concentrada, e encaixada quando a feição atinge camadas de solo menos resistente, ficando confinada pelas mais resistentes.

A configuração da seção transversal de uma voçoroca e sua relação com a localização do relevo inicial e formas de uso da terra, na maioria dos casos permite determinar razões para o seu desenvolvimento. Dobek et. al (2011), determina cinco tipos diferentes de seções transversais no interior de voçorocas, desenvolvidos ao longo da direção de escoamento condicionado pelo relevo (Figura 8), sendo elas: 1) linhas de cursos naturais (a – alcance superior, b- alcance médio, c – alcance inferior); 2) linhas de escoamento das áreas; 3) linhas de escoamento das quedas, 4) linhas de inclinação e, 5) secção com trajeto arborizado.

Segundo Fendrich et al. (1991) existem quatro estágios de desenvolvimento de uma voçoroca: 1°) ocorre formação de sulcos com escoamento superficial concentrado; 2°) ocorre aprofundamento e alargamento da voçoroca com surgimento da cabeceira da feição devido à erosão regressiva; 3°) ocorre encontro do nível base de erosão com formação de fundo achatado; 4°) a voçoroca começa se estabilizar, com abrandamento dos taludes e colonização de espécies vegetais oriunda dos escorregamentos. Onde, neste quarto estágio, provavelmente a colonização se faz por sucessão ecológica de espécies.

Figura 8 - Esquema de diferentes tipos de formato da seção transversal de voçorocas.



Seções transversais esquemáticas dos canais de diferentes tipos de voçorocas no sistema Jedliczny Dól, desenvolvidos ao longo das: 1- linhas de cursos naturais (a – alcance superior, b- alcance médio, c – alcance inferior); 2 – linhas de escoamento das áreas; 3- linhas de escoamento das quedas, 4- linhas de inclinação, 5- trajeto arborizado.

Fonte: Dobek et. al (2011)[1].

De acordo com Coelho Netto (1998), a erosão por ravinas e voçorocas é causada por vários mecanismos que atuam em diferentes escalas temporais e espaciais. Tais mecanismos derivam de rotas tomadas pelos fluxos de água, que podem ocorrer na superfície ou em subsuperfície.

Baseado no fato de que erosão por voçorocas é causada por diferentes mecanismos que atuam em escalas temporais e espaciais diversas, originando-se de rotas de fluxos d'água que ocorrem na superfície ou subsuperfície. Oliveira (1999), enumera os principais mecanismos envolvidos no processo erosivo de forma genérica e de ordem física, sendo eles:

1. Deslocamento de partículas por impacto de gostas de chuva: conhecido como erosão por salpico, onde o deslocamento de partículas por impacto de gotas de chuva acarreta compactação da superfície do terreno, através da remobilização de silte e argila nos espaços intergranulares, e erosão, através da projeção de partículas para fora da zona de impacto;

[1] Tradução livre da autora: Texto em inglês contido na Figura 8: Schematic cross-sections of diferente types of gullies in the Jedliczny Dót gully system, developed along: 1 - natural stream lines (a - upper reach, b - middle reach, c - lower reach), 2 - runoff lines fields, 3 - runoff lines from fallplaces, 4 - skidding lines, 5 - forest roads. (Dobek et. al, 2011).

2. Transporte de partículas de solo pelo escoamento superficial difuso: pode ser compreendido como o resultado de tensões cisalhantes que superam a resistência estática das partículas individuais;
3. Transporte de partículas por fluxos concentrados: ao convergir para microdepressões do terreno, o escoamento superficial se transforma em fluxo concentrado, formando sulcos, ravinas e voçorocas;
4. Erosão por quedas d'água: se origina a partir da água de escoamento superficial que desemboca no interior de incisões erosivas;
5. Solapamento de bases de taludes: pode ocorrer por outros mecanismos além da erosão por cascatas, onde neste caso a atuação dos filetes subverticais de escoamento superficial é outro efeito de erosão por quedas-d'água;
6. Liquefação de materiais de solo: ocorre quando materiais inconsolidados são submetidos a fracas tensões cisalhantes de natureza cíclica. Este processo ocorre quando os materiais do solo estão saturados;
7. Movimentos de massa localizados: podem ser verificados em voçorocas e dependem basicamente da resistência dos materiais;
8. Arraste de partículas por percolação: ocorre como resultado da água que atravessa um meio poroso após aflorar ao longo de uma superfície exposta (Dunne, 1990 citado por Oliveira, 1999);
9. Arraste de partículas por fluxos concentrados em túneis ou dutos: ocorre sob o efeito de água de escoamento superficial e subsuperficial que penetra em dutos biogênicos ou fendas de diversas origens. A erosão em dutos constitui excelentes exemplos de interação entre diferentes mecanismos fundamentais que podem gerar feições erosivas.

Vale ressaltar que estes mecanismos não são exclusivos para o desenvolvimento de voçorocas, pois todos os processos de erosão por escoamento possuem esta dinâmica, a exemplo dos movimentos de massa que são sempre localizados e relacionam-se com o fluxo interno saturado.

As feições erosivas que resultam da atuação de tais mecanismos descritos acima, ainda de acordo com Oliveira (1999), assumem grande importância na etapa de levantamento de voçorocas, relacionadas a seguir:

1. Pedestais (demoiselles) indicam a ocorrência de salpicamento intercalado com remoção das partículas pelo escoamento superficial. Normalmente estas

feições são formas residuais esculpidas abaixo de um objeto cuja densidade não permitiu a sua remoção (grânulos e seixos de minerais variados).

2. Sulcos e ravinas, formados em superfície de encosta com vegetação relativamente degradada, ou no interior de voçorocas, indicando as rotas de organização do escoamento superficial concentrado.
3. As alcovas de regressão também são feições erosivas e podem ser observadas sob diferentes condições litológicas e climáticas, podendo ser esculpidas tanto pelo escoamento superficial como filetes subverticais, quanto pela exfiltração do lençol freático, e até mesmo pela combinação de ambos os mecanismos.
4. Filetes subverticais são documentados preferencialmente em paredes de voçorocas esculpidas em materiais pouco coesivos
5. Dutos de convergência e caneluras são comuns em incisões de pequeno porte (ravinas) e entre sulcos ou ravinas descontínuas e indicam variações das características mecânicas das coberturas superficiais. Também pode ocorrer como feições de detalhes em voçorocas.
6. Marmitas ou panelas indicam a atuação de erosão por quedas-d'água na base de taludes ou de degraus no interior de voçorocas. Em geral, apresentam geometria relativamente dissimétrica, sendo mais profundas a montante e mais rasas a jusante.
7. Quedas de areia resultam da liquefação espontânea de materiais inconsolidados e não coesivos. Pode ser provocadas tanto por instabilidades associadas a movimentos de massa localizados, quanto pela exposição à chuva e a filetes d'água após a dissecação.
8. Quedas de torrões caracterizam movimentos de massa associados, seja ao solapamento da base de taludes ou ao desprendimento de material ao longo de fendas de tração.
9. As chamadas costelas e depressões são feições de detalhe que podem ser encontradas em materiais de origem diversas (aluvial, coluvial, eólico, etc.), em gerlpoligenéticas, e indicam variações, em profundidade, da resistência ao cisalhamento dos materiais de coberturas superficial (NASCIMENTO, 1998).
10. Fendas e dutos indicam a existência de movimento generalizado da encosta em torno da incisão erosiva. Podem ser formados por movimentos translacionais profundos, por tração nas bordas da incisão, ou por expansão e contração de argilominerais.

11. As poças de ressurgência indicam áreas de afloramento do lençol freático, ao longo de incisões erosivas, sua identificação é ideal para o dimensionamento de eventuais estruturas de correção da erosão.

Tais mecanismos podem ser comumente encontrados no interior das voçorocas presentes na área de estudo em Cacequi e apresentar ainda a esta lista os movimentos de massa, o qual constitui grande variedade de feições erosivas (Oliveira, 1999). As mais comuns são associadas à extensão para montante ou ao alargamento das incisões erosivas. Normalmente, a sua ocorrência pode ser identificada pelos resíduos deixados logo abaixo das bordas de incisão.

O processo de erosão interna (piping), consequência do crescimento das voçorocas, avança subsuperficialmente no interior solo sob a forma de tubos. O aumento generalizado da ocorrência dessas tubulações subterrâneas, normalmente provoca o colapso do terreno, com desabamentos que alargam a voçoroca ou criam novas ramificações da mesma. Outro efeito associado a esses processos de erosão interna, são os solapamentos da base das paredes da voçoroca, que resultam no seu desmoronamento (Guerra et. al, 1999). A exposição de tais mecanismos que atuam em voçorocas dá origem a grande número de feições erosivas, onde a identificação de cada uma delas, possibilita a avaliação das interações possíveis entre mecanismos individuais no interior de uma incisão.

Sendo assim, a análise e avaliação dos mecanismos citados nas páginas 42 e 43, podem indicar o estágio da voçoroca, isto é, servem como indicadores para classificar em uma escala qualitativa, feições erosivas de muito jovens a muito maduras, podendo ainda, indicar a retomada ou estabilização de processos erosivos. Tal fato (retomada de erosão) pode indicar que processos neotectônicos estão ocorrendo em uma determinada área.

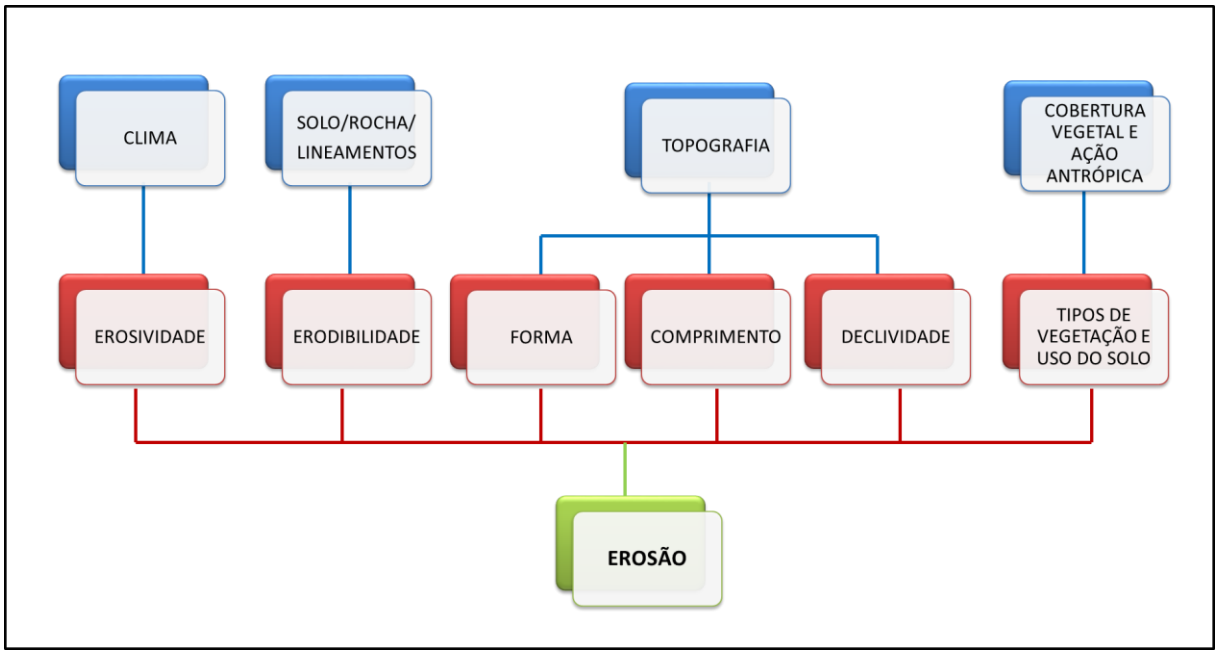
2.2 FATORES CONTROLADORES DOS PROCESSOS EROSIVOS

De acordo com Rios (2011), a erosão por processo natural compõe um importante agente para evolução dos solos e para a dinâmica morfogenética do relevo, constituindo um dos fatores cruciais da dinâmica evolutiva natural do planeta. Os processos erosivos se caracterizam pela interação dos fatores controladores, que determinam as taxas de erosão, que podem ser maiores ou menores (Pires et al, 2002).

Para Bertoni e Lombardi Neto (1990), a erosão é causada por forças ativas associadas às chuvas, às características do declive do terreno e à capacidade que tem o solo de absorver água, e também por forças passivas, representadas pela resistência do solo à ação erosiva da água e à densidade da cobertura vegetal. Isso quer dizer que a erosão dos solos é um fenômeno complexo, determinado pela interação de fatores controladores como a chuva, as propriedades do solo, as características da topografia e a cobertura vegetal, que devem ser compreendidos de forma detalhada para o melhor entendimento do processo erosivo e das taxas de erosão.

A partir da conjunção desses fatores somados a geologia estrutural, certas áreas tendem a erodir mais que outras. Grande parte dos estudos de erosão dos solos, advém de trabalhos empíricos que coletam uma vasta gama de dados sobre perda de solo e agentes controladores, a partir dos quais são determinadas correlações estatísticas. Sendo assim, uma grande quantidade de variáveis é apontada como sendo significativa para explicar e prognosticar a erosão. Viero (2004) acrescenta que os principais parâmetros que controlam a erosão compreendem a erosividade da chuva, a erodibilidade proporcionada pelas propriedades do solo, relevo, cobertura vegetal e uso e ocupação do solo (Figura 9).

Figura 9 - Fatores controladores da erosão.



Fonte: Adaptado a partir de Guerra (2005).

A erosividade, segundo Hudson (1961) citado por Guerra (2003) é a habilidade da chuva em causar erosão. A chuva tem papel ativo na erosão do solo, uma vez que é a fonte de energia para todo o processo e, por isso, considerada como um dos fatores climáticos de maior importância no processo erosivo. A erosividade é determinada por características físicas da chuva, como duração, quantidade, intensidade, frequência, dimensão das gotas, dentre outros. Para Zuquette (2007) a intensidade e a duração são parâmetros particularmente importantes no potencial erosivo da chuva.

A erosividade da chuva se divide em parte ao impacto direto das gotas de chuva no solo e o movimento superficial e subsuperficial que a mesma gera que não ficam retidas sobre a superfície, ou não se infiltram, transportando partículas de solo em suspensão e elementos em dissolução para variados pontos de deposição (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990; BIGARELLA et al., 2003; GUERRA, 2003; LEPSCH, 2002).

A capacidade de erosão do solo causada pela chuva é atribuída à proporção e distribuição das gotas, segundo a sua carga de energia. A erosividade da chuva é atribuída à sua energia cinética ou *momentum*, parâmetros facilmente relacionados à intensidade da chuva ou à sua quantidade total. Corroborando com essa ideia (BIGARELLA et al., 2003) acrescenta que:

> A erosividade é controlada principalmente pela intensidade das chuvas numa unidade de tempo em mm/m². O aumento da intensidade implica no incremento da proporção de gotas maiores (2 a 6 mm de diâmetro); devido ao tamanho, as gotas caem com velocidades maiores e, consequentemente, maior energia cinética (BIGARELLA et al., 2003 p. 900).

De acordo com Lombardi e Neto (1990), quanto maior a intensidade e a duração da chuva, maior o volume e a velocidade da enxurrada e, consequentemente, maior a perda de solo. A chuva se apresenta como um dos fatores climáticos determinantes da erosão, enquanto que o solo, com suas características químicas e físicas, conferem maior ou menor resistência à ação das águas.

Guerra (2003) ressalta que o total de chuva (mensal ou anual) é pouco significativo na erosão dos solos e ainda inclui como parâmetros da erosividade, o momento e a energia cinética, onde todos os parâmetros envolvidos devem ser considerados em conjunto com os demais fatores que afetam a erosão.

Lal (1988) aponta a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo e como sendo dois fatores físicos significantes para a magnitude e/ou intensidade da erosão do solo. Conforme o autor, a erodibilidade do solo é o efeito integrado de processos que regulam a recepção da chuva e a resistência do solo para desagregação de partículas e o transporte subsequente. Tais processos são influenciados pelas propriedades do solo, assim como a distribuição do tamanho das suas partículas, estabilidade estrutural, conteúdo de matéria orgânica, natureza dos minerais de argila e constituintes químicos. Além desses, consideram-se que, os parâmetros do solo que afetam a sua estrutura, hidratação, e as características da circulação da água.

Bertoni e Lombardi Neto (1990) afirmam que a erodibilidade de um solo é explicada pela sua vulnerabilidade ou suscetibilidade à erosão, dependendo da sua resistência aos processos de perda de material.

Segundo Wischmeier e Smith (1962, citado por Pereira, 2000), a suscetibilidade de um solo ao processo erosivo é expressa pela sua erodibilidade e as propriedades do solo estão diretamente ligadas a ela. As propriedades do solo, juntamente com outros fatores controladores da erosão, definem a maior ou menor perda de solo devido ao processo erosivo.

Para Bertoni e Lombardi Neto (1990), as propriedades do solo que influenciam na sua erodibilidade são: a) as que afetam a velocidade da infiltração da água no solo, a permeabilidade e a capacidade de absorção da água e, b) as que resistem à dispersão, ao salpicamento, à abrasão e as forças de transporte da chuva e da enxurrada.

Por outro lado, Guerra (2003) define tais características da seguinte forma: textura, densidade aparente, porosidade, teor de matéria orgânica, teor e estabilidade dos agregados e o pH do solo. Para o autor, estas propriedades agem de maneira distinta no processo erosivo, mas estão todas interligadas, além disso, não são estáticas, isto é, são dependentes da ação do tempo.

Toy et. al (2002), acrescentam que a erodibilidade do solo é resultado do efeito integrado das características físicas de textura, estrutura, agregação e porosidade. Já Bertoni e Lombardi Neto (1990), afirmam que estas propriedades, associadas aos atributos químicos e biológicos, tipificam o comportamento de cada solo, exposto a condições semelhantes de topografia, chuva e cobertura vegetal, onde os solos ricos em silte são facilmente erodíveis, uma vez que suas partículas possuem pequena

adesão entre si e, quando há quebra dos agregados, pelo impacto das gotas de chuva, são facilmente transportados pela água.

Os solos arenosos, apesar de muito permeáveis, também apresentam erodibilidade alta, em razão do pequeno teor de matéria orgânica e argila, responsáveis pela sua coesão (TOY et. al, 2002). Durante um episódio de chuva, os agregados desses solos são quebrados com facilidade e o escoamento superficial pode ocasionar grande perda de solo devido à baixa coesão entre as partículas.

A erodibilidade do solo de acordo com Lepsh et al. (1991) pode ser estimada e avaliada por métodos práticos com base em parâmetros obtidos através de determinações laboratoriais e descrições de características morfológica dos perfis. As análises de laboratório referem-se à textura do solo, estrutura, permeabilidade e avaliações do conteúdo de matéria orgânica e da estabilidade dos agregados.

Inseridos entre uma série de fatores controladores da distribuição dos processos erosivos, os atributos topográficos ou características da vertente, apresentam sua importância à erosão originada pelo fato de que a topografia condiciona a intensidade e a direção dos fluxos hídricos pluviais, que por sua vez são os principais agentes erosivos (COELHO NETTO, 1998; GUERRA, 2003; LEPSCH, 2002).

Considerando os atributos topográficos, a atuação conjunta da declividade, comprimento e a forma da superfície do terreno, exercem grande influência no desencadeamento dos processos erosivos. A capacidade erosiva é influenciada pela velocidade das enxurradas, que de acordo com alguns princípios de hidráulica, depende diretamente do grau de declive (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

Entende-se que à medida que o declive do terreno aumenta, se eleva a velocidade do escoamento superficial, que aumenta o poder erosivo, e a capacidade de arrastar maior quantidade de material, isso demonstra a importância do declive na capacidade erosiva da água, onde em declives mais elevados ocorrem também outros tipos de processos superficiais além da erosão. Da mesma forma, aumenta a capacidade de retirar partículas mais grossas, considerando que aumenta a energia cinética e consequentemente a capacidade erosiva.

Entretanto, Morgan (1996) salienta que em encostas muito íngremes, a perda de solo pode diminuir, devido principalmente à redução do material disponível (solos mais rasos). É evidente que o aumento da declividade aumenta a capacidade erosiva dos agentes (a água, através do escoamento superficial), simultaneamente, não

significa maiores perdas de solo, pois é cabível ocorrer maiores perdas de solos em declividades baixas do que em altas (GUERRA, 2003). Por esse motivo, o fator declividade deve ser considerado conjuntamente com outros parâmetros, que podem intensificar ou reduzir sua influência na erosão.

Um parâmetro importante a ser considerado é o comprimento da encosta, onde para Bertoni e Lombardi Neto (1990) na medida em que o caminho percorrido pela enxurrada aumenta, eleva-se significativamente o volume de água e a velocidade do escoamento, consequentemente, maior é a energia resultante que se traduz por uma capacidade erosiva maior. Nesse contexto, a topografia do terreno, representada pela declividade e pelo comprimento da encosta, exerce relevante influência erosiva.

Dessa forma, o comprimento de vertente possui grande influência em algumas características do terreno, tais como capacidade de infiltração, tempo necessário para o escoamento desde o divisor de águas até o talvegue e na capacidade erosiva. Desta forma, constituí-se em um parâmetro morfométrico importante para ser analisado em estudos geomorfológicos (RECKZIEGEL e ROBAINA, 2006).

Outro fator importante é a forma do perfil e plano curvatura das vertentes, Guerra (1993) define vertentes como planos de declives que divergem a partir das cristas enquadrando o vale. A dinâmica dos fluxos de água superficiais, subsuperficiais e transportes de sedimentos são influenciados pela concavidade ou convexidade da vertente, isto é, pela forma ou geometria.

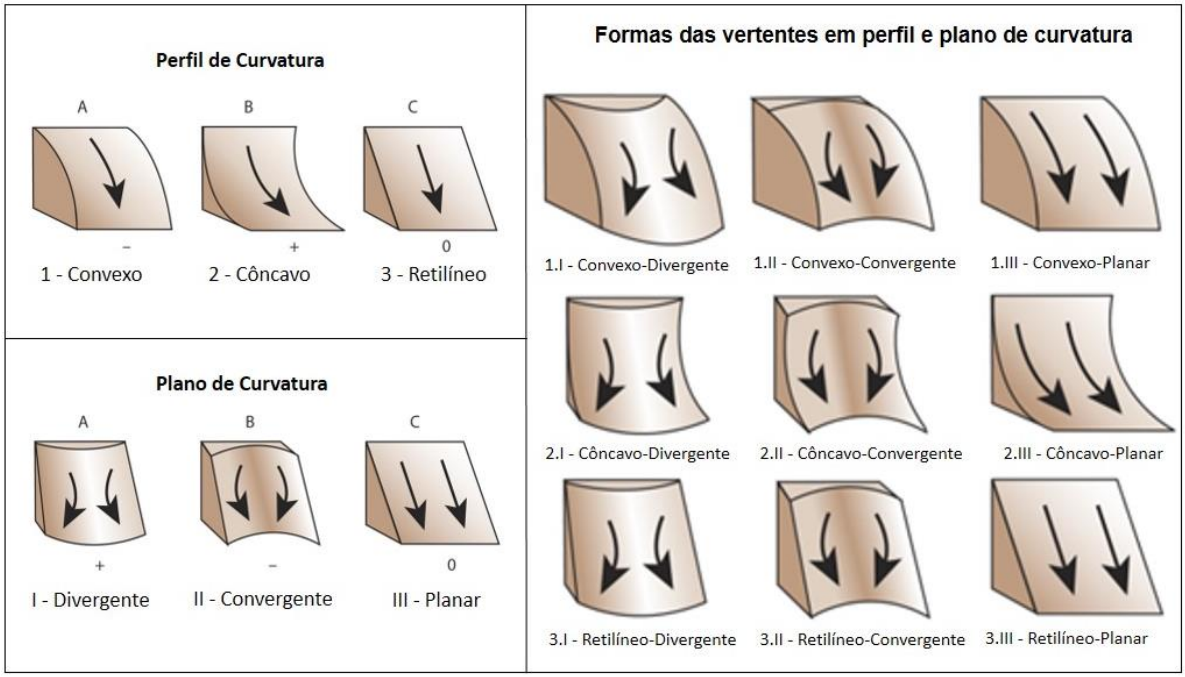
De forma mais sucinta Veloso (2002), descreve vertente como sendo um elemento da superfície terrestre inclinado em relação à horizontal, que apresenta um gradiente e uma orientação no espaço, e dessa forma podem ser classificadas de acordo com a sua curvatura no plano ou em perfil.

Ainda para Veloso, (op. cit), as vertentes são locais onde ocorrem o intemperismo, o transporte e deposição de materiais, o estudo dos processos que nelas ocorrem requer uma descrição cuidadosa e precisa, que geralmente é feita com referência ao seu perfil, onde é traçada uma linha sobre o terreno descrevendo sua inclinação. Esta inclinação é expressa por um ângulo ou um gradiente e sua orientação é dada pelos pontos cardeais. As vertentes cujo perfil tem um ângulo constante são chamadas retilíneas, segmentos ou partes das vertentes também podem ter este tipo de perfil. As vertentes curvas podem ser convexas ou côncavas de acordo com a direção da curvatura e não podem ser descritas por um simples ângulo, mas pelo grau de curvatura do segmento.

A curvatura no plano é a taxa de variação da declividade na direção ortogonal à da orientação da vertente e refere-se ao caráter divergente/convergente do terreno, enquanto a curvatura no perfil é a taxa de variação da declividade na direção de sua orientação e está relacionada ao caráter convexo/côncavo do terreno sendo decisiva na aceleração ou desaceleração do fluxo da água sobre o mesmo (ANJOS, 2011).

Para Valeriano (2003) a classificação das vertentes em relação ao perfil é analisada de acordo com seu valor de curvatura, onde cada forma apresenta um valor associado, ou seja, vertentes retilíneas - valor de curvatura nulo, vertentes côncavas - valores positivos e convexas - curvatura negativa (Figura 10).

Figura 10 - Modelos de curvaturas das vertentes.



Fonte: Curvature function – Esri, ArcMap (2017).

Viero (2004) recomenda em sua pesquisa realizada na bacia do Taboão - RS, que outros parâmetros morfométricos sejam incorporados ao estudo do controle da geomorfologia no desenvolvimento de voçorocas, como as encostas, o comprimento da vertente, a densidade de eixos de drenagem acima da cabeceira da voçoroca, a declividade na cabeceira da voçoroca, a distância entre a cabeceira do divisor de águas, entre outras.

Para Bigarella (2003) a vegetação protege o solo frente aos problemas de escoamento, diminuindo assim os efeitos erosivos. A percentagem das precipitações interceptada pela vegetação depende de muitos fatores, como a duração, a quantidade, a intensidade e a frequência das chuvas, assim como, a intensidade do vento e o tipo de vegetação.

A influência da cobertura vegetal no desenvolvimento de processos erosivos é bastante conhecida, manifestando-se nas taxas de escoamento superficial e erosão mais do que em qualquer outro fator físico individual (MEDEIROS et. al 1995).

Bertoni e Lombardi Neto (1990) citam os benefícios de se manter a cobertura vegetal de um terreno sustentando a defesa natural contra erosão por meio da proteção direta contra o impacto das gotas de chuva; dispersão da água, interceptando-a e evaporando-a antes de atingir o solo; decomposição das raízes das plantas que, formando canalículos no solo, aumentam a infiltração de água; melhoramento da estrutura do solo pela adição de matéria orgânica, aumentando assim sua capacidade de retenção de água e a diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada pelo aumento do atrito na superfície.

Logo após a retirada da cobertura vegetal, o solo fica exposto a diversas intempéries, como a chuva, sol e ventos, que reduzem de sua permeabilidade (GUERRA et al., 2007). Tal fato, desencadeia a compactação do solo, causando sérios problemas erosivos, sobretudo do tipo laminar, que além de ocasionar a degradação também o empobrece.

Segundo Guerra (2003) a densidade da cobertura vegetal é fator importante no escoamento superficial e na perda de solo, enquanto o tipo de cobertura e a sua porcentagem podem reduzir os efeitos dos fatores erosivos naturais. Além de influenciar na interceptação das águas da chuva, também atua diretamente na produção de matéria orgânica que, por sua vez, atua na agregação das partículas constituintes do solo. Em uma área com alta densidade de cobertura vegetal, o escoamento superficial e a erosão ocorrem em taxas baixas, especialmente se houver uma cobertura de serrapilheira no solo que intercepta as gotas de chuva que caem através dos galhos e folhas. Já em áreas parcialmente cobertas pela vegetação, o escoamento e a perda de solo podem aumentar rapidamente, como ocorre geralmente em áreas semi-áridas, agrícolas e de pastoreio, e onde os solos apresentam menos de 70% de cobertura vegetal.

Para Bigarella (2003) a vegetação desempenha também um papel importante no revolvimento das camadas superficiais do solo, o mesmo acontece pela ação dos animais. Além disso, o impacto das chuvas sobre o solo faz com que a porosidade seja diminuída, tornando a superfície menos permeável, aumentando o escoamento superficial e consequentemente a erosão.

A retirada da cobertura vegetal e o uso e ocupação de uma determinada área pode ser sucedida por uma série de alterações que levam a graves desequilíbrios ambientais. Áreas com maior suscetibilidade natural à erosão são intensamente atingidas pelas ocorrências erosivas, fato este agravado pelos inadequados tipos de uso e ocupação do solo.

Para Viero (2004) a ocupação antrópica, através do desmatamento e cultivo do solo, da construção de estradas, da criação e expansão de núcleos urbanos, sobretudo quando de modo inadequado, constitui o fator decisivo da origem e aceleração dos processos erosivos. Uma vez deflagrados pela ocupação do solo, os processos erosivos passam a ser comandados por diversos fatores naturais que determinam as variações nas taxas de erosão.

Ainda para Viero (op. cit) as práticas agrícolas utilizadas em lavouras induzem a variações espaciais e temporais da capacidade de infiltração e do armazenamento superficial que podem ser progressivas ou descontínuas. O sistema de cultivo também contribui para o surgimento de uma rede de canais onde ocorre concentração do escoamento superficial e que também sofre mudanças ao longo do tempo, ou seja, as práticas agrícolas aumentam ou reduzem consideravelmente o risco de erosão por ravinas e voçorocas.

Os processos erosivos vão além da continuidade sobre o relevo, isto é, os agentes internos são construtivos, trabalham alternadamente com os agentes externos com a finalidade de estabelecer o equilíbrio. São os agentes internos que contribuem para a formação de novos relevos subjacentes aos perfis da superfície terrestre

Beavis (2000) avalia em seu trabalho o papel da geologia no desenvolvimento de voçorocas no sudeste da Austrália, e constata que tal papel é exercido pelas estruturas geológicas que determinam a localização da erosão no ambiente e pela litologia, em função da mineralogia e do tamanho das partículas que determinam a intensidade da erosão (erodibilidade). O estudo demonstra ainda uma significativa correlação entre a orientação das fraturas e falhas (lineamentos estruturais) e a

orientação das voçorocas, comprovando que as estruturas presentes no substrato rochoso possuem uma forte influência tanto no desenvolvimento como na orientação das voçorocas.

Os movimentos neotectônicos do período Terciário Superior e início do Quaternário consistiram na reativação de falhas estruturais do Pré-cambriano, influenciando na formação topográfica do relevo atual. Para identificar a influência tectônica na paisagem atual de orógenos estabilizados (como é o caso da porção continental brasileira), a análise da drenagem se torna fundamental, já que a partir destas é possível identificar o substrato litológico, como também as estruturas (dobramentos, falhas) que os condiciona (SILVA e FERREIRA, 2014).

Os padrões de drenagem podem identificar se existe controle estrutural na distribuição da drenagem na superfície, que geralmente está associado a fraturas, falhas e dobramentos. Os padrões básicos são controlados por uma estrutura regional sendo reconhecidas algumas características distinguíveis dos outros padrões básicos (PHILLIPS e SCHUMM, 1987).

Os padrões de lineamentos estruturais podem ser avaliados em imagens de satélite ou fotografias aéreas. Para O'Leary et. al (1976 citado por VIERO, 2004), um lineamento é uma feição linear da superfície, mapeável, simples ou composta, cujas partes estão alinhadas de uma forma retilínea ou levemente curvilínea, e que se difere dos padrões das feições adjacentes e baseado em indícios reflete um fenômeno de subsuperfície. As feições superficiais podem ser fisiográficas, expressas através do relevo, ou tonais, indicadas por contrastes. Expressões fisiográficas consistem em formas de relevo contínuas ou isoladas, limites de áreas distintas morfologicamente ou quebras em um terreno uniforme, como um curso d´água.

Mantelli e Rossetti (2009) alegam que os lineamentos na drenagem, a confluência de canais em ângulos retos (90º) e a ruptura de declives e vales assimétricos, indicam a presença de movimentos tectônicos recentes. Silva et al. (2006) corrobora com tal afirmação em estudos, no qual anomalias na drenagem pode ser definida como uma discordância local da drenagem regional, e/ou dos padrões de canais. Sendo assim, são indicadores da atividade recente, os terraços fluviais assimétricos, trechos retilíneos, ocorrência localizada e abrupta de curvas meândricas e captura fluvial.

Frente a isso, os lineamentos são resultantes de falhamentos e fraturamentos e podem representar zonas de aumento de porosidade e permeabilidade em áreas

com rochas maciças, significativas para o acúmulo e movimentação de água subterrânea. Podem ser utilizados como indicadores do controle exercido pelas estruturas geológicas na erosão por voçorocas (ERDÉLYI e GÁLFI, 1988).

Sendo assim, a extração de lineamentos (de drenagem e relevo) baseados em produtos do sensoriamento remoto para a caracterização morfoestrutural de uma determinada área, fornece suporte na observação de eventos tectônicos antigos assim como neotectônicos.

2.3 GEOTECNOLOGIAS E ANÁLISE DE DADOS MORFOMÉTRICOS APLICADOS A PROCESSOS EROSIVOS

As geotecnologias constituem uma das principais ferramentas para o estudo do espaço geográfico, oferecendo produtos digitais básicos que podem ser aplicados através de técnicas computacionais a análise ambiental, sobretudo em pesquisas voltadas aos processos erosivos.

De acordo com Marcelino (2008), as geotecnologias são representadas especialmente pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG), pelo Sensoriamento Remoto (SR) e o Sistema de Posicionamento Global (GPS), possibilitando a coleta, armazenamento e análise de ampla quantidade de dados, que seriam praticamente inviáveis de serem tratados utilizando métodos analógicos e/ou tradicionais. Além disso, proporcionam a produção e o manejo de informações em pouco tempo e com baixo custo, combinando dados espaciais multi-fontes, a fim de analisar as interações existentes entre as variáveis e dar suporte as tomadas de decisões (BONHAM-CARTER, 1994). Também cabe destacar, as contribuições de Botelho (1999), Xavier da Silva (2005) e Florenzano (2008), onde são apresentados uma série de trabalhos com distintas metodologias e usos de diferentes recursos de geotecnologias para a realização de trabalhos nas questões ambientais.

O Sensoriamento remoto permite a aquisição de informações sobre objetos, áreas ou fenômenos pela utilização de sensores, sem que haja contato direto com os alvos de interesse, o que pode derivar informações relevantes sobre as características físicas e até mesmo químicas dos objetos em estudo. Utiliza-se de forma conjunta de modernos instrumentos (sensores), equipamentos para processamento e transmissão de dados e plataformas (aéreas e espaciais), com o intuito de estudar o ambiente terrestre por meio do registro e da análise das interações entre a radiação

eletromagnética (REM) e as substancias componentes do planeta Terra em suas diferentes manifestações (NOVO, 1998). Para fornecer suporte ao Sensoriamento Remoto, o Sistema de Informação Geográfica entra como instrumento computacional de geoprocessamento, mostrando-se imprescindível no processamento digital de imagens, como recurso para a realização dos cruzamentos entre diferentes bases temáticas.

As geotecnologias amparadas pelo Sensoriamento Remoto e pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), mantem a função de identificar na área de estudo feições erosivas, de modo a apontar as extensões erodidas e como se distribuem, identificando as principais características assim como dos locais onde ocorrem com maior frequência. Tais finalidades se tornam possível com o uso de geotecnologias, mostrando-se uma ferramenta essencial, uma vez que as grandes extensões erodidas fazem com que o processo de mapeamento se torne confuso e lento, muitas vezes ineficaz, quando realizado somente in loco.

As análises morfométricas, com a preocupação de medir as formas de relevo através de processos sistemáticos e racionais, tiveram grande sucesso no final do século XIX, principalmente em pesquisas realizadas na Alemanha, Áustria e Suíça (CHRISTOFOLETTI, 2011). Este tema se expandiu e tomou maior repercussão no campo da análise tectônica, através do trabalho de Filosofov (1960), desde então métodos para a construção e avaliação de modelos morfométricos têm sido constantemente melhorados com o desenvolvimento de novas técnicas, como Gyozo Jordan (2003), Pánek (2004), Barbosa e Furrier (2011) e Jacques, et. al (2014).

A representação morfométrica é frequentemente aplicada em pesquisas voltadas a análises e caracterização de bacias hidrográficas, amparado em técnicas e métodos de extração de índices a partir da própria configuração da drenagem. Muitos são os índices utilizados a exemplo do número de rios, comprimento e densidade dos canais, área e perímetro da drenagem, hierarquia fluvial, forma da bacia de drenagem, direção de escoamento, fator de forma, índice de circularidade e entre outros. Seguindo este viés, podemos citar alguns trabalhos que servem como base conceitual como Christofoletti (1969 e 2011), Tonello et al. (2006), Wilson, et. al. (2012) e Biswas (2016).

A análise morfométrica é também uma abordagem fundamental em estudos da formação e desenvolvimento de vertentes, pois trata também da medição e análise da configuração da superfície terrestre, fisionomia e dimensões de suas formas de relevo.

Trabalhos como os de Castro e Carvalho (2009), Pissarra, et al. (2010), Stipp et al. (2010), Mioto et al. (2014) e Passarella (2016), aplicam ponderações morfométricas à análise geomorfológica, com apoio de Modelos Digitais de Elevação, utilizando como parâmetros, altimetria, lineamentos estruturais, solos, declividade do terreno, orientação e curvatura de vertentes, capacidade de transportes de sedimentos, inclinação longitudinal, fator de simetria topográfica transversal, assimetria da bacia de drenagem, amplitude altimétrica, índice de rugosidade, dissecação horizontal, além de combinar índices relacionados a rede de drenagem.

As técnicas morfométricas, empregadas na identificação e caracterização da superfície e análise do relevo, recebem cada vez mais contribuições cientificas amparadas na coleta de dados (Sensoriamento Remoto) e principalmente na integração desses dados em ambiente SIG (Geoprocessamento), a exemplo dos trabalhos de Chien-Yuan Chen (2011), Cunha e Pinton (2013) e Fernandes (2014).

A extração de atributos morfométricos, se utiliza da análise de dados advindos do processamento digital de fotografias aéreas, imagens multissensoriais e de radar (Modelos Digitais de Elevação), análises estatísticas e geoestatística, o que promovem melhorias significativas nas análises. De acordo com Zaidan e Xavier-da-Silva (2010), tais tecnologias demonstram-se uma ferramenta eficaz no que tange à precisão, confiabilidade e velocidade na geração de dados voltados a avaliação ambiental.

A análise de processos erosivos, combinando os parâmetros geológicos, pedológicos e geomorfológicos, possibilitam um melhor entendimento as suas ocorrências em uma determinada área. Além disso, tais parâmetros somados as características hidricas, são indissossiáveis na análise de processos erosivos, fornecendo como resultado um conjunto de atributos morfométricos que auxiliam na classificação, espacialização e caracterização dos mesmos, indicando ainda maior potencialidade à movimentação dos materiais constituintes da superfície terrestre.

Corroborando com esta questão, Ferreira et al. (2014) considera que na análise de processos erosivos a ação hídrica (canais de drenagem) atua como um agente contínuo de erosão, deposição e transporte de sedimentos, sendo um elemento que pode promover a desestabilização dos terrenos.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia aplicada neste trabalho tem como ponto inicial a análise dos processos erosivos tendo como base as características do ambiente e suas relações com os elementos geológicos e geomorfológicos. Essa visão refere-se ao emprego do método dedutivo de investigação em uma abordagem sistêmica.

A abordagem sistêmica busca conjugar conceitos de diversos meios científicos, visando resolver problemas sob o ponto de vista da Teoria Geral de Sistemas proposta por Bertalanffy em 1976. De acordo com esta teoria o todo possui propriedades globais de interação organizacional, com qualidades e comportamentos sob efeitos de restrições do sistema, as partes estão ligadas ao todo e vice-versa, constituindo uma unidade múltipla.

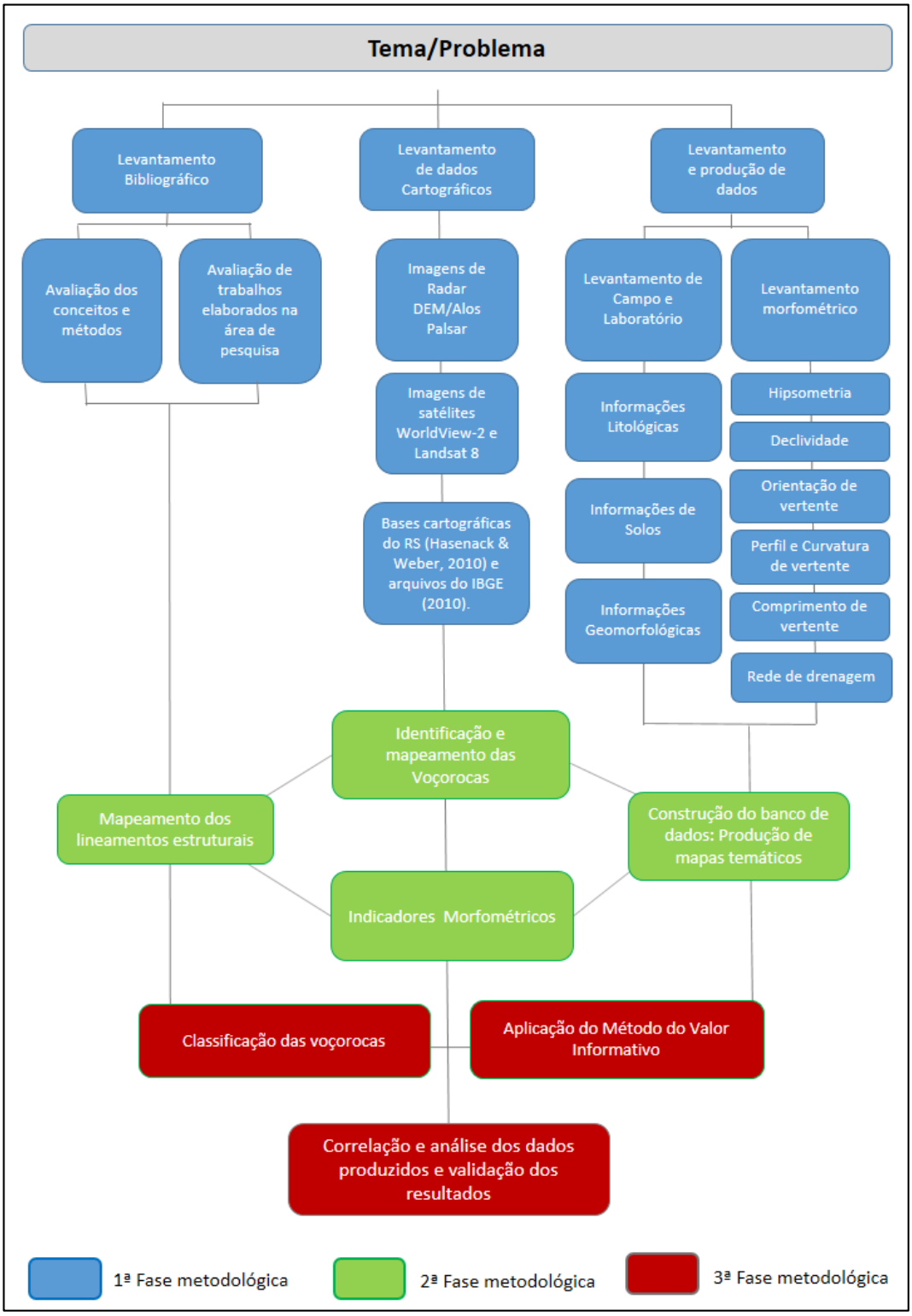
Dentro da questão ambiental, Tricart (1977) refere o conceito de sistema como sendo o melhor instrumento lógico de que dispomos para estudar os problemas do meio ambiente, pois ele permite adotar uma atitude dialética entre a necessidade da análise e a necessidade contrária de uma visão de conjunto, capaz de ensejar uma atuação eficaz sobre esse meio ambiente. A elaboração e análise de mapas temáticos em estudos geográficos, representa importante fase para o entendimento da evolução dos ambientes naturais, relacionados às formas, tipos e processos. Com isso, surge um conjunto de procedimentos técnicos e operacionais, aplicados durante essa etapa da pesquisa, no qual busca desenvolver uma caracterização e interpretação do ambiente de forma sistemática.

Os procedimentos adotados ao longo da pesquisa, buscam meios que possibilitem identificar as diferentes variáveis morfométricas atreladas ao comportamento geomorfológico e geológico da área de estudo, divididos em dois grupos de indicadores morfométricos, o primeiro voltado aos aspectos do quadro natural como hipsometria, declividade, orientação de vertentes, plano e perfil curvatura, morfologia e lineamentos estruturais, e o segundo grupo relacionado aos dados métricos das voçorocas como: área, profundidade, largura, volume, comprimento e índice de circularidade, até então pouco estudados nos processos de voçorocamentos da região.

No intuito de fornecer clareza a série de etapas metodológicas que foram escolhidas para a análise de indicadores morfométricos como suporte para a

classificação de voçorocas da área de pesquisa, foi elaborado um esquema de síntese metodológica apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Síntese metodológica da pesquisa.



Fonte: Organizado pela autora (2018).

De modo geral, a série de etapas metodológicas realizadas ao longo da pesquisa se apresentam em meio a procedimentos divididos em três fases técnico-operacionais.

3.1 PRIMEIRA FASE METODOLÓGICA

Este primeiro momento dos procedimentos metodológicos passa pelo levantamento bibliográfico acerca do tema abordado, consistindo em consultas específicas e sobre a área de estudo a partir de discussões e mapeamentos já existentes, como o Projeto RADAMBRASIL (1973), e estudos mais específicos voltados a erosão e arenização no oeste sul rio-grandense como aqueles desenvolvidos por Suertegaray *et al*. (2001), Robaina et. al (2002), Robaina e Trentin (2004) e Cabral (2004).

O levantamento do material cartográfico para esta investigação priorizou dados com resoluções de maior detalhe possível, disponíveis gratuitamente em plataformas digitais, referenciados na descrição de cada etapa metodológica.

A base cartográfica utilizada nos mapeamentos passou pelo levantamento de um conjunto de dados cartográficos, onde primeiramente buscou-se as informações contidas na base cartográfica vetorial contínua do banco de dados topográficos do Rio Grande do Sul, na escala de 1:50.000 (HASENACK e WEBER, 2010), contendo as informações hidrográficas, localização de estradas e topográficas (curvas de nível e pontos cotados), além do uso das malhas cartográficas dos municípios da Federação disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010).

Também foi levantado o material cartográfico utilizado como base para a extração dos dados morfométricos, como o Modelo Digital de Elevação - AlosPalsar - Global Radar Imagery (2006-2011) com resolução de 12,5 metros e as imagens de satélite WorldView-2, disponibilizadas pelo ESRI World Base Map, datadas de abril de 2015 com resolução espacial de 0,5m. O SRTM (resolução de 30m) disponibilizado pelo Centro de Ecologia da UFRGS, foi utilizado nas análises mais genéricas da área. Toda a organização destes materiais demandou a utilização de SIGs, promovendo maior agilidade na realização no processamento e levantamento de dados, mantendo como função a integração e espacialização das informações.

Dando seguimento a esta primeira etapa metodológica, o levantamento de dados que exercem um controle no desenvolvimento das voçorocas na área de estudo, iniciou com as características geomorfológicas, que tiveram embasamento nas orientações propostas por Ab'Sáber (1969) e Ross (1996), para a concepção do caráter empírico e geomorfológico nela presentes, possibilitando assim, analisar e representar o relevo sob o prisma taxonômico.

Sendo assim, considera-se para esta pesquisa os 5º e 6º níveis taxonômicos que melhor expressam, em termos de detalhe, as formas de relevo da área em questão. O *5 º táxon:* refere-se às partes das vertentes ou setores das vertentes de cada uma das formas do relevo. "As vertentes de cada tipologia de forma são geneticamente distintas, e cada um dos setores dessas vertentes pode apresentar características geométricas, genéticas e dinâmicas diferentes" (TOMINAGA, 2000). A representação zonal desse táxon só é possível em escalas grandes (1:25.000, 1:5.000). Nas escalas médias (1:50.000, 1:100.000) podem ser individualizadas através de símbolos lineares ou pontuais. O *6 º táxon:* "corresponde às pequenas formas de relevo que se desenvolvem por interferência antrópica direta ou indireta ao longo das vertentes. São formas geradas pelos processos erosivos e acumulativos atuais" (Ross, 1992), como ravinas, voçorocas, corridas de lama, assoreamentos, dentre outros. Tais representações só se tornam possíveis em escala grande (1:5.000, 1:1.000).

No que tange ao controle das voçorocas por parte dos aspectos geológicos da região, considera-se os trabalhos elaborados por Trentin et. al. (2015), voltado a caracterização litológica na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, e dados apresentados no mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul, na escala de 1:750.000, elaborado pela Companhia de pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2006), complementando a verificação direta em campo, assim como mapeamento dos principais lineamentos estruturais. A identificação espacial das litologias na área serviu de base também para a análise geomorfológica, permitindo relacionar com os demais fatores condicionantes aos processos superficiais que ocorrem na área.

A fase de produção de dados através do material cartográfico levantado e o do programa ArcGis 10.4 resultaram em um conjunto de informações que compõem a morfometria da área de pesquisa e que auxiliaram na análise das unidades de relevo, compreendendo assim a hipsometria, declividade do terreno, perfil e plano curvatura, orientação e comprimento de vertentes.

O mapa hipsométrico foi confeccionado considerando as sequências de superfícies nas classes altimétricas menor que 100, de 100 a 120, 120 a 140, 140 a 160 e maior que 160 metros (Quadro 1). Tais classes hipsométricas também foram utilizados para a análise do relevo.

Quadro 1 - Classes hipsométricas utilizadas para delimitação do perímetro dos componentes topográficos da área de estudo.

Classes (m)	Características
<100	Relevo com áreas planas.
100 - 120	Setor onde o canal principal começa a se tornar mais encaixado no relevo.
120 - 140	Setor entre o médio e alto curso das bacias hidrográficas.
140 – 160 e > 160	Relevo de topos de colinas.

Fonte: Organizado pela autora (2018).

