

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

Daniéli Flores Dias

**UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA PONDERADA PARA O
ESTUDO DOS PROCESSOS EROSIVOS LINEARES NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ - RS**

Santa Maria, RS
2021

Daniéli Flores Dias

**UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA PONDERADA PARA O ESTUDO DOS
PROCESSOS EROSIVOS LINEARES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ
- RS**

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

Orientador: Prof. Dr. Luís Eduardo de Souza Robaina

Santa Maria, RS
2021

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

DIAS, DANIÉLLI FLORES

UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA PONDERADA PARA O ESTUDO DOS PROCESSOS EROSIVOS LINEARES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUI - RS / DANIÉLLI FLORES DIAS.- 2021.

190 p.; 30 cm

Orientador: LUÍS EDUARDO DE SOUZA ROBAINA
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, RS, 2021

1. Erosão Linear 2. Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí
3. Análise Hierárquica Ponderada 4. Suscetibilidade Erosiva I. DE SOUZA ROBAINA, LUÍS EDUARDO 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.

Declaro, DANIÉLLI FLORES DIAS, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Daniéli Flores Dias

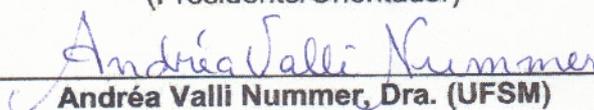
**UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA PONDERADA PARA O ESTUDO DOS
PROCESSOS EROSIVOS LINEARES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUI
- RS**

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

Aprovado em 08 de outubro de 2021:



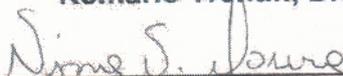
Luís Eduardo de Souza Robaina, Dr.
(Presidente/Orientador)



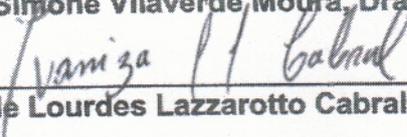
Andréa Valli Nummer, Dra. (UFSM)



Romário Trentin, Dr. (UFSM)



Nina Simone Vilaverde Moura, Dra. (UFRGS)



Ivaniza de Lourdes Lazzarotto Cabral, Dra. (UFMT)

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

Dedico a todas as pessoas que eu amo e que estiveram ao meu lado em todos os momentos!

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Santa Maria que durante uma década me proporcionou ensino público e de muita qualidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO) pela oportunidade de aprendizado e crescimento acadêmico e profissional ao longo desses anos de Mestrado e Doutorado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro no segundo ano de pesquisa, permitindo que eu me dedicasse exclusivamente as atividades do curso de Doutorado.

A secretária do PPGGEO Fátima Liliane Fernandes Bonilla (ou “Lili”), pela atenção e empenho para ajudar no que fosse preciso.

Ao Prof. Dr. Luís Eduardo de Souza Robaina pela sua orientação, amizade, ensinamentos, opiniões e críticas, que foram cruciais para a realização desse trabalho. Obrigada pelo apoio e por ter acreditado em mim em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Romario Trentin, o meu primeiro orientador da faculdade, por toda a ajuda durante esse trabalho. Obrigada por todos os ensinamentos ao longo desses anos de academia.

Ao querido Prof. Dr. Anderson Augusto Volpato Scoti ou simplesmente “Scoti” por toda a ajuda durante a realização dos mapas e as ponderações ao longo desse trabalho. Obrigada pela paciência e por sempre estar disposto em me ajudar no que fosse preciso. Obrigada por tudo Scoti, tu és um baita amigo!

Ao Prof. Dr Mauro Kumpfer Werlang e as Profe Dra. Andréa Valli Nummer, Nina Simone Vilaverde Moura e Ivaniza de Lourdes Lazzarotto Cabral, por terem aceito fazer parte da banca de qualificação e de defesa dessa tese, com valiosas sugestões e contribuições.

Aos demais professores do Departamento de Geociências pelos ensinamentos.

A minha querida mãe Mari Stela Flores Dias, por todo o amor, suporte, incentivo, apoio financeiro e que jamais mediu esforços para que eu chegasse até aqui. Obrigada por tudo, mãe!

Ao Gabriel Trost por ter sido meu maior incentivador nesses últimos dois anos, por ter toda paciência do mundo em momentos de crise e ansiedade, por todo amor e orgulho que sempre demonstrou por mim. Te ouvir dizendo todo feliz que tua

namorada seria “doutora” era o que me dava todo incentivo que eu precisava para concluir esse trabalho. Obrigada por tudo meu amor, esse título também é teu!

As famílias “Flores”, “Dias”, “Trost” e “Santos” por sempre estarem do meu lado e vibrando com cada conquista. Obrigada por tudo, vocês são demais!

As minhas queridas amigas Eloisa Penna da Rosa, Patrícia Ziani, Marinéli Moraes Gaberti, Angeli Aline Behling e Rothieri Serres Luiz, pelo apoio, carinho e palavras de incentivo em todos os momentos. Apesar da distância física, tenho todas vocês em meu coração. Vocês foram os melhores presentes que a Geografia poderia ter me dado.

Aos amigos e colegas da Família Lageolam, em especial os meus queridos amigos Igor da Silva Knierin, Jonatas Giovani Silva Aimon, Lucas Krein Rademann, Ricardo Vieira da Silva e Vinicius Silveira dos Santos por toda a ajuda ao longo do trabalho e também pelas conversas, risadas e pela parceria constante para um café durante o expediente. Sinto saudades dessa galera incrível todos os dias!

Ao meu querido amigo Lucas Krein Rademann por toda a ajuda, por ter sido o entregador oficial da minha tese, já que pela distância, não pude estar presente nesse dia. Obrigada por tudo Lucas!

Aos amigos Rodrigo Corrêa Pontes e Rodrigo Diniz Marques pela grande ajuda com a discussão dos solos e com o auxílio para o abstract dessa tese.

Enfim, agradeço a todos aqueles que me apoiaram, torceram por mim e que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

Muito obrigada!

EPÍGRAFE

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.
(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA PONDERADA PARA O ESTUDO DOS PROCESSOS EROSIVOS LINEARES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ - RS

AUTORA: Daniéli Flores Dias

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís Eduardo de Souza Robaina

Essa tese tem como objetivo geral utilizar o método da análise hierárquica ponderada para analisar a suscetibilidade aos processos erosivos lineares na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. A justificativa pela escolha da área de estudo se deve em razão dessa bacia hidrográfica apresentar intensos processos erosivos, principalmente na margem esquerda do rio Ibicuí. A revisão bibliográfica abordou questões relacionadas a definição e as considerações iniciais sobre a erosão, processos erosivos lineares enfatizando as ravinas e as voçorocas, fatores condicionantes da erosão linear, além das geotecnologias e utilização da análise multicritério para o estudo dos processos erosivos. A metodologia de trabalho utilizou-se da análise hierárquica ponderada, aliada ao método dedutivo e foi dividida em três etapas - etapa de gabinete, estruturação da análise hierárquica ponderada e validação das informações. Como resultados da pesquisa, apresentou-se a discussão dos fatores condicionantes elencados para esse trabalho - relevo, solos, litologia e uso e ocupação - que foram ponderados e hierarquizados para definir a suscetibilidade erosiva da bacia. Posteriormente, realizou-se o cruzamento automatizado dos fatores condicionantes, que deram origem ao mapa da suscetibilidade erosiva. Esse mapa foi classificado em cinco classes de suscetibilidade - muito baixa, baixa, média, alta e muito alta - que foram validadas a partir da demarcação das feições erosivas na área de estudo e dos trabalhos de campo realizados durante a pesquisa. Para validar todas as informações levantadas no decorrer do trabalho, realizou-se um cruzamento do mapa de suscetibilidade com o mapa das feições erosivas, com o intuito de verificar e analisar se as hierarquizações realizadas e as informações refinadas e detalhadas, vão de encontro a distribuição dos processos erosivos da área de estudo. Sendo assim, no mapeamento final da suscetibilidade erosiva, observou-se que mais de 83% das ravinas e voçorocas ocorriam nas áreas mapeadas como alta e muito alta suscetibilidade. Isso reforça que todo o processo de hierarquização e comparação vem ao encontro de todas as informações levantadas e detalhadas ao longo da pesquisa. Para concluir, destaca-se que o foco principal dessa pesquisa é de que ela sirva para aproximar as discussões para a aplicação do planejamento e ordenamento territorial, com base nas definições dos locais apropriados para os diversos tipos de uso. Assim é de extrema importância um conhecimento detalhado da dinâmica ambiental, para que possam ser sugeridas alternativas que tenham como premissa recuperar ou preservar a paisagem em suas dimensões naturais e/ou antrópicas.