Para a elaboração do mapa de declividade utilizou-se a ferramenta “Slope” do programa ArcGis 10.4.1 a partir do MDE, utilizando as classes de declividade estabelecidas pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo) sendo, <2%, 2-5%; 5-15% e >15%, onde na área de estudo correspondem a:

<2 - corresponde às áreas de baixa declividade presentes nas áreas planas, que define o emprego da mecanização na agricultura, principalmente lavouras de arroz, sem ocorrência de processos erosivos, parte dessa classe encontra-se próximas às drenagens, estando sujeitas à ocorrência de inundações.

2 - 5% - representa áreas com declividade um pouco mais acentuadas em relação a classe anterior, representa o relevo suavemente ondulado, onde começam a ocorrer ligeiramente os processos de dinâmica superficial, são área direcionadas a pecuária e rizicultura;

5 - 15% e >15 – representa áreas com relevo mais ondulado, estas classes correspondem ao topo das coxilhas com presença de cultivos de soja, pecuária e silvicultura, área de ocorrência a processos erosivos.

A medição dos comprimentos de vertente na área de estudo foi realizada de forma amostral, onde foram efetivadas medidas de 236 vertentes distribuídas em diferentes porções das quatro sub-bacias hidrográficas. Com este levantamento pode-se identificar os diferentes comprimentos de vertentes existentes, as quais contribuíram para a individualização das unidades de relevo. Os comprimentos de vertentes foram classificados em três classes: curtas (entre 100 e 400 metros), médias (entre 400 e 800 metros), e longas (entre 800 e 1100 metros).

A partir do cruzamento destas informações foram definidas as formas de relevo, que dizem respeito à individualização das áreas com características homogêneas.

A orientação das vertentes também foi definida através do Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando a extensão de análise espacial - *Aspect* do programa Arcgis 10.4, possibilitando a geração do mapa de orientação das vertentes em oito direções - Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste. Esse processo permite indicar as diferentes condições de exposição à radiação solar, identificando a direção do declive de uma superfície.

As vertentes fornecem a capacidade dos processos erosivos em moldar a superfície por permitir que a gravidade, que de modo geral atue verticalmente. O perfil da vertente é a linha traçada sobre o terreno descrevendo sua inclinação. Esta inclinação é expressa por um ângulo ou um gradiente e sua orientação é dada pelos pontos cardeais.

O comprimento de vertente relaciona-se com a extensão entre a crista das vertentes e o talvegue, onde foi definido através da medição das principais vertentes, estipulando três intervalos de classes. A identificação dos comprimentos de vertentes levou em consideração a definição dos aspectos físico-naturais do relevo, utilizando como limites a rede de drenagem, as curvas de nível e os divisores de água, em todas sub-bacias da área de estudo, foram registrados os comprimentos de 236 vertentes estando distribuídas de maneira uniforme ao longo de toda a área. A definição desta quantidade de medidas foram consideradas suficientes para uma boa caracterização das vertentes na área de pesquisa.

Os parâmetros de plano e perfil curvatura das vertentes foram gerados a partir do software ArcGis 10.4, que possui uma extensão “Curvature”, a qual permitiu definir, a partir do MDE, o mapa de perfil de curvatura com as curvaturas côncava, retilínea e convexa, assim como o mapa de Plano de curvatura, com as curvatura divergentes, planares e convergentes. Através de uma matriz de cruzamento do perfil de curvatura,

com o plano de curvatura, obteve-se as curvaturas: Côncavo-Convergente, Retilíneo-Convergente, Convexo-Convergente, Côncavo-Planar, Retilíneo-Planar, Convexo-Planar; Côncavo-Divergente, Retilíneo-Divergente e Convexo-Divergente.

A influência dos solos no desenvolvimento de erosão linear foi analisada a partir do levantamento da distribuição espacial dos solos já existentes na área, a modelo de Robaina e Trentin (2004), Cabral (1998 e 2004), Streck*et al*. (2008) e IBGE (2002). Além disso, foram feitas verificações diretas em campo com o auxílio do GPS (Sistema de Posicionamento Global) e câmera fotográfica digital, onde foram verificadas as características dos dois tipos de solos presentes na área de estudo, além da coleta de amostras para análise em laboratório.

Para o mapeamento de uso e ocupação da área de pesquisa foi utilizado a imagem do sensor OLI (plataforma Landsat 8) datada em de fevereiro de 2018, órbita 223, série 081, com resolução espacial de 30 metros. Foram utilizadas as bandas 3, 4, 5, do Visível, infravermelho próximo, respectivamente, para os procedimentos de classificação digital. As imagens foram obtidas do catálogo do site USGS e o processamento das imagens foi realizado no Software ERDAS IMAGINE® 13.

Foi realizado um recorte vetorial correspondente aos limites da área de estudo com buffer de 100m a mais, pois o recorte exatamente nos limites na área de estudo poderia acarretar na perda de informação. Na criação das assinaturas espectrais foram detectadas as classes de solo exposto (com agregação de áreas com areais, construção e áreas não cultivadas), pastagem, silvicultura, mata nativa, agricultura e corpos d’água.

A classificação foi realizada pelo algoritmo máxima verossimilhança (MaxVer), esse classificador pondera as distâncias entre as médias dos valores dos pixels de cada classe, utilizando parâmetros estatísticos, assume que todas as bandas tem distribuição normal e calcula a probabilidade de um pixel pertencer a uma classe específica (Meneses e Almeida, 2012), aplicação do filtro da mediana para eliminação de pixels isolados e verificação dos resultados por meio de Matriz de resultados dada pelo software ERDAS IMAGINE após a validação da classificação.

Uma das últimas etapas da classificação digital de imagens é a verificação dos resultados, buscando-se avaliar a acurácia da classificação. Para executar a verificação dos resultados obteve-se de forma aleatória 250 pontos na área de estudo onde a partir de uma composição colorida (RGB 453 para o sensor OLI) se obteve a

verdadeira ocupação do solo, posteriormente foi comparada com os resultados obtidos pelo algoritmo de classificação.

Os dados adquiridos a partir da classificação passaram, ainda, pela verificação diretamente em campo com objetivo de confirmar a frequência de algumas formas de uso da área de contribuição onde estão as incisões. Portanto, esses dados em conjunto com as bases digitais serviram para construir o mapa de uso e ocupação da área e entender em que meio encontram-se as voçorocas.

A análise hidrográfica para este trabalho partiu do uso da Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul na escala de 1:50.000 (HASENACK et. al 2010). Devido à escala, foi necessário inserir canais principalmente de 1ª e 2ª ordem a partir de interpretações de imagens de satélite e curvas de nível. Levando em consideração um conjunto de voçorocas mapeadas, onde muitas estão conectadas a um sistema de drenagem fluvial, foi necessária uma análise hidrográfica local no que concerne a descrição dos grupos das bacias existentes (localização e área) e a sua relação com o desenvolvimento das voçorocas. Foram realizados cálculos relativos à densidade de drenagem e a representação do perfil longitudinal dos canais principais.

A densidade da drenagem correlaciona o comprimento total dos canais com a área da bacia (CHRISTOFOLETTI, 2011), sendo calculada pela equação:

$$Dd = \frac{Lt}{A}$$

Dd = Densidade da drenagem;
Lt = Comprimento total dos canais
A = Área da bacia.

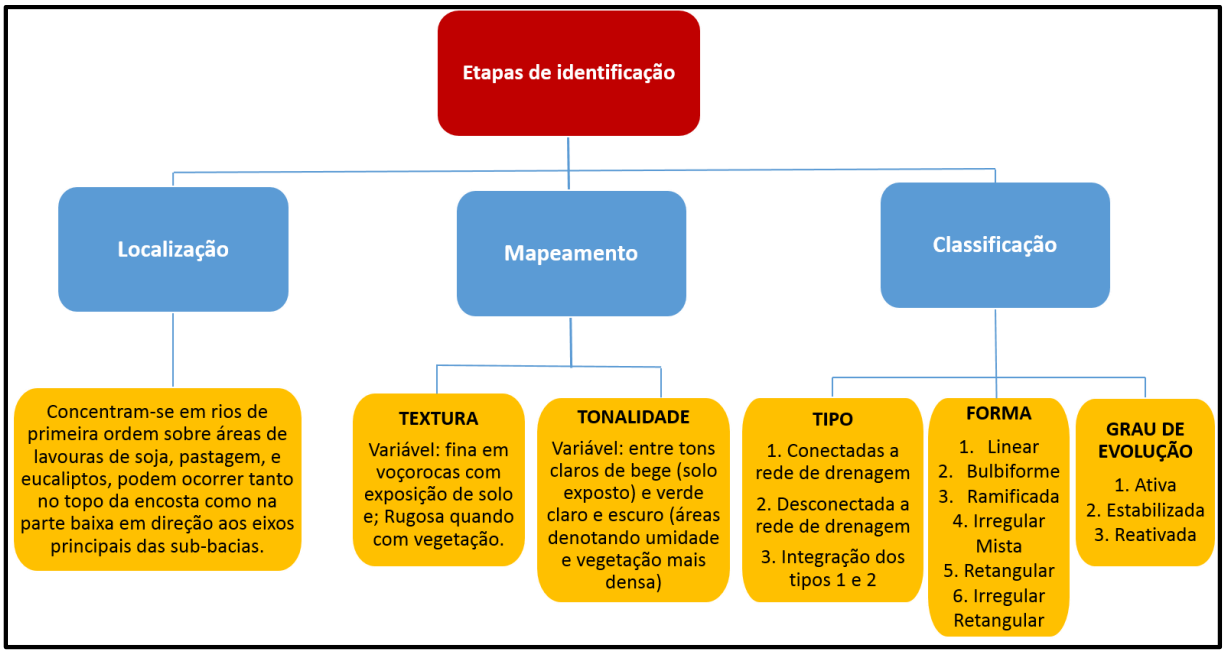
O Perfis longitudinais foram construídos no software ArcGis para cada canal principal das quatro sub-bacias hidrográficas que recobrem a área de estudo, servindo para dar a noção geral do caimento do relevo entre o divisor de águas e a foz das bacias ou sub-bacias. De acordo com Christofoletti (2011), o perfil longitudinal é a representação visual da relação entre a altimetria e o comprimento de determinado curso de água. A amplitude topográfica também foi calculada levando em conta a subtração entre as cotas altimétricas mínima e máxima presentes no MDE.

3.2 SEGUNDA FASE METODOLÓGICA

Esta fase envolveu o levantamento e mapeamento das voçorocas existentes na área de estudo, passando inicialmente pela criação de um banco de dados no software ArcGIS versão 10.4 com sistema de coordenadas no Datum Sirgas 2000 e Fuso 21S, contendo todos os dados relativos a cada incisão mapeada, a fim de organizar as informações extraídas voltadas ao ambiente em que se inserem.

O levantamento das voçorocas iniciou com a identificação de cada incisão existente na área a partir das suas características. Para tal, foram feitas interpretação direta dos alvos nas imagens de satélite e verificação em campo. Todo o procedimento foi executado com a elaboração de uma chave de identificação (Figura12), destacando alguns aspectos relativos ao comportamento das incisões na imagem como por exemplo, a forma, textura, tonalidade, localização, aspectos do solo e vegetação.

Figura 12 - Chave de identificação para localização mapeamento e classificação das voçorocas.



Fonte: Organizado pela autora (2018).

Após identificadas as características das voçorocas na imagem, realizou-se o traçado do contorno de cada incisão, criando um polígono com o desenho de seus limites, resultando em um mapa de distribuição de voçorocas. O mapeamento dos

polígonos das voçorocas foi elaborado a partir da interpretação de imagens de satélite de alta resolução e de trabalhos de campo. As voçorocas foram mapeadas identificadas, descritas e espacializadas, dando origem a um mapa de distribuição destas na área de estudo.

Para o cálculo de densidade de voçorocas, levou-se em consideração a área de cada sub-bacia hidrográfica (descartando a área que compreende a planície de inundação do rio Ibicuí, já que não possui nenhum registro de processo erosivo por voçorocas), dividido pelo número de voçorocas presentes em cada sub-bacia.

Os aspectos ligados a categorização dos tipos de voçorocas, levaram em consideração trabalhos de Oliveira (1992) e Bigarella (2003), que identificaram três tipos de voçorocas, sendo elas: voçorocas do tipo I - aquelas conectadas à rede de drenagem; Voçorocas do tipo II – desconectadas à rede de drenagem e; Voçorocas do tipo III - integração dos tipos I e II. O grau de evolução, também pode ser categorizado, onde constatou-se as categorias, Ativa, Estabilizada e Reativada, ambas as categorizações por tipo e grau de evolução. Ambas categorizações, puderam ser identificadas a partir das imagens de satélite WorldView-2 (0.5m), rede de drenagem e o MDE de 12,5m de resolução, tendo também suporte de pontos de controle distribuídos na área, obtidos por receptor GPS.

Para a extração dos lineamentos, considerou-se o conceito de lineamento de Strieder e Amaro (1997). Para os autores, lineamentos representam uma expressão topográfica, na superfície do terreno, de estruturas tridimensionais presentes na crosta terrestre. Estes lineamentos podem ser altos topográficos (positivos) e baixos topográficos (negativos). Os lineamentos Tipo 2, segundo Strieder e Amaro (1997), correspondem às zonas de fraturas.

Os lineamentos Tipo 2 identificados na área de estudo são segmentos retilíneos de drenagem que representam zonas de fratura ou qualquer outro tipo de descontinuidade da rocha onde houve percolação de água superficial e portanto maior propensão à alteração intempérica. Eles desenvolvem padrões regionais de fraturas com *trends* que se interceptam em diversos locais.

A identificação e caracterização das estruturas deu-se por meio da extração manual dos lineamentos em imagens de satélite WorldView 2, com resolução de 0.5m, de abril de 2015, com posterior conferência em campo. Trabalhou-se com duas escalas de análise: uma regional, para a toda a bacia, e outra de detalhe, para as voçorocas.

Os lineamentos Tipo 2 foram delimitados pela extensão dos segmentos relacionados a canais de drenagem ou alto topográfico alinhado a uma determinada direção. Os dados das direções dos lineamentos foram rebatidos para o primeiro e segundo quadrantes (sentido horário), pois, como a direção do lineamento representa a forma como foi "desenhada" a estrutura, isto é onde começou e onde terminou o traçado, a estatística das medidas pode ficar comprometida. Desta forma, foi construído, com o auxílio do Software *StereoNet*, um diagrama de rosetas com o objetivo de auxiliar na identificação e separação das famílias.

Para a realização desta tarefa, além da análise do diagrama de rosetas, também aplicou-se a regra de Sturges que tem a finalidade de orientar o estabelecimento das classes que passaram a constituir as famílias. Dessa forma, para estabelecer as famílias de lineamentos, fez-se o uso do diagrama de rosetas e da regra de Sturges devido a grande quantidade de dados.

A regra de Sturges é obtida pela seguinte fórmula: $K = 1+3,3 \log n$.

Onde:
K = número de classes;
n= número total do conjunto de dados.

O próximo passo foi calcular a Amplitude Total de Variação de classe, através da seguinte fórmula.

$ATV = x \text{ máximo} – x \text{ mínimo}$

Onde:

"x" máximo corresponde ao maior valor obtido no conjunto de dados; e "x" mínimo corresponde ao menor valor obtido no conjunto de dados. De posse dos valores de K e ATV, o próximo passo consistiu em dividir ATV/K para se obter o intervalo de classes.

A partir do histograma circular de frequência (diagrama de rosetas), e da aplicação da regra de Sturges, os lineamentos foram divididos em famílias que foram analisadas individualmente. Foi construído um banco de dados com o comprimento e o azimute (geográfico) de cada lineamento no ArcGis 10.4. Posteriormente estas informações foram exportadas para a planilha de cálculo Microsoft Excel, versão 2013.

Para a análise dos lineamentos da área de estudo, foi utilizada as informações advindas da extração de lineamentos, através do uso de estatística vetorial (NUMMER et. al., 2013), divididos por meio de histograma circular de frequência (diagrama de rosetas), em famílias, o que serviu como subsídio, juntamente com a morfometria para caracterizar, classificar e compreender o comportamento das voçorocas na área estudada.

No que se refere aos índices morfométricos extraídos diretamente do limite de cada voçoroca, iniciou-se a partir no polígono gerado sobre as feições erosivas o cálculo da área e perímetro, fornecidos diretamente no ArcGis 10.4, (*Calculate Geometry*), estes dois indicadores possibilitaram o seguimento do processo de elaboração do cálculo de profundidade e volume.

Para este processo foi utilizado como base as Imagens de radar do Modelo Digital de Elevação da plataforma AlosPalsar - Global Radar Imagery (2006-2011) com resolução de 12,5 metros. Foi criado no ArcGis 10.4 uma grade de pontos a partir do MDE, com a ferramenta "*Raster to point"*, em seguida criou-se um buffer de 25 metros (dobro do pixel original), apenas da parte externa da borda limite da voçoroca, então, selecionou-se somente os valores de profundidades dentro do buffer e aplicou-se o interpolador "*Global polynominal interpolation*". Esse processo resulta em um teto limite sobre a voçoroca para viabilizar o cálculo das profundidades, sendo necessário diminuir o tamanho dos pixels de 12,5 para 1m, utilizando a ferramenta "*Resample*", para que toda a área seja respeitada no momento do recorte, através da opção "*Extract by Mask*". Para finalizar esse procedimento, foi utilizado o "*Raster Calculator*" para calcular o MDE original subtraindo pelo o MDE modificado (teto), ambos com pixel de 1m, resultando em um novo arquivo com as profundidades das voçorocas.

A partir do arquivo de profundidade foi medido o volume de material erodido de cada incisão, através também da ferramenta "*Raster Calculator*", a qual computou o valor de profundidade embutido em cada pixel multiplicado pela área do pixel (1m), em cada voçoroca. O resultado foi o volume em metros cúbicos (m^3) de material erodido de cada voçoroca.

Os indicadores referentes a largura e comprimento foram extraídos utilizando o programa ArcGis 10.4 e imagens de satélite WorldView-2, com 0.5 m de resolução. O comprimento das voçorocas foi adquirido através da criação de uma linha sobre a área da voçoroca, levando em conta o maior percurso entre a parte a jusante e a cabeceira da voçoroca. Para a medida de largura foi necessário traçar diversas linhas

perpendiculares ao maior comprimento da voçoroca, com equidistâncias de 50 metros, ao longo de toda a área da voçoroca. Devido à irregularidade das formas das voçorocas, esse processo forneceu melhores resultados, principalmente em voçorocas com diversos ramos. Desta forma, somou-se todos os valores obtidos e dividiu-se pelo número de medições, resultando em um valor médio de largura para cada incisão.

Para auxiliar na terceira fase metodológica (classificação das voçorocas), o processo necessitou de maior sustentação, a fim de eliminar a subjetividade na caracterização da forma das voçorocas, indo além da interpretação visual propriamente dita, isto é, partiu-se para análise areal das voçorocas, método bastante utilizado em bacias hidrografias (CHRISTOFOLETTI, 2011). Para esta análise foram reunidos alguns índices voltados a medições planimétricas e lineares, incluindo a área da voçoroca (A), que representa todo o perímetro da incisão e o formato da voçoroca levando em consideração o Índice de Circularidade (Ic), ambos sendo calculados diretamente no software ArcGis, ferramenta "*fieldcalculator*".

O índice de circularidade utilizado neste estudo, estabelece que os valores próximos de 1,0 indicam fragmentos que tendem à forma arredondada. Por outro lado, os índices cujos valores se distanciam de 1,0 indicam que os fragmentos se aproximam de uma forma alongada, ou seja, a finalidade do índice de circularidade é comparar a forma da voçoroca, com a de um círculo. Para a realização do cálculo, primeiramente foi necessário descobrir o raio de cada voçoroca, utilizando a seguinte equação:

$$R = \frac{P}{2\pi}$$

P= Perímetro da voçoroca
R= Raio do perímetro

De posse do valor do raio, cria-se pontos centroides para cada voçoroca e a partir deste uma circunferência de mesmo valor sobreposta a voçoroca. O círculo criado permanece com o mesmo perímetro da voçoroca, porém com uma área diferente, sendo imprescindível calcular a área do círculo. Assim, aplica-se a equação do índice de circularidade (Ic):

$$Ic = \frac{A}{Ac}$$

A = Área da voçoroca

Ac = Área do círculo

Portanto, o Índice de Circularidade é resultado da divisão entre a área da voçoroca (A) pela área da figura geométrica (Ac) representada pelo círculo, com valores que variam de 0 a 1,0.

3.3 TERCEIRA FASE METODOLÓGICA

Todas as etapas metodológicas passaram pelo aprofundamento do referencial teórico-metodológico para executar da melhor maneira possível as técnicas para a elaboração dos dados, assim como, foram realizadas leituras direcionadas a aplicabilidade dos parâmetros morfométricos em estudos voltados a erosão, visando compreender e identificar as classes que mais influenciam no desenvolvimento de voçorocas, através de análises estatísticas e de correlação dos dados. Dessa forma, esta última etapa é destinada a classificação, correlação e análise dos dados produzidos voltados as voçorocas na área de estudo, além da validação dos resultados.

Para a classificação das voçorocas levou-se em consideração a relação entre a análise quantitativa e a qualitativa das feições erosivas, pois se mostram de fundamental importância para a temática estudada, já que podem indicar os diferentes tipos de comportamentos das incisões. A utilização apenas do método quantitativo não é suficiente para realizar a classificação de voçorocas para a área, já que os dados são semelhantes. Desta maneira, a análise qualitativa entra para auxiliar na interpretação dos dados e permitir a diferenciação entre as seis formas de voçorocas (Linear, Bulbiforme, Ramificada, Irregular Mista, Retangular e Irregular Retangular) encontradas para as sub-bacias no município de Cacequi, assim como, apenas a análise qualitativa não fornece subsídios para a classificação, ambas são complementares.

Inicialmente a etapa de classificação do conjunto de formas das voçorocas, baseou-se nos trabalhos de Bigarella e Mazuchowski (1985) expondo as formas:

linear, bulbiforme, dendrítica, entreliça, paralela, composta; e posteriormente considerando a classificação de Vieira (2008) adaptando à área de pesquisa, as classes encontradas em sua extensão, sendo elas: Linear, Bifurcada, Ramificada, Irregular e Retangular. Estas formas estabelecidas pelos autores citados serviram como ponto de partida para criar uma nova classificação para a área de estudo em Cacequi, já que se apresenta com características naturais diferentes das áreas mencionadas na literatura.

Para classificar as erosões por forma, além de entender sua distribuição foi necessário o apoio dos dados morfométricos (Largura, Profundidade, Comprimento, Área, Volume, Índice de circularidade, Declividade, Perfil e Plano Curvatura de Vertentes, Orientação de Vertentes, Altimetria, Morfologia, Lineamentos e Comprimento de Vertentes), baseando-se na premissa de que a análise com suporte em modelos digitais da elevação oferece subsídios ao mapeamento de diversos atributos físicos por meio de modelos quantitativos de interpretação, visando melhorar e agilizar as informações.

A correlação entre as variáveis morfométricas e as voçorocas demandou o emprego de análises estatísticas e avaliação do quadro natural. Foi aplicado o método da correlação linear simples para os dados métricos das voçorocas, como o comprimento, largura, profundidade, volume, índice de Circularidade, além do comprimento das vertentes onde essas incisões estavam inseridas, com o objetivo de avaliar as características de cada forma de voçoroca classificada.

As variáveis utilizadas foram analisadas de modo a verificar se guardavam um padrão de correlação entre si, ou seja, foram analisadas isoladamente e em conjunto, sempre procurando entender como cada uma contribui na distribuição das voçorocas na área de estudo, sendo diretamente lançadas em planilhas dos *softwares Excel e Origin,* e os gráficos gerados automaticamente.

Para a avaliação dos parâmetros morfométricos voltados a (Declividade, Orientação de Vertente, Perfil e plano Curvatura, Altimetria e Morfologia) aplicou-se uma análise estatística bivariada, com base no Método do Valor Informativo, devido estes dados se comportarem em formato matricial, este procedimento se torna mais eficiente nas análises, destacando apenas as classes que controlam o acontecimento, neste caso o processo de voçorocamento.

O método do Valor Informativo é uma técnica que foi proposta por Yan (1988) e Yin e Yan, (1988) e aplicado em pesquisas voltadas a avaliação da susceptibilidade

à ocorrência de movimentos de vertente, a exemplo do trabalho de Zêzere (1997) na região a Norte de Lisboa. A aplicação desse método na presente pesquisa foi adaptado a áreas erodidas e não tem como interesse principal gerar dados de susceptibilidade do acontecimento, mas sim, identificar através de valores (pesos) quais variáveis se destacam no processo, ou seja, a definição prévia de unidades de terreno e a consideração de um conjunto de fatores condicionantes.

O emprego deste método, fez uso do programa ArcGis 10.4, primeiramente com a organização e ajustamento dos dados em formato raster, para que não ocorresse erros nos cálculos, pois foram considerados dados referentes ao limite das voçorocas. Posteriormente, os valores passaram para uma tabela no programa excel, onde para cada uma das classes de cada variável foi determinado o respectivo Valor Informativo, a partir da relação (Yin e Yan, 1988 *in* Zêzere, 1997), onde:

$$li = log \frac{Si/Ni}{S/N}$$

Ii= Valor Informativo da variável i;
Si = número de unidades de terreno com movimentos de tipo y e com a presença da variável *xi*;
Ni= número de unidades de terreno com a presença da variável *xi*;
S = número total de unidades de terreno com movimentos de tipo y;
N = número total de unidades de terreno.

Quando o *Ii* for de valor negativo, considera-se que a variável em questão não é determinante no desenvolvimento de voçorocas. Os resultados positivos indicam uma relação entre a presença da variável e as manifestações de erosão, quanto maior for o valor, maior é sua contribuição para o processo. A aplicação do método do Valor Informativo à avaliação de variáveis contribuintes a erosão por voçorocas seguiu resumidamente três passos:

a. Definição das unidades de terreno a partir do cruzamento das variáveis independentes cartografadas em uma base matricial;
b. Cálculo do Valor Informativo para as classes pertencentes de cada variável;
c. Identificação final das pontuações de Valor Informativo em hierarquias de influência.

Vale evidenciar a dificuldade em se trabalhar com o MDE dessa resolução (12,5m) na aplicação do MVI, pois em âmbito de alcance o ideal seria empregar de forma regional, para definir a suscetibilidade à erosão por voçorocamento. Contudo, devido à escassez de modelos com melhor qualidade, pretendeu-se aplicar este método aos fatores que controlam o desenvolvimento e evolução das voçorocas, o que se tornou uma difícil tarefa, devido a ruídos presentes nesse modelo. Mesmo com tais adversidades foi possível identificar as variáveis morfométricas que se destacaram no processo erosivo.

Os resultados alcançados a partir dos procedimentos descritos anteriormente, serviram como bases essenciais para relacionar e discutir os processos erosivos, ressaltando que, os indicadores morfométricos possuem o objetivo de gerar analises integradas (Quadro 2), afim de classificar as incisões, assim como descrever seu comportamento e sua distribuição na área de estudo.

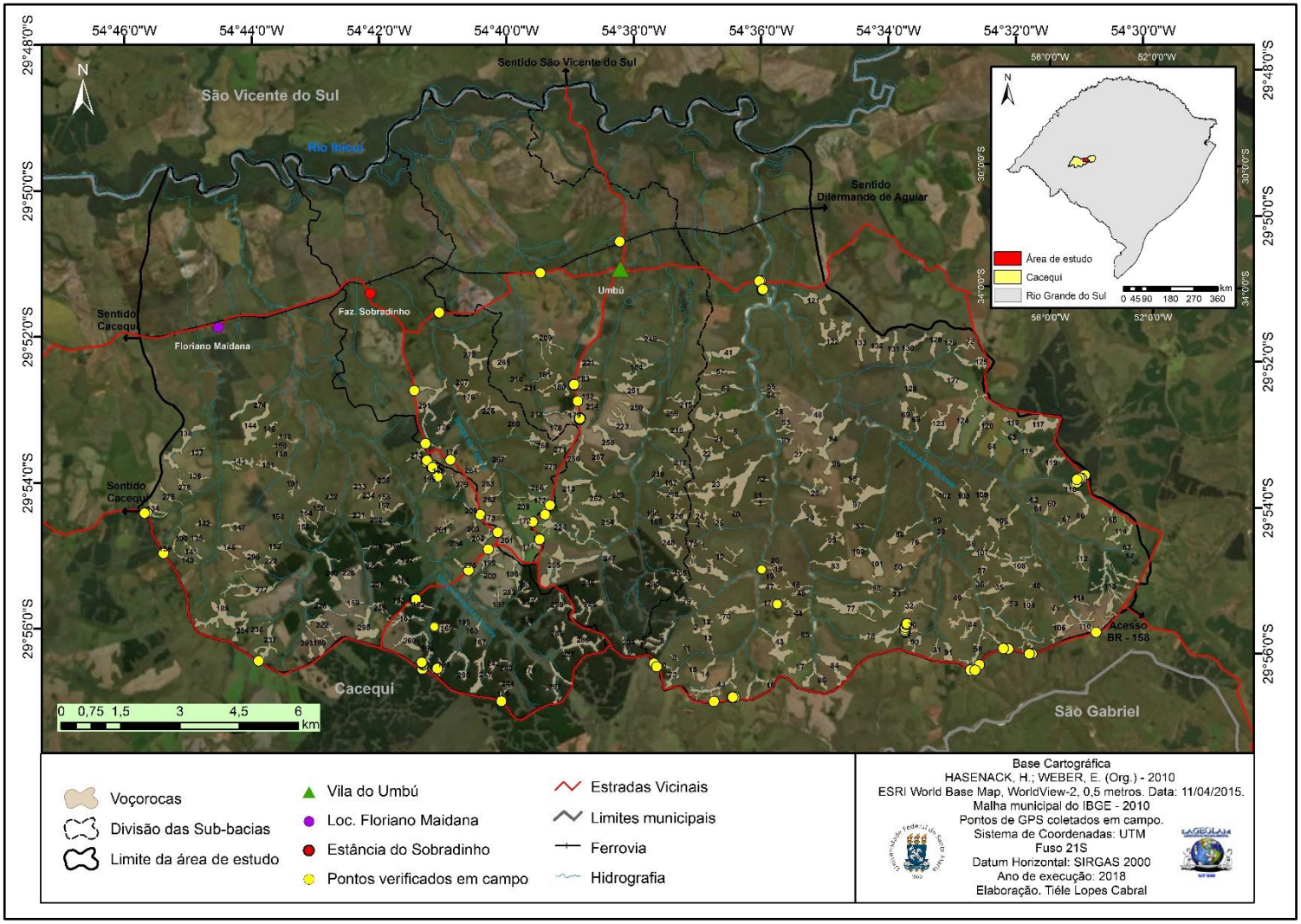
Os procedimentos descritos foram verificados em campo, através de pontos de amostragem, onde 40 incisões foram visitadas e analisadas de acordo com a Figura 13, servindo na tomada de decisão do processo de classificação das diferentes formas das voçorocas, auxiliando no entendimento do estágio de evolução de cada incisão, ou seja, a classificação por forma e tipo ajuda a estabelecer se as mesmas estão em estágio ativo, estável ou reativado.

Quadro 2 – Descrição do uso dos Indicadores Morfométricos.

Indicadores	Objetivo/Proposito
Área	Representa todo o limite espacial pertencente a voçoroca. Serve como dado primário para as correlações, sendo utilizada diretamente no cálculo do IC. Pode expressar também o tamanho de uma voçoroca.
Perímetro	Apresenta o percurso completo do limite externo da voçoroca. Apresenta-se como dado primário para as correlações, sendo utilizado também na elaboração do IC.
Índice de Circularidade	Indica a circularidade de uma voçoroca, expresso por valores que vão de 0 a 1. Em valores próximos a 1, mais próximo da forma circular estará a voçoroca, em valores próximos a 0, mais alongada será o formato da voçoroca. Auxilia diretamente na classificação das formas de voçorocas, dando respaldo na discussão acerca da evolução e desenvolvimento do processo.
Largura	Corresponde a extensão lateral entre dois pontos opostos no interior de uma voçoroca. Auxilia no entendimento acerca da evolução e desenvolvimento do processo.
Profundidade	Este indicador se refere a altura desde a base até o topo no interior de uma voçoroca. Também está atrelado ao grau de evolução e desenvolvimento de uma voçoroca.
Comprimento	Este indicador morfométrico se remete ao tamanho e alongamento de uma voçoroca, fornecendo amparo na fase de classificação de formas.
Volume	Mantem uma relação direta aos índices de área e profundidade, apontando o grau de evolução de uma voçoroca.
Comprimento de Vertente	Indica o caimento do relevo, pode estar relacionado ao comprimento das voçorocas.
Declividade	Representa as classes de energia do relevo, mantém relação entre as maiores classes de declives com a distribuição das voçorocas.
Orientação de Vertente	Representa o comportamento das vertentes, mantém uma relação com a distribuição dos lineamentos estruturais e as voçorocas.
Perfil e plano Curvatura	Implica na relação entre o comportamento da curvatura das vertentes e a distribuição das voçorocas.
Morfologia	Ampara no entendimento da distribuição de voçorocas em relação ao comportamento do relevo. Pode influenciar na concentração de voçorocas em determinadas unidades.
Altimetria	Auxilia no entendimento da distribuição das voçorocas em patamares altimétricos. Pode influenciar na concentração de voçorocas em determinadas classes.
Lineamento Estrutural	Indica a direção de falhas através do comportamento das drenagens, pode fornecer uma relação com as principais formas das voçorocas.

Fonte: Organizado pela autora (2018).

Figura 13 - Mapa de pontos verificados em campo.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Após a descrição do conjunto de dados utilizados nesta pesquisa, a fase de validação é essencial para verificar a concordância dos mesmos diretamente em campo através de medições e apontamentos ligados aos indicadores morfométricos, reforçando que a execução do estudo empírico "*in loco"* serve como ferramenta não só para verificar, como também para confirmar e corrigir dados e informações.

Deste modo, a integração e análise dos dados produzidos e elaborados em gabinete, logo após validados em campo, resultou na classificação das formas de voçorocas e identificação das variáveis que mais contribuem no processo de erosão na área de pesquisa. Contribuindo ainda para definir um cenário evolutivo entre as formas de voçorocas classificadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS FISICOS DA ÁREA DE ESTUDO

Este item visa apresentar os resultados acerca do mapeamento das voçorocas e dos parâmetros físicos e seus atributos presentes na área de estudo, ou seja, suas características, resultados e analises correspondentes a rede de drenagem e morfologia do relevo, estruturas geológicas e tipos de solos.

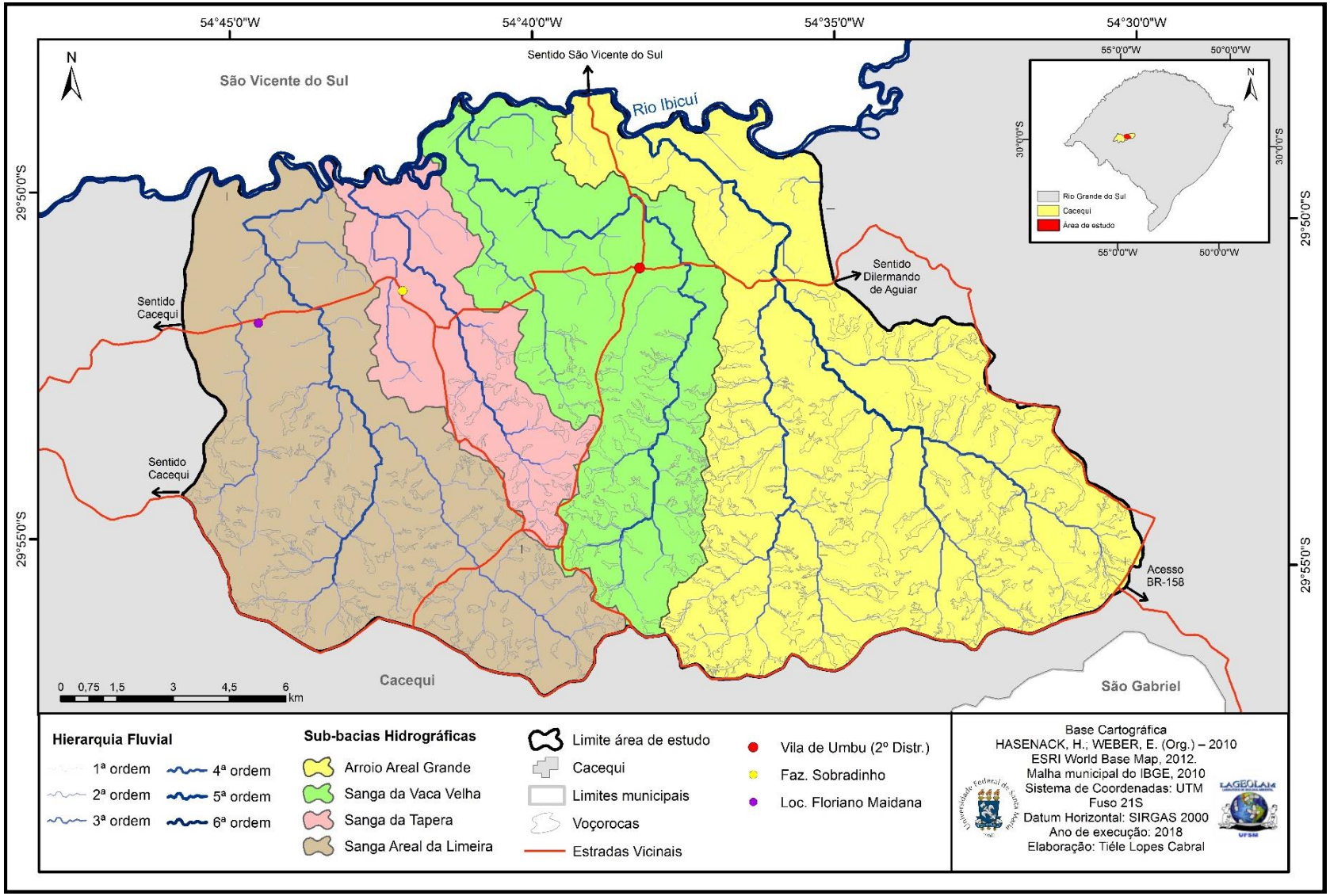
Deste modo, as informações sobre o meio físico da área constituiu base para a discussão e possibilitaram compreender melhor os processos relacionados ao desenvolvimento de voçorocamento na área em questão. Os elementos voltados à morfologia e estruturas apresentam-se dentro do detalhamento das análises, assim como a drenagem, altimetria, declividade, análise do comprimento da vertente, orientação e curvatura das vertentes, definição das formas de relevos e lineamentos estruturais.

4.1.1 Análise das características da drenagem

A área de estudo recobre quatro sub-bacias hidrográficas (Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande) no município de Cacequi. São afluentes da margem direita do Rio Ibicuí, situada no Oeste do Rio Grande do Sul. A Figura 14 apresenta a drenagem das Sub-bacias hidrográficas, bem como as suas divisões.

Em termos de particularidades as sub-bacias hidrográficas apresentam a montante, aspectos de condição de drenagem encaixada. Os canais principais das Sub-bacias Sanga Areal da Limeira e Sanga da Tapera apresentam uma direção preferencial Sudoeste-Noroeste, com comprimentos respectivos de 21,5 e 12,5km. Na Sanga da Vaca Velha o curso principal estende-se de Sul-Norte com um comprimento 17,2km e no Arroio Areal Grande o curso principal possui 21,2km de extensão, partindo de sudeste para noroeste até encontrar outro tributário da mesma sub-bacia e então sofre um desvio de percurso no sentido de sul-norte. Todos estes cursos d’água desaguam no Rio Ibicuí, que por sua vez mantem o sentido preferencial de Leste-Oeste. Esse fato expressa a condição consequente da drenagem tributária da margem esquerda neste setor da bacia hidrográfica do rio Ibicuí.

Figura 14 - Distribuição da drenagem nas sub-bacias hidrográficas da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A Sub-Bacia Arroio Areal Grande apresenta hierarquia fluvial de 5ª ordem, possui a maior área entre as sub-bacias (110,5km²) e um perímetro de 66,6m. O comprimento total das drenagens apresenta 234,9km, o que resulta no menor índice de densidade de drenagem, 2,11km/km². Esse fato possibilita inferir que há uma sistemática de desmembramento de drenagem sob forma de capturas e, pela configuração do traçado dos rios, possivelmente o sistema denominado Sanga da Vaca Velha fazia parte do sistema Arroio Areal Grande.

As demais Sub-bacias apresentam uma hierarquia fluvial de 4ª ordem. Na Sanga da Tapera a área é de 29,2km² com comprimento total dos cursos d'água de 64,2km, isso implica em uma densidade de drenagem total de 2,19km/km². Já a Sub-bacia Sanga da Vaca Velha apresenta a maior densidade de drenagem, já que concentra um número de comprimento total de cursos d'água de 136,1km e uma área relativamente menor (60,2km²) se comparado a outras sub-bacias. A Sub-bacia Sanga Areal da Limeira possui uma área 82,8km² e um comprimento total de canais de 176,2km, resultando em uma densidade de drenagem de 2,12km/km².

A Tabela 1 apresenta os dados morfométricos analisados nas sub-bacias hidrográficas presentes na área de estudo, para os diferentes atributos.

Tabela 1 – Atributos da análise morfométrica da rede de drenagem

ATRIBUTOS	**MORFOMETRIA**			
	Arroio Areal Grande	Sanga da Vaca Velha	Sanga da Tapera	Sanga Areal da Limeira
Hierarquia	5ª ordem	4ª ordem	4ª ordem	4ª ordem
Extensão do canal principal (km)	21,2	17,2	12,5	21,5
Área da bacia hidrográfica (km²)	110,5	60,2	29,2	82,8
Perímetro da bacia hidrográfica (km)	66,6	49,7	38,2	51,1
Comprimento total dos cursos d'água (km)	234,9	136,1	64,2	176,2
Densidade de drenagem (km/km²)	2,11	2,25	2,19	2,12

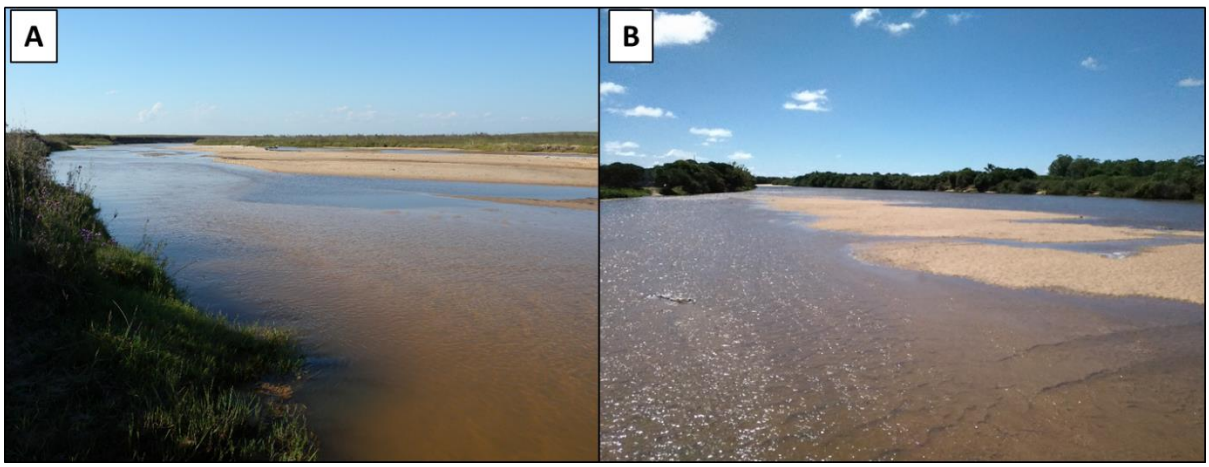
Fonte: Organizado pela autora (2018).

As Sub-bacias hidrográficas apresentam um padrão de drenagem predominantemente dendrítica, com presença de confluência de ângulos retos, o que demonstra anomalias atribuídas a fenômenos tectônicos, também designando significativo controle estrutural que a disposição das camadas geológicas estabelecem junto aos cursos d'água, pois suas drenagens obedecem às linhas das falhas e fraturas geológicas da região.

De acordo com Villela e Mattos (1975), a densidade de drenagem analisada de maneira quantitativa, indica que o índice de 0,5km/km² representa bacias com baixa drenagem, e o índice extremo de 3,5km/km² ou mais, indica bacias excepcionalmente bem drenadas. Sendo assim, as quatro Sub-bacias apresentaram uma densidade de drenagem de entre 2,11 e 2,25km/km², podendo ser consideradas como mediamente drenadas.

Uma das principais características das sub-bacias que recobrem a área de estudo é a presença de depósitos de areia ao longo dos canais principais, a exemplo do Arroio Areal Grande ilustrado na Figura 15 - A, onde é evidente a retirada da mata ciliar e a presença de lavouras e pecuária junto às margens. O canal principal da bacia do Ibicuí, localizado ao norte da área de estudo, mantem a presença de mata ciliar preservada e com bancos de areias ao longo do seu canal.

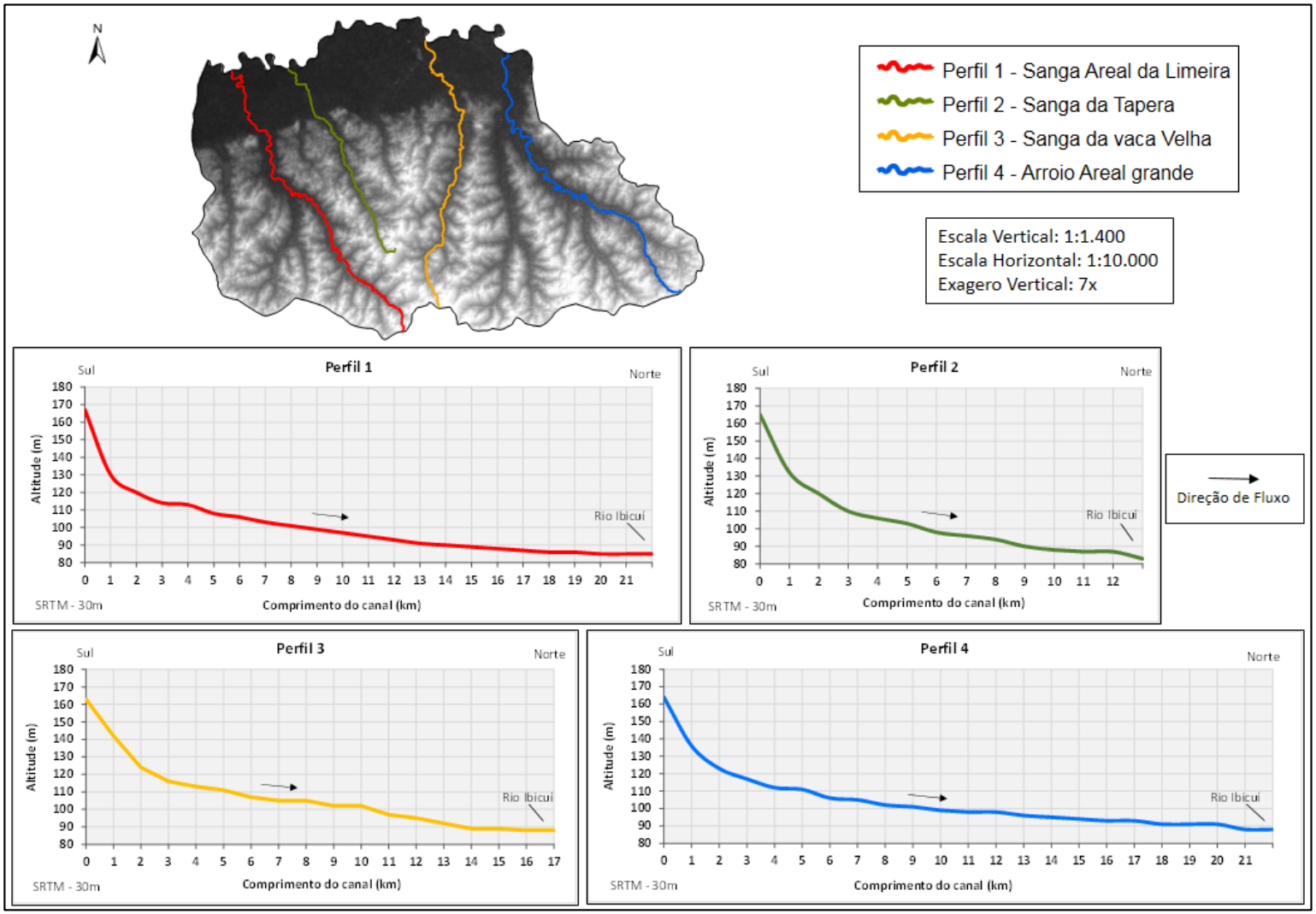
Figura 15 – Características hidrográficas do A) Curso principal da Sub-Bacia do Arroio Areal Grande, canal totalmente colmatado por material arenoso. B) Canal principal do Rio Ibicuí.



Fonte: Trabalho de campo (2016). Fotografias: Tiéle Lopes Cabral.

Dentro da configuração hidrográfica as condições da topografia e o arranjo dos canais principais se mostram indispensáveis nas análises acerca do quadro natural, pois mantem uma relação com a distribuição das voçorocas presentes na área de estudo, condicionando a concentração de voçorocas nas cabeceiras de drenagem em canais de 1ª ordem, indicando uma zona mais dissecada dentro do perímetro expresso pelos perfis longitudinais dos canais na Figura 16. Observa-se que nos perfis 1, 2, 3 e 4, os canais apresentam nos primeiros 8km (das nascentes em direção a foz) um declive mais acentuado, onde excepcionalmente o conjunto de feições erosivas se instalam na área, no restante dos percursos apresentam declividades abaixo de 5%, representando as áreas de planícies de inundação e terraços, onde os processos erosivos não mais atuam.

Figura 16 – Perfis longitudinais dos principais cursos d'água das sub-bacias hidrográficas da área de estudo.



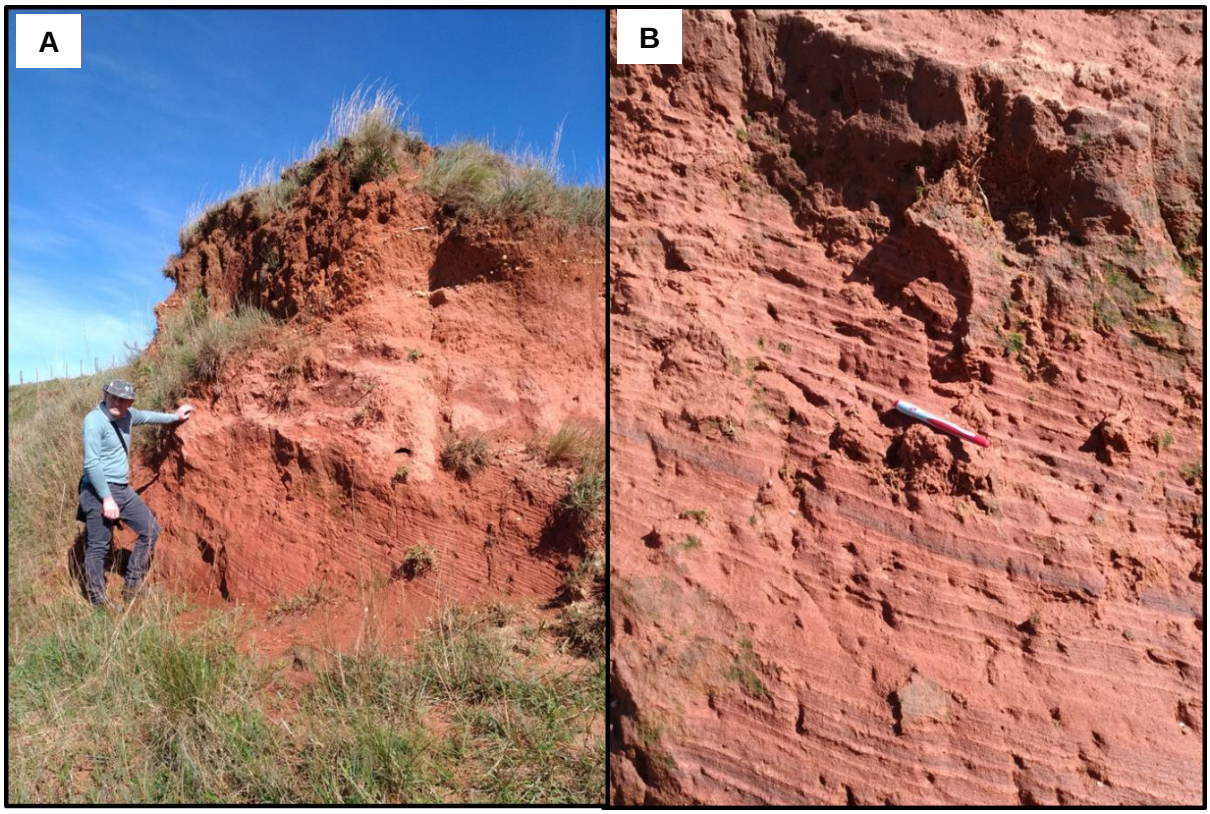
Fonte: Elaborado pela autora (2018) a parir do SRTM (30m).

4.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

No que se refere a Geologia, as incisões mapeadas ocorrem sobre a Formação Pirambóia. Essa litologia abrange toda a extensão da área de estudo, é de origem sedimentar, com alta concentração de arenitos, conduzindo a uma baixa resistência à erosão desencadeando as voçorocas, que sobre essa rocha continuam entalhando seu canal sobre o material de origem. Esta formação é constituída dominantemente por arenitos finos a grossos moderadamente selecionados, avermelhados, com estratificações cruzadas de grande porte, interpretados como depósitos de dunas eólicas com um sentido de mergulho dos foresets para SE que recobrem os depósitos lacustres da Formação Rio do Rasto. (Lavina 1991; Lavina et al, 1993).

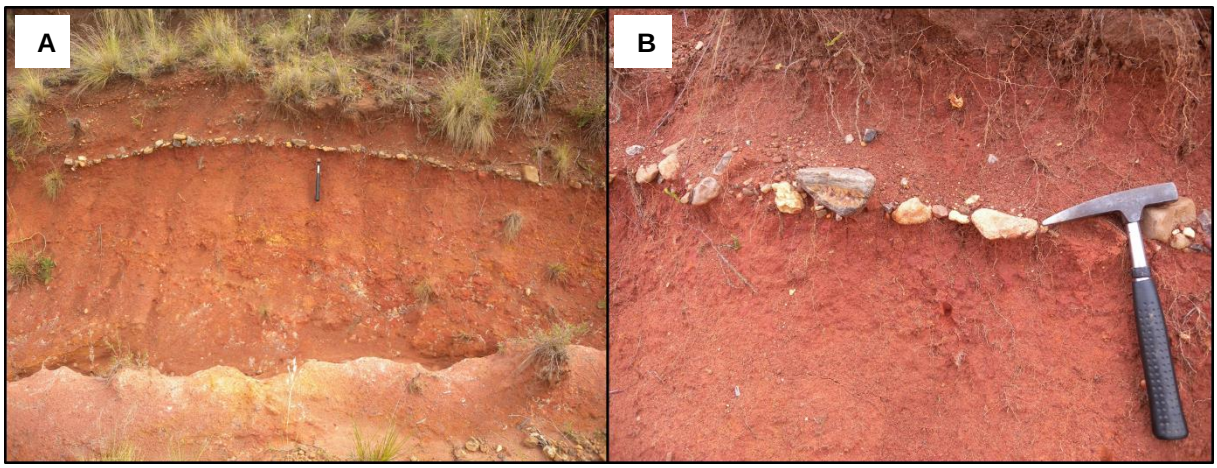
Suertegaray (1998), destaca as unidades geológicas mais recentes em relação ao Arenito Botucatu no Rio Grande do Sul, registrando aspectos da evolução da paisagem do sudoeste do estado, em estudos sobre os processos de arenização. Para a autora, trata-se de duas unidades sedimentares que recobrem as dunas da Formação Botucatu, ou seja, arenito de coloração avermelhada (Figura 17), provavelmente pleistocênico, recobre topos de colinas e fundos de vales em torno da cota de 120 a 140 m. É uma unidade fluvial de contato nítido com o Arenito Botucatu, seguido de um conglomerado basal com seixos mal classificados (Figura 18) e angulosos envoltos em matriz arenosa. Já a segunda unidade, apresenta arenito pouco consolidado de origem eólica, em torno da cota de 140 a 180 m, corresponde a depósitos fluviais.

Figura 17 - Arenito de coloração avermelhada em topos de colinas e fundos de vales - Voçoroca nº195.



Fonte: Trabalho de campo (2018). Fotografias: Tiéle Lopes Cabral.

Figura 18 – Conglomerado basal com seixos mal classificados (A) e angulosos (B) envoltos em matriz arenosa em vales em “U” - Sub-Bacia hidrográfica Sanga da Tapera.



Fonte: Trabalho de campo (2018). Fotografias: Tiéle Lopes Cabral.

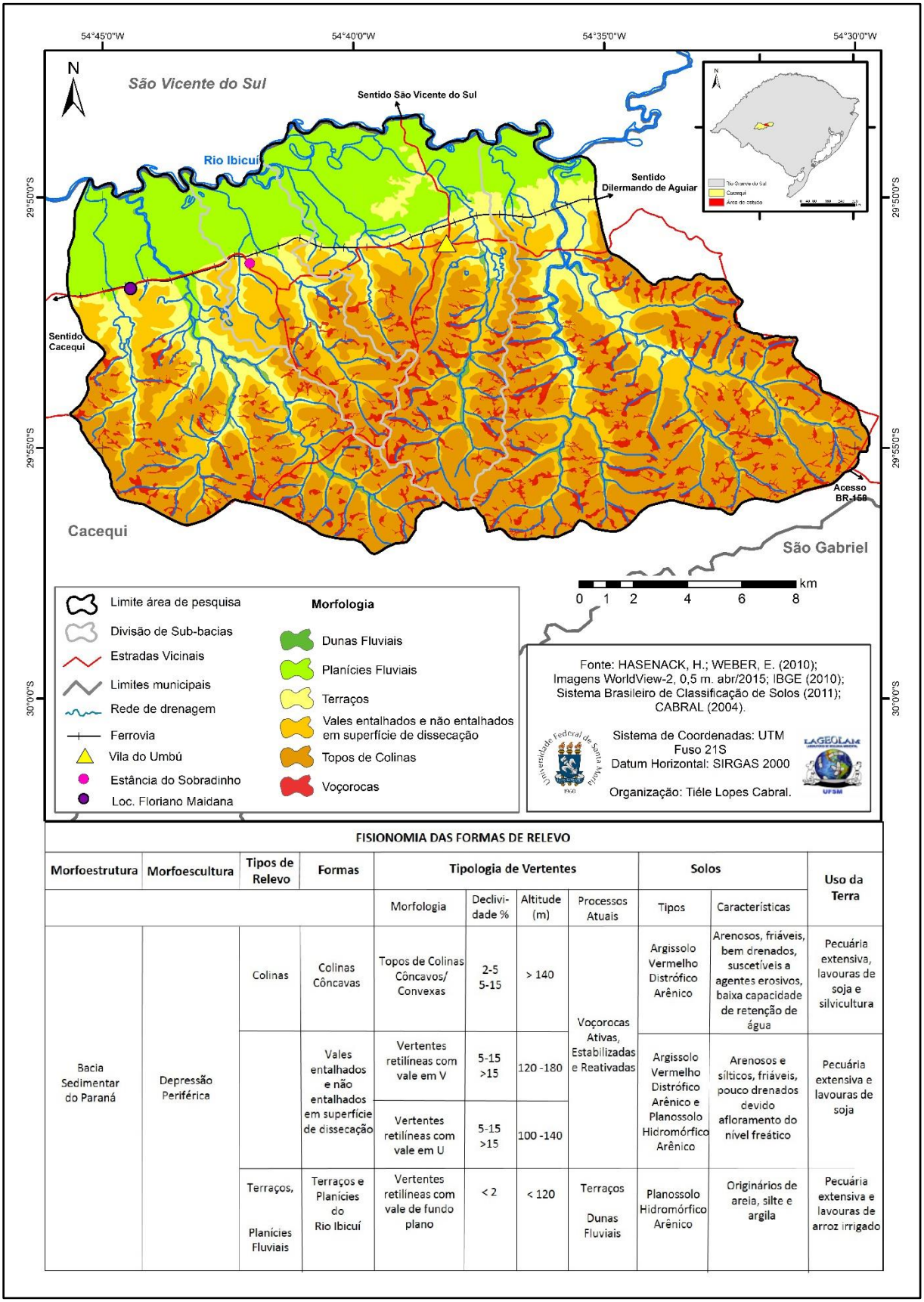
Conforme IBGE (1977 citado por Cabral, 2004), o conjunto de fatos responsáveis pelo desenvolvimento do relevo da Região Sul, tem sua origem na evolução da Plataforma Austro-Brasília, pelas deformações tectônicas, principalmente as ocorridas durante o Mesozóico-Cenozóico, junto com as condições de paleoclimas capazes de promover em sistemas morfogenéticos sucessivos, destacando os relacionados com as condições de aridez durante o Mesozóico, dando origem ao grande deserto Triássico e aos períodos úmidos que se seguiram, favorecendo a instalação do sistema de drenagem.

4.3 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS

Nesta pesquisa o contexto geomorfológico levou em consideração os processos morfogenéticos e morfodinâmicos do relevo, sob o viés da análise e da caracterização dos parâmetros morfológicos e morfométricos da área de estudo. Para isso, foram definidas as correlações entre os elementos do meio físico, a fim de determinar os limites e as características das formas de relevo. Na análise do relevo foram considerados os parâmetros referentes à hipsometria, declividade e a análise das vertentes para determinar as formas de relevo.

Morfologicamente a área de estudo apresenta relevo ondulado em forma de colinas com baixas altitudes, 80 a 160m e vertentes de rampas suaves, intercaladas por extensas planícies aluviais que se distribuem ao longo dos cursos d´água dos principais eixos de drenagem. As formas de relevo definidas para esta análise levaram em consideração a pesquisa de Cabral (2004), sendo elas, os topos de colinas, vales entalhados e não entalhados em superfície de dissecação, terraços, planície de inundação e voçorocas, representadas no mapa da Figura 19.

Figura 19 – Mapa Geomorfológico da área de estudo.



FISIONOMIA DAS FORMAS DE RELEVO

Morfoestrutura	Morfoescultura	Tipos de Relevo	Formas	Tipologia de Vertentes				Solos		Uso da Terra
				Morfologia	Declividade %	Altitude (m)	Processos Atuais	Tipos	Características	
Bacia Sedimentar do Paraná	Depressão Periférica	Colinas	Colinas Côncavas	Topos de Colinas Côncavos/ Convexas	2-5 5-15	> 140	Voçorocas Ativas, Estabilizadas e Reativadas	Argissolo Vermelho Distrófico Arênico	Arenosos, friáveis, bem drenados, suscetíveis a agentes erosivos, baixa capacidade de retenção de água	Pecuária extensiva, lavouras de soja e silvicultura
			Vales entalhados e não entalhados em superfície de dissecação	Vertentes retilíneas com vale em V	5-15 >15	120 -180		Argissolo Vermelho Distrófico Arênico e Planossolo Hidromórfico Arênico	Arenosos e sílticos, friáveis, pouco drenados devido afloramento do nível freático	Pecuária extensiva e lavouras de soja
				Vertentes retilíneas com vale em U	5-15 >15	100 -140				
		Terraços, Planícies Fluviais	Terraços e Planícies do Rio Ibicuí	Vertentes retilíneas com vale de fundo plano	< 2	< 120	Terraços Dunas Fluviais	Planossolo Hidromórfico Arênico	Originários de areia, silte e argila	Pecuária extensiva e lavouras de arroz irrigado

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

No contexto geral, as superfícies dos topos de colinas são aquelas onde se destacam as colinas “baixas” com topos convexos mantidos por material sedimentar arenoso, muito permeável, onde os processos de erosão causados pela ação da água pluvial desenvolve duplo papel, ou seja, o de carrear material da superfície, quando em escoamento superficial, e da subsuperfície, quando a água se infiltra nos componentes arenosos, constituindo uma superfície de fragilidade ambiental. As incisões presentes na área de estudo se concentram nas classes morfológicas de Topos de Colinas mais fortemente e, em seguida em Vales entalhados e não entalhados em Superfície de Dissecação.

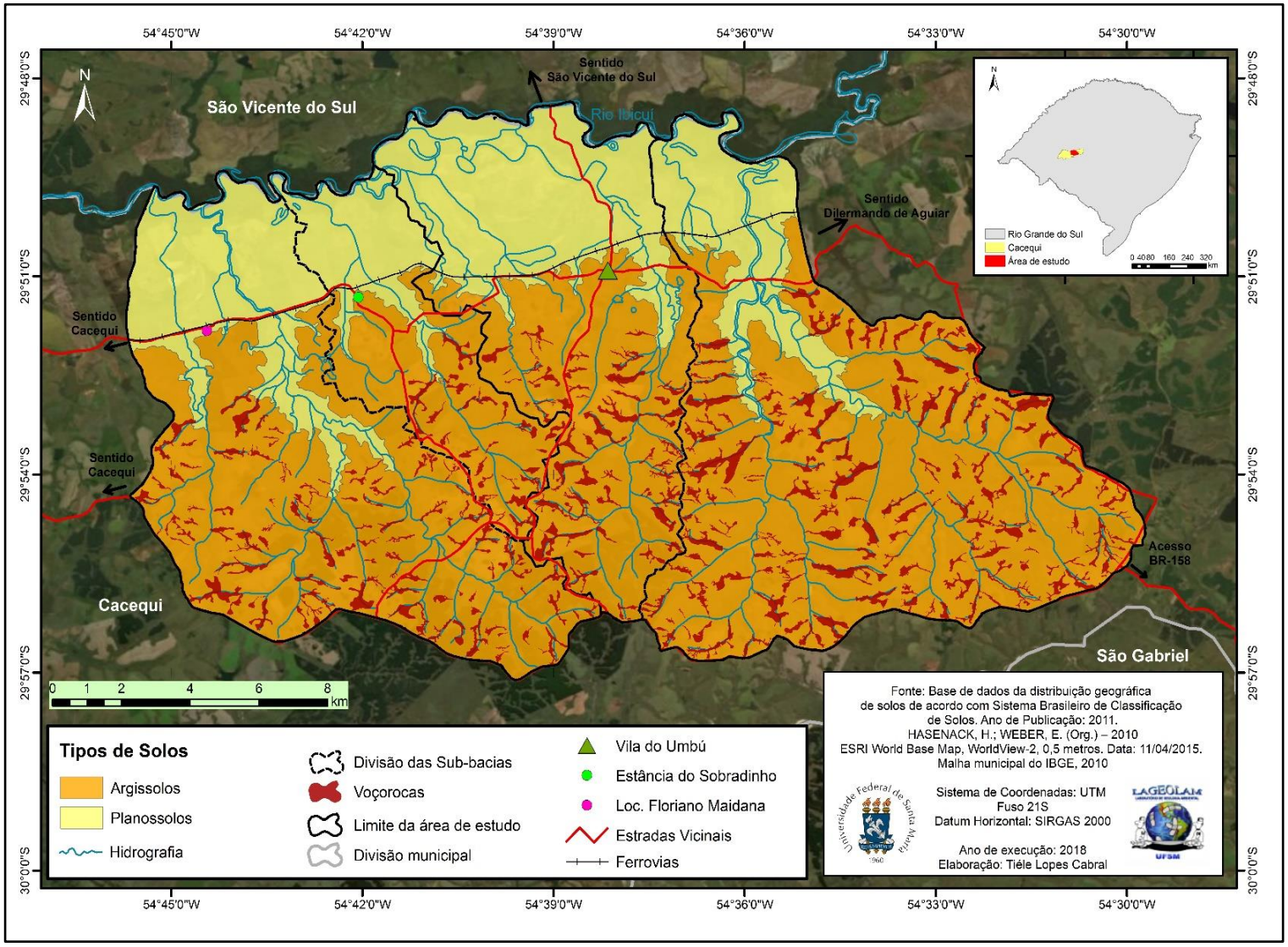
4.4 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO

As classes de solos predominantes na área da pesquisa (Figura 20), se dividem em Argissolos com 71,4%, ocorrendo em topos das colinas e os Planossolos com 28,6%, localizado em áreas abaixo de 120 m de altitude, presentes nos terraços e planícies de inundação do rio Ibicuí e junto aos vales dos seus tributários de maior ordem, também ocorre em vales entalhados e não entalhados, correspondendo as superfícies mais dissecadas em termos morfológicos.

Planossolos são solos constituídos por material mineral com horizonte A ou E seguido de horizonte B plânico. Horizonte plânico sem caráter sódico perde em precedência taxonômica para o horizonte plíntico (EMBRAPA, 2006). Na área de estudo, os Planossolos ocorrem em áreas com declividades abaixo de 5%, compreendendo poucas extensões que atingem as partes inferiores das voçorocas (Figura 21).

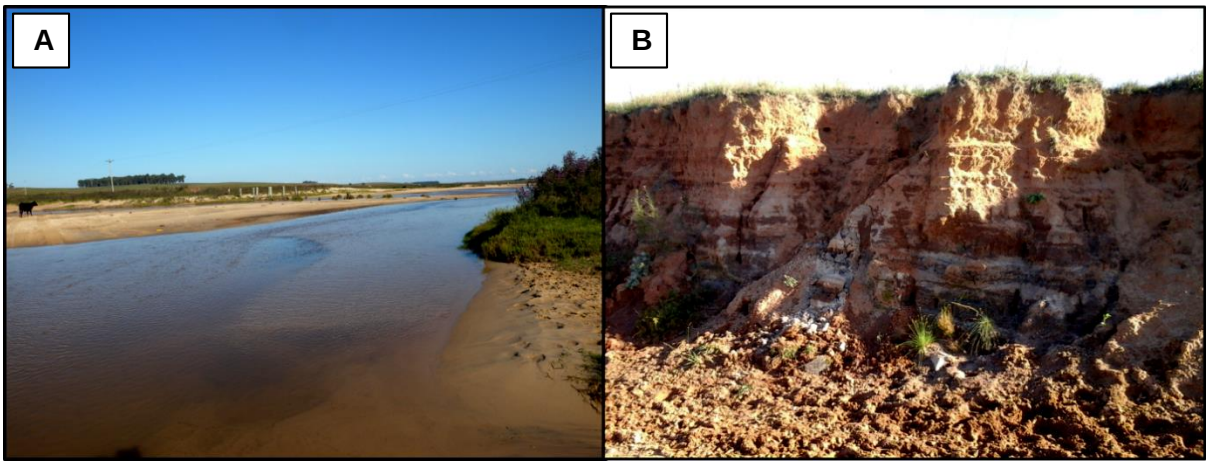
A segunda classe de solo se destina aos Argissolos, característicos por manter um horizonte B textural, com argila de atividade baixa ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico (EMBRAPA, 2006). Na área de estudo ocorrem em altitudes acima de 120m, as margens dos cursos de água de 1ª e 2ª ordem, predominando sobre esta classe a maior quantidade de voçorocas (Figura 22).

Figura 20 – Compilação da distribuição de solos e ocorrências erosivas na forma de voçorocas na área de estudo.



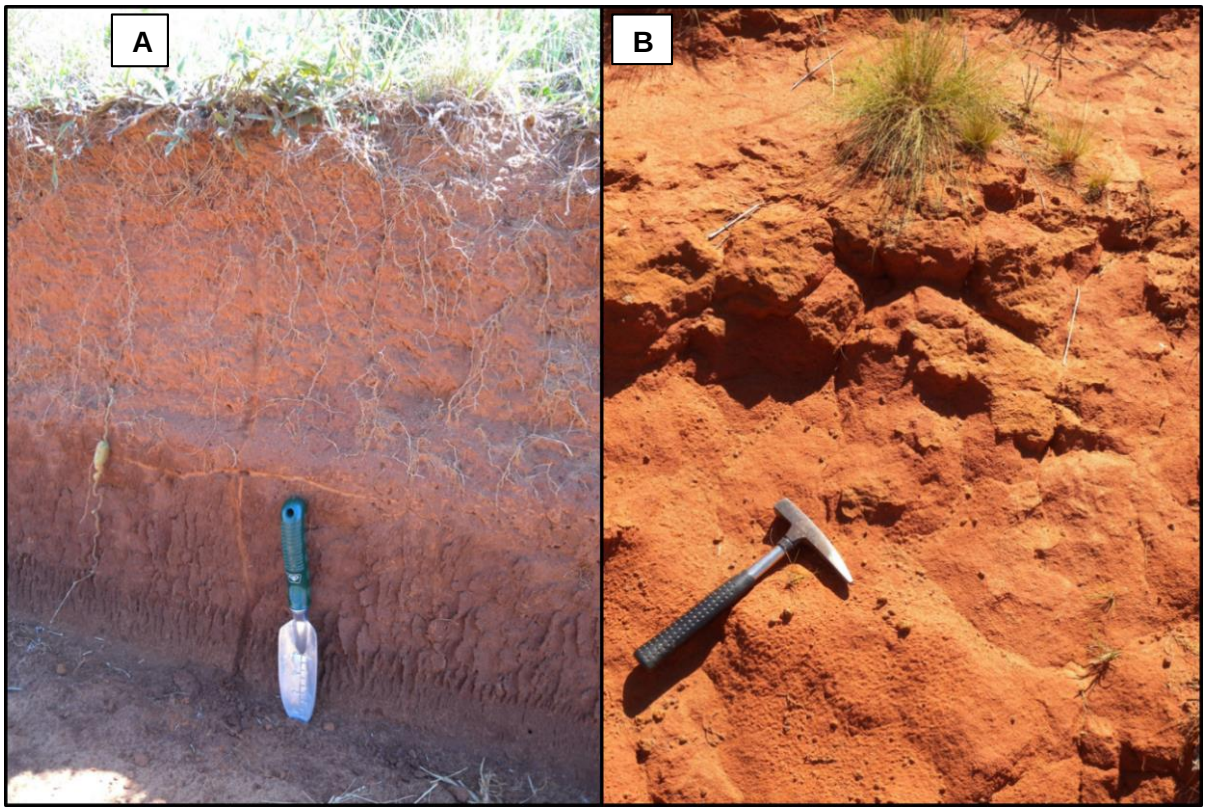
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 21 – Aspecto de um Planossolo presente no baixo e médio curso no Arroio Areal Grande a 102 e 126 m de altitude.



Fonte: Trabalhos de campo (2016 e 2017). Fotografias: Tiéle Lopes Cabral.

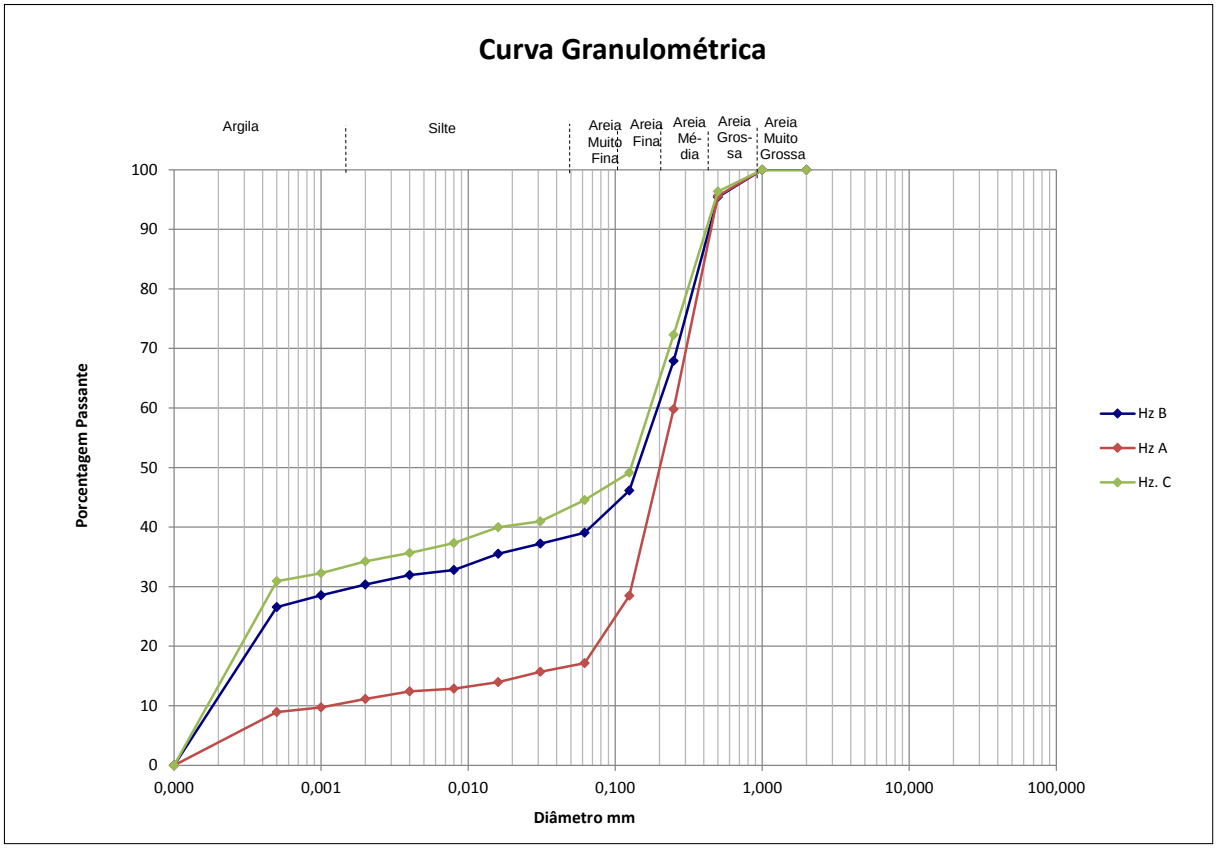
Figura 22 – Argissolos em topo de colina com 174 e 169 metros de altitude, na sub-bacia do Arroio Areal Grande.



Fonte: Trabalho de campo (2016). Fotografias: Tiéle Lopes Cabral.

Tratando-se dos processos de erosão as características físicas dos solos é uma das informações relevantes. Sendo assim, na área onde foi desenvolvida a pesquisa as classes de solos apresentaram teores mais elevados do componente areia, conforme indica os dados da análise física dos solos apresentados no Gráfico 1. Assim, das amostras coletadas na classe de Argissolo, as análises demonstraram que os teores de argila ficam em torno de 20,5%.

Gráfico 1 - Curva de distribuição granulométrica de amostra de Argissolo extraída em campo (Ponto 12), cabeceira da sub-bacia Arroio Areal Grande.



Fonte: Análise realizada pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil – UFSM.
Organização: Autora (2018).

A textura do solo e suas condições superficiais contribuem para a maior ou menor capacidade de infiltração da água das chuvas e, consequentemente, para a formação de fluxos de deslocamento superficiais sob forma concentrada.

Em algumas voçorocas foi constatado a ocorrência de formação de crostas ferruginosas, a exemplo da Figura 23. Embora sendo materiais de relativa expressividade tanto em termos de área de ocorrência, quanto em espessura dos níveis o seu registro não pode ser negligenciado, pois em termos do contexto

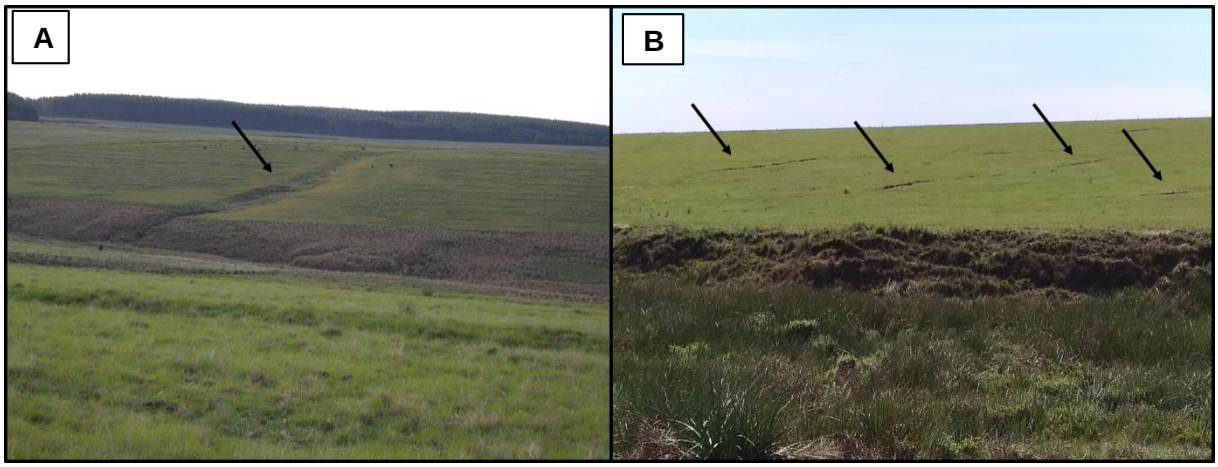
geomorfológico são materiais mantenedores de superfície, além de fornecer evidências de condições paleoclimáticas. É importante destacar que as incisões em forma de voçorocas ultrapassam, em seu perfil, essas camadas mais resistentes.

Figura 23 – Camada de concreção ferruginosa no interior da Voçoroca nº.44 - Arroio Areal Grande.

Fonte: Trabalho de campo (2017). Fotografia: Tiéle Lopes Cabral.

A conexão das voçorocas com os material ferruginoso ocorre da seguinte forma: A superfícies que apresenta esse material, podem influenciar no desenvolvimento das voçorocas, com o surgimento de filetes e sulcos, como se comprova, por exemplo, pela presença de ranhuras nas cabeceiras de algumas voçorocas verificadas em campo (Figura 24), podendo também evoluir para diferentes formatos.

Figura 24 – Presença de sulcos (A) e filetes (B) nas cabeceiras das voçorocas 42 e 118.

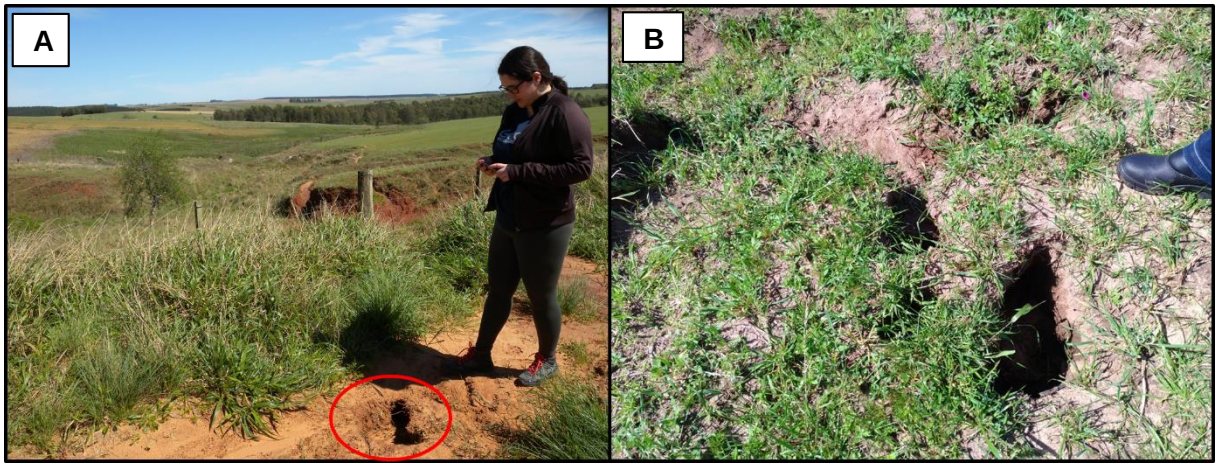


Fonte: Trabalho de campo (2018). Fotografia: Tiéle Lopes Cabral.

Outro aspecto que comprova essa evolução estritamente associado ao desenvolvimento das voçorocas em diferentes estágios, ou seja, desenvolvimento ativo e reativado está ligado à existência de erosão interna nos setores de cabeceiras das incisões, pois a presença do lençol freático, interceptado pela voçoroca, induz ao aparecimento de surgências d'água, acarretando o fenômeno *"piping"*, o que desencadeia provoca a remoção de partículas do interior do solo e, principalmente, das rochas sedimentares componentes do conjunto morfoestrutural da região, formando espaços vazios que provocam colapsos, escorregamentos laterais, deslizamentos e alcovas de regressão, responsáveis em parte pela expansão das incisões, ou seja, alargando a voçoroca e modificando sua configuração.

A Figura 25 indica a ocorrência de processos de erosão por túneis e colapso na evolução das cabeceiras de voçorocas. Em grande parte das voçorocas verificadas em campo pode-se encontram a presença destes processos, que mantem um papel atrelado ao fluxo interno na elaboração dos caminhos preferenciais de evolução das incisões.

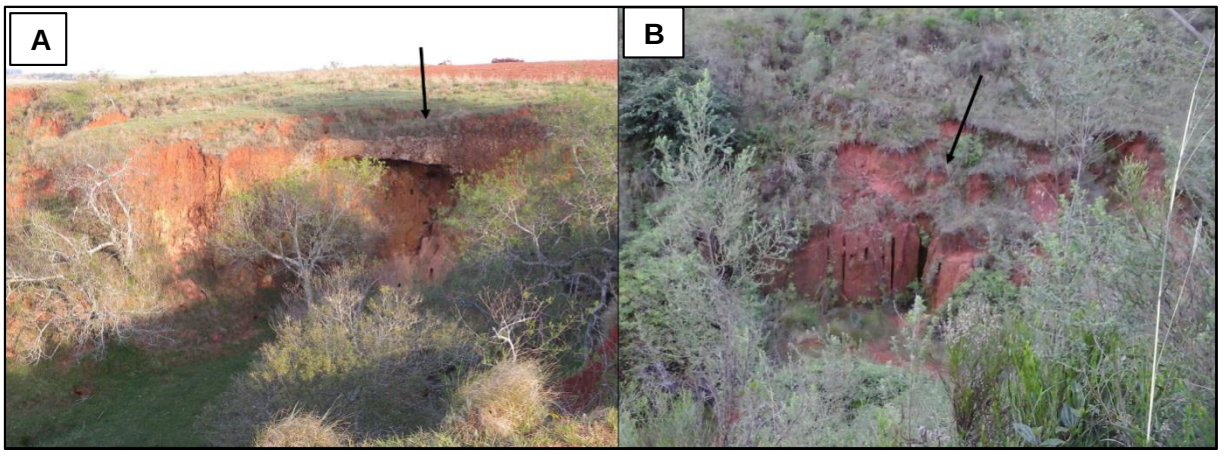
Figura 25 – Erosão interna nas cabeceiras das voçorocas 206 e 118.



Fonte: Trabalho de campo (2018). Fotografias: Andréa Valli Nummer e Tiéle Lopes Cabral.

Na Figura 26 pode-se observar a nítida sugestão de evolução das voçorocas por deslizamento. Está dinâmica pode ser observadas em voçorocas que estão em processo de reativação, ou seja, predomina em voçorocas mais evoluídas, as quais passam de um estágio estável para uma reativação, já encaixadas ao nível freático.

Figura 26 - Solapamento e ranhuras verticais nas cabeceiras das voçorocas 183 e 194.



Fonte: Trabalho de campo (2018). Fotografias: Tiéle Lopes Cabral.

5. VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS

5.1 HIPSOMETRIA

A hipsometria da área de estudo entra nesse ponto de análise das variáveis morfométricas, pois é um dos fatores condicionantes dos processos erosivos por voçorocas, já que mantem um patamar preferencial de ocorrência.

A amplitude altimétrica da área de estudo é de 120 metros, sendo que seu ponto cotado com maior altitude se encontra a 194 metros acima do nível do mar e sua foz junto ao Rio Ibicuí está a 74 metros de altitude. A área foi dividida em seis classes de altitudes distintas, distribuídas ao longo de sua extensão (Figura 28).

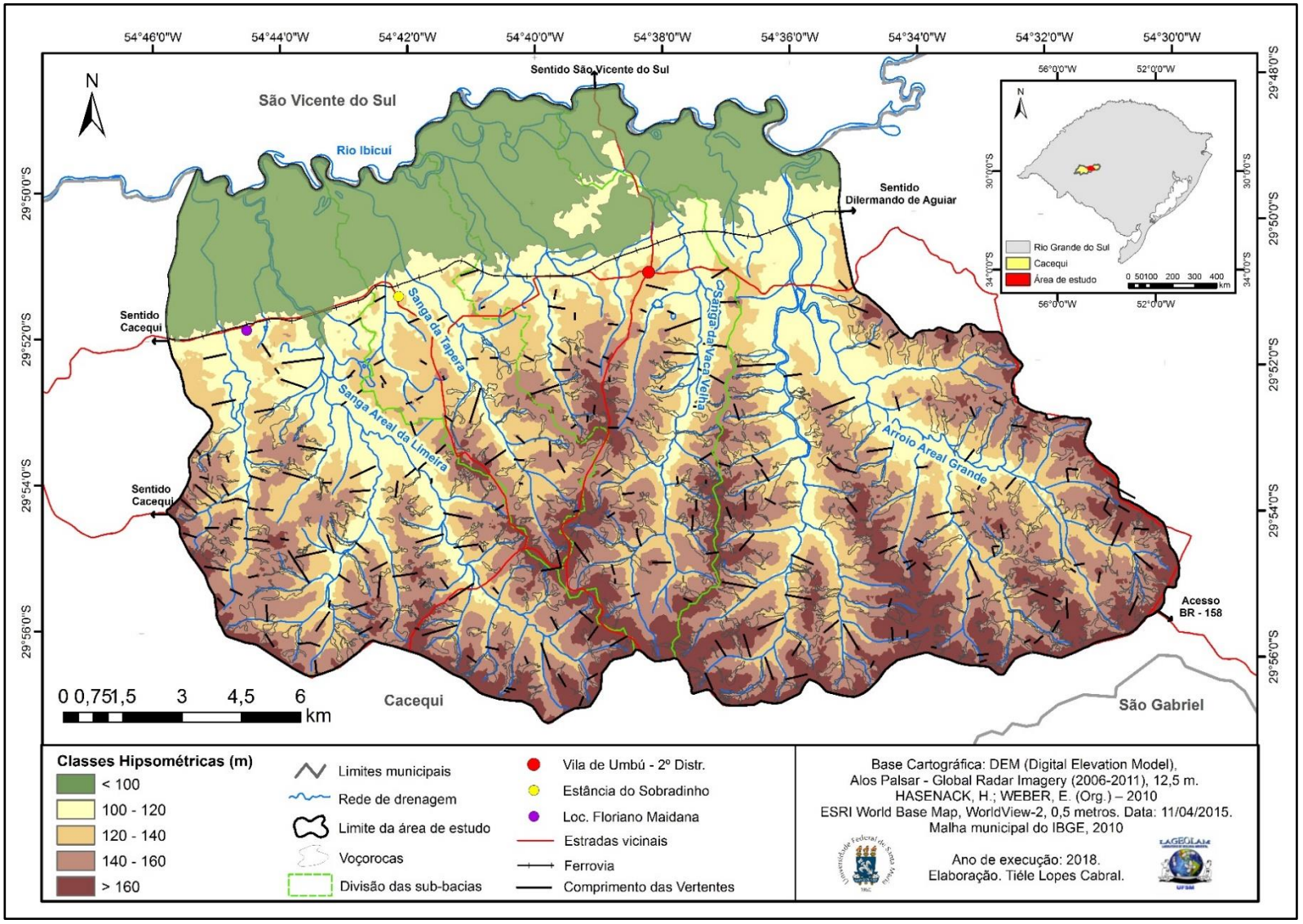
No contexto geral da área em questão esse valor não é tão significativo para justificar a magnitude dos eventos de erosão em forma de voçorocas nas cabeceiras de drenagem surgindo, assim, algumas questões, como por exemplo: a energia cinética da água em escoamento superficial concentrado apresenta força suficiente para tamanho eventos de voçorocas. Sobre essa questão averiguou-se, a partir do confronto das informações presente no mapa da Figura 27 e as apresentadas nos perfis da Figura 16, que grande parte das voçorocas está situada na faixa do relevo de relativa amplitude, ou seja, tem suas cabeceiras situadas em torno dos 160 metros e sua base na cota dos 100 metros, correspondendo o setor de maior amplitude do relevo. A Tabela 2 apresenta os limites utilizados na divisão das seis classes, bem como suas respectivas áreas e porcentagem de ocorrência em toda área pesquisada.

Tabela 2 - O contexto das classes hipsométricas na área de estudo.

Classes Hipsométricas (m)	Área (km²)	Porcentagem em relação a área total (%)
<100	81,66	28,85
100-120	63,95	22,60
120-140	73,72	26,05
140-160	53,80	19,01
160 >	9,79	3,46

Fonte: Organizado pela autora (2018).

Figura 27 - Mapa hipsométrico da área de estudo.

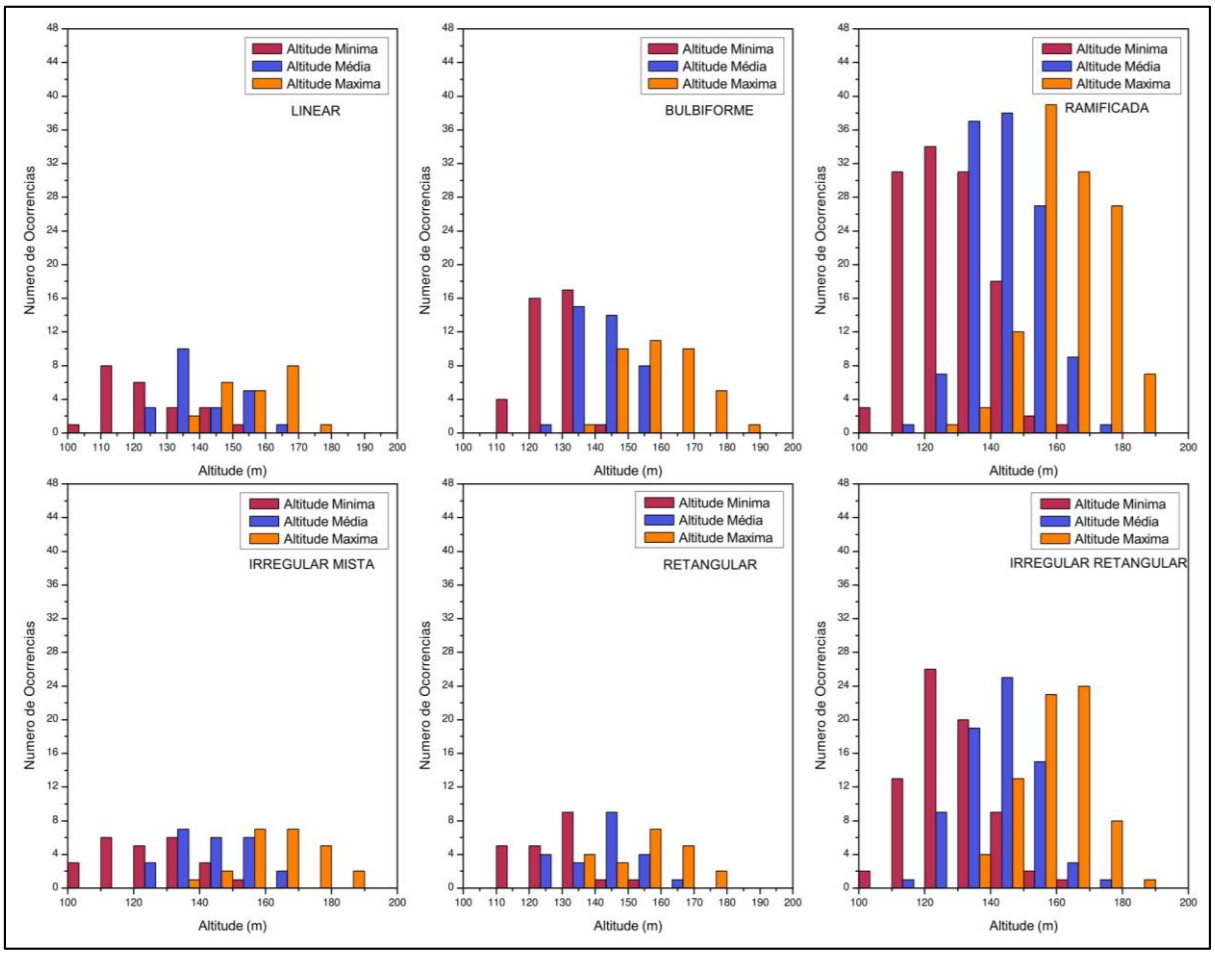


Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Através das informações hipsométricas distribuídas na área de estudo, verifica-se que a classe <100 m de altitude, ocupa uma considerável parcela da área, com 28,84% e estende-se por toda a porção norte, correspondendo à superfície resultante da morfodinâmica fluvial do rio Ibicuí – terraços e planície de inundação.

As altitudes acima de 120 metros estão divididas em três classes e juntas ocupam uma grande parcela da área, cerca de 48,5%, são classes predominantes na área de estudo relacionadas a zonas mais dissecadas propícias aos processos erosivos. Neste contexto, pode-se analisar que os índices altimétricos (Figura 28) ocorrem em todas as formas de voçorocas em uma amplitude de 70 metros, ou seja, estão predominantemente entre a cota de 110 a 180 m de altitude. Os valores mínimo de altitude representam a altitude do fundo das voçorocas.

Figura 28 – Número de ocorrência de modalidades de voçorocas em relação ao nível altimétrico.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

5.2 DECLIVIDADE

A área de estudo apresenta algumas variações quanto à disposição das classes de declividade e, em seu perímetro, sendo definidas quatro classes de declividade, conforme os dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição das classes de declividade na área de estudo.

Classes de declive (%)	**Área (km²)**	**Área (%)**
<2	46,14	16,3
2-5	86,58	30,6
5-15	140,55	49,5
>15	9,65	3,6
Total	282,92	100

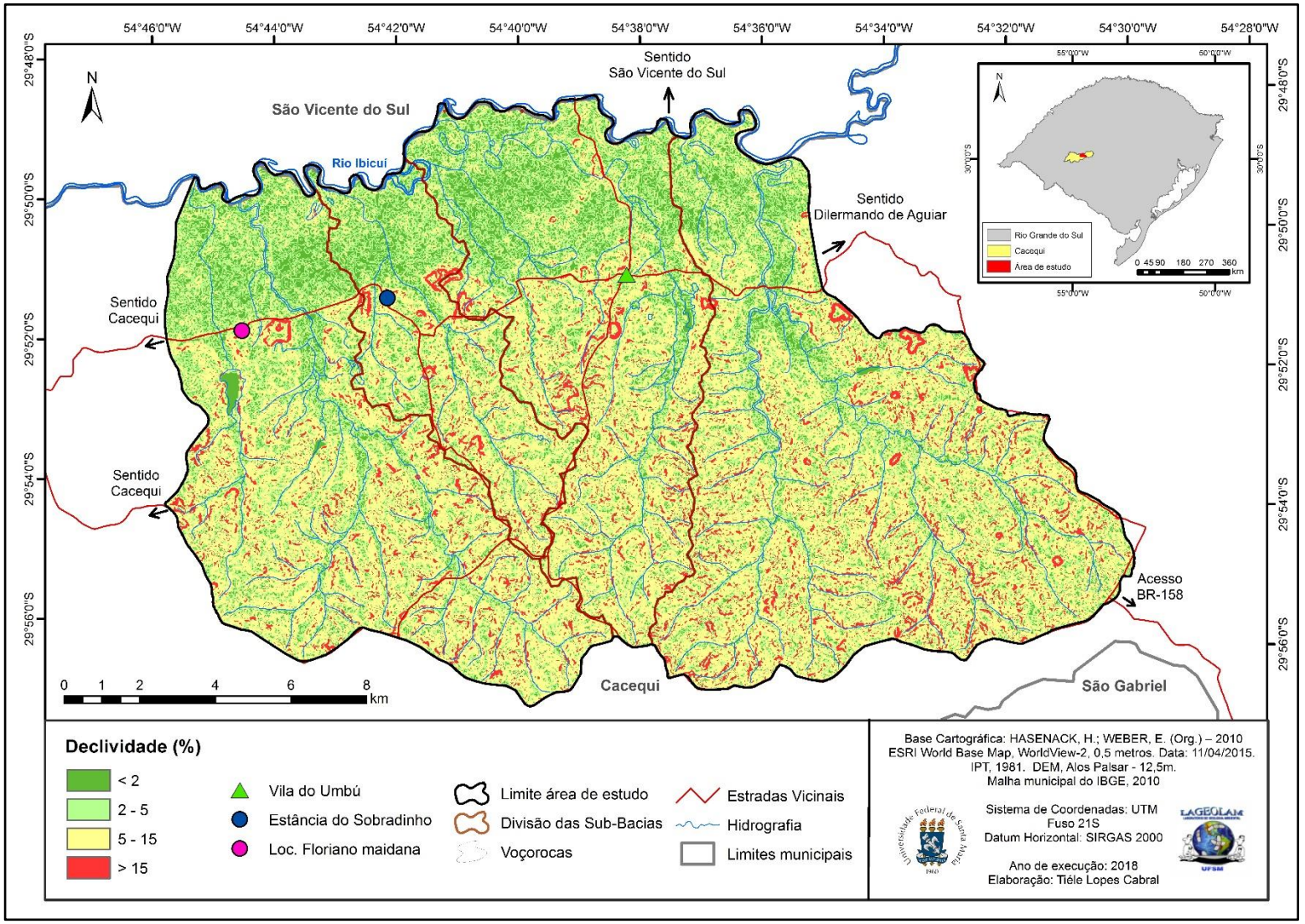
Fonte: Organizado pela autora (2018).

Espacialmente a classe de declividade que abrange a maior área do perímetro é de 5 a 15%, com 49,5%, compreendendo, principalmente, o alto e médio curso das sub-bacias. As declividades inferiores a 2% ocupam 16,3% da área total e se faz presente nas áreas planas, nos setores de baixo curso dos sistemas de drenagem. (Figura 29).