Palavras-chave: Erosão Linear. Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. Análise Hierárquica Ponderada. Suscetibilidade Erosiva.

ABSTRACT

USE OF WEIGHTED HIERARCHICAL ANALYSIS FOR THE STUDY OF LINEAR EROSION PROCESSES IN THE IBICUÍ RIVER HYDROGRAPHIC BASIN - RS

AUTHOR: Daniéli Flores Dias
ADVISOR: Dr. Luís Eduardo de Souza Robaina

The present thesis has as general objective to use the weighted hierarchical analysis method to analyze the susceptibility to linear erosion processes in the hydrographic basin of the Ibicuí River. The reason for choosing the study area is due to the fact that this hydrographic basin presents intense erosive processes, mainly on the left bank of the Ibicuí River. The literature review addressed issues related to the definition and initial considerations about erosion, linear erosion processes emphasizing ravines and gullies, conditioning factors of linear erosion, in addition to geotechnologies and the use of multicriteria analysis for the study of erosion processes. The work methodology used the weighted hierarchical analysis, combined with the deductive method and was divided into three stages - cabinet stage, structuring the weighted hierarchical analysis and validation of information. As results of the research, the discussion of the conditioning factors listed for this work was presented - relief, soils, lithology and use and occupation - which were weighted and ranked to define the basin's erosive susceptibility. Subsequently, an automated crossing of the conditioning factors was carried out, which gave rise to the map of erosive susceptibility. This map was classified into five susceptibility classes - very low, low, medium, high and very high - which were validated based on the demarcation of erosive features in the study area and fieldwork carried out during the research. To validate all the information collected during the work, the susceptibility map was crossed with the map of erosive features, in order to verify and analyze if the hierarchies performed and the refined and detailed information match the distribution of the erosive processes of the study area. Thus, in the final erosive susceptibility mapping, it was observed that more than 83% of ravines and gullies occurred in areas mapped as high and very high susceptibility. This reinforces that the entire process of ranking and comparison matches all the information raised and detailed throughout the research. In conclusion, it is highlighted that the main focus of this research is that it serves to bring together the discussions for the application of territorial planning and ordering, based on the definitions of the appropriate places for the different types of use. Therefore, it is extremely important to have a detailed knowledge of the environmental dynamics, so that alternatives can be suggested that are premised on recovering or preserving the landscape in its natural and/or anthropogenic dimensions.

Keywords: Linear Erosion. Ibicuí River Hydrographic Basin. Weighted Hierarchical Analysis. Erosive Susceptibility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de estudo.	34
Figura 2 - Municípios que integram a BHRI.....	35
Figura 3 - Cenário de evolução das voçorocas no município de Cacequi.....	51
Figura 4 - Modelo de curvatura das vertentes.	57
Figura 5 - Representação dos procedimentos metodológicos adotados na pesquisa.	80
Figura 6 - Modelo hierárquico do AHP.	81
Figura 7 - (A) Reclassificação da suscetibilidade erosiva da BHRI para a definição das classes finais; (B) Histograma de frequência da suscetibilidade, que utiliza o método de “ <i>Natural Jenks</i> ” para a elaboração do mapa final.....	98
Figura 8 - Pontos coletados com o receptor GPS durante a realização dos trabalhos de campo.....	100
Figura 9 - Hierarquização e espacialização das formas de relevo da área de estudo.	115
Figura 10 - Hierarquização e espacialização da hipsometria da área de estudo. ...	117
Figura 11 - Hierarquização e espacialização das declividades da área de estudo.	119
Figura 12 - Hierarquização e distribuição da curvatura das vertentes da área de estudo.	122
Figura 13 - Hierarquização e espacialização das litologias aflorantes na área de estudo.	125
Figura 14 - Hierarquização e distribuição dos solos predominantes na área de estudo.	134
Figura 15 - Hierarquização e espacialização do uso e ocupação da BHRI.....	142
Figura 16 - Mapa da suscetibilidade erosiva da BHRI.....	146
Figura 17 - Espacialização das ravinas e voçorocas identificadas na área de estudo.	149
Figura 18 - Voçoroca localizada no interior do município de Cacequi.....	150
Figura 19 - Voçoroca localizada na estrada de acesso ao município de Cacequi...	151
Figura 20 - Ravina próximo à rodovia de acesso ao município de Cacequi.....	152
Figura 21 - Ravina localizada na estrada de acesso ao município de Manoel Viana.	153
Figura 22 - Ravina no interior do município de São Francisco de Assis.	154
Figura 23 - Voçoroca no interior do município de São Francisco de Assis.	155
Figura 24 - Voçoroca bem desenvolvida no interior do município de São Francisco de Assis.....	156
Figura 25 - Validação final da suscetibilidade erosiva da BHRI.	157
Figura 26 - Ravinas e voçorocas identificadas em áreas de suscetibilidade Alta e Muito Alta.	158

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Elementos identificados no estudo do relevo como um condicionante da suscetibilidade erosiva.	54
Gráfico 2 - Elementos identificados no estudo da litologia como um condicionante da suscetibilidade erosiva.	58
Gráfico 3 - Elementos identificados no estudo dos solos como um condicionante da suscetibilidade erosiva.	61
Gráfico 4 - Elementos identificados no estudo da litologia como um condicionante da suscetibilidade erosiva.	64
Gráfico 5 - Elementos que foram analisados durante a leitura dos artigos.	112
Gráfico 6 - Fatores condicionantes utilizados nos artigos para o estudo da suscetibilidade erosiva.	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparações do AHP.....	83
Quadro 2 - Artigos Qualis A1 analisados durante a pesquisa.	102
Quadro 3 - Artigos Qualis A2 analisados durante a pesquisa.	103
Quadro 4 - Artigos Qualis B1 analisados durante a pesquisa.	106
Quadro 5 - Artigos Qualis B2 analisados durante a pesquisa.	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de julgamento.....	82
Tabela 2 - Valores de IR em função da ordem da matriz quadrada.....	86
Tabela 3 - Hierarquização das altitudes da BHRI.....	88
Tabela 4 - Caracterização das classes de declividade.....	89
Tabela 5 - Hierarquização das declividades da BHRI.....	90
Tabela 6 - Hierarquização da curvatura das vertentes da BHRI.....	91
Tabela 7 - Hierarquização do relevo da BHRI.....	92
Tabela 8 - Hierarquização do AHP para as litologias da BHRI.....	93
Tabela 9 - Hierarquização dos solos da BHRI.....	94
Tabela 10 - Hierarquização do uso e ocupação da BHRI.....	96
Tabela 11 - Hierarquização dos fatores condicionantes para a definição da suscetibilidade erosiva da BHRI.....	97
Tabela 12 - Quantificação das classes de suscetibilidade erosiva na BHRI.....	145
Tabela 13 - Quantificação da área total, número feições, razão de frequência e porcentagem de cada classe de suscetibilidade.....	159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>
BH	Bacia Hidrográfica
BHRI	Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí
CGIS	<i>Canadian Geographic Information System</i>
CPRM	Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
FR	Razão de Frequência
GLONASS	<i>Global Orbiting Navigation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Consistência
IR	Índice Randômico
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LAGEOLAM	Laboratório de Geologia Ambiental
MAUT	Teoria da Utilidade Multi Atributo
MCE	<i>Multi Criteria Evaluation</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
NAVSTAR-GPS	<i>Navigation Satellite With Time and Ranging - Global Positioning System</i>
PH	Potencial de Hidrogênio
PR	Paraná
RADAR	<i>Radio and Detection Ranging</i>
RC	Razão de Consistência
RNAS	Redes Neurais Artificiais
RS	Rio Grande do Sul
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Infraestrutura
SIBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIG'S	Sistemas de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SP	São Paulo
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTB'S	Unidades Territoriais Básicas
UTM	Universal Transversa de Mercator
VANT'S	Veículos Aéreos Não Tripulados
λ	Lambda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	CONHECENDO A ÁREA DE ESTUDO	32
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1	DEFINIÇÃO E CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE EROSÃO	37
2.2	PROCESSOS EROSIVOS LINEARES: RAVINAS E VOÇOROCAS	42
2.3	FATORES CONDICIONANTES DA EROSÃO LINEAR	53
2.3.1	Relevo	54
2.3.2	Litologia	58
2.3.3	Solos	60
2.3.4	Uso e Ocupação	63
2.4	GEOTECNOLOGIAS E UTILIZAÇÃO DE MÚLTIPLOS CRITÉRIOS PARA O ESTUDO DOS PROCESSOS EROSIVOS	67
3	CAMINHO METODOLÓGICO	77
3.1	ETAPA DE GABINETE	79
3.2	ESTRUTURAÇÃO DO AHP	79
3.2.1	Hierarquização do Relevo	87
3.2.2	Hierarquização da Litologia	92
3.2.3	Hierarquização dos Solos	94
3.2.4	Hierarquização do Uso e Ocupação	95
3.3	VALIDAÇÃO DAS INFORMAÇÕES	96
4	DEFINIÇÃO DOS FATORES CONDICIONANTES PARA O ESTUDO DA SUSCETIBILIDADE EROSIVA DA BHRI	101
4.1	CONFIGURAÇÃO DO RELEVO	114
4.1.1	LITOLOGIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUI	123
4.1.2	Rochas Cristalinas	126
4.1.3	Arenitos Conglomeráticos	128
4.1.4	Arenitos Coesos	129
4.1.5	Lamitos	130
4.1.6	Arenitos Coesos	131
4.2	SOLOS PREDOMINANTES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUI	133
4.2.1	Grupo 1	135
4.2.2	Grupo 2	136
4.2.3	Grupo 3	138
4.2.4	Grupo 4	139
4.2.5	Grupo 5	140
4.3	CONFIGURAÇÃO ATUAL DO USO E OCUPAÇÃO	141
5	SUSCETIBILIDADE EROSIVA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUI	145
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	161
	REFERÊNCIAS	165