As declividades superiores a 15% estão distribuídas em trechos próximos aos rios de primeira e segunda ordem, correspondendo às áreas com superfícies mais dissecadas além dos setores de transição entre colinas e terraços, expressando a condição encaixada de parcelas dos vales e/ou do vale como um todo. As declividades mais acentuadas revelam o caráter mais encaixado dos cursos d'água do sistema de drenagem da área em questão.

Frente a análise dos dados expostos no mapa e tabela de declividade, identifica-se que a área apresenta cerca de 97% de sua totalidade com declividades inferiores a 15%, o que significa o favorecimento ao emprego de maquinário agrícola, devido as características do relevo e às condições topográficas, dando suporte ao desenvolvimento agropecuário na área de estudo.

Figura 29 – Mapa de declividade da área de estudo.



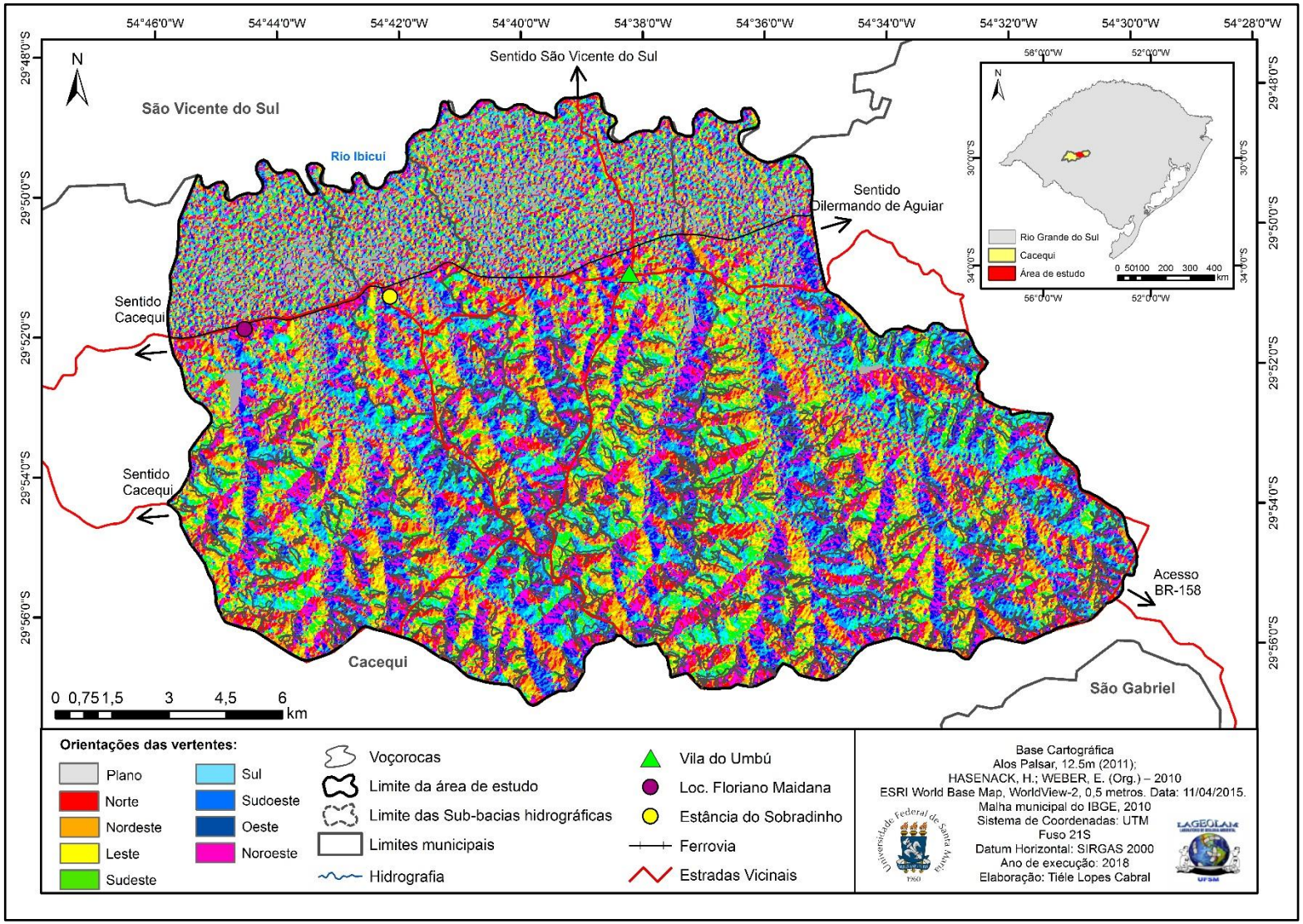
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Com base nas informações sobre o comportamento clinográfico na área pesquisada é importante destacar que o fator “declividade acentuada” não é o condicionante do desenvolvimento do processo de voçorocamentos na região, visto que a maioria destas, independente do seu estágio de evolução, estão situadas nas superfícies com declividade relativamente baixas, ou seja, a erosão remontante, fato que responde pela ampliação das voçorocas, principalmente quando se trata das modalidades Bulbiforme, Ramificada, Irregular Mista, Irregular Retangular e Retangular, se faz em direção a topografia dos topos das colinas, onde as declividades são pouco expressiva.

5.3 ORIENTAÇÃO DAS VERTENTES

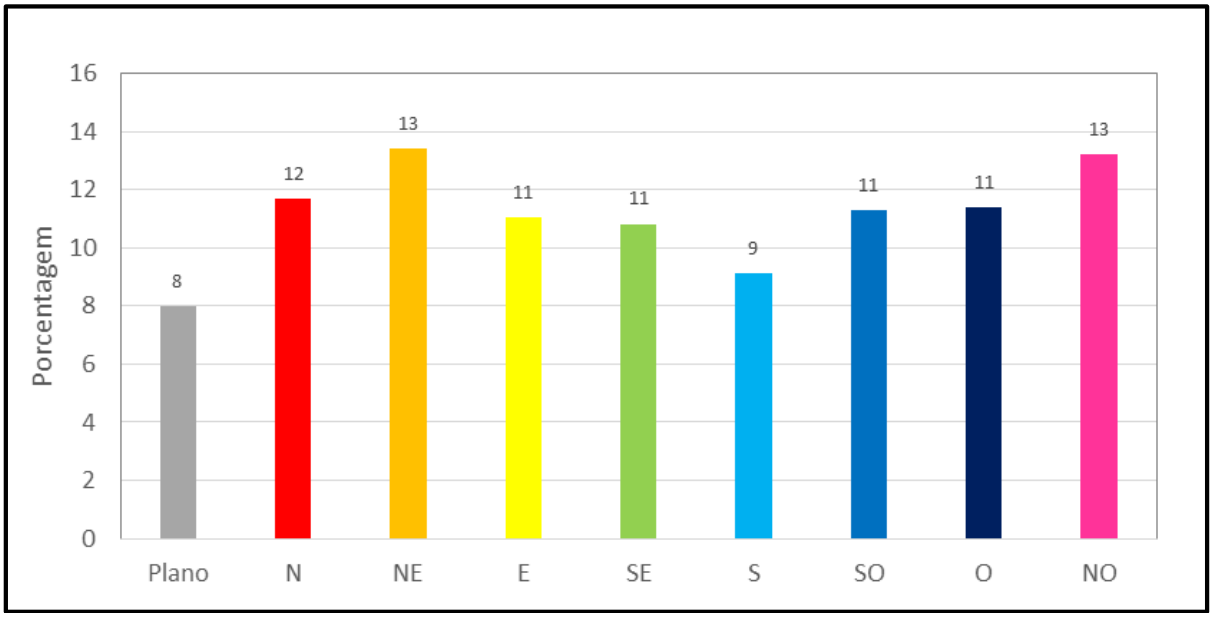
As informações sobre a orientação das vertentes foi utilizada neste trabalho para identificar qual o sentido do caimento de cada vertente na área de estudo (Figura 31), desde o topo até a parte mais baixa da inclinação e fornecer o aspecto das vertentes frente a distribuição espacial das voçorocas, quantificando a distribuição geral das orientações, como apresentado no Gráfico 2.

Figura 30 – Mapa de orientação de vertentes da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Gráfico 2 – Quantificação das classes de orientação de vertentes na área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

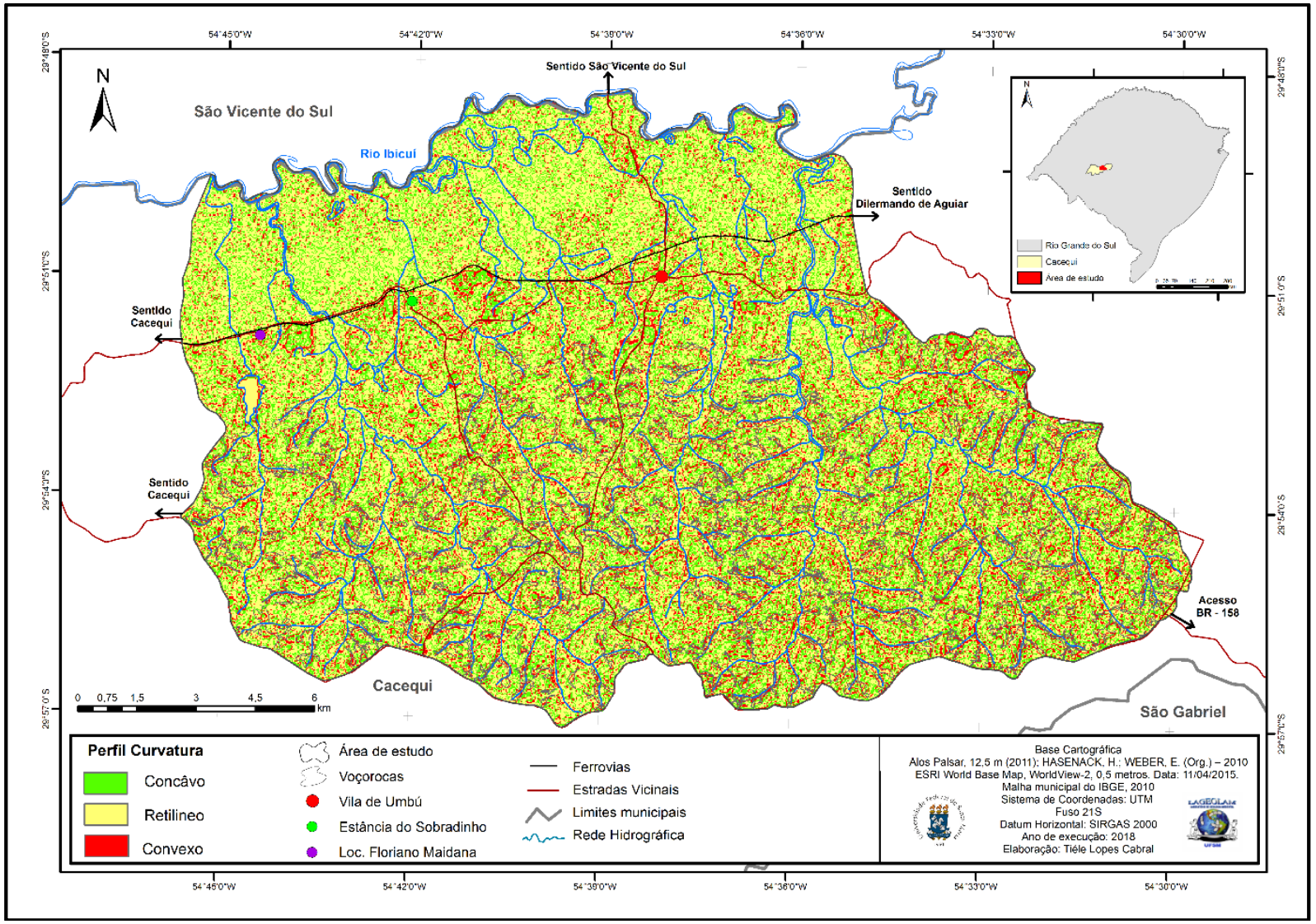
As orientações das vertentes ocorrem de forma bastante proporcionais em toda a área de estudo, desconsiderando as áreas planas, com predomínio da orientação Nordeste (13%) e a orientação com menor ocorrência é a Sul com 9%. As quatro sub-bacias presentes na área mantem de forma homogênea as vertentes de orientação Nordeste e Noroeste.

Mesmo as classes Noroeste, Nordeste e Norte recobrindo maior extensão da área de estudo, não são estas que se destacam frente ao processo erosivo, como pode-se verificar na discussão entre a relação da orientação de vertentes no comportamento das voçorocas através do Cálculo do Valor Informativo (pg. 156).

5.4. PERFIL E PLANO DE CURVATURA DAS VERTENTES

A função das informações sobre a curvatura das vertentes foi utilizada neste trabalho para descrever as características que constituem as superfícies da área estudada, tendo como unidade de análise as sub-bacias de drenagem, por este viés buscou-se entender os processos de erosão por voçorocas através do escoamento laminar. A Figura 31 apresenta o mapa com a distribuição do perfil de curvatura das vertentes na área de pesquisa.

Figura 31 – Mapa da distribuição do perfil de curvatura das vertentes na área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

O valor da curvatura pode ser usado para encontrar os padrões de erosão do solo, bem como a distribuição da água na superfície. A curvatura do perfil afeta a aceleração e desaceleração do fluxo e, portanto, influencia a erosão e a deposição.

Os perfis de curvatura de vertentes convexas e côncavas ocorrem de forma oposta às vertentes retilíneas, tendo menos ocorrência no baixo curso e maior ocorrência no alto curso das sub-bacias. As vertentes convexas são as que aparecem com as maiores ocorrências, distribuídas em todas as sub-bacias, com 38%, já as vertentes côncavas representam a segunda classe de maior ocorrência, com 37% da área.

As vertentes retilíneas ocupam cerca de 25% do total, estas modalidade de vertente ocorre principalmente no baixo e médio curso dos principais canais fluviais. O equilíbrio dos valores que expressam o comportamento dos índices sobre a configuração das superfícies na área em questão permite inferir que os processos responsáveis pela evolução das formas do relevo resultam de uma ação combinada entre a ação química e física da água ao elaborar tais formas. As voçorocas fazem parte deste contexto, porém com alguns incrementos particulares vinculadas a elas como, por exemplo, presença de falhas na região.

A curvatura do perfil é paralela à inclinação e indica a direção da inclinação máxima. Afeta a aceleração e desaceleração do fluxo superficial. As configurações de vertentes mostram a concentração e dispersão de fluxos, o que pode levar a maior ou menor volume de água em escoamento concentrado. O volume de água se deslocando de forma concentrada é um fator que deve ser levando em consideração na relação da força cinética de deslocamento de um fluxo d água.

Dessa forma, frente aos processos de voçorocamento as vertentes com perfis predominantemente côncavos, apresentam-se com o maior agrupamento de incisões erosivas, pois possuem características que favorecem a concentração do escoamento superficial, dando origem ao processo ou mesmo acarretando sua expansão. No perfil convexo, ocorre a dispersão do escoamento superficial, ou seja, menor concentração de água em um único ponto, não possuindo muita influência no desenvolvimento de voçorocas.

Na situação do plano de curvatura, essa configuração se mostra perpendicular à orientação da inclinação máxima do terreno e refere-se à convergência e divergência do fluxo sobre a superfície. Um plano divergente indica que a superfície é

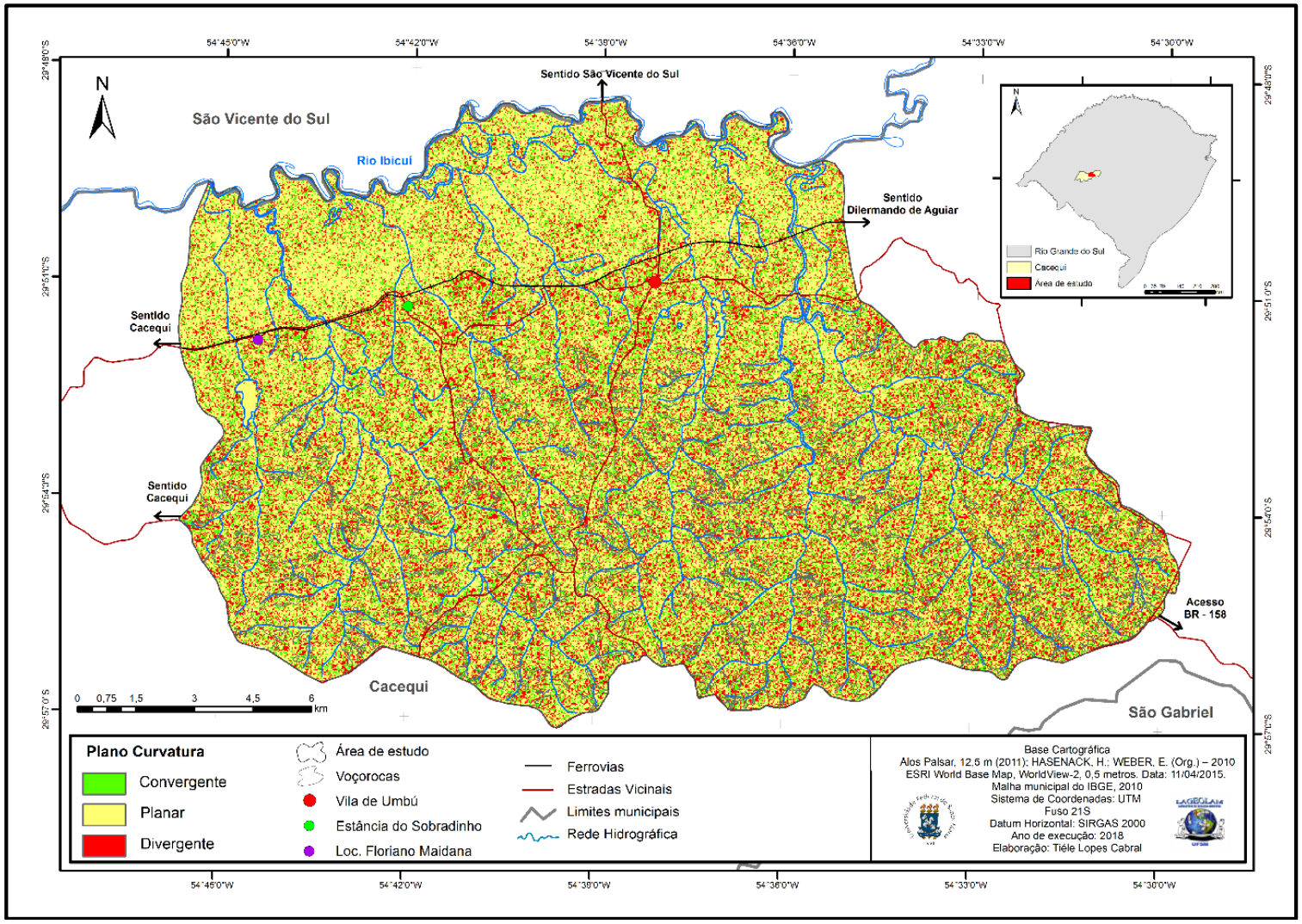
lateralmente divergente nessa área, um plano convergente sugere que a superfície é lateralmente convergente.

De acordo com as informações contidas no mapa (Figura 32), a distribuição do plano curvatura na área de estudo compreende 56% do total da área na classe planar, seguida da divergente com 23% e por último a convergente com 21%.

Analisando isoladamente o plano de curvatura das vertentes frente aos processos de voçorocamento, percebe-se que mantem um comportamento preferencialmente convergente na área de estudo. Este padrão, apresenta maior agrupamento de incisões erosivas, já que direciona o fluxo superficial, condicionando o desenvolvimento do processo. Da mesma forma, a classe divergente não possui influência direta sobre os processos já que distribui o fluxo sobre a superfície.

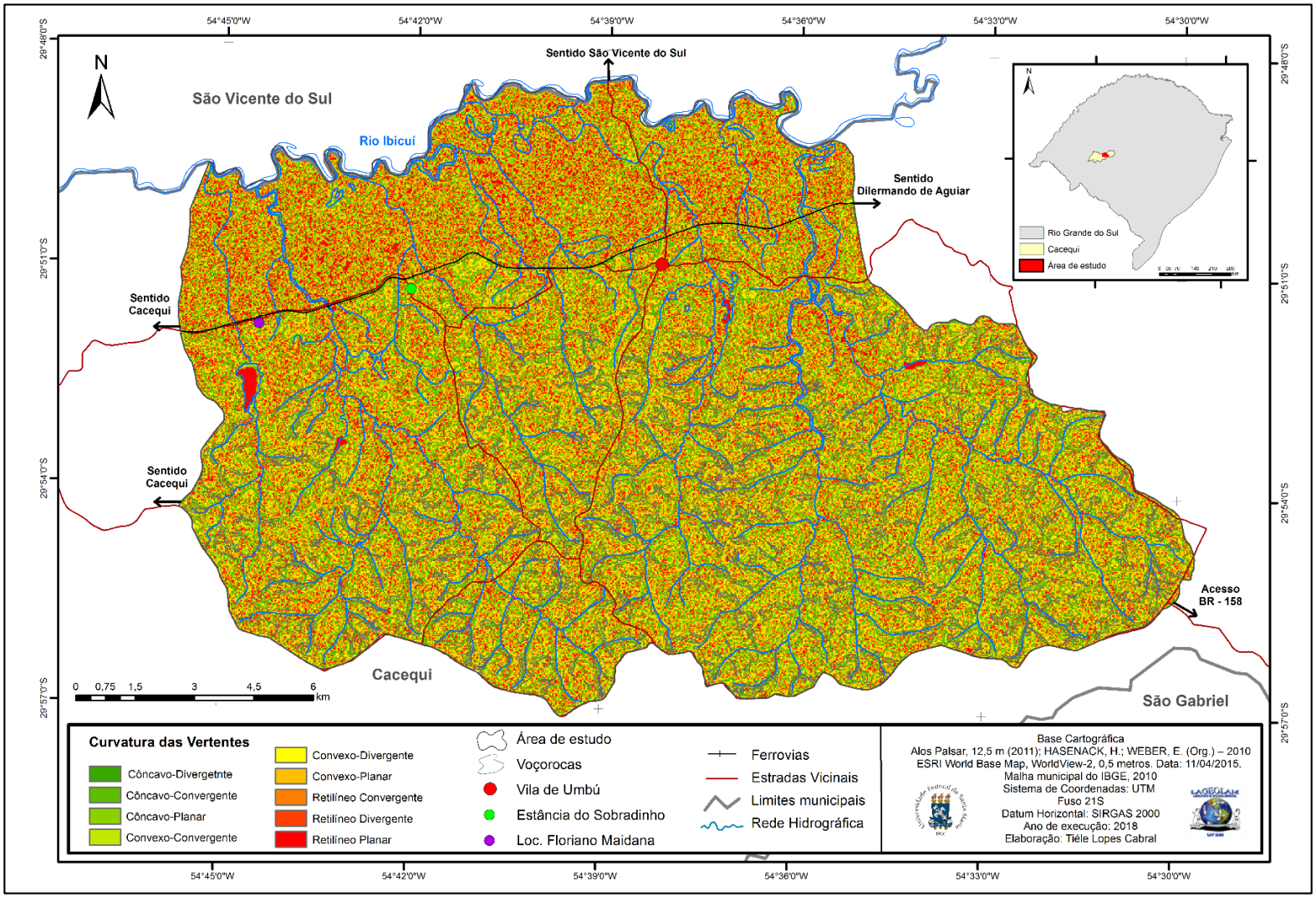
Para expressar de forma integrada o perfil e plano de curvatura das formas de vertentes, o mapa da Figura 33, representa a combinação de tais informações que resultou em nove classes de curvaturas das vertentes, sendo elas: côncavo convergente; retilíneo-convergente; convexo-convergente; côncavo-planar; retilíneo planar; convexo-planar; côncavo-divergente; retilíneo-divergente; convexo-divergente.

Figura 32 – Distribuição do plano de curvatura das vertentes na área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 33 – Distribuição de curvatura das vertentes na área de estudo.

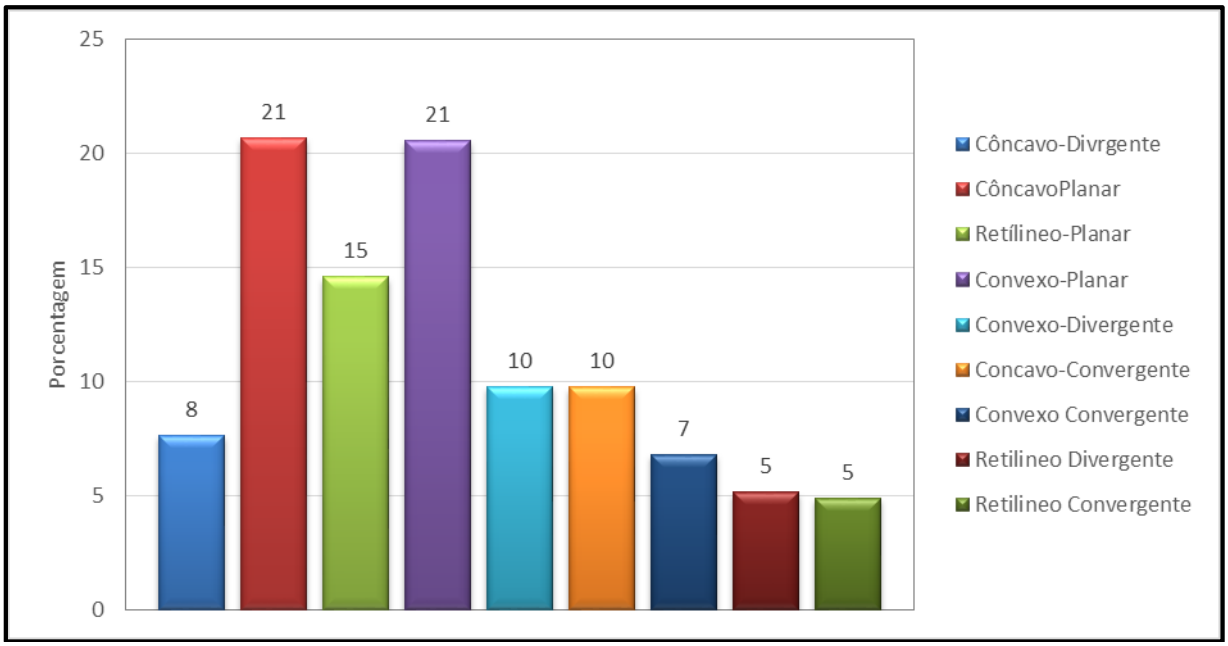


Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Nessa integração de informações entre ambos os comportamentos (plano e perfil curvatura), é notório a inserção de outras configurações de vertentes, que não se destacaram nas análises independentes.

Se a curvatura do perfil afeta a aceleração e desaceleração do fluxo, a curvatura do plano influência a convergência e a divergência do mesmo. Dessa forma, ao considerar a combinação da curvatura do plano e do perfil, pode-se entender com mais precisão o fluxo através da superfície. O Gráfico 3 ilustra a porcentagem de ocorrências destas classes por toda a extensão da área de estudo, com destaque as classes Côncavo-Planar, Convexo Planar e Retilíneo-Planar.

Gráfico 3 - Distribuição das porcentagens da curvatura das vertentes na área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Dentro da perspectiva de integração das informações das vertentes voltado ao processo de voçorocamento, nota-se que este indicador morfométrico mantem uma pré-disposição na ocorrência de vertentes para todas as formas de voçorocas: côncavo-divergente (indica superfície com tendência a concentração de água com o fluxo divergindo em outras direções, dando subsídio a evolução das formas de voçorocas); côncavo-planar (sugere a concentração de fluxo em direção paralela ao segmento); côncavo-convergente (indica a maior concentração de fluxo em um único ponto, classe fortemente atrelada ao desenvolvimento das voçorocas) e retilíneo-convergente (implica em superfícies que condicionam a distribuição do escoamento superficial com concentração de fluxo). Somado as forma Bulbiforme, Irregular Mista, Retangular e Irregular Retangular ocorre a classe convexo-convergente, ou seja, vincula-se a voçorocas com maiores larguras.

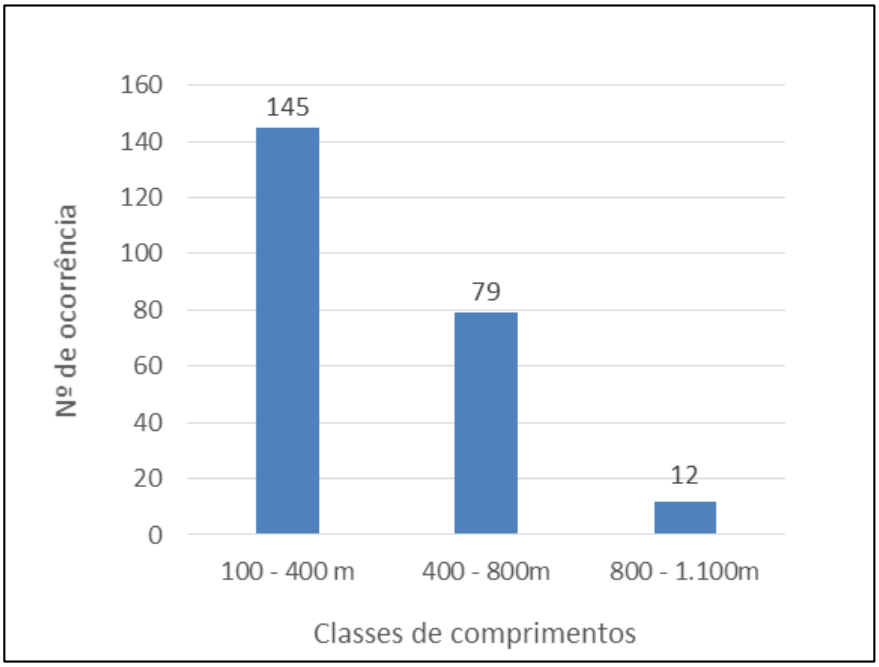
Com os perfis de curvatura predominantemente convexos, ocorre a dispersão do escoamento superficial, ou seja, menor concentração de água em uma só direção favorecendo a expansão das voçorocas em outros sentidos. Os perfis côncavos, apresentam-se com o menor agrupamento de incisões erosivas, mesmo possuindo características que favoreçam a concentração do escoamento superficial, este perfil pode condicionar o processo inicial.

5.5 COMPRIMENTO DAS VERTENTES

Os comprimentos de vertentes, identificados na área de estudo, expostos na Figura 27 (pg. 95), foram divididos em três classes, conforme o comprimento de cada vertente analisada. O maior comprimento de vertente, corresponde a 1.100 metros, a ocorrência de amplas extensões está concentrada na parte leste na sub-bacia do Arroio Areal Grande e a oeste na Sanga Areal da Limeira. Os menores comprimentos de vertente correspondem valores entre 103 a 400m, concentrados nas superfícies das Sangas da Vaca Velha e Tapera, ou seja, setor central da área de estudo.

A partir das análises realizadas, constatou-se há o predomínio de vertentes com comprimento mais curtos entre 100 e 400 metros (Gráfico 4), constituindo 61% do total dos comprimentos analisados, correspondem a vertentes médias, 33% dos comprimentos analisados, e os comprimentos de vertente alongados equivalem a 6%.

Gráfico 4 - Classes de comprimentos de vertentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os comprimento maiores das vertentes estão localizados em grande parte abaixo de 100m de altitude, combinando com voçorocas de maior área, os médios comprimentos estão concentrados nas áreas com maiores altitudes, em topos de colina e em Vales entalhados e não entalhados em superfície de Dissecação, onde as voçorocas estão preferencialmente distribuídas, os pequenos comprimentos se distribuem pela área de estudo coincidindo com voçorocas de pequenos comprimento e área.

Dessa forma, percebe-se que o comprimento de vertentes influência nas características do terreno, no que tange a capacidade de infiltração e na capacidade erosiva, constituindo-se um parâmetro morfométrico importante para ser analisado na distribuição de voçorocas.

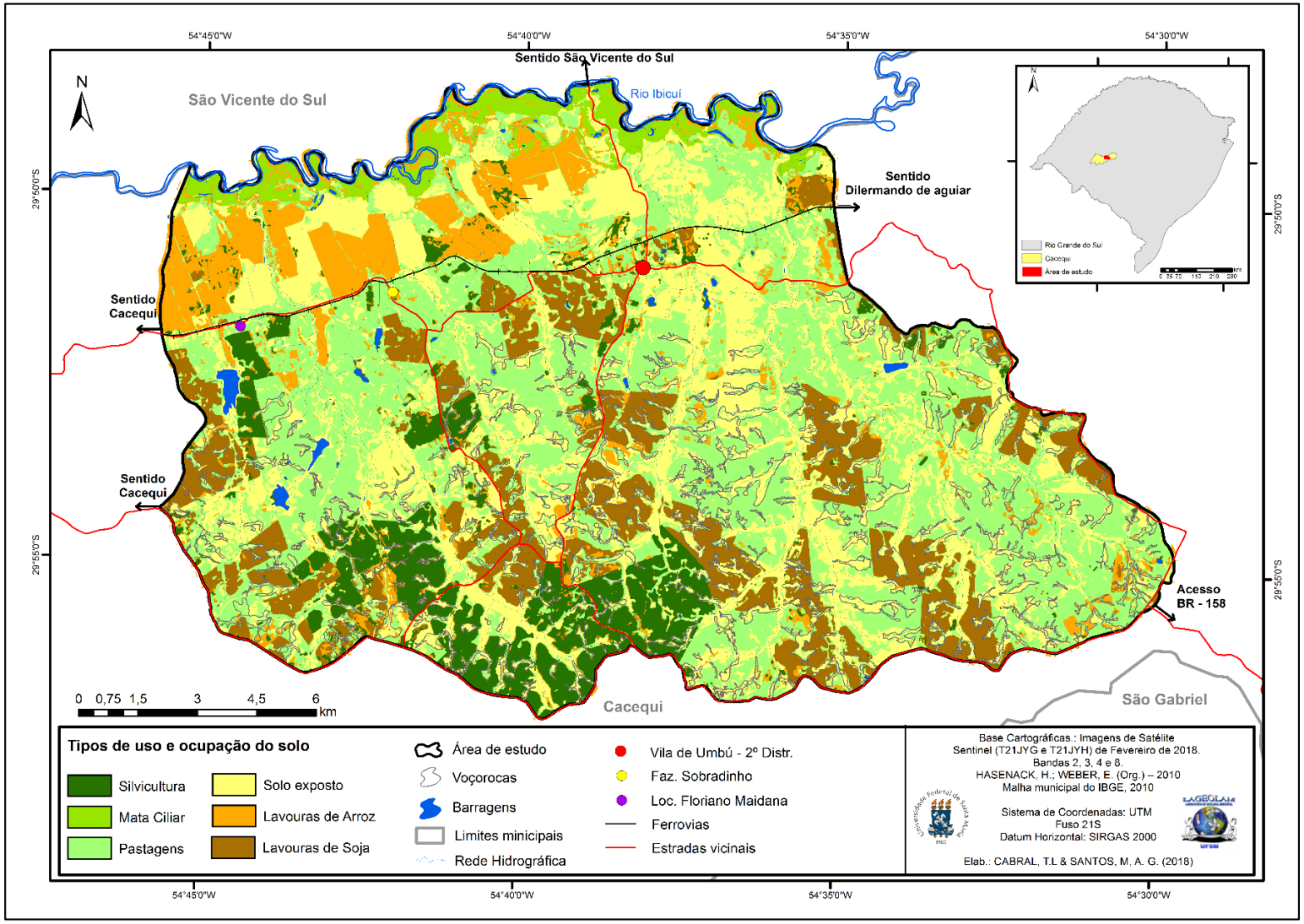
6 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS VOÇOROCAS

A definição das formas das voçorocas considerou no primeiro momento da pesquisa, a interpretação qualitativa, baseada na interpretação visual do comportamento das diferentes formas presentes na área de estudo, e posteriormente envolvendo dados quantitativos voltados às incisões. Os dados apresentados neste item servem como ponto de partida para o entendimento dos processos erosivos por voçorocas na área, fatos levantados a partir dos objetivos específicos e delineados pela metodologia aplicada para obtê-los.

Para fim de descrição da área e entendimento da localização das voçorocas identificadas, verificou-se que estas incisões estão situadas no meio rural do município de Cacequi, onde se distribuem em meio a lavouras de soja (13%), pastagens (35%) e silvicultura (8%), conforme mapa de uso da terra representado na Figura 34. A distribuição das classes de uso evidencia a quantidade de áreas de acumulação dos sedimentos provenientes dos processos de voçorocamentos, pois, conforme registrado no referido mapa há muitas áreas com solo exposto inseridas na classe de áreas não cultivadas (30%) em meio a lavouras de arroz (10%), correspondendo as áreas com superfícies planas e junto às margens dos principais eixos de drenagem.

A cobertura vegetal secundária da área intensifica os processos de erosão ao promover maior escoamento superficial devido à baixa infiltração no solo, contribuindo para a concentração de fluxos superficiais. Além disso, a vegetação também contribui para manter a “estabilidade” das encostas, amenizando, deste modo, os efeitos das chuvas de maior intensidade e duração.

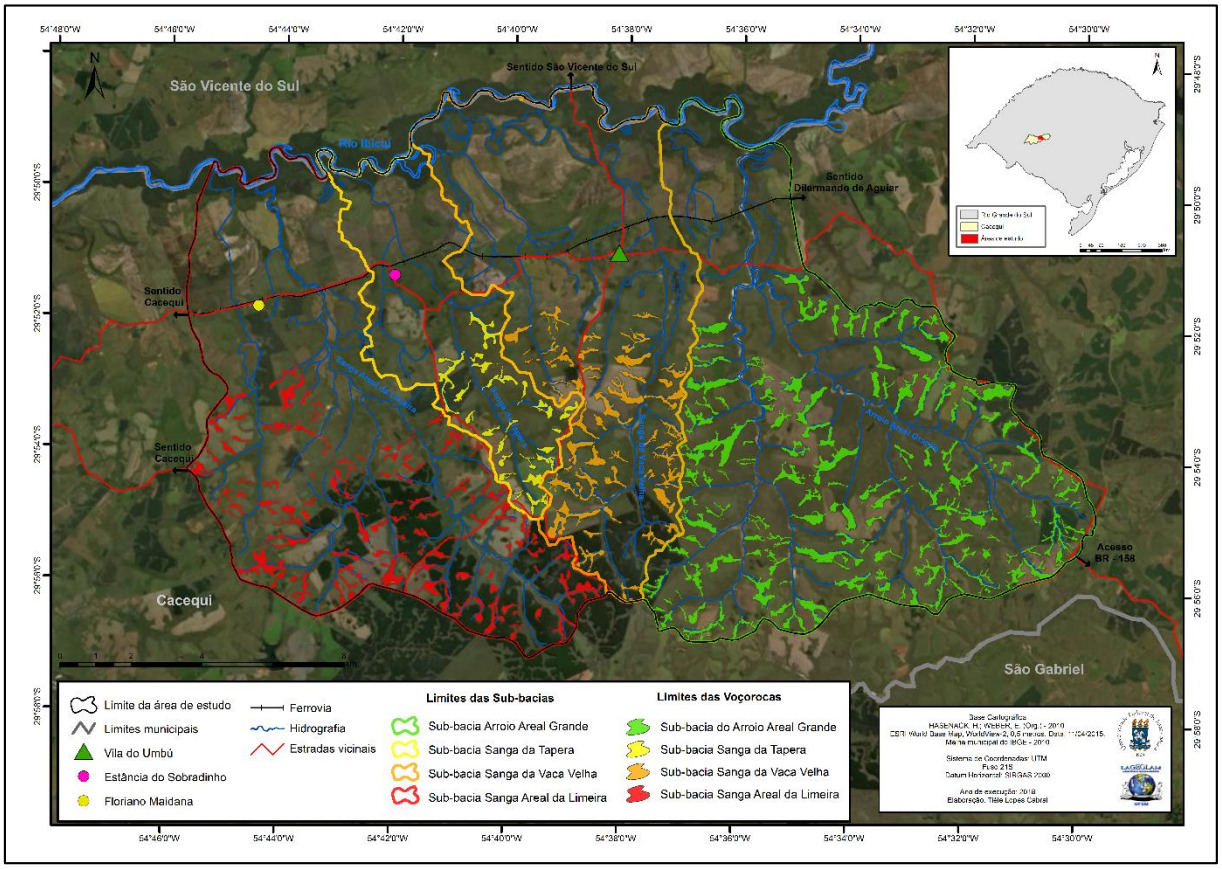
Figura 34 - Mapa de uso e ocupação das áreas com ocorrência de voçorocas.



Fonte: Elaborado por T. L. Cabral e M. A. G. Santos (2018).

A partir da interpretação e análise das características das voçorocas registradas em imagens orbitais, foi possível estabelecer uma sistemática para efetivar o mapeamento das 298 incisões, identificadas e catalogadas. É um número expressivo de incisões concentradas nos canais de 1ª ordem das quatro sub-bacias presentes dentro desse perímetro, como pode ser visto na Figura 35.

Figura 35 - Mapa de distribuição das voçorocas na área de estudo por sub-bacia hidrográfica.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Considerando os dados presentes na Tabela 4, foi possível produzir a densidade de voçorocas em cada sub-bacia pertencente a área de estudo, ponderando o número de incisões e a área das sub-bacias, descartando o setor pertencente a planície de inundação, já que não ocorrem voçorocas. O maior valor da densidade de voçorocas pertence a Sanga Areal da Limeira, com 0,68 voçorocas/km², apresenta uma concentração de 98 incisões e uma área de 67,26km², seguida do sistema hidrográfico Arroio Areal Grande, com 134 voçorocas e uma área de 98,43km², resultando em uma densidade de 0,73 voçorocas/km². A Sanga da Tapera,

comporta 22 incisões e uma área de 29,27km², derivando uma densidade de 0,99 voçorocas/km², já a Sanga da Vaca Velha apresenta uma área de 44,24km² e 44 incisões, resultando na mais baixa densidade de voçorocas na área de estudo (1,00 voçorocas/km²).

Tabela 4 - Densidade de voçorocas por sub-bacia hidrográfica.

Sub-bacias	**Área (km²)**	**Nº de Voçorocas**	**Densidade de voçorocas (voçorocas/km²)**
Areal grande	98,43	134	0,73
Sanga da Vaca Velha	44,24	44	1,00
Sanga da Tapera	21,79	22	0,99
Sanga Areal da Limeira	67,26	98	0,68

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

As Sub-bacias Arroio Areal Grande e Sanga Areal da Limeira possuem maior concentração de voçorocas devido manter maiores áreas de recobrimento, já as sub-bacias Sanga da Tapera e Sanga da Vaca Velha apresentam menores áreas e consequentemente menor concentração de voçorocas.

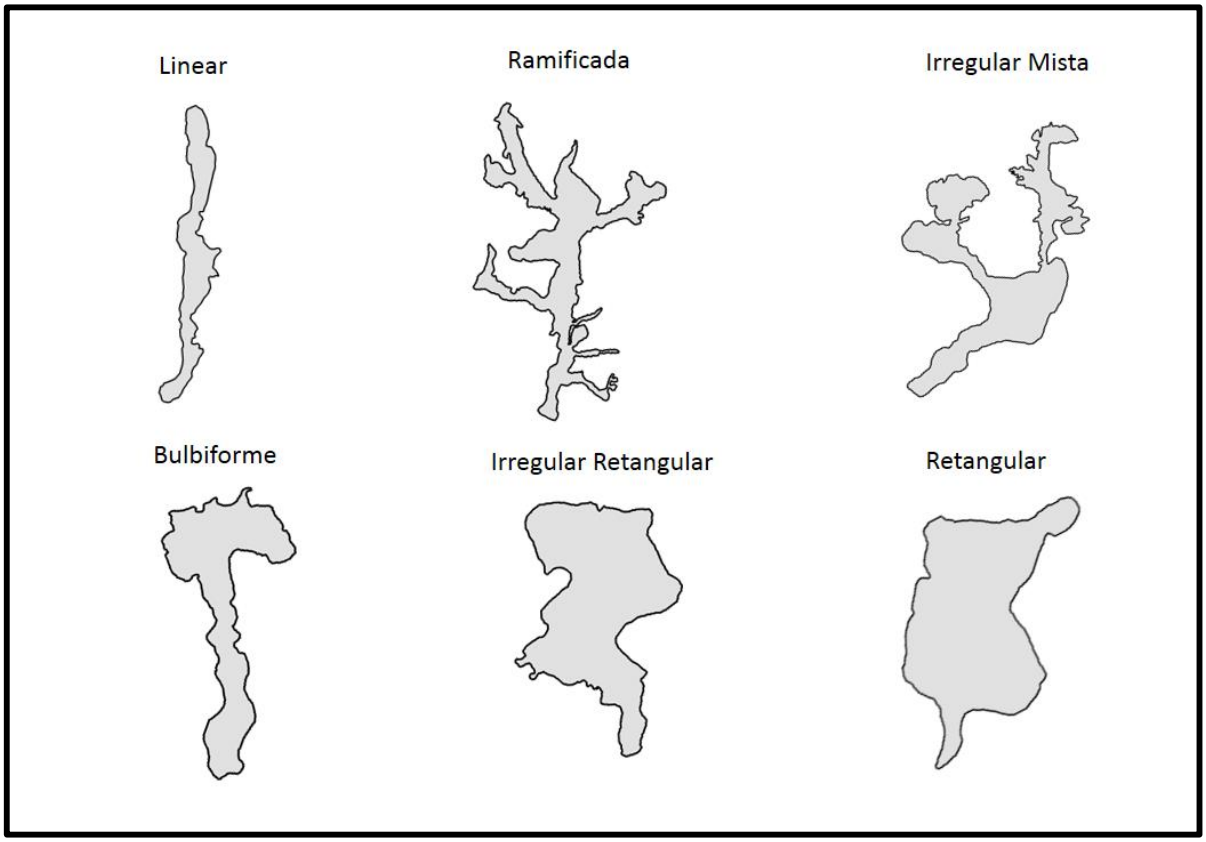
As classificações das voçorocas levou em consideração duas configurações, por tipo e forma, apresentado no Item 2 (pgs. 38 e 39). Quanto à primeira, podem ser conectadas, desconectadas e integradas ao sistema de drenagem. No levantamento foram registradas: 74 conectadas – parte inferior da encosta e conectadas a rede de drenagem, 224 integradas – representam a união entre as conectadas e as desconectadas, e nenhuma voçoroca encontra-se desconectada, todas são conectadas com o sistema de drenagem, apenas 03 incisões apresentam-se com a forma de conexão subsuperficial. Assim sendo, todas as voçorocas estão conectadas ao sistema de drenagem, ou seja, já se constituem como drenagem de primeira ordem, situadas na parte superior da vertente, nas cabeceiras de drenagem.

A classificação por forma seguiu um conhecimento voltado às especificações da área de estudo, adaptando assim, uma nova classificação baseada em trabalhos já existentes (Bigarella e Mazuchowski, 1985 e Vieira, 2008). Quanto à forma foram definidas seis classes (Figura 36) descritas abaixo, sendo elas:

a. Linear - resultante geralmente de um fluxo superficial concentrado, se mantém em uma única direção estrutural, pequenos valores de largura (18 a 107 m), e baixo Índice de Circularidade (valor médio de 0,165);
b. Bulbiforme - evolui a partir da linear, com uma abertura circular de fluxo em direção a parte superior da encosta. Mantém-se estreita no eixo principal e aumenta sua largura no topo. Apresenta baixo índice de circularidade com valor médio de 0,168;
c. Ramificada - caracterizada pela ocorrência de vários canais de drenagem superficiais em diferentes direções de fluxos e estruturas. Possui valores baixos de largura (média de 55,9m) e índice de circularidade (média de 0,086);
d. Irregular Mista - mantém uma abertura mais larga ao longo da sua extensão com ramos e/ou bulbos conectados no topo. Apresenta várias orientações dos fluxos superficiais concentrados dentro da mesma.
e. Retangular - configura-se como o estágio avançado de evolução da voçoroca de fundo chato, podendo reativar e passar para a classe Irregular retangular, está relacionada a uma fase de estabilização. Mantém o Índice de Circularidade no mais alto patamar (média de 0,362) e valores de largura elevados (média de 106,64m).
f. Irregular retangular – apresenta alto índice de circularidade (média de 0,192), com valor elevado de largura (média de 75,53m), se diferencia da retangular pelo avanço da forma mantendo abertura em diferentes direções.

Quantitativamente as voçorocas apresentam as seguintes ocorrências de formas: 22 Lineares; 38 Bulbiformes; 120 Ramificadas; 24 Irregulares Mistas; 21 Retangulares; 73 Irregulares Retangulares, conforme está registrado no mapa da Figura 37. As formas Ramificada e Irregular Retangular são as que mais se destacam em termos de ocorrência com 40,2% e 24,4%, respectivamente. Essas modalidades se destacam em número de ocorrência ao longo de todas as superfícies das sub-bacias presentes na área de estudo (Tabela 5).

Figura 36 - Principais formas de voçorocas encontradas na área de estudo.



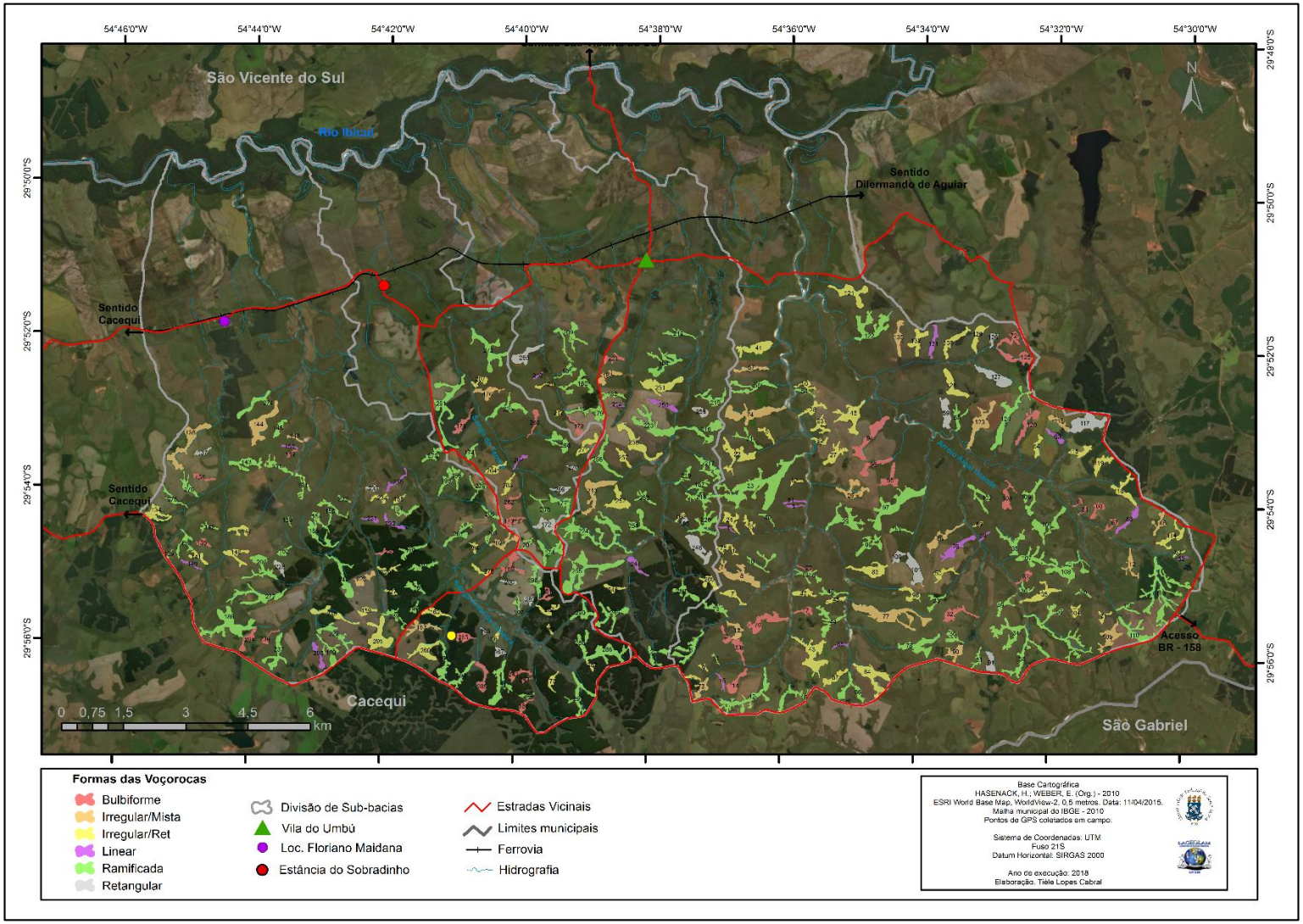
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Tabela 5 - Quantificação e distribuição das formas de voçorocas por sub-bacia hidrográfica da área de estudo.

Sub-Bacias / Formas	Sanga Areal da Limeira	Sanga da Tapera	Sanga da Vaca Velha	Arroio Areal Grande
Linear	06	01	04	11
Bulbiforme	13	04	02	19
Ramificada	46	09	23	42
Irregular Mista	06	01	02	15
Retangular	07	03	04	07
Irregular Retangular	20	04	09	40
Total	**98**	**22**	**44**	**134**

Fonte: Organizado pela Autora (2018).

Figura 37 – Distribuição das voçorocas por forma na área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

6.1 DADOS MÉTRICOS DAS VOÇOROCAS

Os dados métricos neste sub-item referem-se a medidas extraídas diretamente das voçorocas presentes na área de estudo, como a largura, profundidade, volume, comprimento e Índice de Circularidade. As voçorocas identificadas compreendem uma extensão de 22,5km², correspondendo 8% da área total de estudo (Tabela 6), a Sub-bacia Arroio Areal Grande recobre a maior extensão com 104,54km² e mantém a maior concentração de voçorocas com 134 unidades, seguida da Sub-bacia Sanga Areal da Limeira com 82,80km² de área com 98 voçorocas. As menores sub-bacias Sanga da Vaca Velha e Sanga da Tapera possuem respectivamente 66,27km² e 29,27km², com 44 e 22 incisões dentro do seu perímetro.

Tabela 6 - Valores de área e unidades de voçorocas por forma nas sub-bacias presentes na área de estudo.

Sub-Bacias	**Área das Sub-Bacias (km²)**	**Unidades de Voçorocas**	**Área das voçorocas (km²)**	**Área das voçoroca (%)**
Sanga Areal da Limeira	82,80	98	5,6	6,8
Sanga da Tapera	29,27	22	1,4	4,8
Sanga da Vaca Velha	66,27	44	3,8	5,7
Arroio Areal Grande	104,54	134	11,5	11,1
Total	**282,9**	**298**	**22,5**	**8%**

Fonte: Organizado pela autora (2018).

As variáveis quantitativas organizadas e apresentadas na Tabela 7, levou em consideração a área, perímetro, Índice de Circularidade, comprimento, largura, volume e profundidade das voçorocas identificadas e mapeadas, e resultaram nas análises a seguir.

Tabela 7 - Características métricas das voçorocas na área de estudo - Distribuição por Formas.

Formas	Nº de voçorocas	Tipo	Área (m²)	Perímetro (m)	Índice de Circulari-dade	Largura (m)	Profundi-dade (m)	Comprimento (m)	Volume (m³)
Linear	22	C: 05 D: 01 I: 16	Min: 5.346,67 Max: 109.083,44 Med: 29.497,08	Min: 633,67 Max:2.645,99 Med:1.397,75	Min: 0,09 Max: 0,27 Med: 0,16	Min: 17,98 Max:106,90 Med: 45,27	Min: 0,79 Max: 3,87 Med: 2,09	Min: 276,24 Max: 1.031,03 Med: 579,04	Min: 3.456,29 Max: 329.242,04 Med: 62.810,97
Bulbiforme	38	C: 11 D: 00 I: 27	Min: 9.810,42 Max: 187.604,85 Med: 53.552,39	Min: 699,39 Max: 1.755,49 Med: 1.978,01	Min: 0,08 Max: 0,26 Med: 0,16	Min: 31,87 Max:130,74 Med: 67,86	Min: 1,58 Max: 6,90 Med: 3,27	Min: 278,79 Max: 1.355,88 Med: 653,68	Min: 10.937,35 Max: 630.228,03 Med: 174.411,11
Ramificada	120	C: 08 D: 02 I:110	Min: 5.712,21 Max: 561.280,03 Med: 90.055,73	Min: 822,31 Max:14.531,63 Med: 36.72,38	Min: 0,01 Max: 0,15 Med: 0,08	Min: 15,65 Max:123,94 Med: 55,92	Min: 0,96 Max: 8,24 Med: 3,40	Min: 261,09 Max: 2.657,02 Med: 925,04	Min: 3.953,70 Max: 3814.609,39 Med: 299.112,99
Irregular Mista	24	C: 02 D: 00 I: 22	Min: 19604,34 Max: 326.499,61 Med: 110756,11	Min: 1.132,21 Max: 7.689,29 Med: 3.275,92	Min: 0,06 Max: 0,24 Med: 0,13	Min:43,95 Max:169,93 Med:84,32	Min: 1,94 Max: 5,96 Med: 3,96	Min: 465,14 Max:2.115,89 Med: 998,99	Min.: 42.064,08 Max.: 144.3100,99 Med: 412.319,53
Irregular Retangular	73	C: 28 D: 00 I: 45	Min: 9.590,45 Max: 227.821,77 Med: 67.228,67	Min: 686,43 Max: 5.459,20 Med: 2.057,00	Min: 0,07 Max: 0,27 Med: 0,19	Min: 27,87 Max:191,20 Med: 75,53	Min:0,94 Max:7,86 Med: 3,25	Min: 201,66 Max: 1.536,25 Med: 675,13	Min: 8.150,47 Max: 1264.162,38 Med: 224.660,72
Retangular	21	C: 17 D: 00 I: 04	Min: 8.447,90 Max:229.927,93 Med: 68.214,56	Min: 539,29 Max: 2.720,30 Med: 1.436,74	Mini:0,27 Max:0,53 Med:0,36	Min:31,18 Max:266,89 Med:106,64	Min:0,98 Max:6,11 Med:3,40	Mini:205,06 Max:1.047,47 Med:548,97	Min: 11.686,46 Max: 1313.523,94 Med: 270.722,12

Tipo - C: Conectada, D: Desconectada, I: Integrada. Min: Mínima; Max: Máxima; Med: Média.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

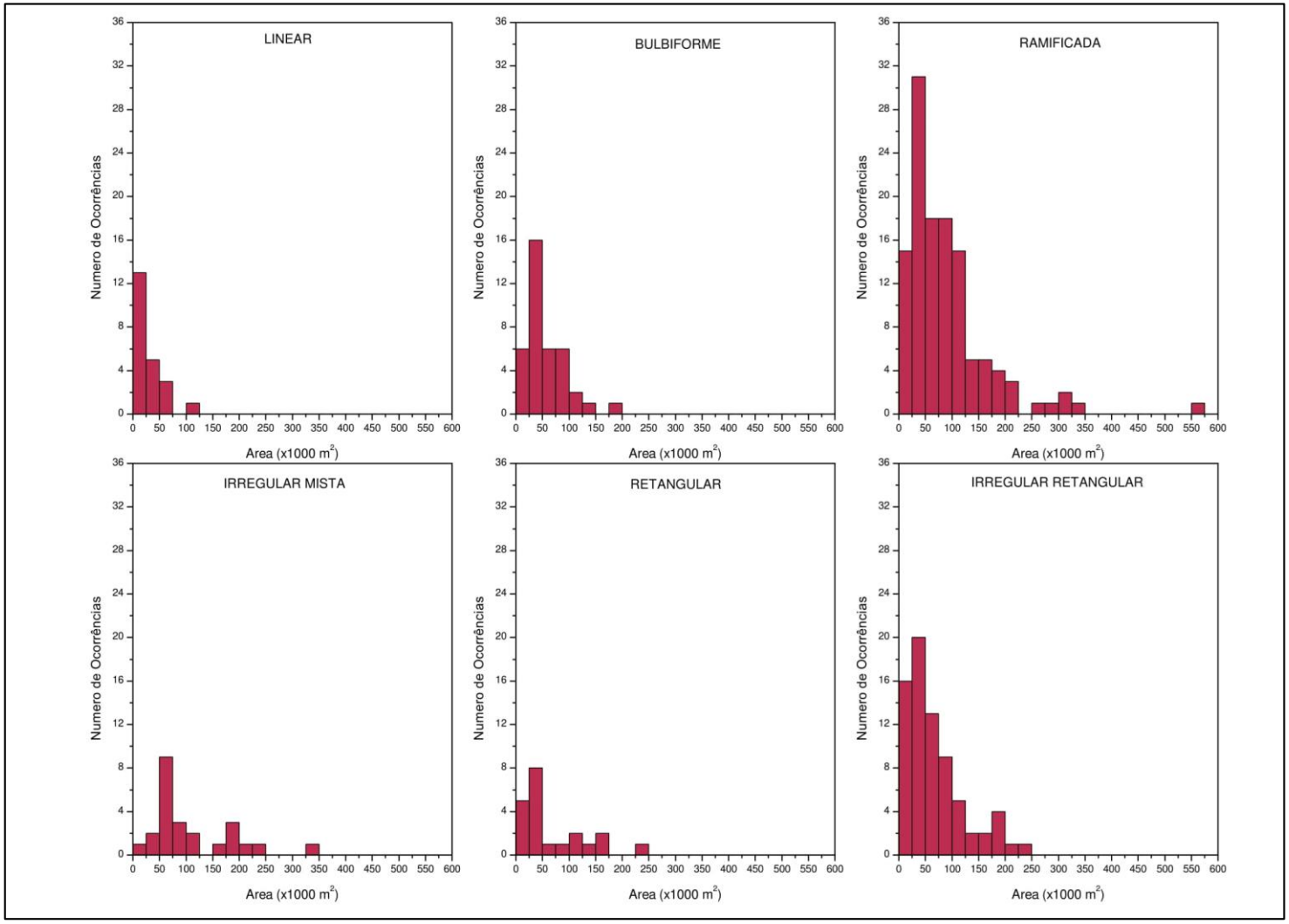
Sendo assim, agrupando por comprimento, as medidas de 37 voçorocas não ultrapassam os 400 m e neste a largura média é de 42 m, se destinam a voçorocas com menores áreas, com Índice de Circularidade de 0,226, volume médio de 27.731m³ e profundidade média de 1,95 m.

As incisões com larguras superiores a 40 m são características de voçorocas que ocorrem em superfície mais plana e/ou com menor resistência do solo e/ou pela existência de vários fluxos oriundos de direções diversas e está relacionada ao grau de evolução das voçorocas.

Um total de 68 voçorocas estão concentradas em vertentes de até 200 m de comprimento devido sua maior declividade. As maiores profundidades verificadas correspondem às voçorocas lineares nas encostas com até 330 m de comprimento. Isso é um indício da presença de falhas ou fraturas na região, fato que condiciona o entalhe das mesmas.

Entre os valores constatados, nota-se que os maiores índices destacam-se em relação a largura, profundidade, área, volume, assim como a maior área de abrangência por incisão. As maiores voçorocas em termos de área (Figura 38) são as formas Ramificada, Irregular Mista e retangular. Por outro lado, a forma linear foi a modalidade que apresentou a menor extensão.

Figura 38 – Histogramas de ocorrências das formas de voçorocas versus área.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

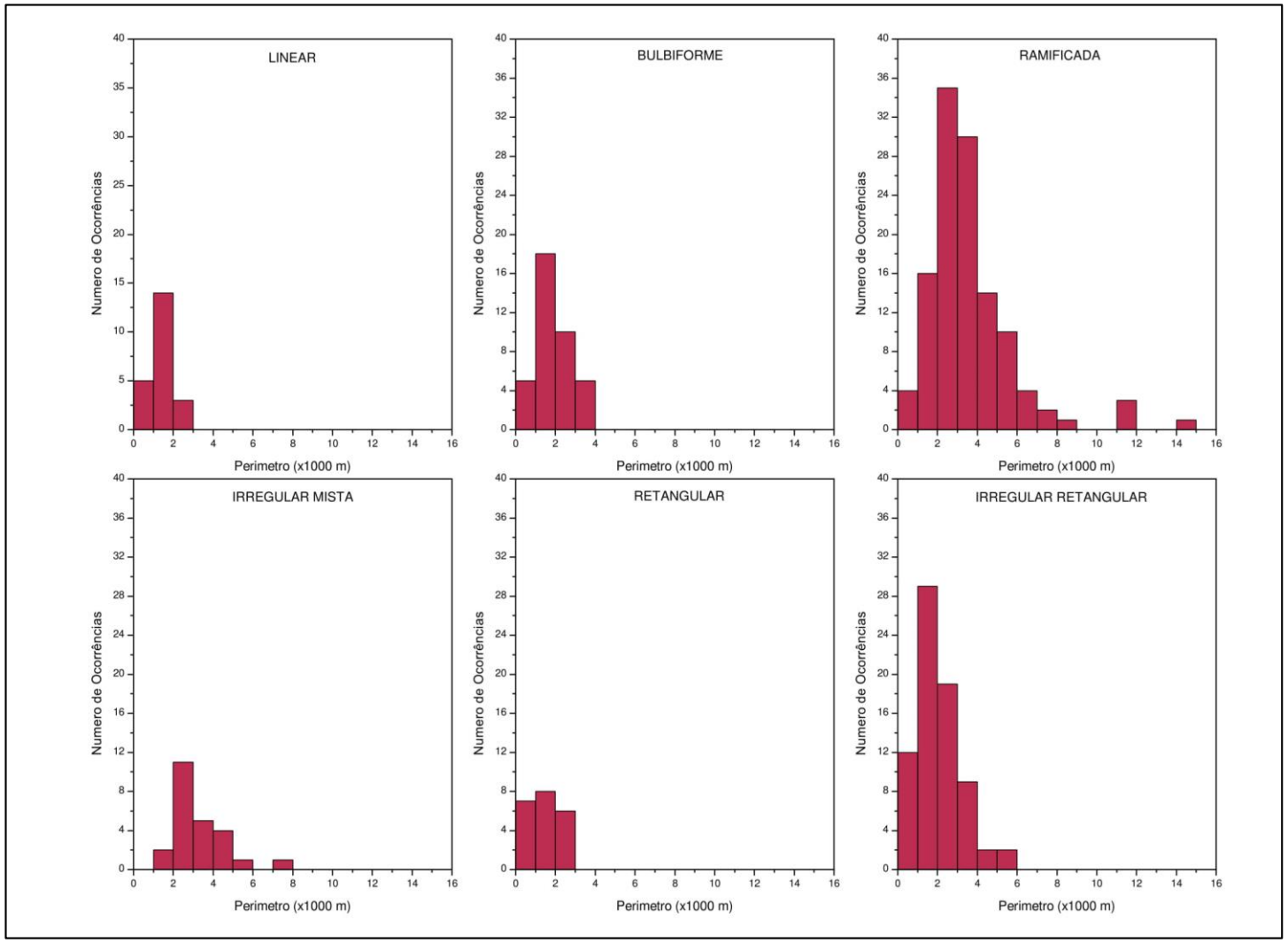
As classes Linear, Bulbiforme, Retangular e Irregular Retangular mantem concentração de ocorrência em pequenas áreas. As classes Ramificada e Irregular Mista apresentam concentração de ocorrência em áreas maiores, acima de 50.000m².

O perímetro das voçorocas é o percurso da linha limite que percorre todo sua margem, as formas Ramificada, Irregular Mista e Irregular retangular apresentaram maiores médias de perímetro, novamente ficando os valores baixos nas classes com forma Linear e Retangular (Figura 39).

Entretanto, é importante observar que a modalidade de forma denominada Ramificada apresenta maior diversidade em seu perímetro, fato que expressa variação em relação ao tamanho desse conjunto de voçorocas. De maneira menos expressiva, esse detalhe também acontece com as que apresentam a forma Irregular Mista e Irregular retangular. Esse detalhe permite inferir que estas modalidades têm afinidades em relação aos fatores da sua gênese e/ou até mesmo o próprio estágio de sua evolução.

Seguindo essa lógica é notável a relação de evolução das voçorocas da modalidade Linear para Bulbiforme. Esta última pode ser um estágio mais avançado da Linear, aumentando assim seu Índice de Circularidade. Sendo assim, é possível crer que a modalidade da voçoroca de forma Linear avança para a modalidade Bulbiforme ao se estabelecer uma condição de erosão remontante, fato condicionado a um rebaixamento do nível de base associado a mudanças climáticas, movimentos neotectônico e/ou intervenção antrópica.

Figura 39 - Histogramas de ocorrências das formas de voçorocas versus perímetro.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

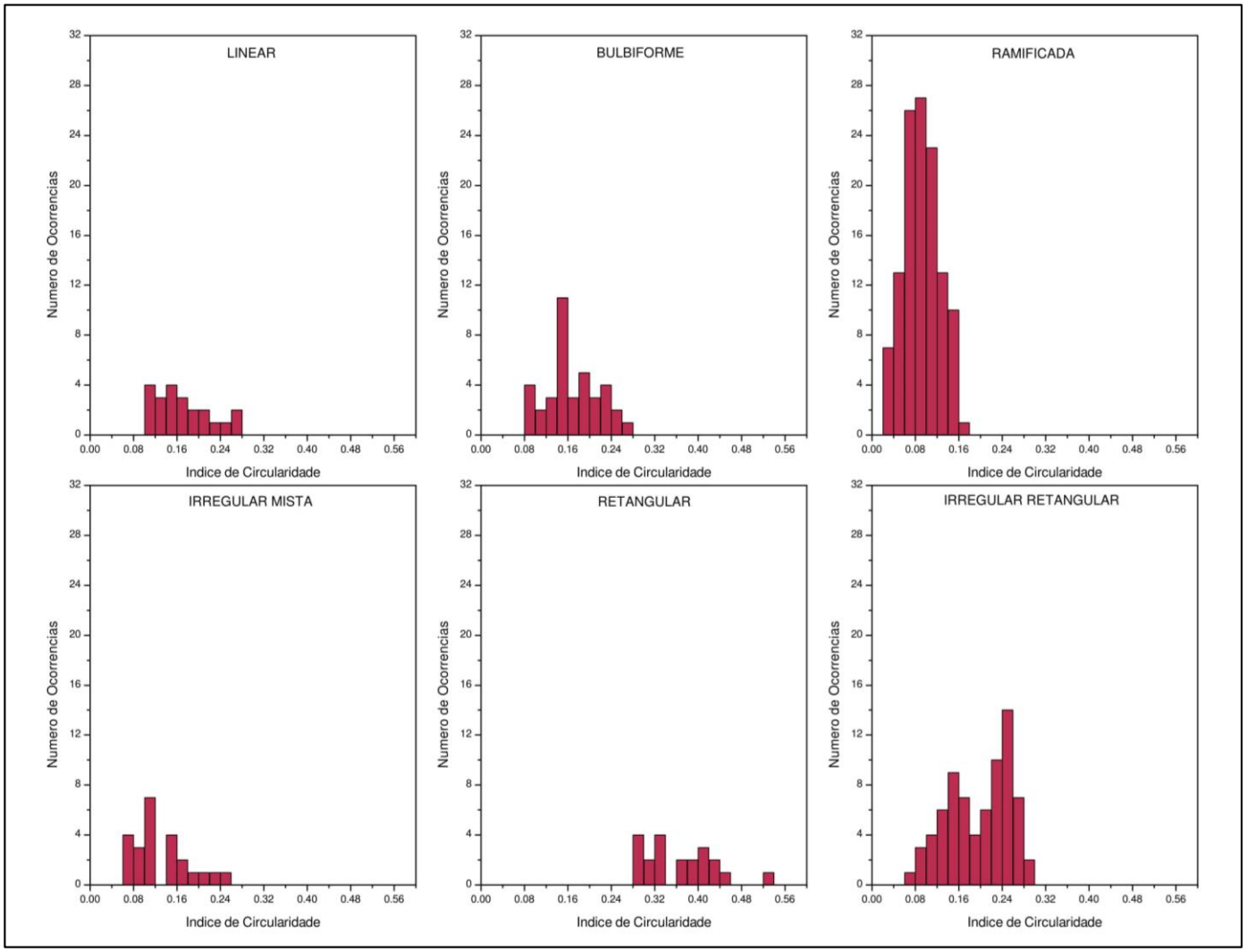
O Índice de Circularidade calculado caracteriza a forma das voçorocas como alongadas e circulares, e a partir dos resultados obtidos constatou-se que este atributo é um dos indicadores que auxiliam na caracterização das formas, mas não é determinante se utilizado unicamente, pois os demais dados métricos também influenciam na configuração de uma voçoroca, portanto não podem ser analisados isoladamente.

As voçorocas com baixo valor do IC, entre 0,017 – 0,170 possuem em sua maioria as formas Ramificadas, algumas Lineares e Bulbiformes (Figura 40), com menores larguras, com vales em “V”, isso denota o favorecimento ao escoamento superficial concentrado, além da indicação da vigência dos processos de erosão vertical em prol da horizontal, ou seja, estas modalidades de voçorocas estão em pleno processo de entalhamento, buscando atingir o nível de base local. Para os valores médios do IC predominam as voçorocas com forma Irregular Mista, e os maiores valores do IC se destinam a voçorocas mais abertas com fundo plano e/ou em “U”, é visível em incisões mais largas, com predomínio de vegetação, presentes nas formas Retangular e Irregular Retangular.

A forma retangular apresenta os maiores índices de circularidade o que evidencia simultaneamente maiores larguras e menores comprimentos, com a predominância de vales com fundo plano.

Percebe-se a partir dos dados que existe um padrão de IC entre as formas Linear e Bulbiforme, com indicadores centralizados entre 0,08 e 0,28, nas formas Ramificada e Irregular Mista ocorre a concentração de voçorocas com IC entre 0,02 e 0,26, e nas formas Retangular e Irregular Retangular concentram-se os índices com elevados valores chegando a 0,54.

Figura 40 - Número de ocorrência de voçorocas em relação a sua modalidade e Índices de Circularidade.

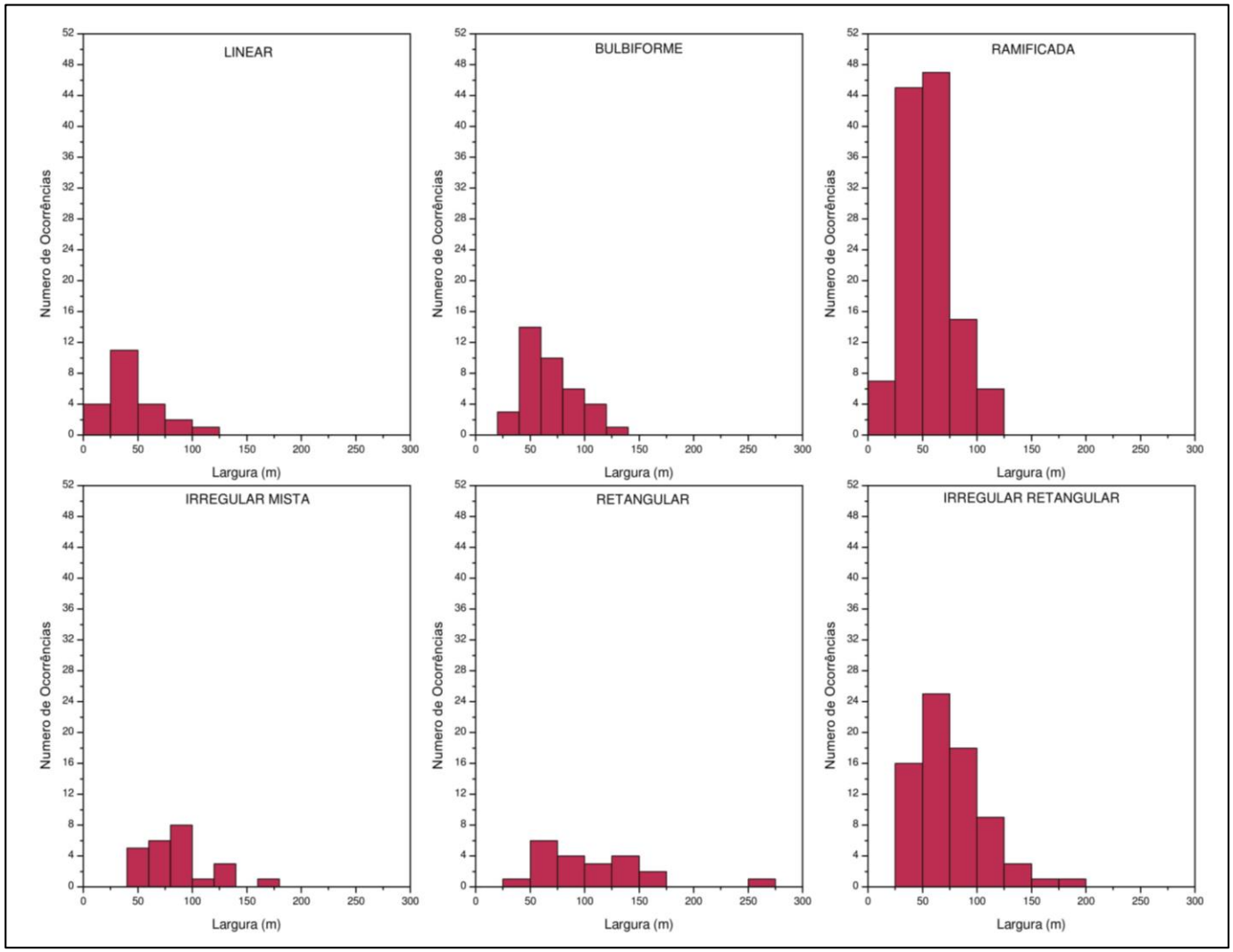


Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Em relação a largura, as modalidades das voçorocas com forma retangular, Irregular Mista e Irregular retangular se destacaram com os maiores valores, como mostra a Figura 41. A largura nestas formas estão atreladas a áreas com maiores profundidades médias, acima de 3,27 metros.

Em voçorocas com grandes larguras é comum a presença de vegetação em seu interior, evidenciando um estágio mais avançado de desenvolvimento, ou seja, ela atingiu o nível de base. Neste estágio podemos ter três possibilidades, ou seja, (I) Entrar em um período de “estabilidade”; (II) ampliar sua área erodida devido a ação da erosão lateral e, (III) retomar o processo de voçorocamento pela ação da erosão vertical remontante.

Figura 41 - Número de ocorrências das diferentes modalidades de voçorocas versus Largura.



Organização: Elaborado pela autora (2018).

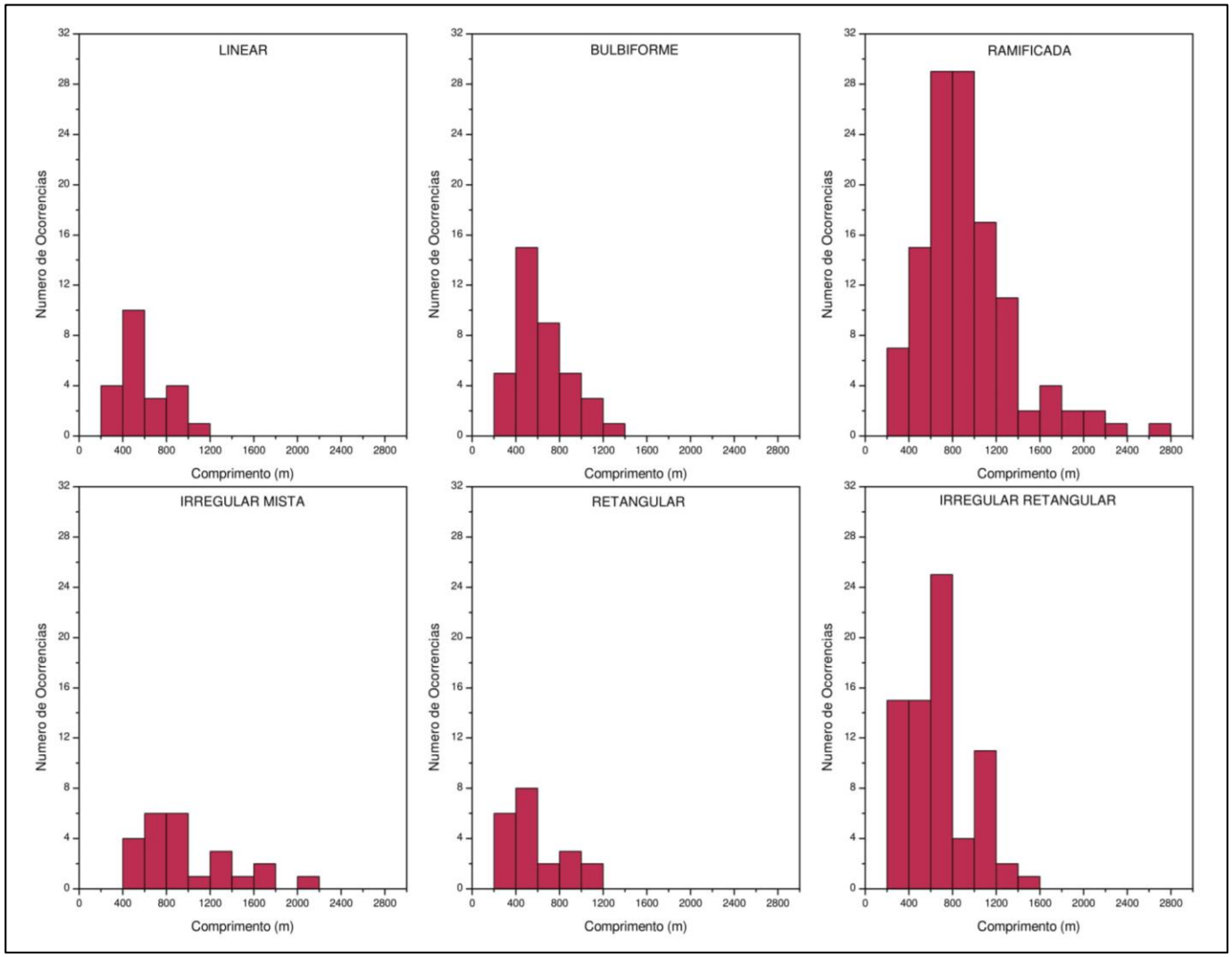
A maior extensão em comprimento de algumas voçorocas pode ser explicada pela existência de um fluxo principal (para cada incisão), o qual tende a provocar erosão remontante seguindo uma determinada orientação, e a menor frequência de fluxos laterais com capacidade suficiente para provocar a expansão lateral.

Em voçorocas com até 100 m de comprimento e até 20 m de profundidade foi constatado um crescimento da incisão. Por outro lado, à medida que a incisão aumenta o seu comprimento, o aprofundamento não segue a mesma velocidade em seu incremento. Esse fato ocorre, principalmente, porque a maioria das incisões surgem na porção inferior da encosta, com menor espessura do solo, portanto, muito próxima de atingir o nível de base local. Para voçorocas com mais de 50 m de largura a profundidade não ultrapassa os 20 m e isso se deve à maior expansão lateral em relação à velocidade de aprofundamento, fato que expressa o avanço para o estágio de “estabilidade” do processo de evolução das voçorocas, ou seja, possivelmente ela atingiu o nível de base vigente nesta parte do sistema hidrográfico regional.

As voçorocas com maiores extensões são aquelas que apresentaram as configurações do tipo Ramificada, Irregular Mista e Irregular retangular (Figura 42). É interessante destacar que todos estes tipos de voçorocas apresentam ramificações distribuídas nos setores mais elevados das vertentes, fato que reforça a condição de conexão destas com o sistema de drenagem contemporânea desta parte da bacia hidrográfica do rio Ibicuí.

Outro detalhe que chama a atenção nas informações apresentadas na Figura 42 é o dado do comprimento das voçorocas na modalidade ramificada. Entre as demais essa modalidade é a que apresenta maior ocorrência em valores entre 600m e 1.200m. Esse fato interagido com outras informações como, por exemplo, a cobertura vegetal, pode subsidiar informações sobre a ciclicidade do processo.

Figura 42 - Número de ocorrências das diferentes formas de voçorocas versus comprimento.



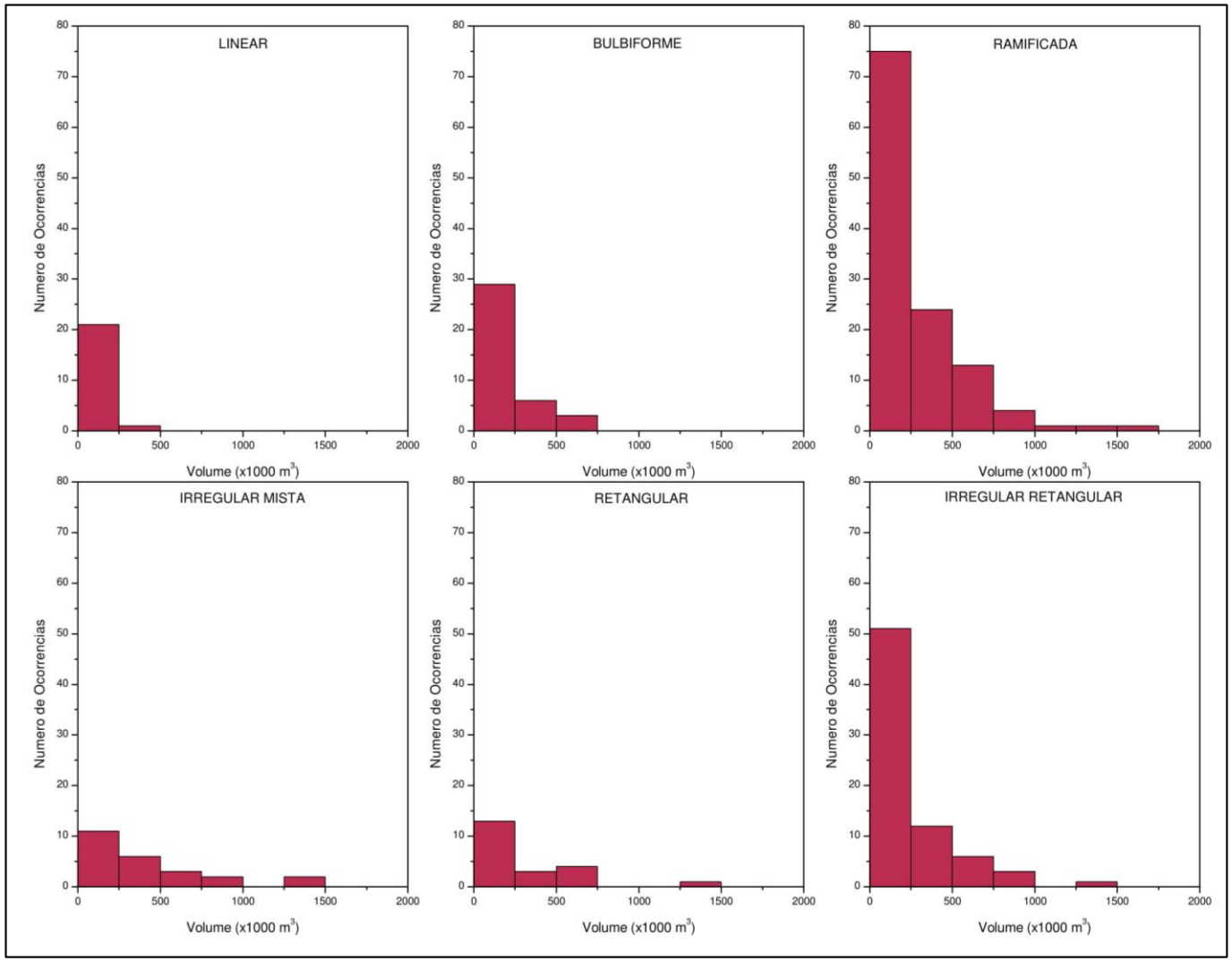
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A ocorrência das formas de voçorocas em relação a seu comprimento apresenta um padrão com valores entre 200 e 1.200 metros nas formas Linear, Bulbiforme, Retangular e irregular retangular. Nas formas Ramificada e Irregular Mista, os valores concentram-se em uma faixa que vão além dos 1.200 metros de comprimento.

Buscando avaliar a perda de material decorrente dos processos de voçorocamentos na área em questão foi constado que o volume médio de material erodido foi na ordem de 254.644 m³ por incisão, mostrando que os eventos de voçorocas respondem significativamente pela morfodinâmica desta parte do relevo na Depressão Central, indicando fortes indícios de reordenação do sistema de drenagem nesta área.

Especificadamente, o valor de perda mencionado anteriormente é considerado elevado e está vinculado aos eventos das grandes voçorocas. Deste modo, foi constatado que os resultados mais elevados enquanto volume sobrepõem as formas com maiores dimensões diretamente ligadas as formas ramificada e irregular mista (Figura 43), ou seja, quanto maior a área da voçoroca maior é o volume erodido. Por outro lado, cabe destacar que a largura e a profundidade demonstraram maior influência no volume erodido do que o comprimento, principalmente no estágio inicial de evolução das voçorocas.

Figura 43 - Número de ocorrência das modalidades das voçorocas em relação e o volume de material erodido.



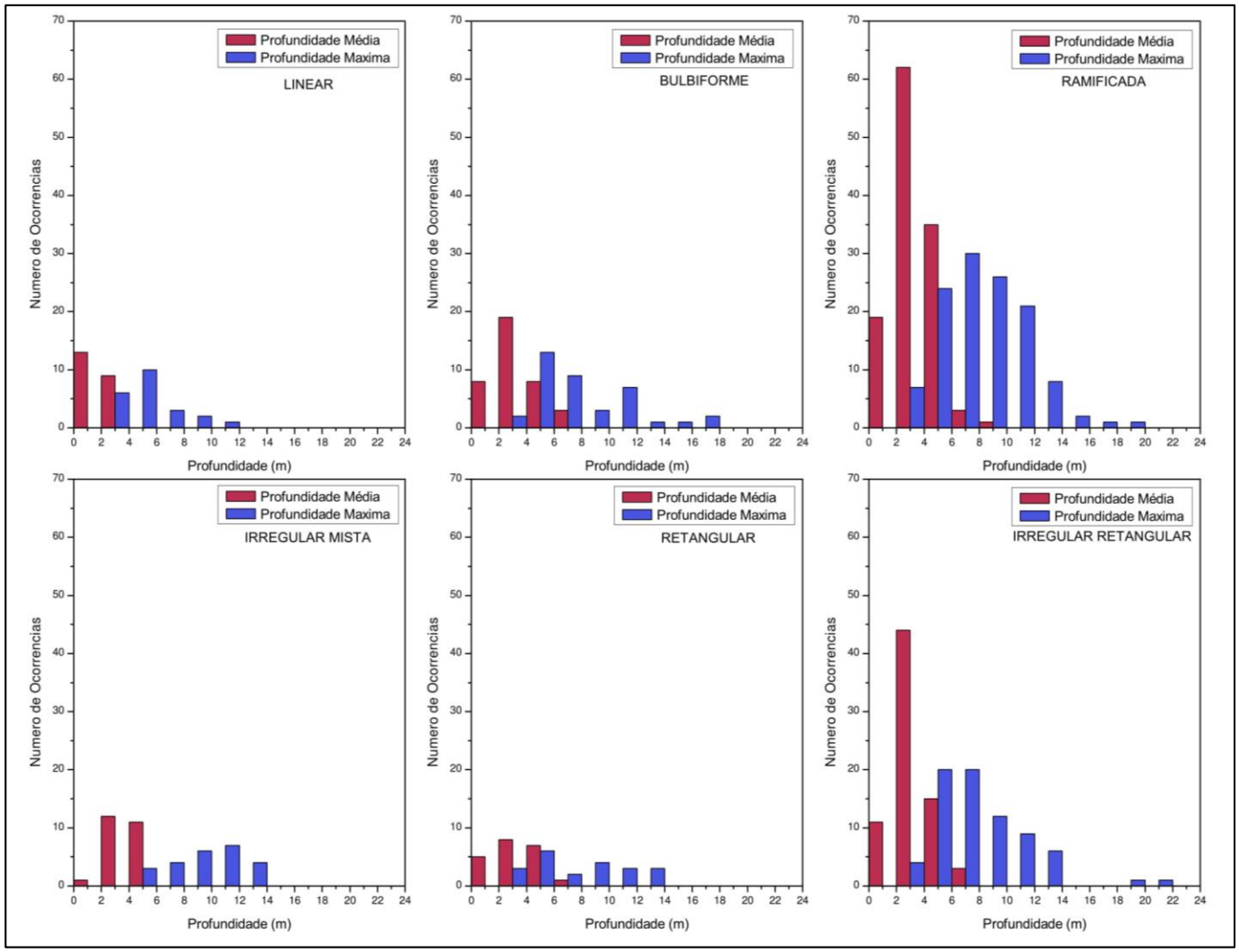
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

O valores referentes ao volume de material erodido apresentam um claro padrão de ocorrência entre os valores 0 e 250 metros, existindo uma variação nas classes Irregular Mista, Retangular e Irregular Retangular.

Em relação a todos os dados métricos das voçorocas descritos nesse item, as formas Irregular Mista e Ramificadas apresentaram os maiores valores se comparado as outras classes. Esses valores expressam a condição morfodinâmica do relevo e as voçorocas fazem parte deste contexto que, em termos gerais, apresenta características de relevo com colinas de baixa amplitude derivadas de material sedimentar em condição de boda de bacia sedimentar. Em escala de detalhe os processos atuantes expressam vertentes de base côncava, retilínea e topo convexo em condição não muito acentuada.

Os valores de profundidade média são menores nas classes de voçorocas na modalidade Linear (2,09m), Irregular Retangular (3,25m) e Bulbiforme (3,27m), nas formas Retangular, Ramificada apresentam uma profundidade de 3,40 m, a forma Irregular Mista apresenta a maior profundidade média com 3,96m (Figura 44).

Figura 44 - Número de ocorrência das modalidades de voçorocas em relação a suas Profundidades.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Em todas as Sub-bacias da área a forma Ramificada se destaca com a maior quantidade de voçorocas com profundidade média de 8,8m, seguida do formato Irregular Retangular. O comprimento médio das voçorocas Ramificas e Irregulares Mistas se aproxima de 1.000m. As formas Retangular, Irregular Mista e Irregular Retangular apresentam as maiores larguras, ou seja, atingem índices entre 84 e 107 metros.

A forma Retangular mantem 81% de suas incisões conectadas ao sistema de drenagem, mantendo menor amplitude altimétrica (61m), com altos índices de circularidade (0,362) e maior largura (106,64m), menor comprimento (548m) e maior profundidade (3,40).

Nessa forma o número de lineamentos é elevado (1.269), porém a média de lineamentos por voçorocas é baixo (17,38). Da mesma forma a soma dos comprimentos é elevada (79.236), sendo estes comprimentos mais longos, no entanto quando se compara com a área o valor é mais baixo (16,15), pois é visualmente difícil distinguir os canais, já que 86% das incisões presentes nessa forma encontra-se em desenvolvimento estável.

As formas Ramificada e Irregular Mista possuem 91% das incisões integradas aos canais de drenagem, com grandes áreas (90.055m² e 110.756m²) e perímetros (3.672m e 3.275m), mantem maiores amplitudes e por isso os maiores comprimentos. Estão com os maiores valores de volumes (299.112m³ e 412.315m³), maior profundidade para a forma Irregular Mista (3,96m) e média profundidade para a Ramificada (3,40), pois está última apresenta menores larguras (55,9m) em relação a Irregular mista (84,3m). Ambas apresentam índices de circularidade mais baixos (0,086 e 0,131).

A Ramificada apresenta maior número de lineamentos por voçoroca (26,83) e a maior soma dos comprimentos (220.031m). As formas Linear e Bulbiforme representam 72% integradas e 28% conectadas a rede de drenagem, possuem respectivamente menores áreas (29.497m² e 53.552m²), mantem uma amplitude de ocorrência de 70 metros, índice de circularidade médio (0,165 e 0,168). A largura se mantem em valores médios (67,8m) para a Bulbiforme e mínima (45,2m) para a Linear. Ambas mantem profundidades baixas (2,09m e 3,27m) e volume (62.810m³ e 174.411m³), a Linear mantem comprimento baixo (579m), já a Bulbiforme possui comprimento médio (653m). Possuem poucos lineamentos (335 e 722), porém a

relação é elevada entre os lineamentos por área (0,52 e 0,35), assim como os comprimentos por área (23,58m e 20,51m).

A forma Irregular Retangular mantem 38% conectadas e 62% integradas a rede de drenagem, com valores elevados de Índice de circularidade (0,192) e largura (75,5m), com amplitude altimétrica de 75m. Possui área média (67.228m²), poucos lineamentos (367) e a soma dos comprimentos baixa (19.906m), com lineamentos mais curtos.

6.2 ANÁLISE DOS LINEAMENTOS

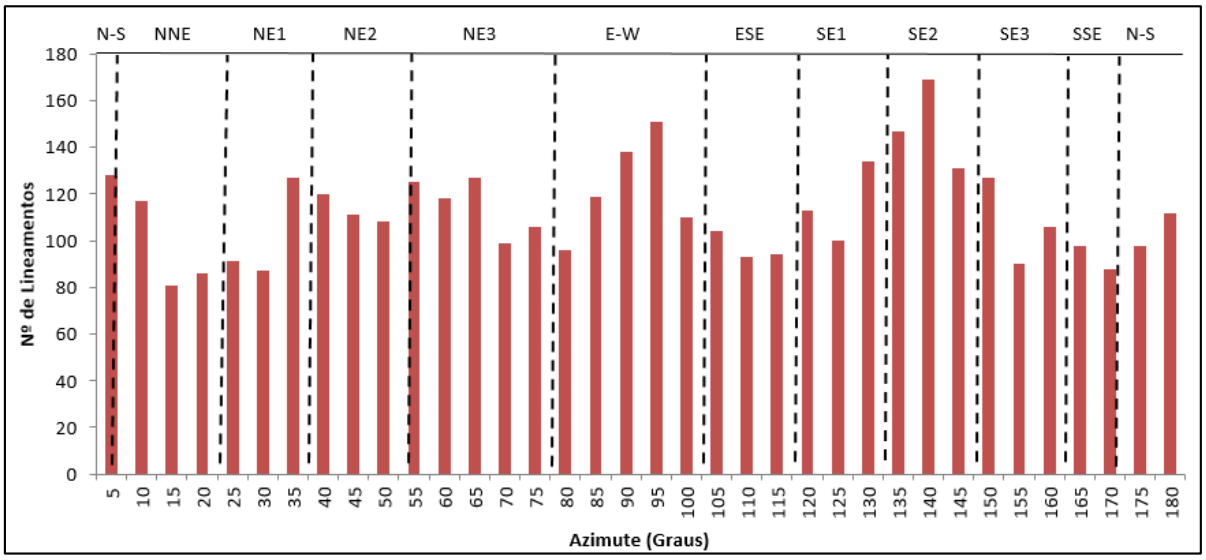
6.2.1 Análise dos dados gerais da área de estudo

No estado frágil, as rochas submetidas a um campo tensional sofrem uma quebra de coesão, o que resulta na formação de estruturas deformacionais como as fraturas por exemplo. As estruturas frágeis desenvolvidas em maciços rochosos correspondem principalmente às fraturas (juntas e falhas), mas também às brechas de falha e às microfraturas.

Partindo do pressuposto que os condicionantes estruturais tem participação efetiva na gênese e evolução das voçorocas, adotou-se uma rotina de trabalho voltada para a extração dos lineamentos morfoestruturais da área de estudo. Dessa forma, os lineamentos foram extraídos através da interpretação visual das imagens de satélite *Google Earth*, totalizando 4.089 feições.

A análise do histograma de frequência (Gráfico 5) permite verificar a combinação entre o sentido de orientação dos lineamentos, dada pelo seu azimute, com o número repetições de cada direção. Como resultado desta correlação os lineamentos foram separados em 11 grupos que são: N-S; NNE; NE1; NE2; NE3; NE4; NE5; E-W; ESE; SE; SSE.

Gráfico 5 - Histograma de frequência representando as direções dos lineamentos da área de estudo.



Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

Os lineamentos encontrados na área de estudo foram separados nas seguintes famílias:

Família 1: N-S, se distribui em uma faixa de 7,5º entre os azimutes geográficos de 172,5º - 180º e 0-7,5 º com 355 medidas;

Família 2: NNE, se distribui em uma faixa de 17,5º entre os azimutes geográficos de 7,5 ° à 25° com 316 medidas;

Família 3: NE1, se distribui em um intervalo de 15º entre os azimutes geográficos de 25º - 40º com 334 medidas;

Família 4: NE2 se distribui em uma *faixa* de 16º entre os azimutes geográficos de 40º-56º com 352 medidas;

Família 5: NE3 se distribui em uma faixa de 24º entre os azimutes geográficos de 56º-80º com 528 medidas, segundo maior número de medidas;

Família 6: E-W é a família que apresenta maior número de medidas, se distribui em um intervalo de 25º, entre os azimutes geográficos de 80º- 105º com 622 medidas.

Família 7: ESE, se distribui em uma faixa de 15º entre os azimutes geográficos de 105º-120º com 300 medidas.

Família 8: SE1, se distribui em um intervalo de 15º entre os azimutes geográficos de 120º-135º com 381 medidas.

Família 9: SE2 é a família que apresenta a maior frequência, se distribui em um intervalo de 15 º entre os azimutes geográficos de 135º-150º com 427 medidas.

Família 10: SE3 se distribui em uma faixa de 15º entre os azimutes geográficos de 150º -165º com 294 medidas.

Família 11: SSE se distribui em uma faixa de 7,5º entre os azimutes geográficos de 165º - 172,5º com 130 medidas.