1 INTRODUÇÃO

A erosão corresponde a um dos principais processos que atuam na esculturação do relevo, podendo ser percebida com maior intensidade em áreas rurais. A cada ano, pesquisadores de diferentes países se preocupam com os casos de erosões profundas, que vem aumentando gradativamente em razão das constantes mudanças climáticas. No ano de 2002, o 2º Congresso Internacional de Erosão dos Solos por Voçorocas sobre Mudanças Climáticas Globais, realizado em Chengchu (província de Sichuan - China), trouxe à tona essa problemática, ressaltando que ela não está restrita apenas em áreas rurais, ocorrendo também nos grandes centros urbanos.

No decorrer das últimas duas décadas, inúmeros estudos sobre os processos erosivos vêm ganhando destaque, pois esse fenômeno gera impactos para as atividades agrícolas, causando a perda de solo e infertilidade, além de significativas alterações na paisagem. Diante da importância dessa temática, vários pesquisadores no mundo todo têm contribuído com pesquisas sobre esse tipo de erosão. No Brasil, podem-se citar os estudos desenvolvidos por Bigarella e Mazuchowski (1985), Oliveira e Méis (1985), Coelho Netto (1998, 2003), Guerra (1995, 1998), Paisani e Oliveira (2001), Guerra e Mendonça (2005), Bacellar e Morais (2005), Drumond e Bacellar (2006), Salomão (2007), Francisco et al (2008, 2010), Marchioro e Oliveira (2014). Cabe destacar que apesar da erosão ser um processo natural da dinâmica do relevo, a ação antrópica tende a acelerar ou mitigá-la, por isso é tão necessário entender a dinâmica e analisar tais processos.

Desde o início da década de 1970, o estado do Rio Grande do Sul vem sofrendo um desenfreado processo de degradação dos solos, em razão da fronteira agrícola, motivada pelo incentivo governamental para esse setor, aliado ao plantio sucessivo e contínuo dos solos com soja e trigo, sem que haja uma preservação adequada das terras (SOUTO, 1985). Nas regiões oeste e sudoeste são observadas feições superficiais marcadas pela ocorrência de processos erosivos associados as estruturas litológicas, atributos do relevo, características de solos e uso e ocupação, que desencadeiam em sérios problemas ambientais como as erosões lineares profundas, principalmente ravinas e voçorocas.

Dessa forma, vários trabalhos têm sido desenvolvidos nessa região, no qual citam-se os estudos de Cordeiro e Santos (1977), Nolla (1982), Souto (1985),

Suertegaray (1987, 1998), Cabral e Maciel Filho (1993), Cabral (2004), Ab'Saber (1995), Marchiori (1995), Medeiros et al (1995), Verdum (1997), Suertegaray et al (2001, 2012), Robaina et al (2002), Robaina e Trentin (2004), Trentin (2011), Knierin (2015), Cabral (2018), Rademann et al (2018) e Rademann (2019), que contribuíram significativamente com pesquisas, buscando investigar sob diferentes formas de abordagem a problemática da erosão dos solos e o fenômeno da arenização.

Analisando depressões interfluviais e voçorocas em sub-bacias da região oeste do Rio Grande do Sul, Cabral (2004) observa que nessa área os processos erosivos são caracterizados por uma série de eventos que, agindo em conjunto, respondem por uma “paisagem regional” composta por amplas colinas seccionadas 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 modelado e remodelação do relevo. Diante disso, as principais manifestações que atualmente expressam a evolução do relevo constituídos por materiais terrosos da Bacia Sedimentar do Paraná, são os processos de arenização e voçorocamento, refletindo a ocorrência de uma erosão acelerada.

A causa da ocorrência de extensas áreas erosivas é influenciada por inúmeros fatores. As técnicas de tomada de decisão são baseadas em critérios qualitativos e quantitativos. Uma das mais utilizadas atualmente é a *Analytic Hierarchy Process* (AHP)¹ para avaliação de objetivos e múltiplos critérios, devido a sua complexidade e subjetividade e por permitir que esses problemas sejam tratados de forma mais simples. Idealizado por Thomas L. Saaty em meados da década de 1970, consiste em um modelo que reflete o funcionamento da mente humana na avaliação das alternativas diante de um problema de decisão complexo, permitindo lidar com problemas que envolvem tanto os valores tangíveis como os intangíveis, graças a sua capacidade de criar medidas para as variáveis qualitativas com base em julgamentos subjetivos emitidos pelos decisores (SAATY, 1991; COSTA E MOLL, 1999; SHIMIZU, 2006; SHIN et al., 2013).

Na Geografia, essa metodologia ainda é pouco utilizada, uma vez que ela é amplamente empregada nas áreas de engenharia e arquitetura e urbanismo. Todavia, na última década, ela vem ganhando espaço na ciência geográfica e tem sido utilizada

¹ Análise hierárquica ponderada.

em estudos socioambientais, principalmente na análise da vulnerabilidade e processos erosivos acelerados.

Frente ao exposto, a presente tese tem como hipótese de que é possível analisar, automaticamente, os fatores condicionantes, para estabelecer um zoneamento de suscetibilidade das erosões lineares. Para isso, têm-se como objetivo geral utilizar o método da análise hierárquica ponderada para analisar a suscetibilidade aos processos erosivos lineares na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. Buscando responder a esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

a) Espacializar na área de estudo as erosões lineares do tipo ravinas e voçorocas.

b) Investigar como o relevo, litologia, solos e uso e ocupação interferem nos processos erosivos.

c) Definir o grau de importância para os fatores condicionantes, fazendo um cruzamento par a par e um cruzamento final entre todos.

d) Realizar um estudo sobre a suscetibilidade erosiva da bacia hidrográfica, através do cruzamento automatizado dos mapas temáticos dos fatores condicionantes.