A Família 9 apresenta a maior frequência relacionada ao azimute 140º (família SE2), seguida das famílias 6 (EW), 5 (NE3), 3 (NE1) e 1 (NS). Vale lembrar que a faixa da Família 9 é menor (15º), sendo que os das famílias 6 e 5 é de 25º e 24º respectivamente.

A Família 9 apresenta a maior frequência relacionada ao azimute 140º (família SE2), seguida das famílias 6 (EW), 5 (NE3), 3 (NE1) e 1 (NS). Vale lembrar que a faixa da Família 9 é menor (15º), sendo que os das famílias 6 e 5 é de 25º e 24º respectivamente.

Os resultados obtidos no tratamento dos lineamentos tipo 2 encontram-se resumidos na Tabela 8. Analisando o número de lineamentos por Família, verifica-se que na Família 6 – E-W (80º- 105º), existe a maior concentração de lineamentos (622), presentes nos rios de primeira e segunda ordem em todas as sub-bacias que compõe a área de estudo, mais concentradas na Sub-bacia Arroio Areal Grande. Os lineamentos pertencentes a família NE3, apresentam a segunda maior concentração entre todas as famílias, condicionam os canais de primeira e segunda ordem, principalmente das sub-bacias do Arroio Areal Grande e Sanga Areal da Limeira.

A Família 9 – SE2 (135º-150º) apresenta 427 unidades e estão relacionadas com a direção dos canais de maior ordem (3ª, 4ª e 5ª) das quatro sub-bacias, concentrados preferencialmente nos topos de colinas, nas classes hipsométricas acima de 140m.

Tabela 8 - Família, orientação, número e comprimento médio dos lineamentos da área de estudo.

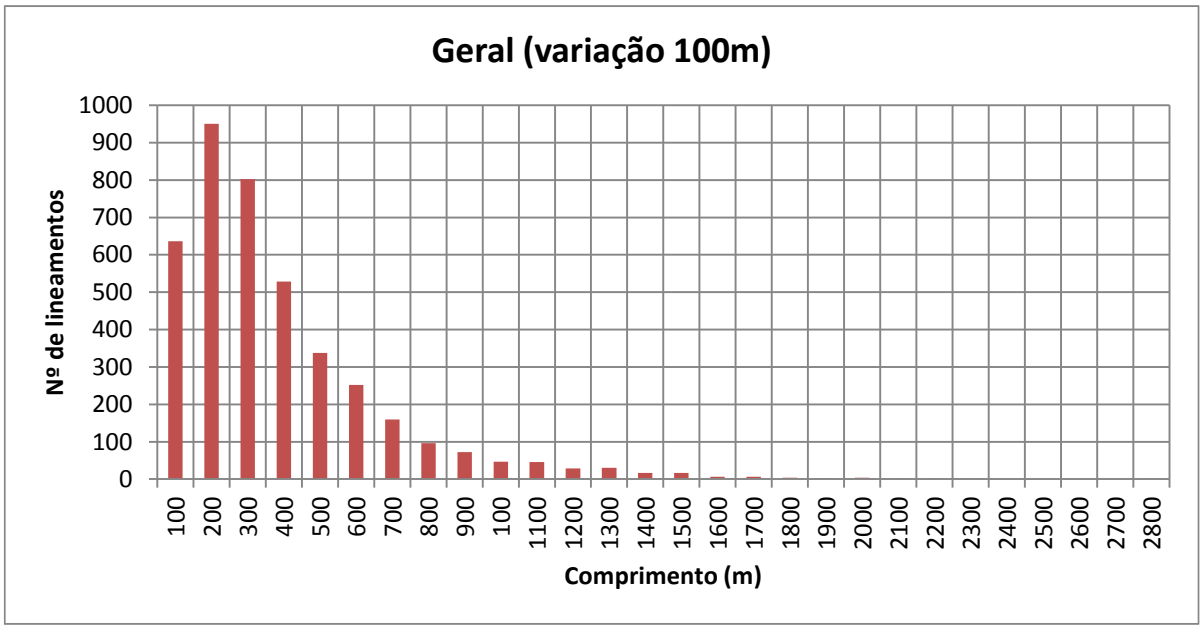
Família		Direção	Nº de Lineamentos	Comprimento médio (m)
F1	N-S	172,5º - 180º 0º - 7,5º	355	709,2
F2	NNE	7,5º – 25º	316	354
F3	NE1	25º - 40º	334	325
F4	NE2	40º-56º	352	327,7
F5	NE3	56º-80º	528	300,2
F6	EW	80º- 105º	622	302,2
F7	ESE	105º-120º	300	327,9
F8	SE1	120º-135º	381	345,5
F9	SE2	135º-150º	427	358,1
F10	SE3	150º -165º	294	351,8
F11	SSE	165º - 172,5º	130	386

Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

De forma geral, observa-se nos dados que as onze Famílias apresentam valores de comprimento médio próximos, variando de 300,2 m à 386 m, destacando-se a Família 1 (azimute 172,5º - 180º e 0º - 7,5º) com comprimento médio de 709,2 m, mais expressivo que as demais, representando os rios tributários do Ibicuí, que correm no sentido de sul para norte.

Foi construído um gráfico de barra com intervalo de 100m de comprimento para ilustrar a relação entre o número de lineamentos e seus comprimentos (Gráfico 6). Pode-se observar que predominam os comprimentos em torno de 200 a 300m.

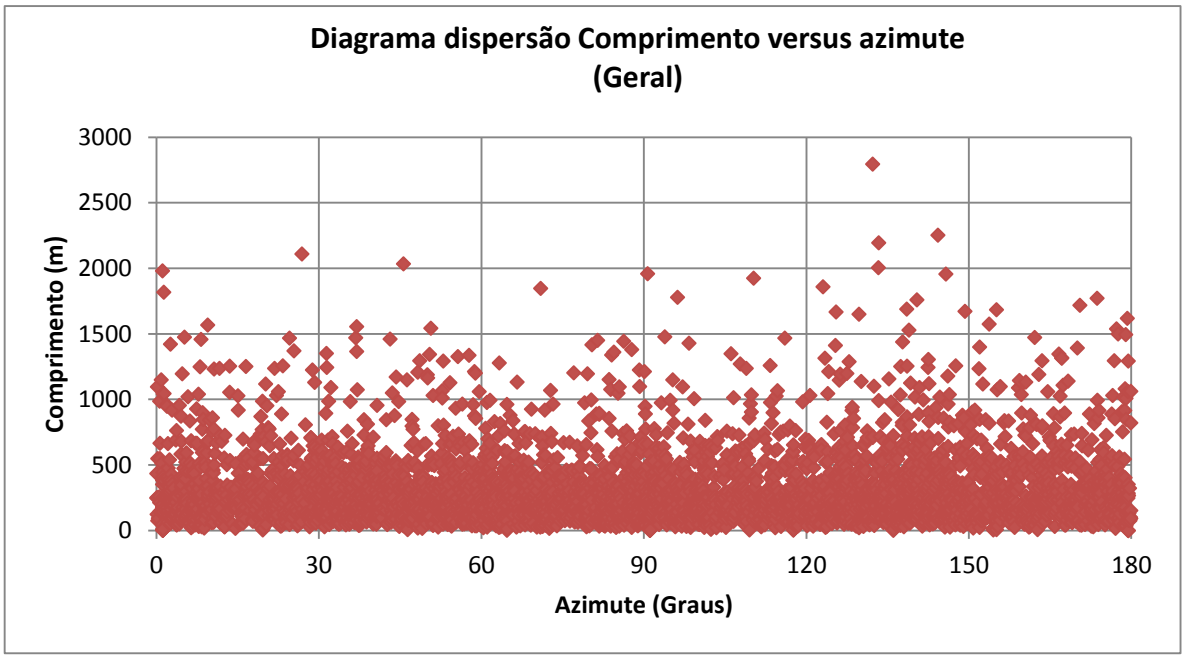
Gráfico 6 – Histograma de frequência dos comprimentos dos lineamentos da área de estudo.



Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

Além deste, foi construído um diagrama de dispersão do comprimento versus azimute para os dados da área como um todo, procurando identificar quais os azimutes dos lineamentos que apresentam os maiores comprimentos (Gráfico 7).

Gráfico 7- Diagrama de dispersão do comprimento versus azimute da área de estudo.



Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

Avaliando o grafico é possivel afirmar que a grande maioria dos lineamentos (de zero a 180º) possuem comprimentos até 500m. As maiores dispersões encontram-se nas Familias 9 e 10, onde os comprimentos estão acima de 1.000m atingindo valores acima de 2.500m. As Familias NS (172,5º - 180º e 0º - 7,5º) e EW (80º- 105º) também mostram comprimentos mais elevados (em torno de 2.000m).

A principal eixo de drenagem da área de estudo corresponde ao rio Ibicuí, está encaixado em um conjunto de falhas de direção 80º-105º, coincidindo com o grupo E-W. As falhas nessa direção orientam os cursos d'água de 1ª, 2ª e 3ª ordem presentes nas sub-bacias, originando vales entalhados e não entalhados em alto e médio curso em superfície de dissecação. Os tributários da margem esquerda do rio Ibicuí, mantém os canais principais com hierarquia de 4ª e 5ª ordem, e permanecem em um conjunto de falhas de direção 80º-105º, coincidindo com o grupo E-W.

O grupo SE com azimute de 117,5º-152,5º, apresenta o maior número de lineamentos, 23,2% do total da bacia. As falhas e fraturas pertencentes ao grupo SE (117,5º-152,5º) condicionam o curso dos principais tributários do rio Guassupi, entre eles Lajeado da Porteira, Lajedo Negrinho, Lajeado Guassupizinho e Lajeado Taquarembó. SSE (152,5º-170º). O grupo SE, está associado aos cursos d'água de primeira e segunda ordem, que tem aspecto mais retilíneo, por esse motivo apresenta o maior comprimento médio entre todos os grupos.

6.2.2 Lineamentos extraídos no interior das voçorocas e sua relação com as formas

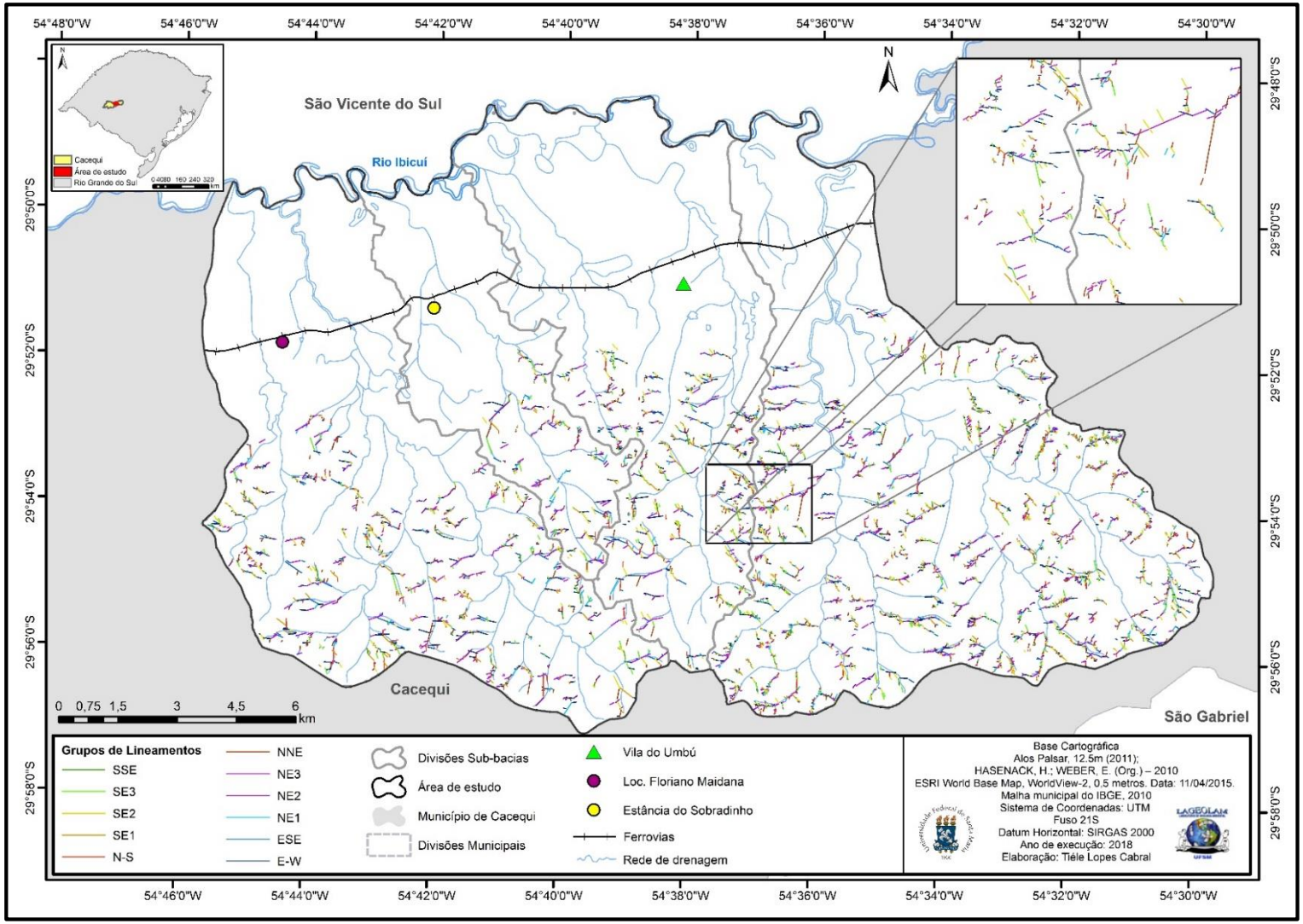
Apenas realizando uma análise visual é possível constatar que existe grande correlação entre os lineamentos morfoestruturais extraídos na área de estudo com os das voçorocas. O mapeamento dos lineamentos, em nível de sub-bacia, foi realizado em uma escala menor, voltado para a extração de estruturas de grande porte procurando compreender o comportamento destas em relação a hidrografia da área. Este produto portanto, não apresenta uma escala adequada para verificar com maior precisão a relação entre as voçorocas e os lineamentos. Para analisar está correlação com mais detalhe, foram extraídas as direções dos lineamentos contidos no interior de cada voçoroca mapeada em uma escala de maior detalhe.

Os lineamentos extraídos no interior das voçorocas foram enquadrados nas mesmas famílias dos lineamentos que compõem a área de estudo e que foram

previamente definidos. Este procedimento justifica-se, para que se realize a comparação das direções entre os lineamentos mais longos (extraídos nas sub-bacias) e os de menor comprimento, extraídos no interior das voçorocas.

Para as voçorocas foram extraídos 6.572 lineamentos estruturais, ilustradas no mapa da Figura 45, considerando que a delimitação (comprimento) foi realizada diretamente sobre os polígonos formados pelas voçorocas.

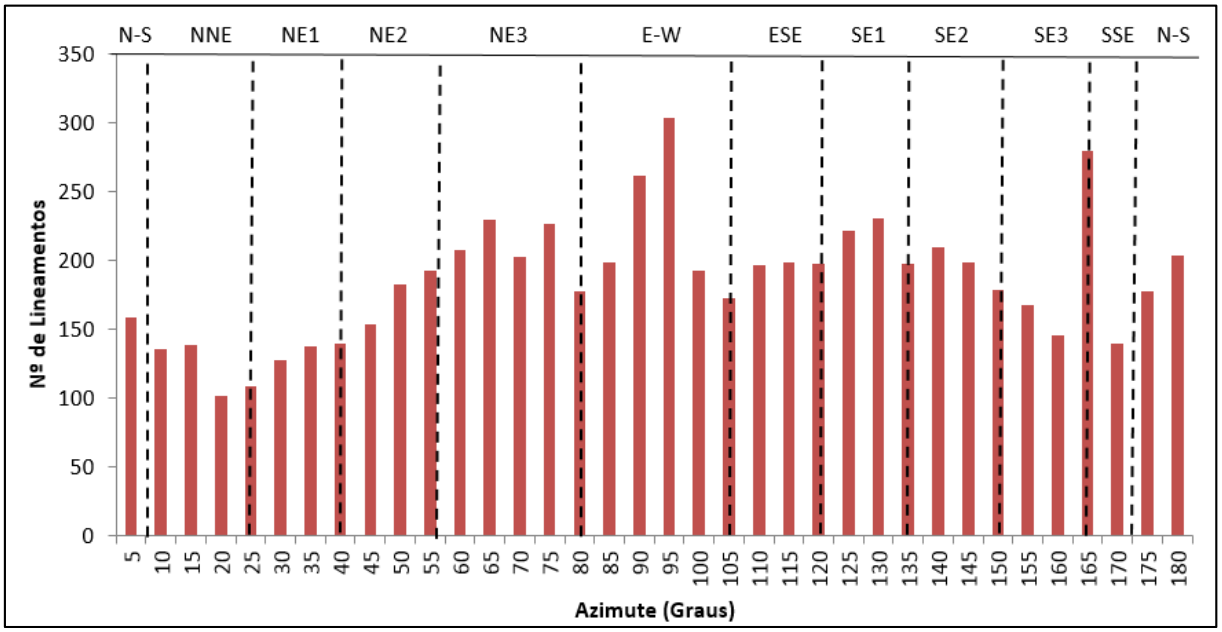
Figura 45 – Distribuição dos Lineamentos estruturais do interior das voçorocas.



Fonte: Elaborado por A. V. Nummer e T. L. Cabral (2018).

O histograma do Gráfico 8 apresenta a relação entre o número de lineamentos e seus comprimentos com suas respectivas famílias.

Gráfico 8 - Histograma da divisão em classes dos grupos de lineamentos extraídos no interior das voçorocas.



Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

A Tabela 9 mostra o número de lineamentos por família no interior das voçorocas e seu comprimento médio.

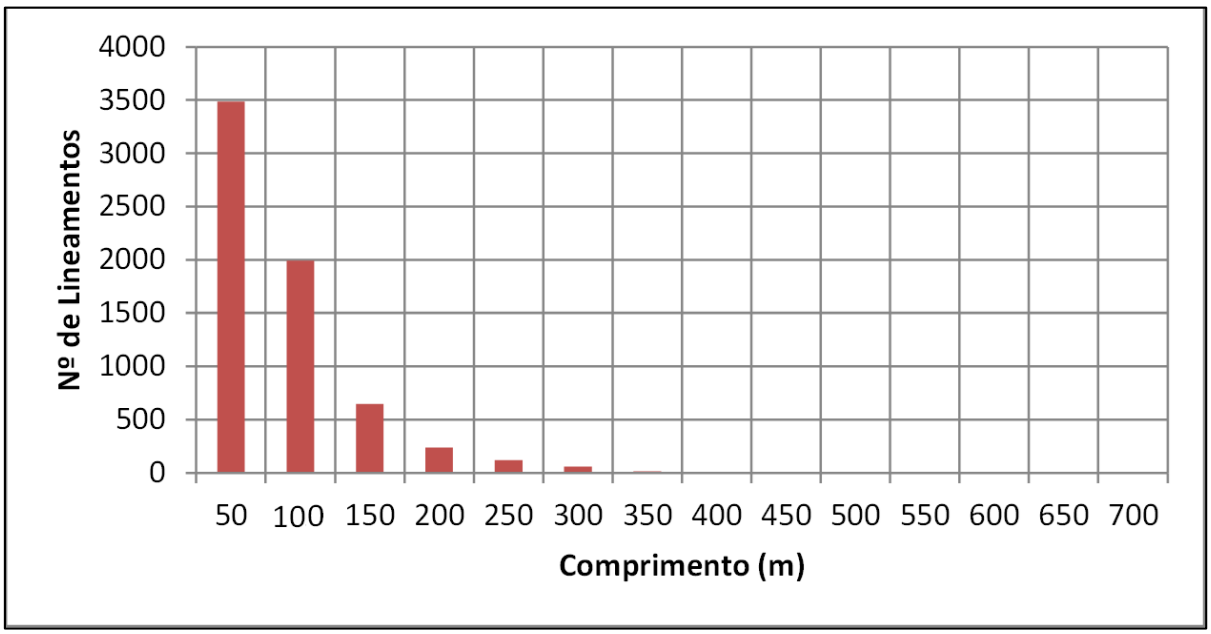
Para compreender a relação entre o comprimento e o número de lineamentos foi construído um histograma de barras com intervalos de comprimentos de 50m (Gráfico 9). Onde percebe-se que, a grande maioria dos lineamentos são curtos (em torno de 50m a 100m).

Tabela 9 - Orientação, número, comprimento médio dos grupos de lineamentos da área de estudo.

Grupos		Direção	Nº de Lineamentos	Comprimento médio (m)
1	N-S	172,5º - 180º e 0º - 7,5º	522	119,5
2	NNE	7,5º – 25º	420	64,5
3	NE1	25º - 40º	408	67,1
4	NE2	40º-56º	565	67,8
5	NE3	56º-80º	1007	65,5
6	EW	80º- 105º	1131	65,5
7	ESE	105º-120º	594	67,9
8	SE1	120º-135º	561	60,0
9	SE2	135º-150º	588	60,7
10	SE3	150º -165º	554	58,5
11	SSE	165º - 172,5º	225	59,3

Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

Gráfico 9 – Histograma de frequência relacionado aos comprimentos.



Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

Avaliando os dados pode-se descrever as famílias de lineamentos para o interior das voçorocas a saber:

Família 1: N-S, com um intervalo de 7,5º entre os azimutes geográficos de 172,5º - 180º e 0-7,5 º com 522 medidas e comprimento médio de 119,5m – o maior valor entre as famílias;

Família 2: NNE, em um intervalo de 17,5º entre os azimutes geográficos de 7,5 ° à 25° com 420 medidas e comprimento médio de 64,5m;

Família 3: NE1, em um intervalo de 15º entre os azimutes geográficos de 25º - 40º com 408 medidas e comprimento médio de 67,1m;

Família 4: NE2 em um intervalo de 16º entre os azimutes geográficos de 40º-56º com 565 medidas e comprimento médio de 67,8m;

Família 5: NE3 em um intervalo de 24º entre os azimutes geográficos de 56º-80º com 1007 medidas, segundo maior número de medidas, e comprimento médio de 65,5m;

Família 6: E-W é a família que apresenta maior número de medidas, se distribui em um intervalo de 25º, entre os azimutes geográficos de 80º- 105º com 1131 medidas, e comprimento médio de 65,5m;

Família 7: ESE, se distribui em uma faixa de 15º entre os azimutes geográficos de 105º-120º com 594 medidas, e comprimento médio de 67,9m;

Família 8: SE1, se distribui em um intervalo de 15º entre os azimutes geográficos de 120º-135º com 561 medidas, e comprimento médio de 60,0m;

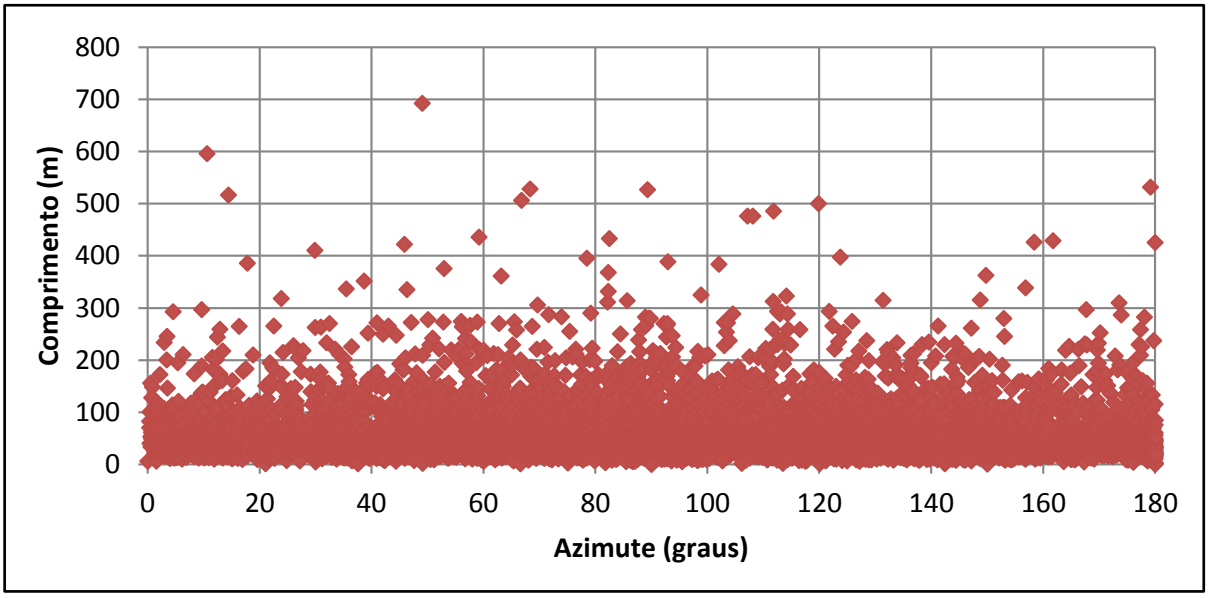
Família 9:SE2 é a família que apresenta a maior frequência, se distribui em um intervalo de 15º entre os azimutes geográficos de 135º-150º com 588 medidas, e comprimento médio de 60,7m;

Família 10: SE3 se distribui em uma faixa de 15º entre os azimutes geográficos de 150º -165º com 554 medidas, e comprimento médio de 58,5m;

Família 11:SSE se distribui em um intervalo de 7,5º entre os azimutes geográficos de 165º - 172,5º com 225 medidas, com menor número de medidas, e comprimento médio de 59,3m.

No diagrama de dispersão de comprimento e azimute (Gráfico 10) é possível verificar quais são as orientações dos lineamentos que apresentam os maiores comprimentos.

Gráfico 10 – Diagrama de dispersão comprimento e azimute no interior das voçorocas.



Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

O Grupo 1, N-S apresenta o maior comprimento médio de lineamentos (119,5) assim como já foi averiguado para as sub-bacias. No Grupos 6 - E-W (80º- 105º) e 5 – NE3 (56º-80º), ocorrem a maior concentração de lineamentos (1.131 e 1007 respectivamente) com comprimentos de aproximadamente 65m o que se repetiu na análise já realizada paras as sub-bacias.

Foram construídos diagramas de rosetas e os histogramas (Figuras 46 e 47) das diferentes formas das voçorocas, bem como histogramas de comprimentos e diagramas de dispersão do comprimento e azimute, pode-se afirmar que:

Forma Linear – nessa forma de voçoroca foram extraídos 335 lineamentos. O comprimento dos lineamentos varia entre 2,79m a 288,74m, somando um total de 15.285,2m. A maioria dos lineamentos (68,7%) mantem valores em torno de 50m. Comprimentos em torno de 100m correspondem a 15,5%, sendo os demais valores (15,8%) até 288,74m. Predominam as direções Leste-Oeste (família 6), Nordeste 3 (família 5), Leste-Sudeste (família 7) e com menor representatividade NS (família 1). Em relação ao comprimento e azimute, observa-se que lineamentos de até 50m ocorrem nas direções de 0° a 180°. Os lineamentos mais extensos (até 300m) correspondem as famílias E-SE, NE2 e SE2. Os lineamentos com comprimentos até 200m, correspondem as famílias E-W, E-SE (ambas em maior quantidade) e N-S.

Forma Bulbiforme – nessa forma de voçoroca foram extraídos 722 lineamentos. O comprimento dos lineamentos varia entre 0,57m a 422,34m, somando

um total de 41.711,6m. A maioria dos lineamentos (59,6%) são curtos em torno de 50m. Comprimentos em torno de 100m correspondem a 27,7%, sendo os demais valores (12,7%) acima de 100m. Predominam as direções EW (família 6), NE3 (família 5), SE2 (família 9) e com menor representatividade NNE (família 2). Em relação ao comprimento e azimute, observa-se que lineamentos acima de 200m, há uma grande concentração de lineamentos das famílias NE1 e NE2, sendo nesta última foram encontrados lineamentos acima de 400m. Entre 200m e 250m, têm-se as famílias SE1, NE3 e SE3. Nesta forma, todas as direções (0° a 180°) têm lineamentos de até 50m.

Forma Ramificada – nessa forma de voçoroca foram extraídos 3.219 lineamentos. O comprimento dos lineamentos varia entre 0,34m a 692,47m (valor mínimo e máximo encontrado para todas as formas), somando um total de 22.031,2m. A maioria dos lineamentos (48,15%) são curtos em torno de 50m. Comprimentos em torno de 100m correspondem a 31%, 12% corresponde a 150m, sendo os demais valores (8,85%) acima de 150m. Predominam as direções EW (família 6), SE1 (família 8) e NS (família 1). Nesta forma, todas as direções (0° a 180º) tem ao menos 50 lineamentos, o que não ocorre nas demais formas. Em relação ao comprimento e azimute, observa-se que lineamentos entre 300m e 400m pertencem as famílias NE1, NE2, SE3, EW e ESE. Entre de 400m até 600m, NE3, NS, NE2, EW e ESE, estas três últimas correspondem as famílias de lineamentos mais expressivos.

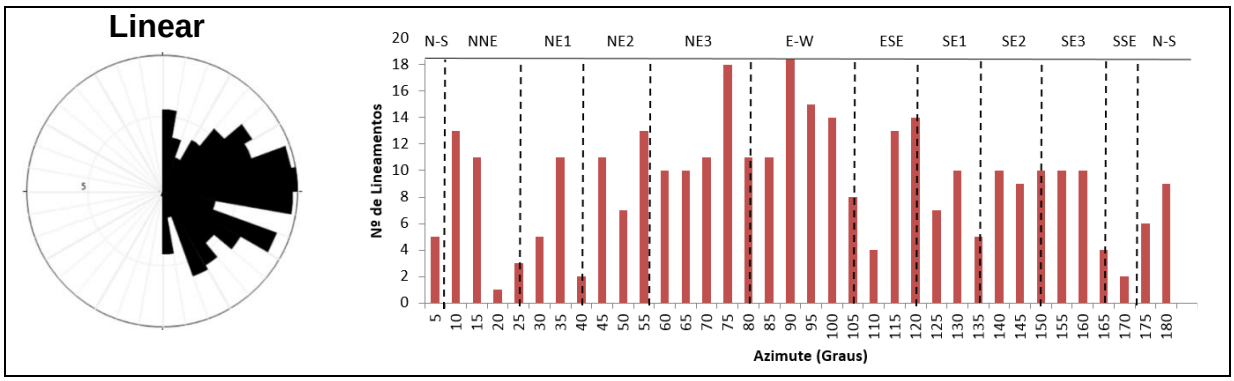
Forma Irregular Mista – nessa forma de voçoroca foram extraídos 669 lineamentos. O comprimento dos lineamentos varia entre 1,28m a 375,49m, somando um total de 42.765,5m. A maioria dos lineamentos (49,3%) são curtos em torno de 50m. Comprimentos em torno de 100m correspondem a 35,8%, sendo os demais valores (14,8%) acima de 100m. Predominam as direções ESE (família 7) juntamente com a SE2 (família 9), seguida da EW (família 6), e NS (família 1). Em relação ao comprimento e azimute, observa-se que lineamentos entre 250m a 300m, encontram-se as famílias NE2, NE3 e EW. Comprimentos maiores que 300m, encontram-se as famílias NE3, EW, SE3 e NS. Sendo que, os maiores comprimentos pertencem, predominante as famílias NE3 e EW.

Forma Irregular Retangular – nessa forma de voçoroca foram extraídos 1.269 lineamentos. O comprimento dos lineamentos varia entre 0,29m (sendo este o menor valor entre os valores mínimos) a 516,76m, somando um total de 79.236,83m. A maioria dos lineamentos (55,2%) são curtos em torno de 50m. Comprimentos em torno

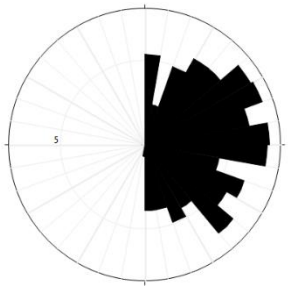
de 100m correspondem a 27,6%, 8,7% corresponde a 150m, sendo os demais valores (8,4%) acima de 150m. Predominam as direções EW (família 6), NE3 (família 5), ESE (família 7). Em menor número, a família 1 (NS), família 2 (NNE) e a família 3 (NE1). Em relação ao comprimento e azimute, observa-se que lineamentos até 100m estão distribuídos em todas as direções. Entre 200m e 300m, concentram-se as direções NE1, SE1, SE2, NS, NE3 e EW, sendo as duas últimas com maior número de lineamentos. Acima de 400m, têm-se as famílias NNE, NE3 e ESE.

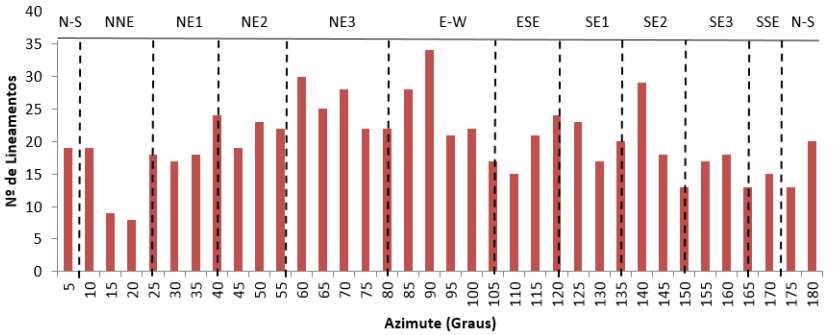
Forma Retangular – nessa forma de voçoroca foram extraídos 337 lineamentos. O comprimento dos lineamentos varia entre 3,42m (sendo este o maior valor entre os valores mínimos) a 432,89m, somando um total de 19,906,75m. A maioria dos lineamentos (68,2%) são curtos em torno de 50m. Comprimentos em torno de 100m correspondem a 29,6%, sendo os demais valores (2%) acima de 100m. Esta forma se destaca por apresentar 98% dos lineamentos com comprimentos que não ultrapassam 100m. Predominam as direções EW (família 6), SE1 (família 8), NE3 (família 5), e SE3 (família 4). Em relação ao comprimento e azimute, observa-se que lineamentos até 50m distribui-se em todas as direções. Os comprimentos de 100m a 200m concentram-se nas direções EW (preferencialmente), SE1, SE2, SE3 e NE2, esta última em menor quantidade. Entre 200m e 300m, NE3, ESE, SE2 e NS. E acima de 400m, na direção EW.

Figura 46 - Diagramas de rosetas e histogramas das diferentes formas de voçorocas.

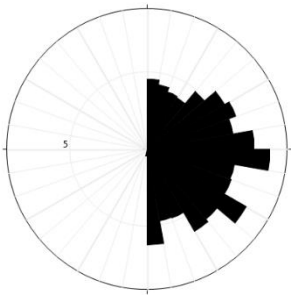


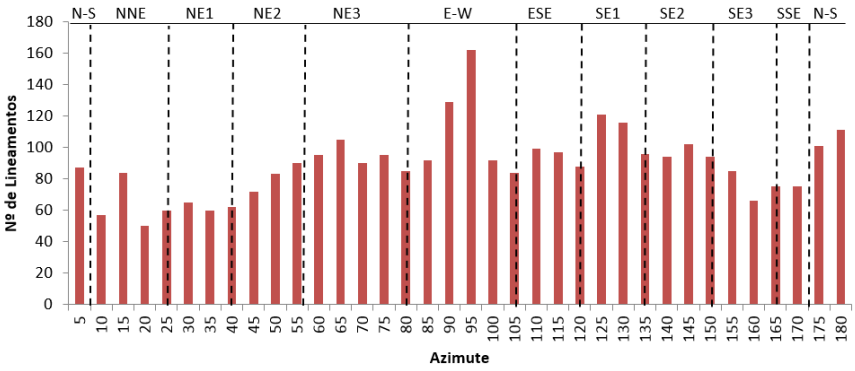
Bulbiforme



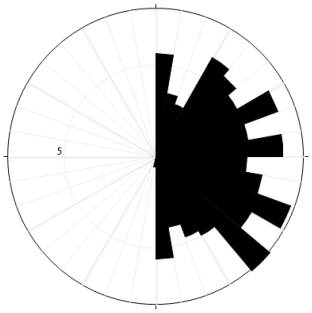


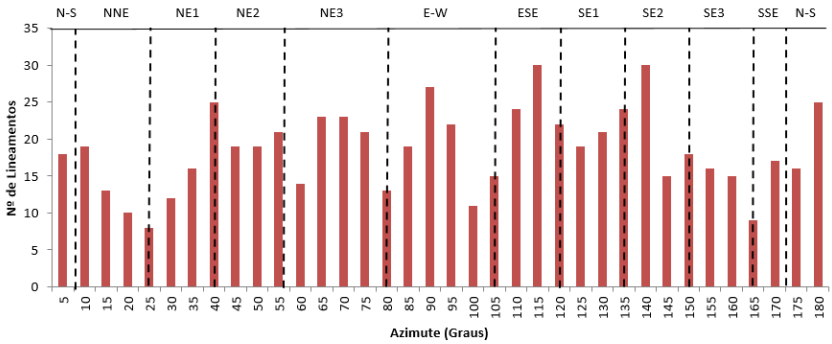
Ramificada



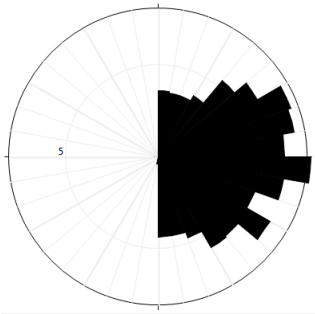


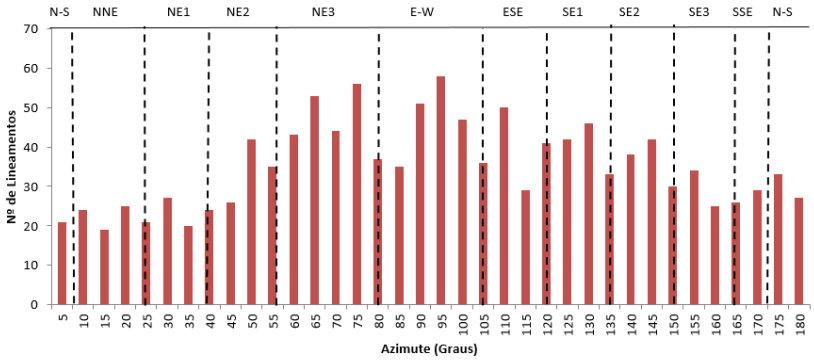
Irregular mista

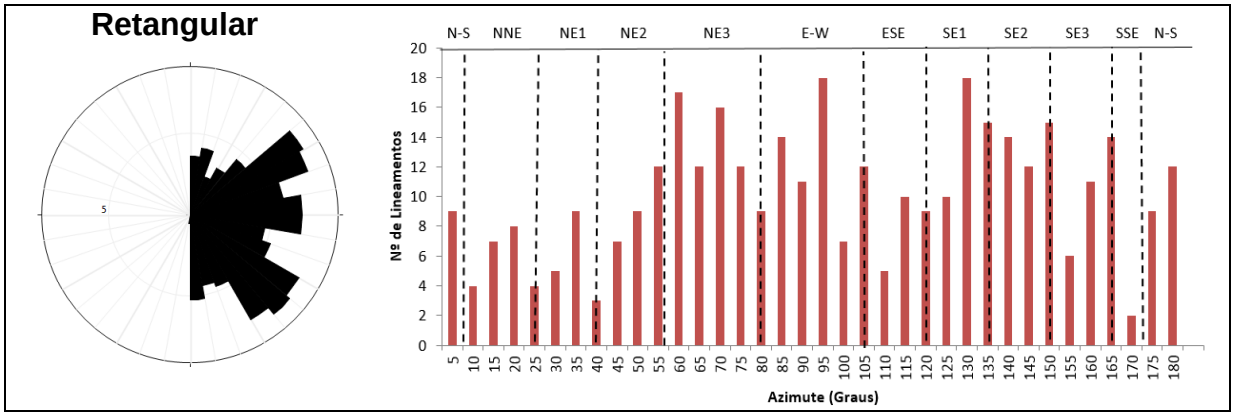




Irregular retangular

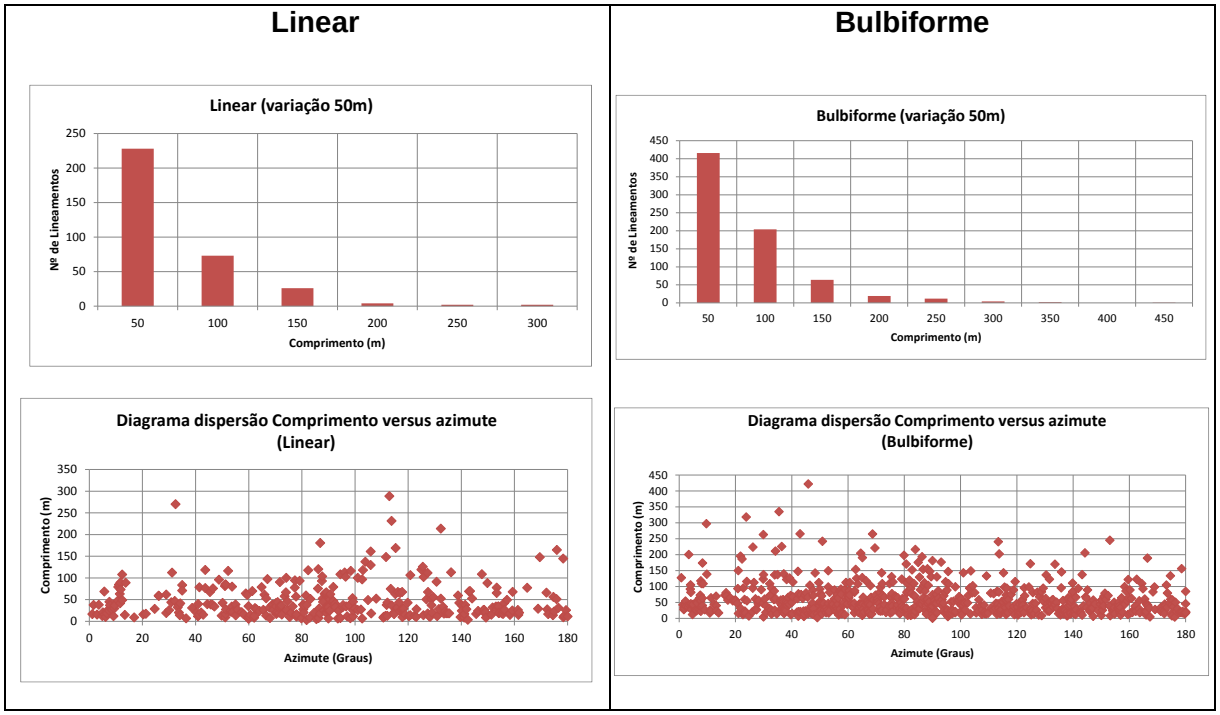


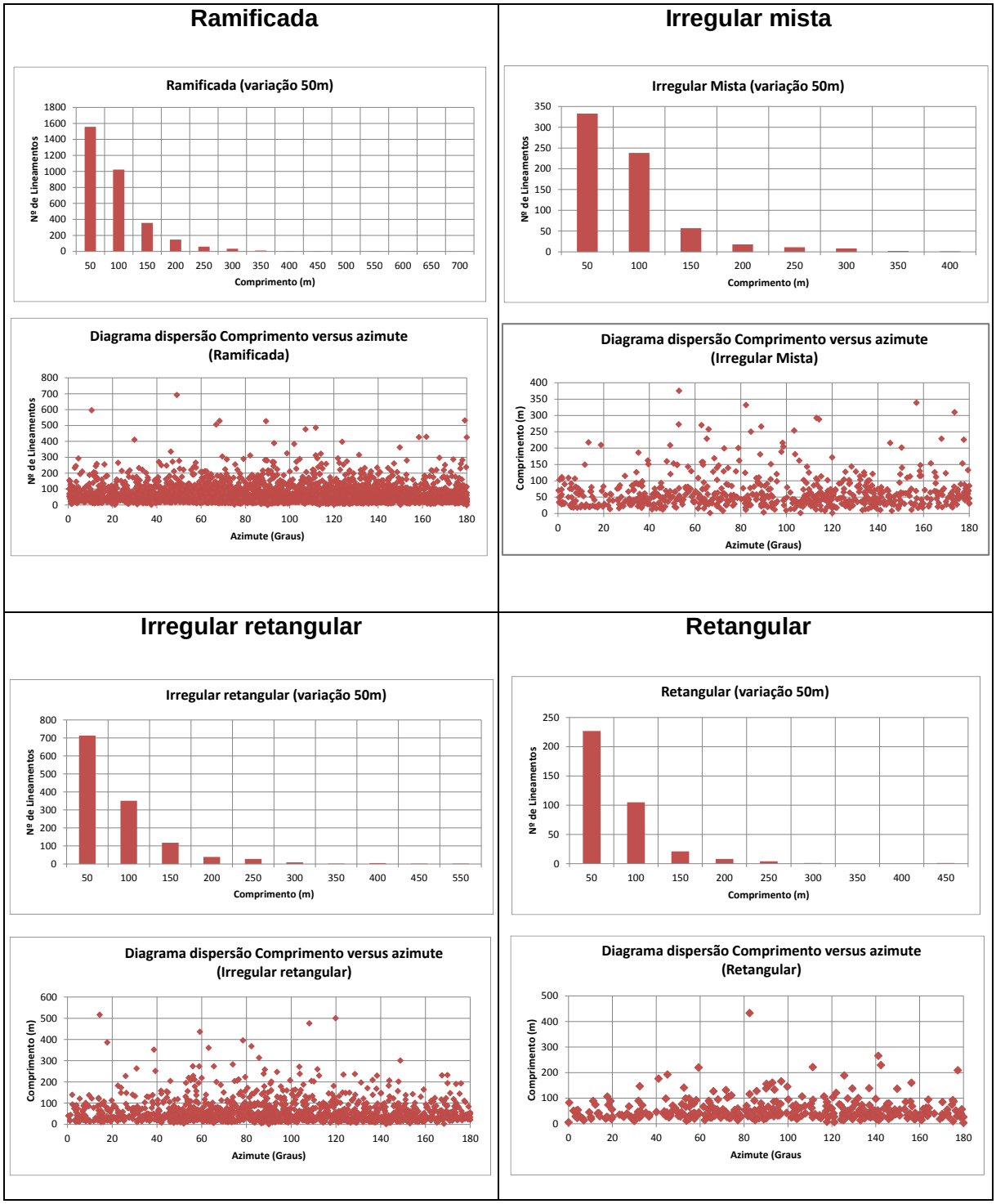




Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

Figura 47 - Histogramas de comprimentos dos lineamentos e diagramas de dispersão do comprimento x azimute.





Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

Com base somente na direção e comprimento dos lineamentos (Tabela 10) é possível fazer as seguintes relações com a forma das voçorocas:

Linear – mantem a direção NE3 responsável pela direção principal e as direções E-W e SSE sendo as direções subsidiárias. Os maiores comprimentos de lineamentos nessa forma se encontram nas direções ESE, NE2 E SE2.

Bulbiforme – possui também a direção NE3 como responsável pela direção principal dos lineamentos e as direções E-W, SE2 e NNE como sendo as direções subsidiárias. Os maiores comprimentos de lineamentos nessa forma se encontram nas direções NE2 e NE1.

Ramificada – mantem um conjugado de estruturas entre as direções E-W e N-S que fornecem um padrão retangular entre as estruturas, as direções SE1 e NE3 são subsidiárias. Os maiores comprimentos de lineamentos nessa forma se encontram nas direções E-W, NE2 e ESE.

Irregular Mista – as direção principais são ESE e E-W, possui um conjugado de estruturas entre as direções E-W e N-S que fornecem um padrão retangular entre as estruturas, as direções SE2 e N-S se mantem como subsidiárias. Os maiores comprimentos de lineamentos nessa forma se restringem as direções NE3, E-W, SE3 e N-S.

Irregular Retangular – mantem uma direção preferencial no sentido NE3 um conjugado de estruturas entre as direções NE3 e SSE formando um padrão retangular entre as estruturas, as direções E-W e ESE constituem direções subsidiárias. Os maiores comprimentos de lineamentos encontram-se nas direções NE3, E-W, acima de 400m encontram-se nas direções NE3, NNE E ESE.

Retangular – retém um conjugado de estruturas entre as direções SE1 e NE3 que fornecem um padrão retangular entre as estruturas, a direção E-W se mantem como subsidiária. Os maiores comprimentos de lineamentos nessa forma se encontram nas direções E-W, NE3, ESE, N-S.

Tabela 10 - Relação entre o comprimento das formas de voçorocas e comprimento dos lineamentos.

Formas	Comprim. das voçorocas (m)	Comprim. médio dos lineam. (m)	Direção Principal	Direção Subsidiária	Direção com maiores comprimentos
Linear	579,04	45,63	NE3	E-W SSE	SSE, NE2, SE2
Bulbiforme	653,68	57,77	NE3	E-W SE2 NNE	NE2, NE1
Ramificada	925,04	68,36	E-W N-S	SE1 NE3	E-W, NE2, SSE
Irregular Mista	998,99	63,93	SSE E-W	SE2 N-S	NE3, E-W, SE3, N-S
Retangular	548,97	54,24	E-W	SE1 NE3	E-W, NE3 SSE, N-S
Irregular Retangular	675,13	62,44	NE3	E-W SSE	NE3, E-W **>400m** NE3, NNE, SSE

Fonte: Elaborado por A. V. Nummer e T. L. Cabral (2018).

A Tabela 11 apresenta s formas das voçorocas, a área ocupada, sua área medida e dados relacionados aos lineamentos como quantidade (nº), número para área e soma dos comprimentos, procurando avaliar se existe a relação entre estes aspectos. Na tabela, os valores foram agrupados em 3 níveis: Baixo – se remete a menores valores entre os dados, Moderado – refere-se a valores intermediários, que estão entre baixos e altos valores de índices e, Alto – representa os maiores valores de índices.

Tabela 11 - Relação entre as formas de voçorocas e lineamentos.

Formas	Nº de voçorocas	Área ocupada por forma (m²)	Área média por voçoroca (m²)	Número de Linea-mentos	Número de lineamentos por forma	Número de Lineamentos por área ocupada	Soma comprimentos dos lineamentos (m)	Soma dos comprimentos por área
Linear	22	648	29,45	335	15,22	0,52	15.285,02	23,58
Bulbiforme	38	2.034	53,53	722	19	0,35	41.711,6	20,51
Ramificada	120	10.806	90,05	3.219	26,83	0,29	220.031,2	20,36
Irregular Mista	24	2.658	110,75	669	27,87	0,25	42.769,5	16,09
Irreg. Retangular	73	1.432	68,19	367	12,71	0,18	19.906,75	13,9
Retangular	21	4.907	67,22	1.269	17,38	0,26	79.236,83	16,15

Valores Baixos Valores Moderados Valores Altos

Fonte: Elaborado por A. V. Nummer e T. L. Cabral (2018).