Assim, a justificativa pela escolha da área de estudo se deve em razão dessa bacia hidrográfica apresentar intensos processos erosivos, principalmente na margem esquerda do rio Ibicuí. Indo ao encontro disso e conforme já retratado por Cabral (2004), De Nardin (2009) e Trentin (2011), o oeste do Rio Grande do Sul apresenta suscetibilidade a ocorrência de processos erosivos acelerados, com o desenvolvimento de ravinas, voçorocas, formação de areais e em áreas rurais, causam a perda de solos agricultáveis, assoreamento de reservatórios e cursos d'água, entre outros efeitos.

Ainda conforme Trentin (2011) no oeste do Rio Grande do Sul a temática da degradação ambiental é vista como de extrema relevância, ao passo que a realização de estudos nessas áreas está relacionada as situações de maior preocupação ecológica do território sul-rio-grandense. Para o autor, os dados cartográficos em escalas maiores ainda são limitados e assim, trabalhos voltados para a caracterização dos processos de dinâmica superficial e a formação de núcleos de arenização, carecem de maiores detalhamentos.

Com base nisso, destaca-se que o presente trabalho foi redigido em seis capítulos, assim caracterizados: no primeiro capítulo foi apresentada a introdução do trabalho, contendo a hipótese, objetivos, a justificativa pela escolha da área de estudo, além de uma breve apresentação e contextualização da bacia hidrográfica do rio Ibicuí. O segundo capítulo refere-se as concepções teóricas que deram suporte a proposta do trabalho, tendo como foco estruturar através de conceitos-chaves a base teórica dessa tese. Assim, a revisão bibliográfica abordou questões relacionadas a definição e as considerações iniciais sobre a erosão, processos erosivos lineares com ênfase em ravinas e voçorocas, fatores condicionantes da erosão e geotecnologias e a utilização da análise multicritério para o estudo dos processos erosivos. Por conseguinte, o terceiro capítulo tratou do caminho metodológico percorrido durante a pesquisa, a fim de apresentar uma proposta metodológica para a definição da suscetibilidade erosiva da área de estudo. O quarto capítulo é responsável por apresentar e discutir os fatores condicionantes utilizados para a definição da suscetibilidade erosiva da bacia. No quinto capítulo é exposto o resultado final da pesquisa, que corresponde ao mapeamento automatizado dos fatores condicionantes que dão origem ao mapa da suscetibilidade erosiva da bacia hidrográfica do rio Ibicuí. O sexto e último capítulo traz as conclusões do trabalho e as efetivas recomendações para pesquisas futuras e a tomada de decisões referentes ao planejamento ambiental e territorial da bacia hidrográfica.

1.1 CONHECENDO A ÁREA DE ESTUDO

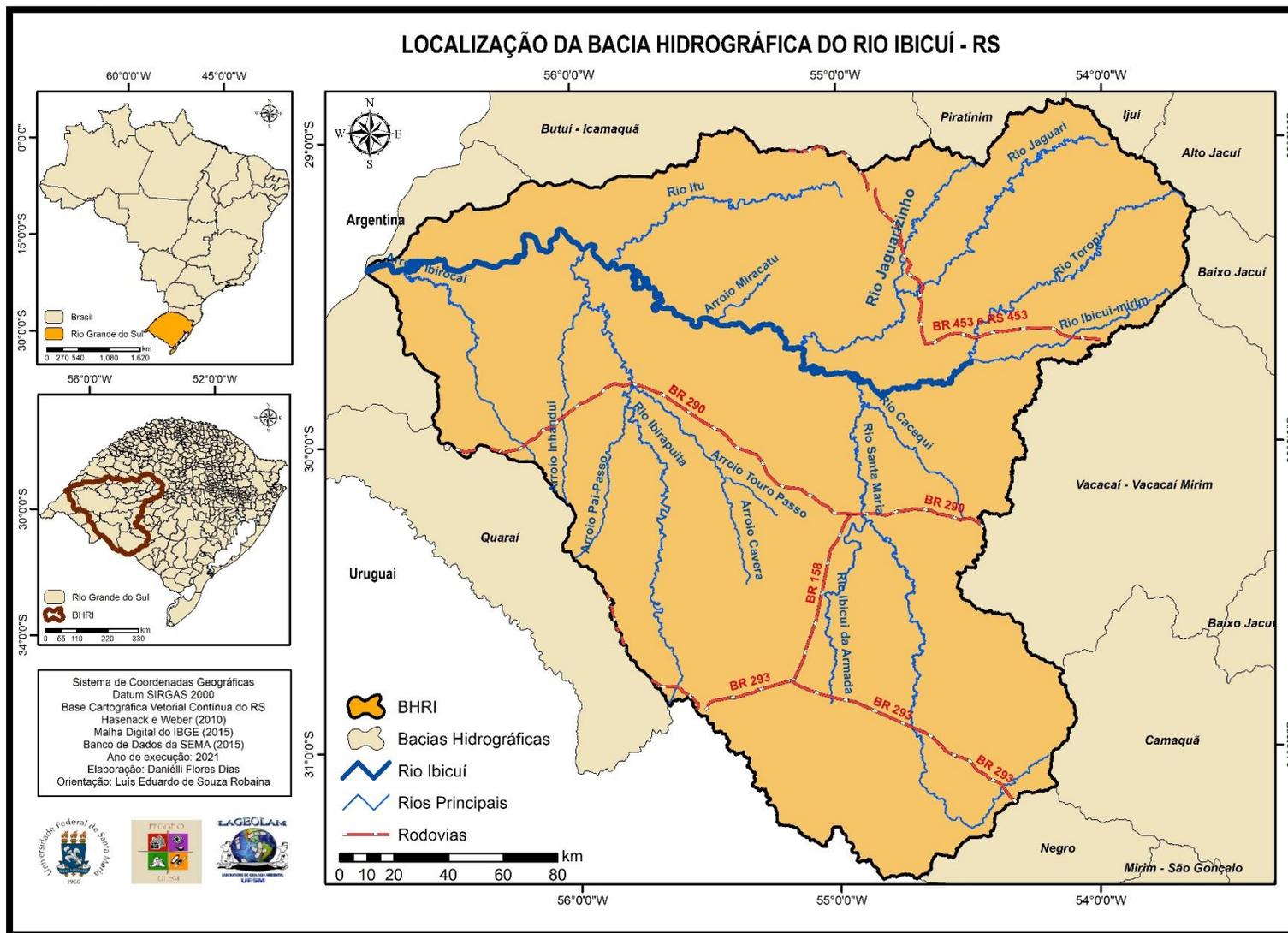
Localizada na porção oeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas de 29°01' e 31°20' (latitude sul) e 56°47' e 53°29' (longitude oeste), a bacia hidrográfica do rio Ibicuí (BHRI) (Figura 1) espacializa-se em uma área territorial de 47,141,88 km² e abrange 34 municípios, sendo que 14 estão em sua totalidade na bacia e os demais ocupam-na parcialmente, conforme mostra a Figura 2. Desses municípios, apenas Manoel Viana tem sua sede as margens do rio Ibicuí. Os limites físicos e políticos da BHRI são: a sudoeste com a BH do Quaraí, a sudeste com a BH do Negro, ao sul com a República Oriental da Uruguai, a leste com a BH do Camaquã, BH do Vacacaí-Vacacaí Mirim e a BH do Baixo Jacuí, a nordeste com a BH do Alto Jacuí e a BH do Ijuí, ao norte com a BH do Piratinim e a BH do Butuí-Icamaquã e a oeste com a República da Argentina.

Os principais cursos d'água dessa bacia são os rios Ibicuí Mirim, Ibicuí da Armada, Toropi, Jaguari, Itu, Jaguarzinho, Santa Maria, Ibirapuitã, Cacequi e os arroios Caverá, Miracatu, Pai Passo, Inhanduí, Ibirocai e Touro Passo (COMITÊ DO IBICUÍ, 2013). Com 673 km de extensão, o rio Ibicuí² nasce da confluência entre os rios Ibicuí Mirim e Toropi, no limite entre os municípios de Cacequi, São Pedro do Sul e São Vicente do Sul e tem a contribuição do rio Santa Maria, sendo considerado o seu principal formador e flui em direção ao oeste até desaguar no rio Uruguai, na fronteira do Brasil com a Argentina.