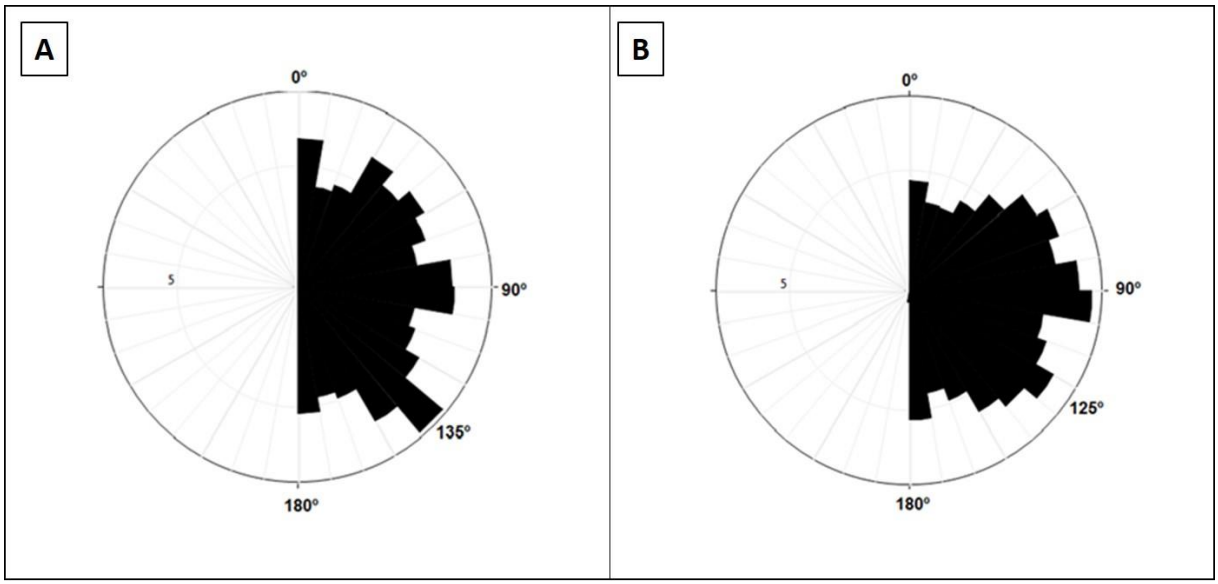
Os lineamentos referentes as formas lineares e bulbiformes tem um padrão semelhante, isto é, possuem respectivamente menor área (648 e 2.034m²) e valores elevados de número de lineamentos por área (0,52 e 0,35) e a soma dos lineamentos por área (23,58 e 20,51). Já a ramificada apresenta áreas médias maiores, um maior número de lineamentos (3.219) e soma de comprimentos também elevada (220.031,2), com lineamentos mais longos, porém, uma relação média entre estes índices reflexo da área maior (10.806m²), semelhante ao que ocorre com a voçorocas irregulares mista (índices menores que a ramificada).

As formas retangulares apresentam valores baixos de número de lineamentos por área (0,26) das voçorocas. Isto pode estar relacionado ao fato destas áreas estarem associadas a um período de estabilização não mostrando poucos canais de drenagem visíveis onde pudesse ser extraído os lineamentos.

A irregular retangular, embora tenha um número expressivos destas formas na área ela é a que apresenta os valores de área média (1.432m²), número (669) e soma de lineamentos (42.769,5) mais baixo e da mesma forma a relação com a área com valores também baixos (16,09).

Ao analisar os lineamentos das sub-bacias e das voçorocas (Figura 48), percebe-se o predomínio da direção E-W em todas as formas, o que significa a existência de uma forte influência dos arranjos regionais de fraturas ligadas aos principais sistemas de drenagens retilíneos e paralelos conforme Asmus (1978), como o Rio Ibicuí por exemplo.

Figura 48 – (A) Histograma circular de frequência dos lineamentos tipo 2 na área de estudo (4.089 medidas) e (B) orientação dos lineamentos extraídos no interior das voçorocas.



Fonte: Elaborado por A. V. Nummer, V. D. Guareschi e T. L. Cabral (2018).

Considerando um cenário de evolução das formas de voçorocas, pode-se pensar que:

- A forma Linear apresenta direção preferencial NE3 e secundariamente E-W, o que se repete nas voçorocas com forma Bulbiforme pelo fato de serem consideradas uma evolução da primeira.

- As formas Ramificada e Irregular Mista, são as mais ativas e apresentam lineamentos de direções preferenciais E-W e N-S, bem como SSE e NE3 que formam conjugados em padrão retangular (sempre associados as principais direções de reativação).

- As Irregular Retangular e Retangular, são formas que mostram algum estágio de estabilização com padrões de lineamentos E-W e SSE, com conjugados retangulares como NE3 e SSE para Irregular retangular e E-W e N-S ou SSE e NE3 para a forma Retangular.

6.3 RELAÇÃO ENTRE OS DADOS MORFOMÉTRICOS E AS FORMAS DAS VOÇOROCAS ATRAVÉS DO VALOR INFORMATIVO

A relação existente entre as formas das voçorocas e os atributos morfométricos voltados aos dados matriciais correspondentes a Declividade, Orientação de vertentes, Perfil e Plano curvatura das vertentes, hipsometria e Morfologia, ocorreu através do Método do Valor Informativo.

Previamente é importante destacar que os valores positivos apresentados nas tabelas obtidas através da aplicação do Método do Valor Informativo (**APÊNDICES A, B, C, D, E, F e G**) vinculadas ao cálculo das variáveis utilizadas, são os que contribuem diretamente nos processos erosivo estudado na área de interesse.

Na questão morfológica, duas classes se destacam na ocorrência de voçorocas são, os Topos de colinas e Vales entalhados e não entalhados em Superfície de Dissecação. Todas as formas de voçorocas estão presentes em Topos de Colinas, já nos Vales entalhados e não entalhados em Superfície de Dissecação a forma Retangular é a única que não ocorre (**APÊNDICE A**).

Em relação a declividade da área de estudo, o valor informativo (**APÊNDICE B**) apresenta a concentração de valores positivos em todas as formas de voçorocas nas classes de 5 a 15% (Linear 0,22, Bulbiforme, 0,20, Ramificada, 0,21, Irregular Mista 0,21, Retangular, 0,25 e Irregular Retangular, 0,20), e acima de 15% de declive (Linear 0,24, Bulbiforme, 0,75, Ramificada, 0,28, Irregular Mista 0,57, Retangular, 0,63 e Irregular Retangular, 0,41), ou seja, nessa classe de maior declividade as Formas Bulbiforme, Retangular e Irregular Mista sustentam os maiores valores informativos. Dessa forma, as classes de maior valor de declives condicionam a ocorrência de erosão por voçorocas nesta área.

Mesmo as classes de orientação de vertente NO, NE, e N recobrindo maior extensão dentro da área de estudo, se destacam no cálculo do valor informativo (**APÊNDICE C**), frente a distribuição das voçorocas, as direções sudeste (SE), sul (S) e leste (E). As formas Linear e irregular Mista se apresentam distribuídas em maior área, seguida das formas Ramificada e Irregular Retangular e por último as formas Retangular e Bulbiforme que apresentam maior dispersão enquanto a orientação, ou seja, estas duas formas se apresentam com várias direções de vertentes.

O Quadro 3 apresenta de forma resumida as classes pertencentes as variáveis morfométricas que mais se destacaram em termos de valores positivos dento do cálculo do VI.

A orientação Sudeste (SE) recobre a maior extensão e está atrelada a voçorocas com grandes áreas, predominando nas formas Ramificada e Irregular Mista. As direções Leste e Sul ocorrem uniformemente em todas as formas de voçorocas. A orientação Sudoeste ocorre em voçorocas com maior Índice de circularidade e largura, com predomínio nas voçorocas com maiores aberturas ao longo de sua extensão, como as formas Retangular e Irregular Retangular.

No cálculo do Valor Informativo para as classes de perfil curvatura de vertentes (**APÊNDICE D**), todas as formas apresentam valores positivos para a classe convexa, tendo as formas Linear, Bulbiforme e irregular Mista os maiores valores (0,37, 0,34 e 0,35), ou seja, o perfil convexo mantem o maior controle no desenvolvimento das voçorocas.

No plano curvatura das vertentes a classe convergente se destaca positiva em todas as formas de voçorocas (**APÊNDICE E**), com maiores valores presentes nas formas Linear (0,33), Bulbiforme (0,35) e Retangular (0,32). Mesmo as classes planar e divergente se destacando em maior área, não são determinantes para o processo erosivo.

As classes de curvatura que mais atuam no processo de erosão de acordo com cálculo do valor informativo (**APÊNDICE F**), variam de acordo com a forma da voçoroca. Na forma Linear são as classes Côncavo-Divergentes, Côncavo-Planar, Côncavo-Convergente e Retilíneo-Convergente que se destacam. Mesmo a classe Côncavo-Divergente indicando que não há concentração do escoamento superficial em uma única direção, ela ocorre na forma Linear, sugerindo dessa forma, a existência de um controle estrutural ao longo de fraturas localizadas nessa forma de voçoroca.

Nas formas Bulbiforme, Irregular Mista, Retangular e Irregular Retangular as classes de curvatura com valores positivos representam as classes Côncavo-Divergentes, Côncavo-Planar, Côncavo-Convergente, Convexo-Convergente e Retilíneo-Convergente.

Quadro 3 - Relação entre as variáveis morfométricas e as formas de voçorocas através do Cálculo do Valor Informativo.

Variáveis Morfométricas / Formas de voçorocas	Orientação de Vertentes	Morfologia	Declividade	Hipsometria	Perfil curvatura de vertentes	Plano Curvatura de vertentes	Curvatura das Vertentes
Linear	E, SE, S	Vales entalhados e não entalhados em superfície de Dissecação e Topos de Colinas	- De 5 a 15% - Acima de 15%	- 120 a 140m - 140 a 160m	Convexo	Convergente	- Côncavo-Divergente - Côncavo-Planar - Côncavo-Convergente - Convexo-Convergente* - Retilíneo-Convergente * Não possui está curvatura nas formas Ramificada e Linear
Bulbiforme	N, NE, E, SE, S, SO						
Ramificada	E, SE, S, SO						
Irregular Mista	E, SE, S						
Irregular retangular	E, SE, S, SO						
Retangular	S, N, SO, NO, O	Topos de Colinas					

Fonte: Organizado pela autora (2018).

A forma Ramificada se diferencia das outras, apresentando valores positivos para as classes Côncavo-Divergentes, Côncavo-Planar, Côncavo-Convergente e Retilíneo-Convergente,

As categorias vinculadas à concavidade do terreno é vinculada ao interior da incisão, pois é tratado nesta pesquisa apenas seu limite, talvez seja interessante se trabalhar com área de abrangência de uma voçoroca, pois envolve as características do seu entorno. Essas categorias do terreno estão também atreladas a convergência do fluxo, que se direcionam a um mesmo ponto. Dessa forma, verifica-se que o entorno das voçorocas presentes na área se mostra convexo-convergente, mantendo um fluxo desacelerado, porém concentrado.

As incisões quando analisadas por categoria altimétricas (**APÊNDICE G**), demonstraram que a maior concentração de voçorocas ocorrem preferencialmente nas classes altimétricas de 120-140m e 140-160m, apenas na forma Irregular Mista se estende a altitudes maiores que 160m, ou seja, onde estão situadas a maior parte das voçorocas da área em questão. Essa informação corrobora com as apresentadas por Cabral (2004).

7 CENÁRIO DE EVOLUÇÃO DAS VOÇOROCAS

Esta fase é destinada a teoria de evolução das formas de voçorocas mapeadas na área de estudo, baseando-se no cenário onde estão inseridas e nos resultados alcançados e discutidos ao longo da pesquisa, que possibilitaram a partir da análise das formas e agrupamento de voçorocas indicar o grau de evolução das mesmas.

A construção do entendimento de evolução partiu primeiramente da observação das diferentes formas categorizadas de voçorocas, onde pode-se perceber a mudança de comportamento dos formatos mais alongados e estreitos para as formas mais largas e circulares (abertas). Passando para um próximo nível de entendimento, o cenário evolutivo das incisões envolve a análise em conjunto dos índices morfométricos (área, perímetro, largura, profundidade, volume, comprimento, Índice de Circularidade, hipsometria, declividade, morfologia, orientação de vertentes, comprimento de vertentes, perfil e plano curvatura das vertentes, lineamentos estruturais) interligados entre si, que resultaram na interpretação do atual comportamento de cada voçoroca identificada (Ativa, Estabilizada e Reativada) e na evolução de uma forma para outra.

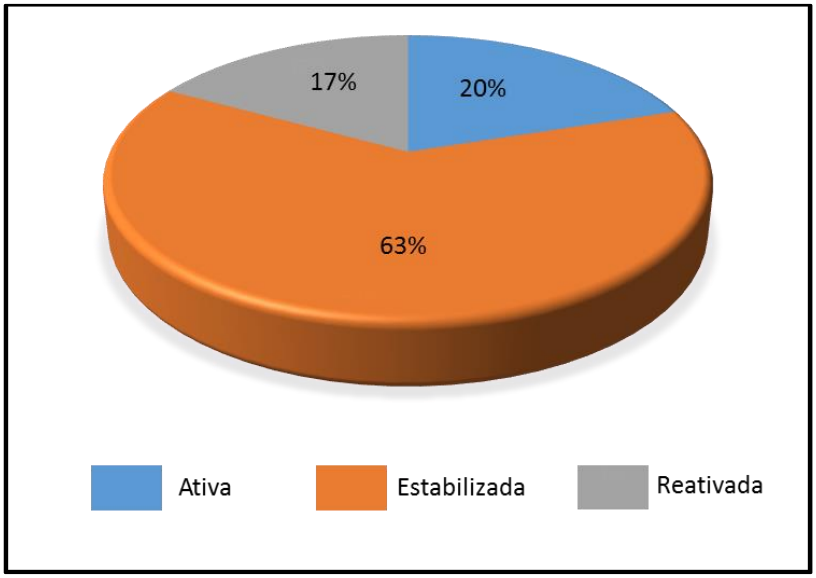
As voçorocas ativas (Figura 50) se caracterizam a partir de eventos como: a verticalização, a presença de terrenos expostos, ocorrência de formações lateríticas em suas bordas e desbarrancamentos, representando 20% do quadro de desenvolvimento. As voçorocas ativas são mais profundas e chegam a ultrapassar o perfil do solo, expondo o material de origem.

Figura 46 - Voçoroca em pleno processo erosivo (nº. 165) - Sanga Areal da Limeira.

Fonte: Organizado pela autora (2018), a partir de Imagens WorldView-2, 0.5 m (abr./2015).

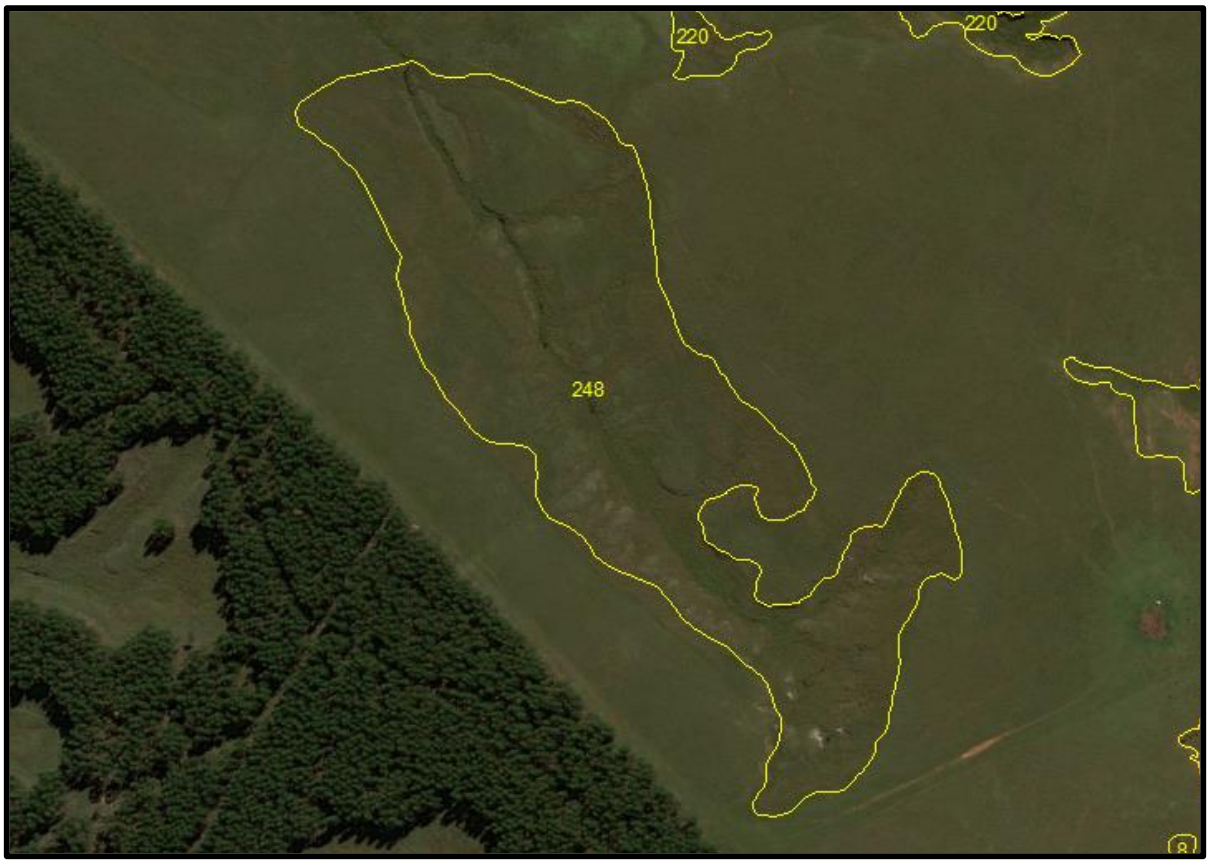
As voçorocas no estágio ativo são as que mais predominam na área de estudo com 63% (Gráfico 11), caracterizam-se pela “estabilidade” do processo erosivo, com predomínio de vegetação rasteira e/ou arbórea no seu interior (Figura 51), além do que a erosão a montante encontra-se “estabilizada”. Nas formas Irregular Retangular e Retangular apresentam em seu interior menor profundidade, com bordas suaves (menos inclinação vertical), integrando-se a paisagem, não deixando evidente características erosivas que as tornam mais fácil em seu reconhecimento para fins de mapeamento. A forma da voçoroca neste estágio prevalece em contornos mais abertos, com grandes larguras. O processo de erosão é remontante, por isso a “estabilidade” das voçorocas está relacionada com o nível de base do freático. Enquanto a erosão não atingir o nível de base vai estar aprofundando sob condição de erosão remontante. Quando atinge o nível de base, a erosão passa a ser lateral até chegar ao nível de “estabilidade”. Esta condição também pode sofrer interferência litológica, falhas e presença de níveis de concreções de óxido de ferro.

Gráfico 11 – Distribuição do grau de evolução de voçorocas em porcentagem.



Organização: Autora.

Figura 47 - Voçoroca em estágio de estabilização (nº. 248) – Sanga da Vaca Velha.



Fonte: Organizado pela autora (2018), a partir de Imagens WorldView-2, 0.5 m (abr./2015).

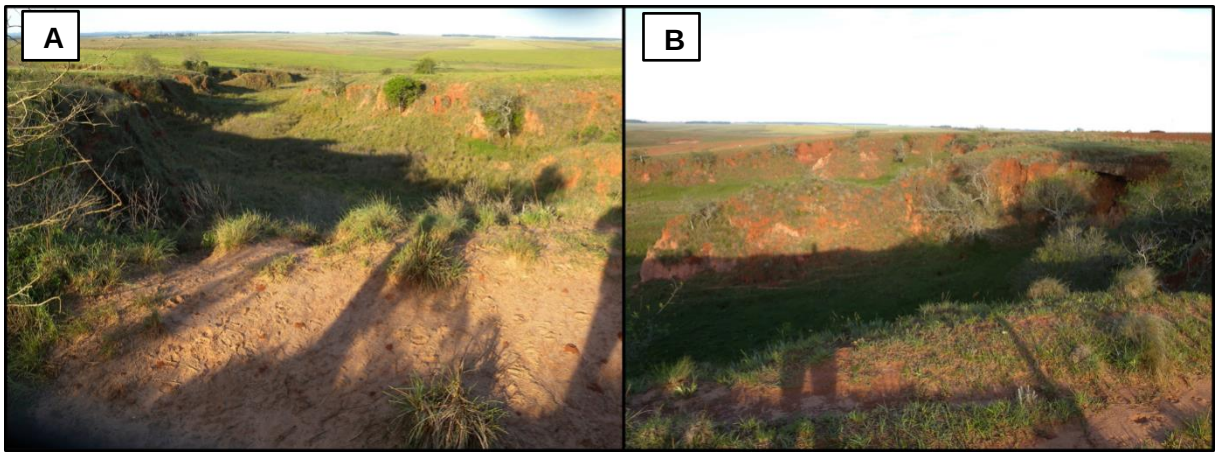
O estágio de reativação da voçoroca passa primeiramente pela estabilização e posteriormente pela retomada da erosão, isto é, reinicia o processo erosivo de forma que percebe-se a perda da vegetação existente em alguns pontos da incisão, alargamento das bordas, desbarrancamentos recentes e solo exposto (Figura 52), ao mesmo tempo que se mantem uma área vegetada estável. Este estágio ocorre maioritariamente em formas ramificadas e irregular mista.

Figura 48 - Voçoroca em processo de reativação nas laterais (nº. 172) – Sanga da Tapera.

Fonte: Organizado pela autora (2018), a partir de Imagens WorldView-2, 0.5 m (abr./2015).

Ao analisar uma voçoroca reativada deve-se levar em consideração além das cabeceiras, a parte inferior onde encontra-se conectada a um outro curso d'água em altitude baixa, neste setor da voçoroca muitas vezes é onde o processo inicia a retomada de erosão. Este nível de evolução é o mais complexo de se analisar, já que inclui os dois processos anteriores, estabilizada e ativa, ou seja, existem diferentes seções dentro de uma mesma voçoroca que encontram-se estáveis e simultaneamente ativos (Figura 53).

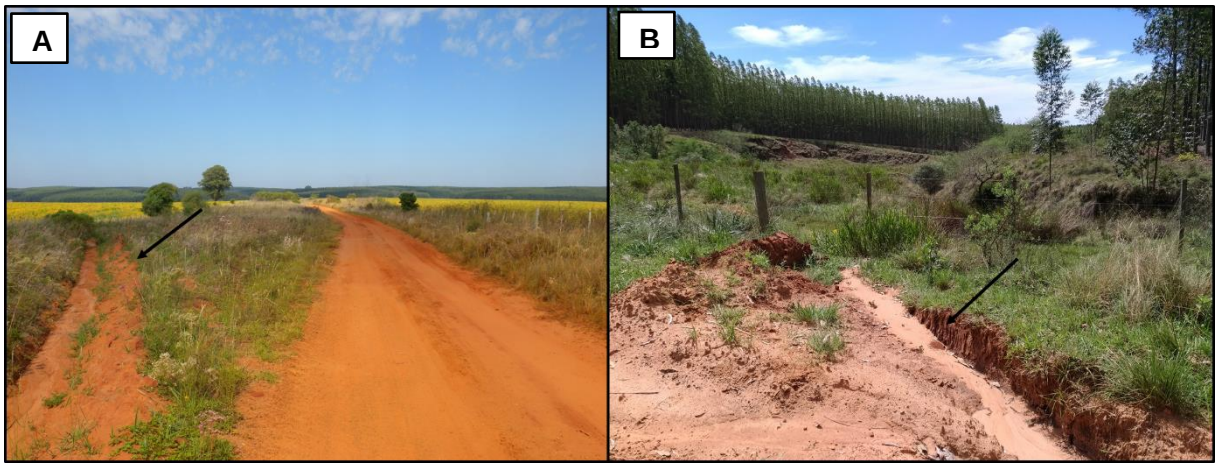
Figura 49 - Voçorocas nº 182 e 183 em processo de reativação nas cabeceiras e bordas - Sub-bacia Sanga da Vaca Velha.



Fonte: Trabalho de campo (2018). Fotografias: Tiéle Lopes Cabral.

Um acontecimento verificado em campo que leva a aceleração do processo ou até mesmo a reativação de voçorocas tem relação com o uso nas cabeceiras de drenagem, um fato comumente detectado na área foi a presença de dutos artificiais as margens das estradas ligado diretamente às incisões (Figura 54), fato ocasionado por desconhecimento da gestão pública do município de Cacequi na manutenção de estradas, o que gera a alta concentração do fluxo d'água nas cabeceiras das voçorocas provocando sua expansão.

Figura 50 – Canais artificiais para escoamento d'água às margens de estradas, em cabeceiras de voçorocas.

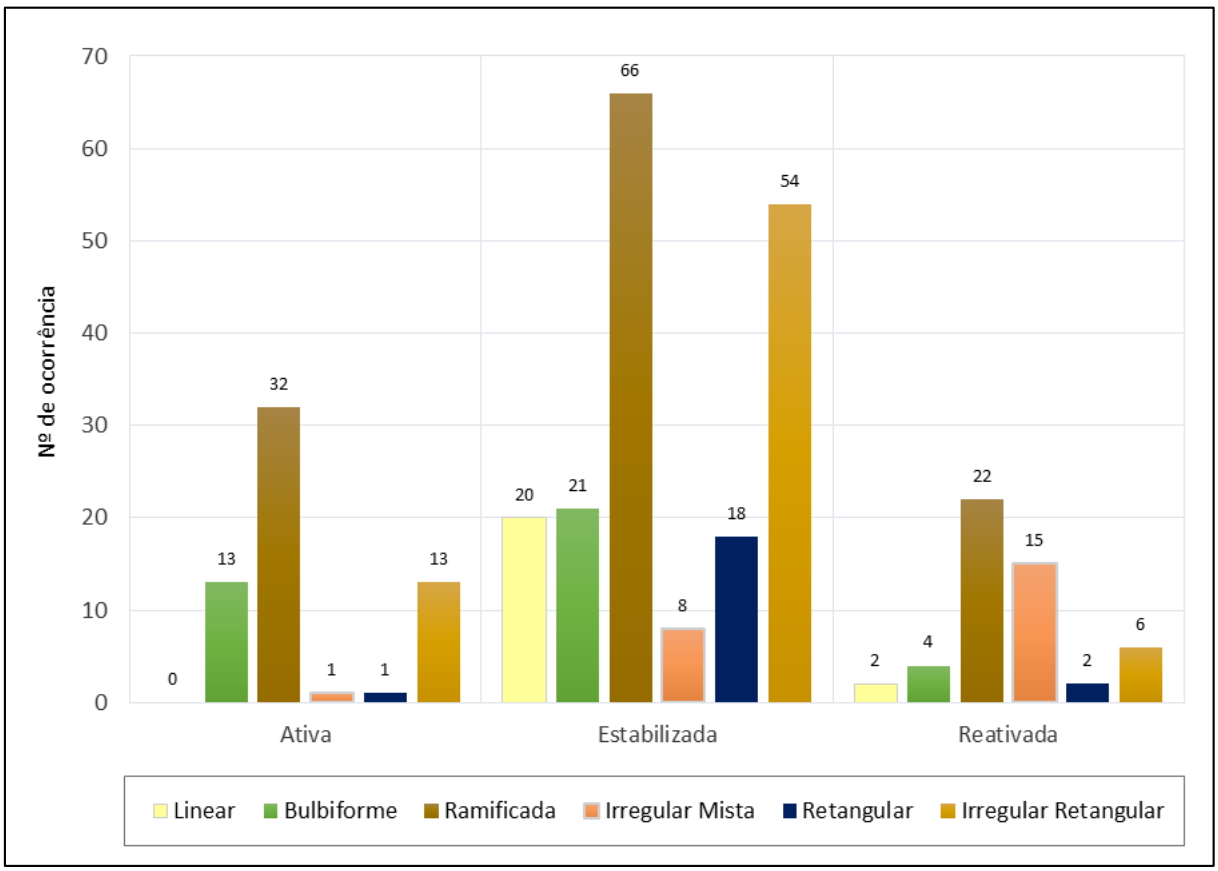


Fonte: Trabalho de campo (2018). Fotografias: Tiéle Lopes Cabral.

A alta concentração de voçorocas ramificadas estabilizadas na área de estudo, apresentado do Gráfico 12, denota que com o passar do tempo podem retomar o processo erosivo de modo a evoluir para uma forma retangular ou irregular retangular. A frequente presença de barragens é outro aspecto observado na área de estudo ligado ao uso do solo, concentram-se no alto curso das sub-bacias, ao longo dos principais eixos de drenagem, o que determina as variações fluviométricas e as consequentes alterações nos níveis dos lençóis freáticos das encostas, tornando as voçorocas mais predispostas a “estabilidades”.

O maior número de incisões encontra-se na forma ramificada onde 55% estão “estabilizadas” e 28% ativas. A classe linear concentra a maior porcentagem de voçorocas estabilizadas com 91% seguida da retangular com 86%. A classe Irregular Mista mantém 58% das voçorocas em estágio de reativação.

Gráfico 12 - Número da ocorrência entre as formas de voçorocas e os seus respectivos níveis de desenvolvimento.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

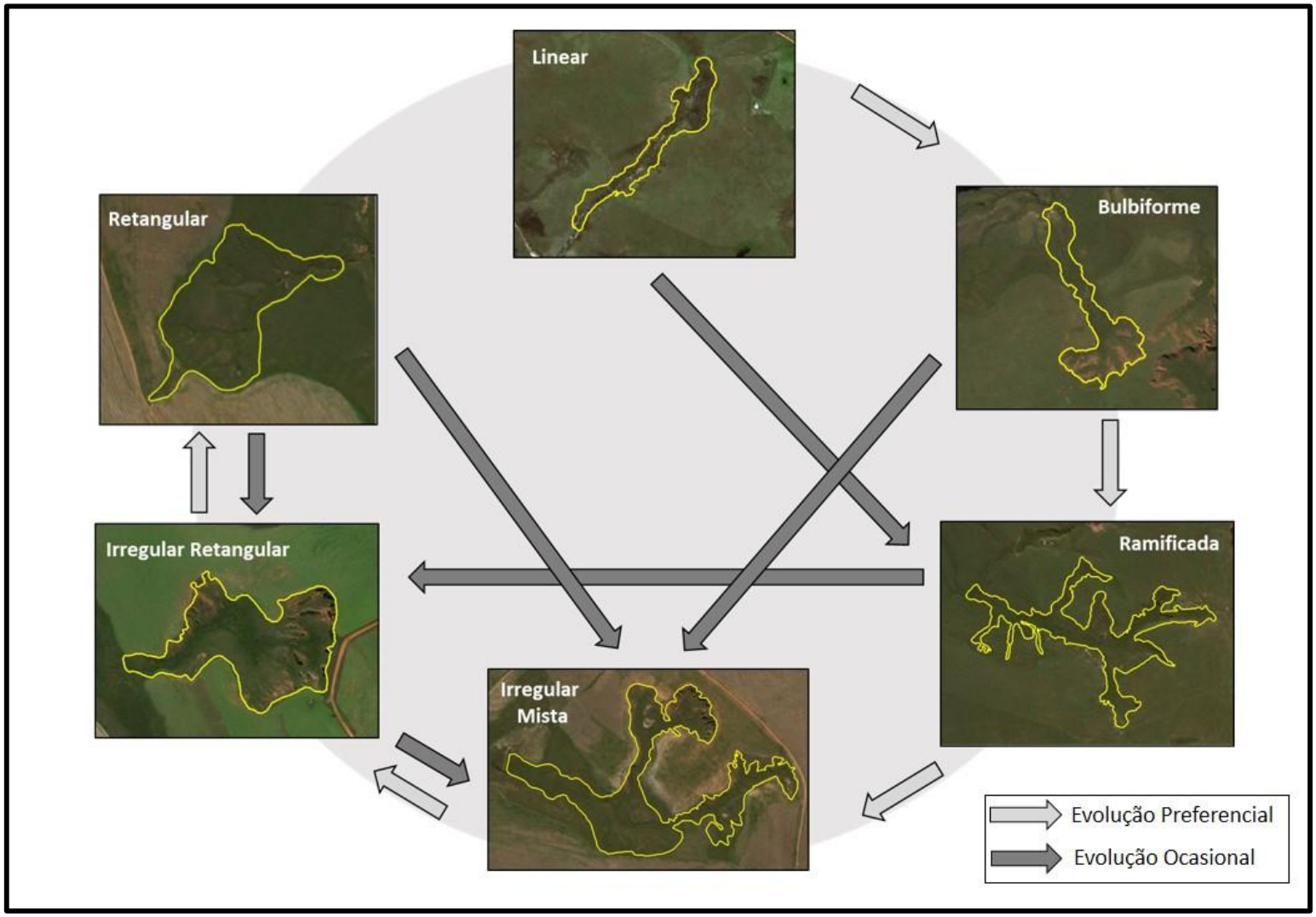
Percebe-se que o total da modalidade das voçorocas estabilizadas é bastante superior em relação aos demais níveis. Tal fato, corrobora com a concepção de Müller Filho (1970), relacionada a organização dos dois sistemas de drenagem responsáveis pela abertura da Depressão Central Gaúcha, onde a condição do processo de evolução das voçorocas se comportam de maneira cíclica envolvendo a variação no nível de base da área.

Com isso, entende-se que as incisões podem mudar consideravelmente com o passar do tempo, como resultado das mudanças nos processos atuantes. Uma voçoroca linear, por exemplo, pode evoluir para patamares mais altos podendo ramificar em diferentes direções e alargar no topo, este processo motiva a evolução para a forma Bulbiforme, derivada estritamente da Linear, alargando na parte a montante. Posteriormente está forma (Bulbiforme) pode evoluir para classe Ramificada ou Irregular Mista dependendo das direções de influências.

Através dos índices morfométricos definidos nesta pesquisa foi possível se chegar a um cenário de evolução das formas de voçorocas (Figura 55), seguindo uma ordem de desenvolvimento, iniciando pela forma Linear, considerada o estágio inicial, até se chegar a Retangular, forma avaliada como estágio mais avançado de evolução.

A forma Irregular Mista é o estágio mais combinado no quadro evolutivo, pois mantem uma base linear, com abertura na média vertente e ramos no topo, em alguns casos os ramos apresentam características bulbiformes. Esta classe pode se desenvolver para uma Irregular Retangular, onde estaria ligada principalmente a um aumento da sua circularidade, resultando em uma forma retangular.

Figura 51 – Cenário de evolução das formas de voçorocas presentes na área de estudo em Cacequi-RS.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

O fato da forma linear não apresentar incisões ativas, mesmo sendo uma forma inicial do processo, demonstra que a área possui voçorocas antigas a ponto de crescente desenvolvimento e não desencadeamento. Deste modo, percebe-se que a forma retangular é um estágio avançado de desenvolvimento característico de estabilidade, entretanto pode reativar e evoluir para os moldes Irregular Retangular e Irregular Mista aderindo novas direções de ampliação.

A análise dos dados métricos das voçorocas, em conjunto com as características físicas da área de estudo favorecem também o melhor entendimento da possibilidade de expansão e evolução das incisões. Desta maneira, essa transição de formas pode acontecer para qualquer um dos formatos, podendo todos alcançar um nível de estabilização, rompido de acordo com a existência de novos fluxos ou de mudança na direção e distribuição dos fluxos já existentes, relacionadas também às características de resistência da superfície do solo, controle estrutural e mudanças do nível de base local.

Esta modelagem da evolução dos estágios ligados as formas das voçorocas, requer maiores discussões e levantamentos de informações, principalmente voltadas ao conhecimento geológico. Este estudo pode representar uma contribuição ao tema, que requer uma atenção especial nesta região do Rio Grande do Sul não só para entender o contexto do grau de fragilidade das superfícies locais, mas também para avançar no conhecimento sobre a abertura e evolução da Depressão Central Gaúcha.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando que o objetivo principal da pesquisa foi analisar a relação dos aspectos geomorfológicos e geológicos sobre o desenvolvimento de voçorocas no município de Cacequi, os resultados obtidos pela pesquisa conduzem a várias considerações acerca dos eventos de voçorocamentos atrelados aos sistemas de drenagem na região.

Primeiramente, os resultados obtidos permeiam o levantamento das 298 voçorocas no perímetro de estudo, distribuídas por 4 sub-bacias hidrográficas (Sanga Areal da Limeira, Sanga da tapera, Sanga da Vaca velha e Arroio Areal Grande). No contexto geral de ocorrências o sistema de drenagem do Arroio Areal Grande apresentou a maior concentração com 134 voçorocas, seguido da Sanga da Limeira com 98, Sanga da Vaca Velha com 44, e por último a Sanga da Tapera com 22 incisões. Em relação a configuração da incisão, classe de forma que se destacou foi a Ramificada com 120 ocorrência, enquanto a Retangular teve apenas 21 casos sendo de menor expressão entre os tipos de formas constatados.

As voçorocas apresentam-se como grandes incisões, com volume médio erodido por voçoroca de 254.644 m³ e ocupando 8% da área total pesquisada. A distribuição das incisões entre os sistemas de drenagem são diferentes, ou seja, as menores voçorocas concentram-se na Sub-bacia hidrográfica da Sanga Areal da Limeira e, as maiores na área do sistema de drenagem da Sanga da Vaca Velha e do Arroio Areal Grande. Em termos métricos, a Sanga da Vaca Velha apresentou as maiores voçorocas em comprimento (838 m) e o Arroio Areal Grande a maior em largura média (71 m) e profundidade média de 3,5 m. Ambas as áreas se assemelham em relação às características métricas.

O tipo predominante de voçoroca é a variedade denominada de integrada com 224 ocorrências, seguida pela categoria das conectada 74, sem ocorrência de desconectadas. Quanto à forma há 22 Lineares, 38 Bulbiformes, 120 Ramificadas, 24 Irregular Mistas, 21 Retangular e 73 Irregular Retangular.

Em um segundo momento ocorre à análise da influência dos aspectos naturais reveladores de vários atributos condicionantes em relação ao problema estudado. Observando estas características, verifica-se a ocorrência das voçorocas estão nas superfícies das duas principais classes de solos presentes na área: 71,45% sobre

Argissolos, onde encontram-se as voçorocas e 28,6% sobre Planossolos em áreas planas com baixa declividade.

A análise dos lineamentos extraídos deu respaldo na comparação da orientação das voçorocas e da rede de drenagem local e regional, onde as direções das incisões mapeadas apresentam predominância na orientação E-W, essa coincidência direcional sugere controle estrutural, onde as principais direções das voçorocas contribuem em suas formas. A associação dos lineamentos aos elementos morfológicos permite supor uma associação à dinâmica geomorfológica da área com influência neotectônica.

Em relação a topografia a predominância de voçorocas sobre encostas com bases convexas expressa a condição geomorfológica de que os eventos das voçorocas fazem parte dos processos do desenvolvimento das formas de relevo sob a custódia de condição de clima úmido. A declividade onde ocorrem varia de 5 a 15% e maiores de 15%, predominando nas porções de maior declividade do terreno (topo de colinas e vales entalhados e não entalhados), onde estão situadas as vertentes com maiores declividades e mais curtas. No conjunto destas superfícies os vales são mais encaixados e as cotas altimétricas são maiores.

Por meio dos dados e dos trabalhos de campo na área foi possível constatar que é frequente a presença de barragens ao longo dos principais eixos de drenagem, o que determina as variações fluviométricas e as consequentes alterações nos níveis dos lençóis freáticos das encostas, tornando-as mais predispostas a estabilidades dos processos erosivos. As considerações obtidas a partir da análise das informações compiladas no mapa de declividade, comprimento de encosta e perfis topográficos permitiu inferir que a maior concentração de voçorocas está nas superfícies das áreas onde a dissecação é maior.

O quadro natural da área mantém um padrão em suas características de relevo de colinas de topo côncavo - “as Coxilhas do Rio Grande do Sul”. Pelo contexto das variáveis declividade, comprimento e forma da encosta, além da configuração das sub-bacias de drenagem existentes constituem no conjunto das informações que fornecem indícios sobre os condicionantes da locação e distribuição das voçorocas. Em síntese, o relevo da área apresenta-se com encostas convexas de média declividade e pequenos comprimentos, as quais favorecem o aumento da velocidade dos escoamentos.

O mapeamento das voçorocas e a integração dos dados, possibilitaram a identificação do controle individual e a relevância de cada variável para a análise sobre o desenvolvimento das voçorocas. O Método do Valor Informativo serviu para registrar os atributos mais relevantes dentro dos parâmetros utilizados e se mostrou viável a trabalhos de cunho ambiental, principalmente se tratando de áreas susceptíveis aos processos superficiais. Talvez para este tipo de temática, seja interessante utilizar também a extensão da voçoroca, ou seja, uma área de contribuição (considerando seu entorno). Isso pode tornar a análise mais integrada em termos de variáveis que discriminam melhor os fatores desencadeadores do processo principalmente em relação aos trabalhos sobre temáticas que tratam do uso e ocupação do solo como agentes desencadeadores de erosão.

Os métodos utilizados na pesquisa foram determinantes para chegar aos resultados obtidos, o estudo de caso dentro desta temática de pesquisa envolveu a interpretação qualitativa das voçorocas. A análise visual de suas características em campo e em imagens de satélite foi essencial para determinar as diferentes formas das incisões. Somado a isso, a análise quantitativa dos dados complementou a classificação das formas através de indicadores morfométricos, pois utilizando apenas os elementos quantitativos não seria possível realizar a classificação para a área escolhida, devido à semelhança entre os valores obtidos, fato relacionado à homogeneidade do relevo regional e, de certo modo, do fato pesquisado, não sendo possível classificar as voçorocas apenas pela interpretação visual.

Na análise das formas pode-se perceber uma divisão de formas, agrupados em três conjuntos com aspectos similares entre as seis formas classificadas, os quais possuem semelhanças entre si. Assim sendo, em um primeiro grupo temos as formas Lineares e Bulbiformes, com menores áreas, profundidade e volume, seguidas do segundo grupo das formas Ramificada e Irregular Mista, as quais possuem as maiores áreas, perímetro, amplitudes altimétricas e profundidade e por último o terceiro agrupamento entre as formas Retangular e Irregular Retangular, apresentando valores médios relacionados a área, amplitude altimétrica e volume. Vale destacar que, para esse tipo de classificação deve-se considerar as características especificas do ambiente onde os processos se desenvolvem, podendo adaptar outras categorizações a configuração da área em que se encontram.

A utilização apenas do método quantitativo não foi suficiente para realizar a classificação de voçorocas para a área, já que os dados se assemelham entre si,

sendo necessário a complementação da análise qualitativa para auxiliar na interpretação dos dados e permitir a diferenciação entre as formas das incisões.

O estudo de caso dentro desta temática de pesquisa envolveu a interpretação qualitativa das voçorocas, ou seja, a análise visual de suas características em campo e em imagens de satélite foi essencial para determinar as diferentes formas das incisões. Somado a isso, a análise quantitativa dos dados complementou a classificação das formas através de indicadores morfométricos, já que utilizando apenas os elementos quantitativos não seria possível realizar a classificação para a área escolhida, devido à semelhança de valores, da mesma forma, não seria possível classificar as voçorocas apenas pela interpretação visual. Dessa forma, a relação qualitativa e quantitativa foram complementares entre si e indissociável na análise dos indicadores morfométricos, relacionados aos parâmetros geológicos e geomorfológicos, se mostrando decisivas no estudo da distribuição e classificação de voçorocas em sub-bacias no município de Cacequi.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. **A revanche dos ventos: Derruição de solos areníticos e formação de areais na Campanha Gaúcha.** Revista Sociedade & natureza. n. 11. 09-27 p. ISBN: 14964. Editora: Ciência e Ambiente. Julho/Dezembro 1995.

ANJOS, D. S.; MENEGUETTE JUNIOR, NUNES, M. J. O. R. **Classificação da curvatura de vertentes em perfil via Modelo numérico de Terreno.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE p.2286. Curitiba, 30 de abril a 05 de maio de 2011.

ARAUJO, G. H. de S.; ALMEIDA, J. R. de; GUERRA, A. J. T. Gestão Ambiental de áreas degradadas. 5. ed. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, 2010.

ASMUS, H.E. **Hipóteses sobre a origem dos sistemas de zonas de fraturas oceânicas/alinhamentos continentais que ocorrem nas regiões Sudeste e Sul do Brasil.** Série Projeto REMAC. n.4, p.39 – 73. 1978.

BARBOSA, M. E. F.; FURRIER, M. **Caracterização geomorfológica com apoio de índices morfométricos: o estudo de caso da bacia do rio Guruji.** Cadernos do Logepa, v. 6, n. 1, p. 1-24, ISSN: 2237-7522. jan./jun. 2011.

BEAVIS, S. G. **Structural controls on the orientation of erosion gullies in mid-western New South Wales, Australia.** Geomorphology, v. 33, p.59-72, 2000. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X99001105. Acesso em: Ago. 2016.

BERTALANFFY, L. V. **Teoria dos Sistemas.** Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro, 1976.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** 6. ed. Ícone. 355 p. São Paulo, 1990.

BERTRAND, G. **Paisagem e Geografia Física Global: esboço metodológico.** Cadernos de Ciências da Terra, IG-USP, n. 13, p. 1-27. São Paulo, 1972.

BIGARELLA, J. J. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. v.3. Ed. da UFSC. Florianópolis, 2003.

BIGARELLA, J. J.; MAZUCHOWSKI, J. Z. **Visão integrada da problemática da erosão.** In: Simpósio Nacional de Controle da Erosão, 3. Anais, ABGE-ADEA. p. 332. Maringá, 1985.

BISWAS, S. S. **Analysis of GIS Based Morphometric Parameters and Hydrological Changes in Parbati River Basin, Himachal Pradesh, India.** Journal of Geography & Natural Disasters. Vol. 6, Issue 2. ISSN: 2167-0587. 2016.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for geoscientists: Modelling with GIS.** 398p. Pergamon. Otawa, 1994.

BOTELHO, R. G. M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações.** Bertrand Brasil, p. 173- 215. Rio de Janeiro, 1999.

CABRAL, I. L. L. **Capacidade de Uso da terra na Bacia Hidrográfica Areal Grande (Cacequi-RS).** Dissertação de Mestrado. USP/FFLCH. Dep. de Geografia. São Paulo, 1998.

CABRAL, I. L. L. **Depressões interfluviais e voçorocas articuladas à rede de drenagem: o exemplo das bacias dos rios Ibicuizinho, Areal do paredão, Cacequi, Santa Maria e Ibicuí.** 2004. 187pg. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo-USP. São Paulo, 2004.

CABRAL, I. L. L. **Estudo de Locais Susceptíveis à Erosão na Microbacia do Areal Grande (Sub-bacia do rio Ibicuí Mirim).** Monografia de Especialização. UFSM. Dep. de Ciências Rurais. Santa Maria, 1993.

CAMAPUM de CARVALHO, J. C. **Processos erosivos no centro oeste brasileiro.** Editora FINATEC. Brasília, 2006.

CARVALHO, J. C.; LIMA, M. C.; MORTARI, D. **Considerações Sobre Prevenção e Controle de Voçorocas.** Anais do VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia, maio de 2001.

CASTRO, S. B.; CARVALHO, T. M. **Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo - GO, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.** Scientia Plena, vol. 5, nº.2. 025401-1. 2009. Disponível em: http://ufrr.br/mepa/phocadownload/morfometria%20bacia%20castro%20e%20carvalho%202009.pdf. Acesso em: out. 2018.

CHRISTOFOLETTI, A. **A significância da Teoria de Sistemas em Geografia Física.** Boletim de Geografia Teorética 16-17, Encontro de Geógrafos da América Latina. Rio Claro, 1986. Disponível em: http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/tegal1/Teoriaymetodo/Teoricos/SIGNIFICANCIADATEORIADESISTEMAS.pdf. Acesso em: 21 ago.2018.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise morfométrica de bacias hidrográficas**. Notícia Geomorfológica, v. 18, n. 9, p. 35-64, Campinas, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** 2ª Ed. Editora Blucher. São Paulo, 2011.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: Guerra A. J. T. e Cunha S. B. (Orgs.). **Geomorfologia - Uma atualização de base e conceitos.** 2. ed., Bertrand, p. 93-148. Rio de Janeiro, 1998.

COOKE, R. U.; DOORNKAMP, J. C. **Geomorphology in Environmental Manegement: a new introduction.** 2ª edition. p. 410. Oxford, 1990.

CORDEIRO, C. de A; SOARES, L. de C. **A erosão nos solos arenosos da região sudoeste do Rio Grande do Sul.** Rev. Bras. Geográfica. N. 39, v 4, 32 – 150. Rio de Janeiro, 1977.

CORRÊA, A. A. M. **Métodos de combate a erosão do solo.** Ministério da agricultura, serviço de informação agrícola, série didática Nº 17, 152 p. Rio de Janeiro, 1959.

COSTA, A.F.U.; RAMGRAB, G.E. Lineamento Jaguarão – Caracterização aeromagnética. **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 7, p. 41 – 45. Rio de Janeiro, 1989.

CUNHA, C. M. L. **Quantificação e mapeamento das perdas de solo por erosão com base na malha fundiária.** Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Rio Claro, 1997.

CUNHA, C. M. L.; PINTON, L. G. **A cartografia do relevo como subsídio para a análise morfogenética de setor cuestiforme.** Mercator - Revista de Geografia da Universidade Federal do Ceará - UFC, vol. 12, núm. 27, janeiro-abril, p. 149-158. Fortaleza, 2013.

DOBEK, K.; DEMCZUK, P.; RODZIK, J.; HOLUB, B. **Types of gullies and conditions of their development in silvicultural loess catchment (Szczebrzeszyn Roztocze region, SE Poland).** Landform Analysis, Vol. 17: p. 39-42. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-cross-sections-of-different-types-of-gullies-in-the-Jedliczny-Dol-gully-system_fig2_265336017. Acesso em: 15. ago./2015.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. EMBRAPA-SPI. Rio de Janeiro, 2006.

ERDÉLYI, M.; GÁLFI, J. **Surface and Subsurface Mapping in Hydrogeology.** AkadémíaiKiadó. p. 383. Budapest, 1988.

ESRI. ArcMap. **Curvature function.** Catalog: Manage Data. Disponível em:http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm. Acesso em: 18 de out. 2017.

FACINCANI, E. M. **Influência da estrutura e tectônica no desenvolvimento das boçorocas da região de São Pedro, SP: proposta de reabilitação e aspectos jurídico-institucionais correlatos.** 124p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1995.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; GARCIAS, C. M. **Drenagem e controle da erosão urbana.** 3. ed. IBRASA. Curitiba: Ed. Universitária Champagnat, 442 p. São Paulo, 1991.

FILOSOFOV, V. P. **Brief Guide to Morphometric Methods in Search of Tectonic Features.** Saratov University Publishing House. Saratov, 1960.

FERNANDES, J. F. C. **Modelação de Processos Erosivos no Alto Douro Vinhateiro: o caso de estudo da Quinta de S. Luiz.** Dissertação de Mestrado - Universidade do Porto, Portugal. 135 p. Porto, 2014.

FLORENZANO, T. G. Cartografia. *In:* FLORENZANO, T. G. (Org.) **Geomorfologia conceitos e tecnologias atuais.** Oficina de Textos. p. 105-128. São Paulo, 2008.

GUARESCHI, V. D. **Cabeceiras de drenagem no planalto das araucárias, bacia hidrográfica do Rio Guassupi - RS: Distribuição espacial das depressões fechadas, controle estrutural e evolução geomorfológica.** Tese de Doutorado – UFSM. 205 p. Santa Maria, 2018.

GUERRA, A. J. T. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações.** 2ª ed. Bertrand Brasil, 340p. Rio de Janeiro, 2005.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** 5. ed. Bertrand Brasil. p. 149-209. Rio de Janeiro, 2003.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. d.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2006.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.) **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000.** Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto) e ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra.** (Levantamento de recursos naturais, v.33). 794 p. IBGE. Rio de Janeiro, 1986. Disponível em: http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv19048.pdf. Acesso em: Jul. 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de geomorfologia.** Coordenadores: Nunes, B. de A; Ribeiro, M.I. de C.; Almeida, V.J. de; Natali Filho, T. Série Manuais Técnicos em Geomorfologia n. 5. Fundação IBGE, Rio de Janeiro, 1995.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Controle de erosão.** DAEE-IPT, São Paulo, 1989.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Manual de ocupação de encostas.** CUNHA, M. A. (coord.). IPT. São Paulo, 1991.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Mapeamento Geomorfológico do Estado de São Paulo.** Escala 1:500.000, v. 2, 130 p. São Paulo, 1981.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Ocupação de encostas.** Coord. Cunha, M.A. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – (Publicação IPT n.1831). São Paulo, 1991.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Subsídios técnicos para um plano de controle preventivo e corretivo de erosão para a área urbana do município de Franca, SP.** (Relatório Técnico 35.774). IPT. São Paulo, 1998.

JACQUES, P. D., SALVADOR, E. D., MACHADO, R., GROHMANN, C. H., NUMMER, A. R. Application of morphometry in neotectonic studies at the eastern edge of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. Geomorphology, 213; 13–23. 2014.

LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. et al. **Soil erosion research methods.** Soil and Water Conservation Society, p. 141-160. Washington, 1988.

LAVINA, E. L. **Geologia sedimentar e paleogeografia do Neopermiano e Eotriássico (intervalo Kanzaniano-Scitiano) da Bacia do Paraná.** Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 336p. Porto Alegre, 1991.

LAVINA, E. L. C., FACCINI, U. F., RIBEIRO, H. J. S. **A Formação Pirambóia (Permo-triássico) no estado do Rio Grande do Sul.** Acta Geologica Leopoldensia, 38, Vol. 16, p. 179-197. 1993.

LEPSCH, I. F. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.132-185. Campinas, 1991.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos.** Oficina de Textos, 178p. São Paulo, 2002.

MACIEL FILHO, C. L. **Introdução à geologia de engenharia.** 2 ed. Santa Maria: UFSM; CPRM. Brasília, 1997.

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V. **Introdução à geologia de engenharia.** 5 ed. rev. e ampl. 456 p. Ed. da UFSM. Santa Maria, 2014.

MAGALHÃES, R. A. **Erosão: Definições, Tipos e Formas de Controle.** Anais do VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia, maio de 2001.

MANTELLI, L. R.; ROSSETTI, D. F. **Significado tectônico de lineamentos de drenagem no sudoeste da ilha de Marajó.** Revista Brasileira de Geociências, 39(1) INPE. São José dos Campos, 2009. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/marajo/significado_tectonico.pdf> Acesso em: jul. 2016.

MARCELINO, E. V. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos.** CRS/INPE. Santa Maria, 2008.

MARCHIORI, J. N. C. **Vegetação e areais no sudoeste Rio-Grandense.** Ciência & Ambiente, vol. 11, p. 81-92. Santa Maria, 1995.

MAURO, J. R.; LOLLO, J. A. **Uso da Técnica de Avaliação do Terreno para a Elaboração de Carta de Susceptibilidade à Erosão na Bacia do Prosa – Campo Grande, MS.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 9 n.3, 23-38. Jul/Set 2004.

MEDEIROS, E.; ROBAINA, L. E. S.; CABRAL, I. L. L. **Degradação ambiental na região centro-oeste do Rio Grande do Sul.** Revista Sociedade & Natureza. n. 11. ISBN: 14964. Editora: Ciência e Ambiente. Julho/Dezembro 1995.

MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E. M.; NARDY, A. J. R. Geological and Magmatic aspects of the Paraná Basin – an introduction. In: PICCIRILLO E. M.; MELFI, A. J. (Eds.) **The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin, petrogenetic and geophysical aspects**. p.1-13. 1988.

MENDONÇA, J. K. S.; GUERRA, A. J. T. Erosão dos solos e a questão Ambiental. **In: Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil.** GUERRA, A. J. T. e VITTE, C. A. (Orgs.). Ed. Bertrand Brasil. p. 225-251. Rio de Janeiro, 2004.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation.** 2. Ed. 198p. Ed. Longman. England, 1996.

MÜLLER FILHO, I. L. **Notas para o Estudo da Geomorfologia do Rio Grande do Sul.** UFSM, Santa Maria, 1970.

NASCIMENTO, E. E. D. J. **Contribuição aos estudos de processos erosivos acelerados em área de dunas poligenéticas – o caso da praia Mole, ilha de Santa Catarina.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade federal de Santa Catarina. 161p. Florianópolis, 1998.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações.** 2ª. Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1998.

NUMMER, A. V.; PIRES, C. A. F.; STRIEDER, A. J. **Uso de estatística vetorial para análise de lineamentos da Bacia do rio Três Forquilhas, Nordeste do rio Grande do Sul.** Revista Brasileira de Estatística. V. 74, n. 239, p 21 a 42. Rio de Janeiro, jul/dez. 2013.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.) **Erosão e conservação dos solos: conceitos temas e aplicações.** Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, 1999.

OLIVEIRA, M. A. T.; SBRUZZI, G. J.; PAULINO, L. A. **Taxa de erosão por voçorocas no médio vale do rio Paraíba do Sul.** In: VI Simpósio de Geografia Física Aplicada. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 1995.

OLIVEIRA, M. A. T. **Slope geometry and gully erosion development: Bananal, São Paulo, Brazil.** Z. Geomorph. N. F. Berlim, 1989.

PÁNEK, T. **The use morphometric parameters in tectonic geomorphology (on the example of the Western Beskydy Mts).** Acta Universitatis Carolina e Geographica, Nº.1, P. 111-126. 2004.

PHILLIPS, L. F.; SCHUMM, S. A. **Effect of Regional Slope on Drainage Networks.** Geology, 15:813 – 816. 1987.

PIRES, J. S. R; SANTOS, J. E; DEL PRETTE, M. E. A utilização do conceito de bacia hidrográfica para a conservação de recursos naturais. In: **Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações.** Orgs: SCHIAVETTI, A. e CAMARGO, A. F. M. Editus. Ilhéus - BA, 2002.

POESEN, J. **Gully typology and gully control measures in the European loess belt.** Soil Erosion on agricultural land. P. 513-530. Leuven, 1993.

PRUSKI, F. F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica.** 2ª ed. 279p. Editora UFV. Viçosa, 2009.

RADAMBRASIL. **Levantamentos de Recursos Naturais.** Vol. 33, 1986.

RECKZIEGEL, E. W.; ROBAINA, L. E. de S. **Estudo de parâmetros morfométricos do relevo e da rede de drenagem da área situada entre os rios Jaguari e Ibicuí no município de São Vicente do Sul - RS.** ANAIS – VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology. Goiânia, 2006. Disponível em: http://jararaca.ufsm.br/websites/lageolam/download/artigos/Reckziegel_E.pdf. Acesso em 19. Dez. 2017.

RIBEIRO, M. **Geossuturas do Escudo do Rio Grande do Sul.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Anais. v. 5, p. 2709-2718. Balneário Camboriú, 1980.

RIBEIRO, R. M. N. **Análise de área urbana degradada por processo erosivo voçoroca no município de Planaltina de Goiás.** Trabalho apresentação para título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Católica de Brasília. Brasília, 2015. Disponível em: http://repositorio.ucb.br/jspui/bitstream/10869/5932/1/Rhael%20Maycon%20Noronha%20Ribeiro.pdf. Acesso em: ago. 2016.

RIOS, M. L. **Vulnerabilidade à erosão nos compartimentos morfopedológicos da microbacia do Córrego do Coxo / Jacobina-BA.** Belo Horizonte – MG. Dissertação de Mestrado - Programa De Pós-Graduação Em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R. **Degradação dos solos: Problema ambiental no sudoeste gaúcho.** Interface, v.1, n.1, p. 29-41. Porto Nacional - TO, 2004. Disponível em: file:///C:/Users/user/Downloads/317-1081-1-PB%20(1).pdf. Acesso em: mar. 2016.

ROBAINA, L. E. S.; NETO, S. F; PAULA, P. M.; PEREIRA, V. P. **Processo Erosivo Acelerado no RS: Voçorocamento no Município de Cacequi.** Rev. de Geografia Teorética. v. 27, n 2, 109 -120. Rio Claro, 2002.

RODRIGUEZ, J. M. M.; SILVA. E. V.; CAVALCANTI, A. P. B. **Geoecologia das Paisagens: Uma visão geossistêmica da análise ambiental.** 3ª. Ed. Edições UFSC. Fortaleza, 2010.

ROSS, J. L. S. **Geografia do Brasil.** Editora Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia. Ambiente e Planejamento.** Contexto: São Paulo, 1996.

ROSS, J. L. S. **O Registro Cartográfico dos Fatos Geomorfológicos e a Questão da Taxonomia do Relevo.** Revista do Departamento de Geografia, USP, Nº 6, São Paulo, 1992.

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, 240p. Porto Alegre, 2011.

SALOMÃO, F. X. T., IWASA, O. Y. **Erosão e a Ocupação Rural e Urbana**. In: BITAR, Omar Yaszbek (coordenação geral). Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente. Associação Brasileira de Geologia e Engenharia: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Geologia. Série Meio Ambiente. São Paulo, 1995.

SILVA, T. A.; FERREIRA, M. F. M. **Análise dos processos erosivos lineares - ravinas e voçorocas entre os municípios de Nazareno e São João del Rei – MG.** Anais I Simpósio Mineiro de Geografia: Das diversidades à articulação geográfica. ISBN: 978-85-99907-05-4. 21-33p. Universidade Federal de Alfenas - MG. Alfenas, 2014.

SILVA, T. M.; MONTEIRO, H. S.; CRUZ, M. A.; MOURA, J. R. S. **Anomalias de Drenagem e Evolução da paisagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (RJ/SP).** Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. ISSN 0101-9759. Vol. 29 - 2 / p. 210-224. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.anuario.igeo.ufrj.br/anuario_2006_2/anuario_2006_v29_2_210_224.pdf>. Acesso em: 28 Jul. 2016.

SOTCHAVA, V. B. **Définition de quelques notions et termes de Géographie Physique.** Dokl. Institute de Géographie de la Sibérie et Extreme Orient, 3: 94 – 11, 1962.

STRIEDER, A. J.; AMARO, V. E. **Structural patterns removed from remotely sensed lineaments.** Egatea. Revista da Escola de Engenharia, v. 25, n. 4, p.109-117. Porto Alegre, 1997.

SUERTEGARAY, D. M. A. **A Trajetória da Natureza. Um estudo Geomorfológico sobre os Areais de Quarai – RS.** 1987. 243 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987.

SUERTEGARAY, D. M. A. **Deserto Grande do Sul: controvérsia.** Editora da Universidade. 109 p. Porto Alegre, 1998.

SUERTEGARAY, D. M. A., GUASSELLI, L. A. & VERDUM, R. **Atlas de Arenização: Sudoeste do Rio Grande do Sul.** Secretaria da Coordenação e Planejamento. v. 1. Atlas. Porto Alegre, 2001.

TOMINAGA, L. K. **Análise Morfodinâmica das Vertentes da Serra do Juqueriquerê em São Sebastião - SP.** Dissertação de Mestrado em Geografia Física, Departamento de Geografia, FFLCH – USP. São Paulo, 2000.

TOY, T. J.; FOSTER, G. R.; RENARD, K. G. **Soil erosion: processes, prediction, measurement and control.** Willey, 338 p. New York, 2002.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. **Os Processos Erosivos Atuantes na Dinâmica Superficial do Sudoeste do Rio Grande do Sul.** In: IV Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental e Responsabilidade Social, v. 1. Porto Alegre, 2004.

TRENTIN, R.; ROBAINA. L. E. S.; SCCOT, A. A. V. **Determinação dos litótipos aflorantes na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, RS.** Revista Geografia Ensino & Pesquisa. Vol. 19, n. 2, maio/ago, 2015.

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

VELOSO, Antônio J. G. **A importância do Estudo das Vertentes.** GEOgraphia. V.8, n.8, 2002.

VIEIRA, N. M. **Estudo geomorfológico das boçorocas de Franca, SP.** Tese de doutorado - Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), Franca, 1978.

VIEIRA, N. M. **Os processos morfogenéticos atuantes nas boçorocas de Franca (SP, Brasil).** Notícia Geomorfológica, v. 15, n. 29, p. 3–52, Campinas, 1975.

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

VIEIRA, A. F. G. **Erosão por voçorocas em áreas urbanas: o caso de Manaus (AM).** (Dissertação de Mestrado). DPGG/UFSC. 181 p. Florianópolis, 1998. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/77508. Acesso em: 24 jun. 2016.

VIERO, A. C. **Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: bacia do Taboão, RS.** Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 141 p. Porto Alegre, 2004. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5370/000424928.pdf?sequence=1. Acesso em: 20 jun. 2015.

VILLELA, S. M.; MATOS, A. **Hidrologia Aplicada**. McGraw-Hill do Brasil, 245 p. São Paulo, 1975.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação.** UFRGS Centro de Ecologia. ISBN 978-85-63843-02-9. Porto Alegre, 2004. Disponível em: <http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>. Acesso em: 20 jun. 2016.

WILSON, J. S.; CHANDRASEKAR, J. N.; MAGESH, N. S. **Morphometric Analysis of Major Sub-Watersheds in Aiyar & Karai Pottanar Basin, Central Tamil Nadu, India Using Remote Sensing & GIS Techniques.** Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, Vol. 2, Special Issue 1, July 2012.

XAVIER DA SILVA, J. Geomorfologia e Geoprocessamento. In: GUERRA, A. J.T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos.** Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, 2005.

ZAIDAN, R. T.; XAVIER DA SILVA, J. Geoprocessamento aplicado ao zoneamento de áreas com necessidade de proteção: O caso do Parque Estadual do Ibitipoca - MG. In: XAVIER DA SILVA, J.; ZAIDAN, R. T. (Orgs). **Geoprocessamento & Análise Ambiental.** Bertrand Brasil, 4ª edição. Rio de Janeiro, 2010.

ZALÁN, P. V.; WOFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. In RAJA CABAGLIA, G.P.; MILANI, E. J. (Eds.). **Origem e evolução das Bacias Sedimentares**. Petrobrás. p.135-168. 1990.

ZUQUETTE, L. V.; CARVALHO, J. A. R.; YAMANOUTH, G. R. D. B. **Feições erosivas na bacia do córrego do Espraiado, São Pedro (SP), seus tipos e evolução entre 1972 - 2002.** Revista Brasileira de Geociências, v. 37, p. 414-425, Curitiba, junho 2007.

APÊNDICE A - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES MORFOLÓGICAS POR FORMA DE VOÇOROCA.

LINEAR

		VALOR INFORMATIVO										
Código	Classes	Count	Area (m²)	Nº pixels Voço. Linear	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Planície de Inundação	316602	49469063	0	0	316602	649375	1810485	0	0,35867	0	0
2	Terraços	250281	39106406	12812,5	12812,5	250281	649375	1810485	0,05119	0,35867	0,14273	-1,947
3	Vales entalhados e não ent. em Sup. de Dissec.	440620	68846875	260468,75	260468,75	440620	649375	1810485	0,59114	0,35867	1,64813	**0,500**
4	Topos de Colinas	802982	125465938	376093,75	376093,75	802982	649375	1810485	0,46837	0,35867	1,30584	**0,267**
		1810485	**282888281**	**649375**								

BULBIFORME

		VALOR INFORMATIVO										
Código	Classes	Count	Area (m²)	Nº pixels Voço. Bulbiforme	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Planície de Inundação	316602	49469063	0	0	316602	2031875	1810485	0	1,12228	0	0
2	Terraços	250281	39106406	2812,5	2812,5	250281	2031875	1810485	0,01124	1,12228	0,01001	-4,604
3	Vales entalhados e não ent. em Sup. de Dissec.	440620	68846875	526250	526250	440620	2031875	1810485	1,19434	1,12228	1,06421	**0,062**
4	Topos de Colinas	802982	125465938	1502812,5	1502812,5	802982	2031875	1810485	1,87154	1,12228	1,66762	**0,511**
		1810485	**282888281**	**2031875**								

RAMIFICADA

		VALOR INFORMATIVO										
Código	Classes	Count	Area (m²)	Nº pixels Voço. Ramificada	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Planície de Inundação	316602	49469063	0	0	316602	10812188	1810485	0	5,97198	0	0
2	Terraços	250281	39106406	250937,5	250937,5	250281	10812188	1810485	1,00262	5,97198	0,16789	-1,784
3	Vales entalhados e não ent. em Sup. de Dissec.	440620	68846875	2890781,25	2890781,3	440620	10812188	1810485	6,56071	5,97198	1,09858	**0,094**
4	Topos de Colinas	802982	125465938	7670468,75	7670468,8	802982	10812188	1810485	9,55248	5,97198	1,59955	**0,470**
		1810485	**282888281**	**10812187,5**								

IRREGULAR MISTA

		VALOR INFORMATIVO										
Código	Classes	Count	Area (m²)	Nº pixels Voço. Irregular Mista	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Planície de Inundação	316602	49469063	0	0	316602	2657813	1810485	0	1,46801	0	0
2	Terraços	250281	39106406	131718,75	131718,75	250281	2657813	1810485	0,52628	1,46801	0,3585	-1,026
3	Vales entalhados e não ent. em Sup. de Dissec.	440620	68846875	761406,25	761406,25	440620	2657813	1810485	1,72803	1,46801	1,17713	**0,163**
4	Topos de Colinas	802982	125465938	1764687,5	1764687,5	802982	2657813	1810485	2,19767	1,46801	1,49704	**0,403**
		1810485	**282888281**	**2657812,5**								

RETANGULAR

		VALOR INFORMATIVO										
Código	Classes	Count	Area (m²)	Nº pixels Voço. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Planície de Inundação	316602	49469063	0	0	316602	1432344	1810485	0	0,79114	0	0
2	Terraços	250281	39106406	12968,75	12968,75	250281	1432344	1810485	0,05182	0,79114	0,0655	-2,726
3	Vales entalhados e não ent. em Sup. de Dissec.	440620	68846875	344218,75	344218,75	440620	1432344	1810485	0,78121	0,79114	0,98746	-0,013
4	Topos de Colinas	802982	125465938	1075156,25	1075156,3	802982	1432344	1810485	1,33895	0,79114	1,69244	**0,526**
		1810485	**282888281**	**1432343,75**								

IRREGULAR RETANGULAR

		VALOR INFORMATIVO										
Código	Classes	Count	Area (m²)	Nº pixels Voço. Irreg. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Planície de Inundação	316602	49469063	0	0	316602	4905938	1810485	0	2,70974	0	0
2	Terraços	250281	39106406	125625	125625	250281	4905938	1810485	0,50194	2,70974	0,18523	-1,686
3	Vales entalhados e não ent. em Sup. de Dissec.	440620	68846875	1264218,75	1264218,8	440620	4905938	1810485	2,86918	2,70974	1,05884	**0,057**
4	Topos de Colinas	802982	125465938	3516093,75	3516093,8	802982	4905938	1810485	4,3788	2,70974	1,61595	**0,480**
		1810485	**282888281**	**4905937,5**								

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Apêndice B - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES DE DECLIVIDADE POR FORMA DE VOÇOROCA.

LINEAR

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Linear	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	< 2	262353	40992656	44843,75	44843,75	262353	649375	1805052	0,170929	0,359754	0,475127	-0,744
2	2 a 5	467309	73017031	117500	117500	467309	649375	1805052	0,25144	0,359754	0,698921	-0,358
3	5 a 15	954517	149143281	431562,5	431562,5	954517	649375	1805052	0,452127	0,359754	1,256765	**0,229**
4	>15	120873	18886406	55468,75	55468,75	120873	649375	1805052	0,458901	0,359754	1,275596	**0,243**
		1805052	**282039375**	**649375**								

BULBIFORME

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Bulbiforme	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	< 2	262353	40992656	113593,75	113593,8	262353	2031875	1805052	0,432981	1,12566	0,384646	-0,955
2	2 a 5	467309	73017031	313437,5	313437,5	467309	2031875	1805052	0,670729	1,12566	0,595854	-0,518
3	5 a 15	954517	149143281	1314375	1314375	954517	2031875	1805052	1,377005	1,12566	1,223287	**0,202**
4	>15	120873	18886406	290468,75	290468,8	120873	2031875	1805052	2,40309	1,12566	2,134828	**0,758**
		1805052	**282039375**	**2031875**								

RAMIFICADA

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Ramificada	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	< 2	262353	40992656	759843,75	759843,8	262353	10812188	1805052	2,896265	5,989959	0,48352	-0,727
2	2 a 5	467309	73017031	1973750	1973750	467309	10812188	1805052	4,223651	5,989959	0,705122	-0,349
3	5 a 15	954517	149143281	7112343,75	7112344	954517	10812188	1805052	7,451249	5,989959	1,243957	**0,218**
4	>15	120873	18886406	966250	966250	120873	10812188	1805052	7,993928	5,989959	1,334555	**0,289**
		1805052	**282039375**	**10812187,5**								

IRREGULAR MISTA

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Irregular Mista	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	< 2	262353	40992656	161093,75	161093,8	262353	2657813	1805052	0,614034	1,47243	0,417021	-0,875
2	2 a 5	467309	73017031	439843,75	439843,8	467309	2657813	1805052	0,941227	1,47243	0,639234	-0,447
3	5 a 15	954517	149143281	1741406,25	1741406	954517	2657813	1805052	1,824385	1,47243	1,23903	**0,214**
4	>15	120873	18886406	315468,75	315468,8	120873	2657813	1805052	2,609919	1,47243	1,772525	**0,572**
		1805052	**282039375**	**2657812,5**								

RETANGULAR

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	< 2	262353	40992656	73437,5	73437,5	262353	1432344	1805052	0,279919	0,793519	0,352756	-1,042
2	2 a 5	467309	73017031	198125	198125	467309	1432344	1805052	0,42397	0,793519	0,534291	-0,627
3	5 a 15	954517	149143281	979062,5	979062,5	954517	1432344	1805052	1,025715	0,793519	1,292615	**0,257**
4	>15	120873	18886406	181718,75	181718,8	120873	1432344	1805052	1,503386	0,793519	1,89458	**0,639**
		1805052	**282039375**	**1432343,75**								

IRREGULAR RETANGULAR

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Irreg. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	< 2	262353	40992656	334687,5	334687,5	262353	4905938	1805052	1,275714	2,717893	0,469376	-0,756
2	2 a 5	467309	73017031	876718,75	876718,8	467309	4905938	1805052	1,876101	2,717893	0,690278	-0,371
3	5 a 15	954517	149143281	3197812,5	3197813	954517	4905938	1805052	3,350189	2,717893	1,232642	**0,209**
4	>15	120873	18886406	496718,75	496718,8	120873	4905938	1805052	4,109427	2,717893	1,51199	**0,413**
		1805052	**282039375**	**4905937,5**								

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Apêndice C - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES DE ORIENTAÇÃO DE VERTENTES POR FORMA DE VOÇOROCA.

(Continua)

	VALOR INFORMATIVO												
LINEAR	Código	Classe	Count	Área	Nº pixels Voço. Linear	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	Plano	144494	22577188	17969	17968,75	144494	649375	1805416	0,124356	0,359682	0,34574	-1,06207
	2	N	211074	32980313	47656	47656,25	211074	649375	1805416	0,22578	0,359682	0,627721	-0,46566
	3	NE	241858	37790313	75938	75937,5	241858	649375	1805416	0,313976	0,359682	0,872926	-0,1359
	4	E	199830	31223438	111563	111562,5	199830	649375	1805416	0,558287	0,359682	1,55217	**0,439654**
	5	SE	195508	1617188	129063	129062,5	195508	649375	1805416	0,660139	0,359682	1,835343	**0,607231**
	6	S	164730	25739063	73125	73125	164730	649375	1805416	0,443908	0,359682	1,23417	**0,210398**
	7	SO	203753	31836406	66406	66406,25	203753	649375	1805416	0,325915	0,359682	0,906122	-0,09858
	8	O	205703	32141094	62031	62031,25	205703	649375	1805416	0,301557	0,359682	0,838401	-0,17626
	9	NO	238466	37260313	65625	65625	238466	649375	1805416	0,275196	0,359682	0,765111	-0,26773
			1805416	**253165313**	**649375**								

	VALOR INFORMATIVO												
BULBIFORME	Código	Classe	Count	Área	Nº pixels Voço. Bulbiforme	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	Plano	144494	22577188	39688	39687,5	144494	2031875	1805416	0,274665	1,125433	0,244053	-1,41037
	2	N	211074	32980313	254375	254375	211074	2031875	1805416	1,205146	1,125433	1,070829	**0,068433**
	3	NE	241858	37790313	298281	298281,3	241858	2031875	1805416	1,233291	1,125433	1,095837	**0,091518**
	4	E	199830	31223438	306719	306718,8	199830	2031875	1805416	1,534898	1,125433	1,363829	**0,310296**
	5	SE	195508	1617188	279844	279843,8	195508	2031875	1805416	1,431367	1,125433	1,271837	**0,240462**
	6	S	164730	25739063	202656	202656,3	164730	2031875	1805416	1,230233	1,125433	1,093119	**0,089035**
	7	SO	203753	31836406	248125	248125	203753	2031875	1805416	1,217773	1,125433	1,082049	**0,078856**
	8	O	205703	32141094	177813	177812,5	205703	2031875	1805416	0,864414	1,125433	0,768072	-0,26387
	9	NO	238466	37260313	224375	224375	238466	2031875	1805416	0,94091	1,125433	0,836042	-0,17908
			1805416	**253165313**	**2031875**								

	VALOR INFORMATIVO												
RAMIFICADA	Código	Classe	Count	Área	Nº pixels Voço. Ramificada	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	Plano	144494	22577188	283750	283750	144494	10812188	1805416	1,963749	5,988751	0,327906	-1,11503
	2	N	211074	32980313	1202344	1202344	211074	10812188	1805416	5,696314	5,988751	0,951169	-0,05006
	3	NE	241858	37790313	1370313	1370313	241858	10812188	1805416	5,665773	5,988751	0,946069	-0,05544
	4	E	199830	31223438	1291563	1291563	199830	10812188	1805416	6,463306	5,988751	1,079241	**0,076258**
	5	SE	195508	1617188	1617188	1617188	195508	10812188	1805416	8,27172	5,988751	1,38121	**0,32296**
	6	S	164730	25739063	1372031	1372031	164730	10812188	1805416	8,32897	5,988751	1,390769	**0,329857**
	7	SO	203753	31836406	1304688	1304688	203753	10812188	1805416	6,40328	5,988751	1,069218	**0,066927**
	8	O	205703	32141094	1117656	1117656	205703	10812188	1805416	5,433349	5,988751	0,907259	-0,09733
	9	NO	238466	37260313	1252656	1252656	238466	10812188	1805416	5,252976	5,988751	0,87714	-0,13109
			1805416	**253165313**	**10812187,5**								

IRREGULAR MISTA	Código	Classe	Count	Área	Nº pixels Voço. Irregular Mista	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	Plano	144494	22577188	62344	62343,75	144494	2657813	1805416	0,431463	1,472133	0,293087	-1,22729
	2	N	211074	32980313	308125	308125	211074	2657813	1805416	1,459796	1,472133	0,99162	-0,00842
	3	NE	241858	37790313	344375	344375	241858	2657813	1805416	1,423873	1,472133	0,967217	-0,03333
	4	E	199830	31223438	352188	352187,5	199830	2657813	1805416	1,762436	1,472133	1,197199	**0,179984**
	5	SE	195508	1617188	461094	461093,8	195508	2657813	1805416	2,358439	1,472133	1,602056	**0,471288**
	6	S	164730	25739063	338906	338906,3	164730	2657813	1805416	2,057344	1,472133	1,397526	**0,334703**
	7	SO	203753	31836406	240781	240781,3	203753	2657813	1805416	1,181731	1,472133	0,802734	-0,21973
	8	O	205703	32141094	206406	206406,3	205703	2657813	1805416	1,003419	1,472133	0,681609	-0,3833
	9	NO	238466	37260313	343594	343593,8	238466	2657813	1805416	1,44085	1,472133	0,97875	-0,02148
			1805416	**253165313**	**2657812,5**								

(Conclusão)

RETANGULAR

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classe	Count	Área	Nº pixels Voço. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Plano	144494	22577188	26875	26875	144494	1432344	1805416	0,185994	0,793359	0,234438	-1,45056
2	N	211074	32980313	173906	173906,3	211074	1432344	1805416	0,823911	0,793359	1,03851	**0,037787**
3	NE	241858	37790313	152344	152343,8	241858	1432344	1805416	0,629889	0,793359	0,793952	-0,23073
4	E	199830	31223438	114688	114687,5	199830	1432344	1805416	0,573925	0,793359	0,723412	-0,32378
5	SE	195508	1617188	132344	132343,8	195508	1432344	1805416	0,676922	0,793359	0,853236	-0,15872
6	S	164730	25739063	141875	141875	164730	1432344	1805416	0,861258	0,793359	1,085583	**0,082118**
7	SO	203753	31836406	257500	257500	203753	1432344	1805416	1,263785	0,793359	1,592954	**0,46559**
8	O	205703	32141094	237969	237968,8	205703	1432344	1805416	1,156856	0,793359	1,458174	**0,377185**
9	NO	238466	37260313	194844	194843,8	238466	1432344	1805416	0,817071	0,793359	1,029888	**0,02945**
		1805416	**253165313**	**1432343,75**								

IRREGULAR RETANGULAR

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classe	Count	Área	Nº pixels Voço. Irreg. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Plano	144494	22577188	138438	138437,5	144494	4905938	1805416	0,958085	2,717345	0,352581	-1,04247
2	N	211074	32980313	520781	520781,3	211074	4905938	1805416	2,467292	2,717345	0,907979	-0,09653
3	NE	241858	37790313	602656	602656,3	241858	4905938	1805416	2,491777	2,717345	0,91699	-0,08666
4	E	199830	31223438	637188	637187,5	199830	4905938	1805416	3,188648	2,717345	1,173443	**0,159942**
5	SE	195508	1617188	667813	667812,5	195508	4905938	1805416	3,415781	2,717345	1,257029	**0,228751**
6	S	164730	25739063	582031	582031,3	164730	4905938	1805416	3,533244	2,717345	1,300256	**0,262561**
7	SO	203753	31836406	671094	671093,8	203753	4905938	1805416	3,293663	2,717345	1,212089	**0,192345**
8	O	205703	32141094	538750	538750	205703	4905938	1805416	2,619067	2,717345	0,963833	-0,03684
9	NO	238466	37260313	547188	547187,5	238466	4905938	1805416	2,294614	2,717345	0,844433	-0,16909
		1805416	**253165313**	**4905937,5**								

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Apêndice D - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES DE CURVATURA DAS VERTENTES POR FORMA DE VOÇOROCA.

(Continua)

LINEAR

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Linear	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Côncavo-Divrgente	138028	21566875	62500	62500	138028	649375	1803075	0,452807	0,360149	1,257277	**0,228948**
2	CôncavoPlanar	373574	58370938	182344	182343,8	373574	649375	1803075	0,488106	0,360149	1,355291	**0,304016**
3	Retílineo-Planar	263515	41174219	72344	72343,75	263515	649375	1803075	0,274534	0,360149	0,762279	-0,27144
4	Convexo-Planar	371531	58051719	72813	72812,5	371531	649375	1803075	0,19598	0,360149	0,544163	-0,60851
5	Convexo-Divergente	176377	27558906	35938	35937,5	176377	649375	1803075	0,203754	0,360149	0,565749	-0,5696
6	Concavo-Convergente	176269	27542031	113750	113750	176269	649375	1803075	0,645321	0,360149	1,791817	**0,58323**
7	Convexo Convergente	122646	19163438	39844	39843,75	122646	649375	1803075	0,324868	0,360149	0,902038	-0,1031
8	Retilineo Divergente	92991	14529844	28281	28281,25	92991	649375	1803075	0,304129	0,360149	0,844454	-0,16907
9	Retilineo Convergente	88144	13772500	41563	41562,5	88144	649375	1803075	0,47153	0,360149	1,309264	**0,269465**
		1803075	**281730469**	**649375**								

BULBIFORME

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Bulbiforme	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Côncavo-Divrgente	138028	21566875	191563	191562,5	138028	2031875	1803075	1,387852	1,126894	1,231573	**0,208292**
2	CôncavoPlanar	373574	58370938	535781	535781,3	373574	2031875	1803075	1,434204	1,126894	1,272705	**0,241144**
3	Retílineo-Planar	263515	41174219	185781	185781,3	263515	2031875	1803075	0,705012	1,126894	0,625624	-0,46901
4	Convexo-Planar	371531	58051719	269063	269062,5	371531	2031875	1803075	0,724199	1,126894	0,642651	-0,44215
5	Convexo-Divergente	176377	27558906	138281	138281,3	176377	2031875	1803075	0,78401	1,126894	0,695726	-0,3628
6	Concavo-Convergente	176269	27542031	366250	366250	176269	2031875	1803075	2,07779	1,126894	1,84382	**0,611839**
7	Convexo Convergente	122646	19163438	148125	148125	122646	2031875	1803075	1,207744	1,126894	1,071746	**0,069289**
8	Retilineo Divergente	92991	14529844	86563	86562,5	92991	2031875	1803075	0,93087	1,126894	0,826049	-0,1911
9	Retilineo Convergente	88144	13772500	110469	110468,8	88144	2031875	1803075	1,253276	1,126894	1,11215	**0,106295**
		1803075	**281730469**	**2031875**								

RAMIFICADA

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Ramificada	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Côncavo-Divrgente	138028	21566875	1030313	1030313	138028	10811250	1803075	7,464518	5,996007	1,244915	**0,219067**
2	CôncavoPlanar	373574	58370938	2921719	2921719	373574	10811250	1803075	7,820991	5,996007	1,304367	**0,265718**
3	Retílineo-Planar	263515	41174219	1131875	1131875	263515	10811250	1803075	4,295296	5,996007	0,716359	-0,33357
4	Convexo-Planar	371531	58051719	1403125	1403125	371531	10811250	1803075	3,776603	5,996007	0,629853	-0,46227
5	Convexo-Divergente	176377	27558906	699219	699218,8	176377	10811250	1803075	3,964342	5,996007	0,661164	-0,41375
6	Concavo-Convergente	176269	27542031	1819688	1819688	176269	10811250	1803075	10,32336	5,996007	1,721705	**0,543315**
7	Convexo Convergente	122646	19163438	731250	731250	122646	10811250	1803075	5,962282	5,996007	0,994375	-0,00564
8	Retilineo Divergente	92991	14529844	465000	465000	92991	10811250	1803075	5,000484	5,996007	0,833969	-0,18156
9	Retilineo Convergente	88144	13772500	609063	609062,5	88144	10811250	1803075	6,909858	5,996007	1,15241	**0,141855**
		1803075	**281730469**	**10811250**								

IRREGULAR MISTA

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Irregular Mista	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Côncavo-Divrgente	138028	21566875	267656	267656,3	138028	2657812,5	1803075	1,939145	1,474044	1,315527	**0,274237**
2	CôncavoPlanar	373574	58370938	723438	723437,5	373574	2657812,5	1803075	1,936531	1,474044	1,313753	**0,272888**
3	Retílineo-Planar	263515	41174219	241406	241406,3	263515	2657812,5	1803075	0,916101	1,474044	0,621488	-0,47564
4	Convexo-Planar	371531	58051719	347344	347343,8	371531	2657812,5	1803075	0,934898	1,474044	0,63424	-0,45533
5	Convexo-Divergente	176377	27558906	193750	193750	176377	2657812,5	1803075	1,098499	1,474044	0,745228	-0,29406
6	Concavo-Convergente	176269	27542031	456875	456875	176269	2657812,5	1803075	2,591919	1,474044	1,758373	**0,564389**
7	Convexo Convergente	122646	19163438	192656	192656,3	122646	2657812,5	1803075	1,570832	1,474044	1,065661	**0,063595**
8	Retilineo Divergente	92991	14529844	102969	102968,8	92991	2657812,5	1803075	1,107298	1,474044	0,751197	-0,28609
9	Retilineo Convergente	88144	13772500	131719	131718,8	88144	2657812,5	1803075	1,494359	1,474044	1,013781	**0,013687**
		1803075	**281730469**	**2657813**								

(Conclusão)

	VALOR INFORMATIVO												
RETANGULAR	Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	Côncavo-Divrgente	138028	21566875	143438	143437,5	138028	1432343,75	1803075	1,039191	0,794389	1,308164	**0,268624**
	2	CôncavoPlanar	373574	58370938	338750	338750	373574	1432343,75	1803075	0,906782	0,794389	1,141482	**0,132328**
	3	Retílineo-Planar	263515	41174219	145938	145937,5	263515	1432343,75	1803075	0,553811	0,794389	0,697153	-0,36075
	4	Convexo-Planar	371531	58051719	200313	200312,5	371531	1432343,75	1803075	0,539154	0,794389	0,678703	-0,38757
	5	Convexo-Divergente	176377	27558906	113906	113906,3	176377	1432343,75	1803075	0,645811	0,794389	0,812966	-0,20707
	6	Concavo-Convergente	176269	27542031	242656	242656,3	176269	1432343,75	1803075	1,376625	0,794389	1,732934	**0,549816**
	7	Convexo Convergente	122646	19163438	110000	110000	122646	1432343,75	1803075	0,89689	0,794389	1,129031	**0,12136**
	8	Retilineo Divergente	92991	14529844	64063	64062,5	92991	1432343,75	1803075	0,688911	0,794389	0,86722	-0,14246
	9	Retilineo Convergente	88144	13772500	73281	73281,25	88144	1432343,75	1803075	0,831381	0,794389	1,046566	**0,045514**
			1803075	**281730469**	**1432344**								

	VALOR INFORMATIVO												
IRREGULAR RETANGULAR	Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Irreg.	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	Côncavo-Divrgente	138028	21566875	464375	464375	138028	4905937,5	1803075	3,36435	2,72087	1,2365	**0,21228**
	2	CôncavoPlanar	373574	58370938	1277969	1277969	373574	4905937,5	1803075	3,42093	2,72087	1,25729	**0,22896**
	3	Retílineo-Planar	263515	41174219	550313	550313	263515	4905937,5	1803075	2,08835	2,72087	0,76753	-0,2646
	4	Convexo-Planar	371531	58051719	668750	668750	371531	4905937,5	1803075	1,79998	2,72087	0,66155	-0,4132
	5	Convexo-Divergente	176377	27558906	328438	328438	176377	4905937,5	1803075	1,86213	2,72087	0,68439	-0,3792
	6	Concavo-Convergente	176269	27542031	789844	789844	176269	4905937,5	1803075	4,4809	2,72087	1,64686	**0,49887**
	7	Convexo Convergente	122646	19163438	345625	345625	122646	4905937,5	1803075	2,81807	2,72087	1,03572	**0,0351**
	8	Retilineo Divergente	92991	14529844	205625	205625	92991	4905937,5	1803075	2,21124	2,72087	0,81269	-0,2074
	9	Retilineo Convergente	88144	13772500	275000	275000	88144	4905937,5	1803075	3,11989	2,72087	1,14665	**0,13685**
			1803075	**281730469**	**4905938**								

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Apêndice E - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES DE PERFIL CURVATURA DAS VERTENTES POR FORMA DE VOÇOROCA.

LINEAR

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Linear	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Côncavo	670607	104782344	148593,75	148593,8	670607	649375	1803205	0,221581	0,360123	0,615293	-0,486
2	Retílineo	444676	69480625	142187,5	142187,5	444676	649375	1803205	0,319755	0,360123	0,887907	-0,119
3	Convexo	687922	107487813	358593,75	358593,8	687922	649375	1803205	0,521271	0,360123	1,447482	0,370
		1803205	281750781	649375								

BULBIFORME

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço.	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Côncavo	670607	104782344	555468,75	555468,8	670607	2031875	1803205	0,828307	1,126813	0,735089	-0,308
2	Retílineo	444676	69480625	382812,5	382812,5	444676	2031875	1803205	0,86088	1,126813	0,763995	-0,269
3	Convexo	687922	107487813	1093593,75	1093594	687922	2031875	1803205	1,589706	1,126813	1,410798	0,344
		1803205	281750781	2031875								

RAMIFICADA

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Ramificada	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Côncavo	670607	104782344	2833593,75	2833594	670607	10811250	1803205	4,225416	5,995575	0,704756	-0,350
2	Retílineo	444676	69480625	2205937,5	2205938	444676	10811250	1803205	4,960775	5,995575	0,827406	-0,189
3	Convexo	687922	107487813	5771718,75	5771719	687922	10811250	1803205	8,390077	5,995575	1,399378	0,336
		1803205	281750781	10811250								

IRREGULAR MISTA

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Irregular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Côncavo	670607	104782344	733750	733750	670607	2657813	1803205	1,094158	1,473938	0,742336	-0,298
2	Retílineo	444676	69480625	476093,75	476093,8	444676	2657813	1803205	1,070653	1,473938	0,726389	-0,320
3	Convexo	687922	107487813	1447968,75	1447969	687922	2657813	1803205	2,104844	1,473938	1,428041	0,356
		1803205	281750781	2657812,5								

RETANGULAR

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço.	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Côncavo	670607	104782344	424218,75	424218,8	670607	1432344	1803205	0,632589	0,794332	0,796379	-0,228
2	Retílineo	444676	69480625	283281,25	283281,3	444676	1432344	1803205	0,637051	0,794332	0,801996	-0,221
3	Convexo	687922	107487813	724843,75	724843,8	687922	1432344	1803205	1,053671	0,794332	1,326487	0,283
		1803205	281750781	1432343,75								

IRREGULAR RETANGULAR

VALOR INFORMATIVO												
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Irreg. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Côncavo	670607	104782344	1342812,5	1342813	670607	4905938	1803205	2,002384	2,720677	0,735987	-0,307
2	Retílineo	444676	69480625	1030937,5	1030938	444676	4905938	1803205	2,318401	2,720677	0,852142	-0,160
3	Convexo	687922	107487813	2532187,5	2532188	687922	4905938	1803205	3,680922	2,720677	1,352944	0,302
		1803205	281750781	4905937,5								

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Apêndice F - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES DE PLANO CURVATURA DAS VERTENTES POR FORMA DE VOÇOROCA.

LINEAR

	VALOR INFORMATIVO											
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Linear	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Convergente	387306	60516563	195156,25	195156,3	387306	649375	1805052	0,503881	0,359754	1,400627	0,33692
2	Planar	1010051	157820469	327500	327500	1010051	649375	1805052	0,324241	0,359754	0,901285	-0,10393
3	Divergente	407695	63702344	126718,75	126718,8	407695	649375	1805052	0,310818	0,359754	0,863972	-0,14621
		1805052	**282039375**	**649375**								

BULBIFORME

	VALOR INFORMATIVO											
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Bulbiforme	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Convergente	387306	60516563	624843,75	624843,8	387306	2031875	1805052	1,613308	1,12566	1,43321	0,359917
2	Planar	1010051	157820469	990625	990625	1010051	2031875	1805052	0,980767	1,12566	0,871282	-0,13779
3	Divergente	407695	63702344	416406,25	416406,3	407695	2031875	1805052	1,021367	1,12566	0,907349	-0,09723
		1805052	**282039375**	**2031875**								

RAMIFICADA

	VALOR INFORMATIVO											
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Ramificada	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Convergente	387306	60516563	3160000	3160000	387306	10812188	1805052	8,158923	5,989959	1,3621	0,309028
2	Planar	1010051	157820469	5457500	5457500	1010051	10812188	1805052	5,403193	5,989959	0,902042	-0,10309
3	Divergente	407695	63702344	2194687,5	2194688	407695	10812188	1805052	5,38316	5,989959	0,898697	-0,10681
		1805052	**282039375**	**10812187,5**								

IRREGULAR MISTA

	VALOR INFORMATIVO											
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Irregular Mista	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Convergente	387306	60516563	781250	781250	387306	2657813	1805052	2,017139	1,47243	1,369939	0,314766
2	Planar	1010051	157820469	1312187,5	1312188	1010051	2657813	1805052	1,29913	1,47243	0,882303	-0,12522
3	Divergente	407695	63702344	564375	564375	407695	2657813	1805052	1,384307	1,47243	0,940151	-0,06171
		1805052	**282039375**	**2657812,5**								

RETANGULAR

	VALOR INFORMATIVO											
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Convergente	387306	60516563	425937,5	425937,5	387306	1432344	1805052	1,099744	0,793519	1,385907	0,326355
2	Planar	1010051	157820469	685000	685000	1010051	1432344	1805052	0,678184	0,793519	0,854653	-0,15706
3	Divergente	407695	63702344	321406,25	321406,3	407695	1432344	1805052	0,78835	0,793519	0,993485	-0,00654
		1805052	**282039375**	**1432343,75**								

	VALOR INFORMATIVO											
Código	Classes	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Irreg.	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
1	Convergente	387306	60516563	1410468,75	1410469	387306	4905938	1805052	3,64174	2,71789	1,33991	0,29261
2	Planar	1010051	157820469	2497031,25	2497031	1010051	4905938	1805052	2,47218	2,71789	0,9096	-0,0948
3	Divergente	407695	63702344	998437,5	998438	407695	4905938	1805052	2,44898	2,71789	0,90106	-0,1042
		1805052	**282039375**	**4905937,5**								

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Apêndice G - VALOR INFORMATIVO DAS CLASSES HIPSOMÉTRICAS POR FORMA DE VOÇOROCA.

LINEAR

	VALOR INFORMATIVO												
	Código	Classes (m)	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Linear	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	< 100	319477	49918281	0	0	319477	649375	1805052	0	0,359754	0	0
	2	100-120	369856	57790000	51250	51250	369856	649375	1805052	0,138567	0,359754	0,385173	-0,954
	3	120-140	462736	72302500	373906,25	373906,3	462736	649375	1805052	0,808034	0,359754	2,246072	**0,809**
	4	140-160	453848	70913750	196250	196250	453848	649375	1805052	0,432413	0,359754	1,201969	**0,184**
	5	>160	199135	31114844	27968,75	27968,75	199135	649375	1805052	0,140451	0,359754	0,390409	-0,941
			1805052	**282039375**	**649375**								

BULBIFORME

	VALOR INFORMATIVO												
	Código	Classes (m)	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Bulbiforme	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	< 100	319477	49918281	0	0	319477	2031875	1805052	0	1,12566	0	0
	2	100-120	369856	57790000	63750	63750	369856	2031875	1805052	0,172364	1,12566	0,153123	-1,877
	3	120-140	462736	72302500	759062,5	759062,5	462736	2031875	1805052	1,640379	1,12566	1,45726	**0,377**
	4	140-160	453848	70913750	1008750	1008750	453848	2031875	1805052	2,22266	1,12566	1,97454	**0,680**
	5	>160	199135	31114844	200312,5	200312,5	199135	2031875	1805052	1,005913	1,12566	0,893621	-0,112
			1805052	**282039375**	**2031875**								

RAMIFICADA

	VALOR INFORMATIVO												
	Código	Classes (m)	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Ramificada	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	< 100	319477	49918281	0	0	319477	10812188	1805052	0	5,989959	0	0
	2	100-120	369856	57790000	729062,5	729062,5	369856	10812188	1805052	1,971206	5,989959	0,329085	-1,111
	3	120-140	462736	72302500	4011718,75	4011719	462736	10812188	1805052	8,669563	5,989959	1,447349	**0,370**
	4	140-160	453848	70913750	4926718,75	4926719	453848	10812188	1805052	10,85544	5,989959	1,812272	**0,595**
	5	>160	199135	31114844	1144687,5	1144688	199135	10812188	1805052	5,748299	5,989959	0,959656	-0,041
			1805052	**282039375**	**10812187,5**								

IRREGULAR MISTA

	VALOR INFORMATIVO												
	Código	Classes (m)	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Irregular Mista	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	< 100	319477	49918281	0	0	319477	2657813	1805052	0	1,47243	0	0
	2	100-120	369856	57790000	235156,25	235156,3	369856	2657813	1805052	0,635805	1,47243	0,431807	-0,840
	3	120-140	462736	72302500	1137343,75	1137344	462736	2657813	1805052	2,457867	1,47243	1,669259	**0,512**
	4	140-160	453848	70913750	986250	986250	453848	2657813	1805052	2,173084	1,47243	1,475849	**0,389**
	5	>160	199135	31114844	299062,5	299062,5	199135	2657813	1805052	1,501808	1,47243	1,019952	**0,020**
			1805052	**282039375**	**2657812,5**								

RETANGULAR

	VALOR INFORMATIVO												
	Código	Classes (m)	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	< 100	319477	49918281	0	0	319477	1432344	1805052	0	0,793519	0	0
	2	100-120	369856	57790000	66406,25	66406,25	369856	1432344	1805052	0,179546	0,793519	0,226266	-1,486
	3	120-140	462736	72302500	495000	495000	462736	1432344	1805052	1,069724	0,793519	1,348076	**0,299**
	4	140-160	453848	70913750	785156,25	785156,3	453848	1432344	1805052	1,729998	0,793519	2,180159	**0,779**
	5	>160	199135	31114844	85781,25	85781,25	199135	1432344	1805052	0,430769	0,793519	0,542859	-0,611
			1805052	**282039375**	**1432343,75**								

IRREGULAR RETANGULAR

	VALOR INFORMATIVO/ALTIMETRIA												
	Código	Classes (m)	Count	Área (m²)	Nº pixels Voço. Irreg. Retangular	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log
	1	< 100	319477	49918281	0	0	319477	4905937,5	1805052	0	2,71789	0	0
	2	100-120	369856	57790000	396562,5	396562,5	369856	4905937,5	1805052	1,07221	2,71789	0,3945	-0,930
	3	120-140	462736	72302500	1976875	1976875	462736	4905937,5	1805052	4,27214	2,71789	1,57186	**0,452**
	4	140-160	453848	70913750	2222812,5	2222812,5	453848	4905937,5	1805052	4,8977	2,71789	1,80202	**0,589**
	5	>160	199135	31114844	309687,5	309687,5	199135	4905937,5	1805052	1,55516	2,71789	0,57219	-0,558
			1805052	**282039375**	**4905937,5**								

Fonte: Elaborado pela autora (2018).