Conforme Moss e Moss (2007) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), a base econômica da população é a agricultura, com destaque para o cultivo de arroz irrigado, que constitui o principal uso da água. O consumo doméstico e industrial de água é insignificante, mas a qualidade da água acaba por ser afetada principalmente pela falta de tratamento de esgotos domésticos e industriais, como possíveis casos em frigoríficos e pelas atividades das lavouras. Como atividades econômicas complementares, têm-se a prática da pecuária e extração de areia. Para concluir, Moss e Moss (2007) ainda comentam que dentre os problemas ambientais detectados na região, a aceleração dos processos erosivos e da arenização frente ao uso inadequado dos solos, é ainda o que mais preocupa os pesquisadores e a população dessa área.

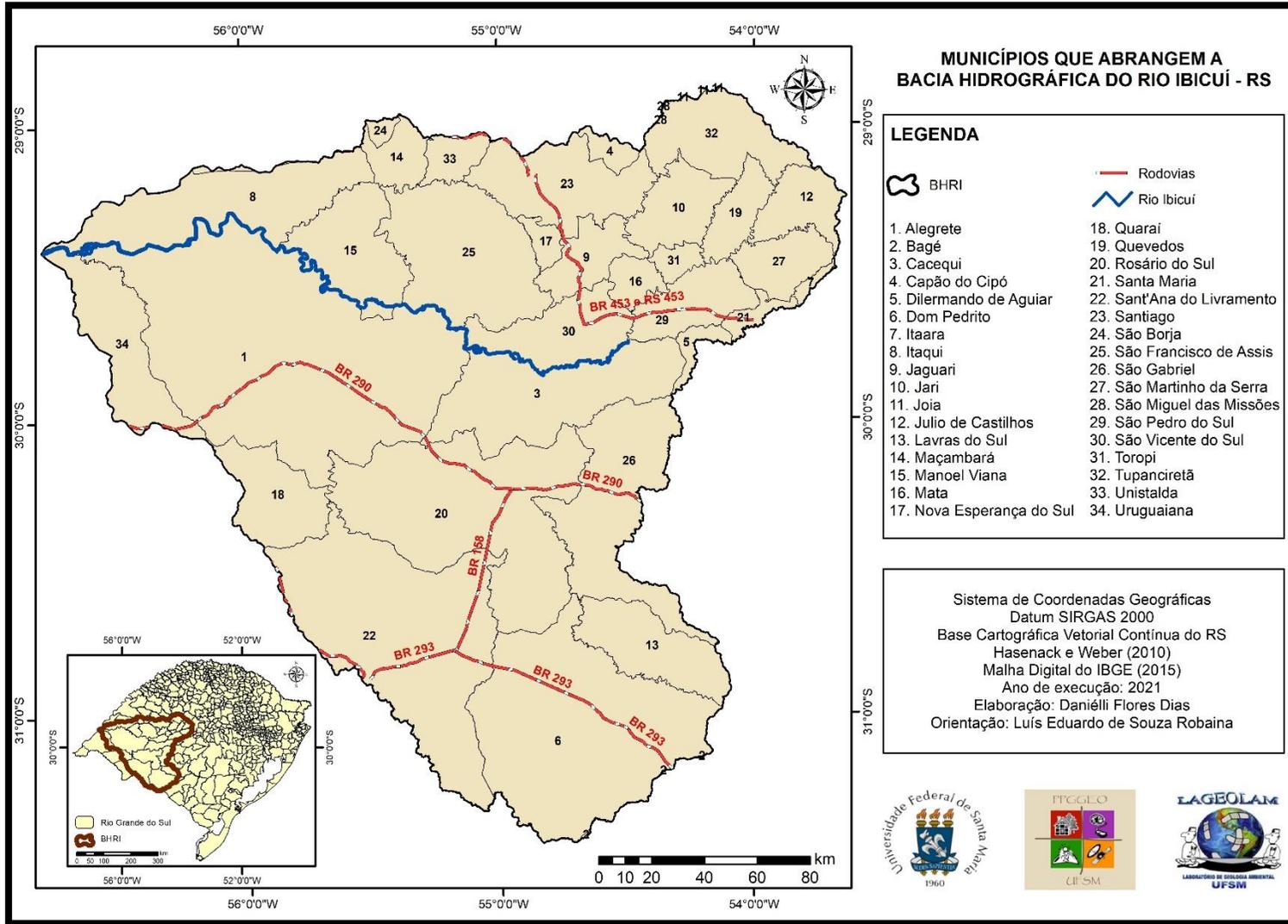
² É considerado o maior afluente da Bacia do Uruguai.

Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015), SEMA (2015) e elaborado pela autora (2021).

Figura 2 - Municípios que integram a BHRI.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015) e elaborado pela autora (2021).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFINIÇÃO E CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE EROSÃO

A expressão erosão deriva do latim “*erodere*” e seu significado está associado aos processos de desgaste da superfície com a retirada e o transporte de material desagregado e inconsolidado, formado principalmente por grãos e minerais, que posteriormente, se depositam e modelam a superfície do terreno. Esse processo de desagregação e remoção das partículas de solos e fragmentos de rocha ocorre pela ação combinada com a água, vento, gelo ou organismos (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT, 1986; SALOMÃO E IWASA, 1995).

Ao realizar um estudo geotécnico sobre a erodibilidade dos solos, Bastos (1999) apresenta uma breve revisão acerca dessa temática, destacando as principais áreas do conhecimento e o enfoque de cada uma:

1) Agronomia - com dois enfoques distintos: a) Física dos Solos, estudando as características físicas, químicas e mineralógicas que influenciam na erodibilidade dos solos dos horizontes superficiais e o estudo dos modelos de previsão da perda de solo; b) Manejo e Conservação, por meio do estudo do impacto de técnicas de cultivo e manejo do processo erosivo.

2) Hidráulica - enfatizando a hidráulica dos canais, através do estudo da erosão localizada dos solos pelo fluxo d'água em estruturas hidráulicas, como os canais de terra.

3) Engenharia - com ênfase na Engenharia Geotécnica, por meio de estudos relacionados com a modelagem dos mecanismos de erosão e em critérios de avaliação da erodibilidade dos solos.

4) Geologia - com enfoque na Geologia de Engenharia, a partir de estudos concentrados no diagnóstico ambiental da erosão, nos condicionantes geológicos e geomorfológicos e no relato de obras para o controle dos processos erosivos.

5) Geografia³ - com ênfase na Geomorfologia, é responsável por estudar as características físicas, químicas e mineralógicas que influenciam no modelado do relevo.

³ Acrescentado pela autora.

Nos estudos das Ciências Exatas e da Terra, Carvalho et al (2006) definem a erosão como o processo de desgaste da superfície terrestre pela água, vento, queimadas, gelo, organismos vivos e ação antrópica. Os processos erosivos caracterizam uma forma natural de modelagem do relevo e atuam em conjunto com os processos pedogenéticos, que sob condições naturais, agem em equilíbrio onde há certa equivalência entre a quantidade de solo erodida e produzida. Comumente, esse fenômeno é denominado de erosão geológica ou natural. Quando se dá o rompimento desse equilíbrio devido a interferência do homem e não é permitida ao solo a recuperação natural, dá-se origem a erosão acelerada ou antrópica.

Pruski (2009) considera que a erosão é tão primitiva quanto a própria Terra, sendo denominada “geológica” aquela oriunda de fenômenos naturais que agem continuamente na crosta terrestre, como ocorrência normal da modificação dessa e que constitui um ponto positivo para a formação do próprio solo. A ação do homem quebra essa harmonia, por meio da inserção de práticas que destroem o equilíbrio das condições naturais desse processo, dando origem a erosão acelerada que representa um fenômeno de grande relevância em razão da rapidez com que se processa e pelo fato de acarretar prejuízos não só para a exploração agropecuária, mas também para diversas atividades econômicas e ao próprio meio ambiente.

Por sua vez, Bigarella (2003) define que a erosão pode ser normal ou acelerada. No primeiro caso, ela ocorre dentro das condições normais, sendo imperceptível ou ficando em evidência apenas com o passar do tempo. A ação acelerada implica na remoção de grande massa de material a curto prazo, abrindo sulcos mais ou menos profundos na superfície do terreno, destruindo o solo no meio rural e as propriedades na área urbana, além de afetar as obras de engenharia. O autor ainda ressalta que na aceleração do processo erosivo, ocorre a interferência antrópica ou das mudanças climáticas, fazendo com que as taxas e intensidades erosivas sejam maiores que as da erosão normal. Esse tipo de erosão afeta principalmente as vertentes mais íngremes, as encostas mais arenosas ou aquelas desprovidas de cobertura vegetal, além das terras utilizadas inadequadamente na agricultura, que em pouco tempo se tornam degradadas e impróprias para o uso.

Sendo assim, observa-se que a erosão geológica ocorre sob um estado natural do ambiente, desencadeada por meio da atuação dos agentes exógenos na superfície, integrada aos demais condicionantes naturais. Por outro lado, a erosão acelerada também ocorre em função desses fatores, porém é incrementada pela ação

antrópica com a retirada da cobertura vegetal, uso de técnicas agrícolas incompatíveis, ocupação de áreas de risco para a habitação, dentre outros.

Cunha (1997) ainda salienta que a erosão dos solos é considerada normal, quando ocorre um equilíbrio entre a formação do solo e o seu desgaste natural. Porém, quando o processo erosivo é mais intenso que a formação do solo, ocorre a erosão acelerada ou antrópica. Essa condição pode ser determinada por questões intrínsecas dos solos, das formações litológicas e das características do relevo que propiciam, basicamente, a substituição da vegetação natural por outro tipo de cobertura vegetal ou a transformação topográfica que não proporciona proteção eficiente contra a erosão, dificultando o estabelecimento do processo pedogenético que reconstruiria a camada erodida.

Independente de qual seja o agente causador, Galetti (1973, 1982) define que a erosão acontece em três fases: a) Desagregação, que ocorre no momento em que as gotas de chuva atingem a superfície do solo, pois com o impacto elas se fragmentam e respingam, levando consigo as partículas soltas; b) Transporte, onde as partículas fragmentadas e soltas são transportadas pelo agente erosivo. Quando o transporte ocorre pela água, as partículas menores são levadas em solução, as médias em suspensão e as grossas são empurradas ou roladas, sendo que o seu destino dependerá do tamanho, da força d'água, topografia do terreno e da presença de obstáculos durante o transporte; c) Deposição (ou Sedimentação), que é a etapa final correspondente ao depósito de partículas na superfície terrestre.

Em teoria semelhante, Guerra (1998) constata que a erosão dos solos é um processo que apresenta duas fases: uma que constitui a remoção de partículas e outra que é o transporte desse material, efetuado pelos agentes erosivos. Quando não há energia suficiente para continuar o transporte, ocorre uma terceira fase, que é a deposição desse material transportado. Já para Bigarella (2003) a erosão, o transporte e a deposição são processos que não podem ser separados. Eles são interdependentes dentro das relações constantemente mutáveis do fluxo e da carga existente. A capacidade de erosão de um fluxo depende mais das partículas por ela transportadas do que o volume d'água. O fluxo aumenta para a jusante, assim como a sua carga. Com a diminuição do fluxo, ocorre a deposição.

Dentre os fenômenos ambientais que atingem os solos, a erosão hídrica é considerada uma das mais importante, podendo atuar sob duas faces distintas: a) o ataque da água atinge o solo na superfície, desagregando e transportando partículas

menores; b) a ação não ocorre somente em superfície, mas também em subsuperfície, em uma determinada porção do perfil afetando uma massa de material inconsolidado. Assim, Morgan (2005) considera que o processo de erosão hídrica está intimamente relacionado ao caminho percorrido pela água em seu movimento através da cobertura vegetal e sobre a superfície do solo. Isso ocorre porque durante a precipitação, parte da água cai diretamente sobre o terreno, seja por ausência da cobertura vegetal ou pelas “brechas” que a chuva encontra entre as árvores. Esse movimento é conhecido como queda direta.

Frente a isso, o primeiro impacto erosivo nos solos é propiciado pela ação mecânica das gotas de chuva, promovendo o desprendimento e o arraste das partículas terrosas. Essa ação mecânica é exercida por causa da energia cinética das gotas, variando conforme o tamanho e a sua velocidade. Dessa forma, Guerra (1999, 2015) e Brito (2012) destacam que o ciclo das chuvas é o ponto de partida do processo erosivo, pois durante a precipitação, parte da água cai diretamente no solo. Isso ocorre ou por não haver vegetação, ou porque a água passa pelos espaços existentes na cobertura vegetal. Assim, parte da água é interceptada pela copa das árvores, sendo que um percentual volta à atmosfera por evaporação e outra chega ao solo por meio do gotejamento das folhas e escoamento pelo tronco.

Com relação aos impactos que esse tipo de erosão pode causar, Bertoni e Lombardi Neto (1999, p. 75) definem que,

[...] os danos causados pelas gotas de chuva que golpeiam o solo a uma alta velocidade constituem o primeiro passo no processo da erosão. As gotas podem ser consideradas como bombas em miniatura que golpeiam a superfície do solo, rompendo os grânulos e torrões, reduzindo-os a partículas menores e, em consequência, fazendo diminuir a capacidade de infiltração de água no solo. Uma gota golpeando um solo úmido forma uma cratera, compactando a área imediatamente sob o centro da gota, movimentando as partículas soltas para fora em um círculo em volta de sua área.

A ação das gotas de chuva causa a erosão por salpicamento (ou *splash*), que ocorre quando a água que chega ao solo pode ser armazenada em pequenas depressões ou se infiltra, aumentando a umidade do solo ou abastecendo o lençol freático. Quando o solo não consegue mais absorver a água, o excesso começa a se mover em superfície ou subsuperfície e pode provocar a erosão através do escoamento das águas. Com isso, Bertoni e Lombardi Neto (1999, 2012) explicam que esse processo se dá através da chuva exercendo a ação erosiva sobre o solo

com o impacto das gotas que caem com velocidade e energia que variam com o seu diâmetro e a ação do escoamento superficial. Ao caírem sobre o solo, as gotas contribuem da seguinte forma: desprendem as partículas de solo no local que sofreu impacto, transportam por salpicamento essas partículas, imprimem energia de forma turbulenta fazendo com que a água escoe na superfície do terreno exercendo uma ação transportadora sobre ela, dando origem a erosão laminar e por fim, o material transportado é depositado.

A erosão laminar⁴ recebe esse nome porque o escoamento superficial se distribui pela encosta de forma dispersa e não se concentra em canais. Conforme Guerra (1998), o lençol d'água que cobre a superfície do solo durante uma forte chuva, raramente apresenta profundidade uniforme e geralmente ocorre de maneira anastomosada, ou seja, sem canais definidos. Essa forma de escoamento, quase sempre ocorre sob condições de chuva prolongada, quando a capacidade de armazenamento de água no solo e nas suas depressões e irregularidades saturam.

Para Vieira e Verdum (2015), o escoamento laminar corresponde a um contínuo filme de água que ao escoar sobre a superfície do solo se assemelha a um fino lençol, sem formar canais definidos, caracterizando uma feição erosiva planar. Geralmente, esse tipo de escoamento transporta um grande aporte de material fino a ser depositado em cursos d'água e em pontos mais a jusante que resultam em assoreamento, além de se apresentar com um processo erosivo lento e de difícil percepção imediata.

A perda de solo por erosão laminar é tão significativa que Bertoni e Lombardi Neto (2012, p. 98) observam que,

[...] o Brasil perde, por erosão laminar, cerca de 500 milhões de toneladas de terra anualmente, correspondendo ao desgaste uniforme de uma camada de 15 cm de espessura numa área de cerca de 280.000 hectares de terra. Esse prejuízo lento e continuado, que a erosão do solo tem ocasionado à nossa economia vem-se patenteando já de maneira insofismável na fisionomia depauperada de algumas de nossas regiões.

Esse tipo de erosão é caracterizado pela desagregação e o arraste das partículas do solo em camadas uniformes, sem formar sulcos, desgastando a primeira camada e retirando uma lâmina na superfície, sendo muito difícil de ser diagnosticada. Suas consequências são mais visíveis em locais com cobertura de terreno fértil, pois

⁴ Ou também chamada de erosão por entressulcos.

além de levar grande parte dos nutrientes, desestabiliza as plantações, atingindo a cobertura de suas raízes e gerando o assoreamento dos cursos d'água (CARVALHO et al., 2006).

Por sua vez, a erosão em sulcos representa o ponto de partida dos processos erosivos lineares, que ocorrem devido ao escoamento superficial concentrado em função das irregularidades das vertentes, ocorrendo a incisão vertical que pode ser mais ou menos profunda no terreno, representando as áreas onde a erosão laminar é mais intensa e sua profundidade pode atingir até 10 cm (BAPTISTA, 1997; CERRI et al., 1997, CARVALHO et al., 2006).

A erosão formada por sulcos caracteriza-se por ser um processo complexo e suas consequências estão elencadas à erosividade da chuva, características de solos e da superfície. No entanto, pode-se resumir que essa erosão depende basicamente de dois fatores: desagregação da massa de solo pelo impacto das chuvas e o transporte desse solo pelo escoamento.

Por fim, autores como Carvalho et al (2006), Freitas et al (2008) e Lafayette et al (2011) definem que a erosão em sulcos corresponde a segunda fase da evolução de um processo provocado pela erosão hídrica do solo. É caracterizada pela transformação na forma do escoamento (de difuso à sulcos), acarretando na mudança da lâmina de escoamento para cisalhamento onde ocorre o aumento da sua espessura e sua capacidade.

2.2 PROCESSOS EROSIVOS LINEARES: RAVINAS E VOÇOROCAS

Com relação aos conceitos utilizados para categorizar as erosões lineares, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1986) define que as ravinas correspondem ao aprofundamento das feições de sulcos provocados pela ação erosiva da água do escoamento superficial concentrado, com profundidade mínima de 50 cm e que não atingem o lençol freático, onde atuam mecanismos de desprendimento de material dos taludes laterais e transporte de partículas de solo. Já as voçorocas são caracterizadas como as formas de erosão mais complexas e destrutivas, onde sua profundidade varia entre 15 e 30 metros, seu comprimento pode alcançar centenas de metros e seu perfil transversal a forma de "V".

Bergsma et al (1996) conceituam as ravinas como canais superficiais com profundidade superior a 20 ou 30 cm, que podem ser destruídas no momento em que

o solo é arado para o plantio. Os autores ainda recordam que as características do relevo são frutos do desenvolvimento das microformas de erosão. Para Carvalho et al (2006), o termo ravina deve ser aplicado para os canais com profundidade superior a 10 cm atingindo o limite máximo de 50 cm ou ainda para àquela na qual começa a ocorrer instabilidade dos taludes por deficiência da coesão real ou de cimentação.

Na concepção de Vieira (1998), as ravinas são na verdade o aprofundamento dos sulcos, com profundidade que variam entre 5 cm e 1,5 metros, apresentando um crescimento tanto progressivo (como a erosão em sulcos) quanto regressivo (igual a erosão por voçorocas). Já na visão de Suertegaray (2008), as ravinas correspondem a um tipo de feição de escoamento concentrado que se formam quando o fluxo d'água aumenta na encosta por ocasião de grandes episódios, tornando-se turbulento. Com isso, o aumento do gradiente hidráulico pode ocorrer devido a intensificação das chuvas, a uma maior declividade da encosta ou a saturação do solo. E, por fim, Magalhães (2001) diz que a erosão por ravinas é causada pela força d'água através de uma enxurrada, onde essa feição é caracterizada por ser um canal de escoamento das águas das chuvas, com traçados definidos que vão se aprofundando com passar dos anos até atingir alguns poucos metros de profundidade.

Sendo assim, ao tratar da conceituação de feições erosivas, cada autor propõe uma determinada classificação, que serve tanto para os processos de ordem natural, como para aqueles provocados e intensificados pela ação do homem. Dessa forma, ao tratar da caracterização das ravinas, para essa pesquisa será adotada a conceituação de Carvalho et al (2006), que caracteriza as ravinas como feições que variam entre 10 e 50 cm de profundidade.

O termo voçoroca⁵ deriva de uma expressão tupi-guarani, onde as palavras que deram origem ao nome são *ybi* (terra) e *coróc* (rasgo), significando assim “terra rasgada” (PONÇANO E PRANDINI, 1987; CUNHA E GUERRA, 2009).

Conforme Cunha e Guerra (op cit.), as voçorocas são características erosivas relativamente permanente nas encostas, que possuem paredes laterais e íngremes, geralmente com fundo chato onde ocorre fluxo d'água no seu interior durante os

⁵ O termo voçoroca é conhecido por *boçoroca* principalmente no estado de São Paulo e *desbarrancado* no Triângulo Mineiro (VIEIRA, 1978; 2008). A forma mais antiga adotada pelos pesquisadores e pouco usual é *vossoroca*. Alguns nomes também são usados para designar uma voçoroca, como *erosão em gargantas* ou em *grotas* (CÔRREA, 1959 apud VIEIRA, 2008), *gully erosion* na maioria dos países de língua inglesa (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 1975), *lavaka* em Madagascar (THOMAS, 1994) e *ravine* na França (LOZET E MATHIEU, 2002).

eventos chuvosos. Por vezes, elas aprofundam tanto que chegam a atingir o lençol freático. Comparando com os canais fluviais, as voçorocas geralmente possuem maior profundidade, menor largura e estão associadas com o processo de erosão acelerada e, conseqüentemente, com a instabilidade da paisagem. Em outras palavras, os autores citam que existem três possíveis origens para o surgimento das voçorocas: o alargamento e o aprofundamento das ravinas, a erosão por escoamento subsuperficial formando dutos ou pipes e a partir do escoamento superficial concentrado sobre antigos deslizamentos de terra.

Para Vieira e Albuquerque (2004) as voçorocas são incisões que apresentam formas bem marcantes, como fundo plano e paredes laterais bem verticais, caracterizando a forma da calha em “U” onde observa-se ou não o afloramento do lençol freático. Entretanto, essas características não devem ser utilizadas como parâmetro para diferenciar uma ravina de uma voçoroca, uma vez que algumas voçorocas podem não apresentar esse tipo de ocorrência.

Seguindo a definição do dicionário geológico-geomorfológico de Guerra e Guerra (2006, p. 637) uma voçoroca é conceituada como,

[...] 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 voçorocada. As voçorocas podem também ser formadas pelo escoamento superficial.

Por sua vez, Pruski (2009) observa que a erosão em voçorocas consiste no deslocamento de grande massa de solo, formando canais de dimensões consideráveis, que impedem o trânsito de máquinas agrícolas e reduzem a área para o plantio. Essa incisão, portanto, consiste na fase mais avançada da erosão, sendo que no seu processo de ocorrência, estão envolvidas forças que regem à estabilidade de taludes e os movimentos de massa. O autor ainda reforça que esse tipo de erosão é responsável pela divisão de áreas e dificulta sua mecanização, uma vez que os tratores e outras máquinas agrícolas, não conseguem atravessar os sulcos profundos. Essas incisões erosivas são frequentemente encontradas em divisas de propriedades, que normalmente é onde o escoamento superficial é direcionado.

Em uma discussão similar, Suertegaray (2008) diz que as voçorocas podem ser originadas pelo aprofundamento e o alargamento das ravinas, ou pela erosão causada pelo escoamento subsuperficial que dá origem aos dutos (*pipes*). De forma geral, as encostas são relativamente permanentes, possuem paredes laterais íngremes, fundo chato na maioria das vezes e ocorrência de fluxos d'água no seu interior durante os períodos chuvosos. Assim, com o aprofundamento dos seus canais as voçorocas atingem o lençol freático.

Ao utilizar as discussões de Bigarella et al (1996), Fendrich et al (1997) e Cunha e Guerra (2009), Mathias (2016) corrobora salientando que as formas erosivas que traduzem com maior nitidez a intensidade resultante da erosão linear são as voçorocas. Essas formas resultam de estágios acelerados dos processos superficiais e subsuperficiais, culminando no colapso da estruturação dos solos e na fragilização do manto pedo-ecológico. Nesse estágio, é identificado um conjunto de processos integrados, como a erosão linear propriamente dita, a laminar, o solapamento dos taludes, movimentos de massa e a erosão interna em dutos (ou túneis ou *pipping*).

Para Coelho Netto et al (1988), o principal mecanismo das voçorocas está associado à exfiltração da água dos fluxos subsuperficiais, sendo a lavagem superficial e os movimentos de massa, movimentos secundários. Os autores ainda reforçam que essa nomenclatura é devida a ordem dos fatos e não a magnitude dos fenômenos.

Com relação as águas subterrâneas, Robaina e Trentin (2004) consideram que elas possuem um papel fundamental no desenvolvimento dos processos erosivos por voçorocas. Para Fonseca (2006), a presença do lençol freático interceptado pela voçoroca, induz ao aparecimento de surgências ou exfiltração d'água, acarretando no aparecimento de *pipping*, que corresponde a uma erosão interna que gera a remoção de partículas do interior do solo, formando "tubos" vazios que provocam colapsos e escorregamentos laterais do terreno, alargando a voçoroca.

Nas discussões de Carvalho et al (2006), a erosão subterrânea ocorre principalmente quando a força de percolação ultrapassa a resistência localizada no solo, gerando a ruptura hidráulica que leva ao arraste das partículas do solo, permitindo a abertura de pequenos dutos, onde ocorre a concentração de fluxo e a criação de pequenas cavidades. Para Suertegaray (2008), os dutos são canais abertos em subsuperfície, com diâmetro que variam de poucos centímetros até vários metros e que transportam grandes quantidades de material. Assim, à medida em que

esse material vai sendo removido, o canal aumenta e ocorre um colapso no solo que contribui significativamente para a evolução das voçorocas.

De forma geral, conclui-se que as voçorocas representam o estágio mais avançado da erosão acelerada, correspondendo a passagem natural do processo de ravinamento até atingir o lençol freático, com o aparecimento de surgências d'água. Com isso, resultam em um sistema ramificado distribuído em uma área de contorno elipsoidal que abrange grandes extensões e se caracteriza por ser estreita a jusante e vai se alargando na medida em que avança para a montante.

É necessário exemplificar que certas voçorocas também podem ter origem a partir das estruturas de abatimento. Com isso, Oliveira e Camargo (1996) ao estudarem as voçorocas na área rural de Lapa (PR), concluíram que esse tipo de feição se caracteriza por apresentar cavidades na superfície do terreno, que posteriormente, podem se integrar e formar incisões erosivas que tendem a se expandir na direção das depressões localizadas à montante. Em estudo mais antigo, Selby (1982) definiu que os possíveis fatores para o surgimento da erosão em túneis são: oscilações na precipitação, solos propensos ao surgimento de gretas de contração em períodos de seca, redução da cobertura vegetal, camada relativamente impermeável no perfil, existência de gradiente hidráulico e camada dispersiva no solo.

Além disso, tanto as ravinas quanto as voçorocas podem ter origem através de diferentes dinâmicas erosivas, como por meio da reativação de antigas paleodrenagens pela ação da água que precipita e escoar de forma concentrada ao longo de rupturas na encosta e formam sulcos ao atingir uma superfície descoberta. Já nos areais, as ravinas e voçorocas geralmente estão associadas as cabeceiras de drenagem e também podem ocorrer junto aos morros e morrotes associados as linhas de afloramentos da rocha, que representam o arenito silicificado mais impermeável e o arenito friável da base (PAULA E ROBAINA, 2003; VIEIRA E VERDUM, 2015).

Maciel Filho e Nummer (2014) citando Gorshov e Yakushova (1970) definem que o processo que vai desde a formação até a extinção de uma voçoroca, passa por quatro estágios ou fases, sendo assim descritos: a) o primeiro estágio é aquele da formação de sulcos, passando por ravinas; b) no segundo estágio ocorre a formação de saltos, o aprofundamento da voçoroca e a erosão regressiva; c) no terceiro estágio acontece o alargamento da voçoroca e o encontro do nível de base, resultando na formação de fundo plano; d) no último estágio, tem-se a extinção da voçoroca com o abrandamento dos taludes e a implantação da vegetação.

Para essa pesquisa, será adotada a conceituação utilizada pela *Soil Science Society of America* (1975) que define a voçoroca como um canal resultante de erosão causado por fluxos d'água concentrados, intermitentes e relacionados com a chuva, que interferem em operações normais de cultivo e apresentam profundidade e largura superior a 50 cm.

As voçorocas podem ser distinguidas e classificadas de diversas formas, sendo as classificações referentes a sua forma, condição em relação a drenagem e ao seu tamanho, as mais citadas na literatura (AUGUSTIN E ARANHA, 2006; VIEIRA, 2008; CHEROBIN, 2012; MAGALHÃES et al., 2012; MARCHIORO et al., 2016). Um dos primeiros estudos é o de Ireland et al (1939), que consideram a morfologia.

No estudo realizado por Furlani (1980), as voçorocas podem ser classificadas em diferentes aspectos: a) quanto à posição que ocupam em uma encosta, podendo ser de alta, média ou baixa vertente; b) quanto as linhas de maior classificação, discriminadas em transversais (ajustadas à linha de maior declive) e longitudinais (quando parte expressiva da feição se dispõe de forma que contraria a linha de maior declividade); c) quanto à configuração de suas paredes, que podem ser lisas (quando são destituídas de reentrâncias) e lobuladas (relacionadas a um sistema de escoamento ramificado); d) quanto ao grau de entalhamento, sendo peculiar, rasa ou profunda.

Finalizando sua pesquisa, o autor ainda salienta que as voçorocas também podem ser classificadas conforme o estágio de seu processo evolutivo: a) primeiro estágio ou vivas, quando suas bordas exibem paredes verticais e subverticais; b) segundo estágio ou estabilizadas, manifestada por uma suavização das paredes salientes e desprovidas de cobertura vegetal que ao ser reativada, a voçoroca estabilizada sofre uma brusca reativação em suas cabeceiras, deixando um forte contraste com as partes vegetadas; c) terceiro estágio ou cicatrizadas, que possuem aspecto de um anfiteatro, rupturas ou declives suaves, vegetação revestindo todo o seu interior, com o lençol freático aflorando junto à calha principal.

Oliveira (1989) adotou uma classificação relacionada com a rede de drenagem, onde são identificados três tipos de voçorocas: a) Tipo I, conectadas à rede de drenagem, podendo estar associadas ao escoamento hipodérmico e/ou subterrâneo nas partes mais baixas da encosta e que por vezes, são consideradas canais de primeira ordem; b) Tipo II, desconectadas da rede de drenagem e encontradas no topo das encostas, podendo estar ligadas ao escoamento superficial e/ou movimentos

de massa e não formam um canal de primeira ordem, pois não estão ligadas a rede de drenagem; c) Tipo III, corresponde a integração dos tipos anteriores e se desenvolvem desde o topo da encosta até a jusante, formando uma só incisão.

Fendrich et al (1991) classificaram as voçorocas conforme o formato da secção transversal: a voçoroca em “U” é normalmente comumente encontrada em regiões onde o solo e o subsolo são mais facilmente erodíveis, não significando necessariamente um perfil mais estabilizado. Nesse caso, as paredes são quase verticais e a ampliação lateral é realizada por erosão superficial ou por descalçamento da base da parede devido a ação da água subterrânea. Já a voçoroca em formato de “V” está atrelada a solos que apresentam maior resistência a erosão. Essa forma é mais comum no início do processo, muito embora seja mais frequente encontrar ambos os formatos em uma mesma voçoroca, independentemente de sua idade ou estabilização.

Em uma discussão similar, Carvalho et al (2006) ressaltaram 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 de “U” ou trapezoidal; e formato de anfiteatro, quando a feição assume forma mais concentrada e encaixada ao atingir camadas de solos menos resistentes, ficando confinada pelas mais resistentes.

Com o objetivo de estudar as voçorocas do sudeste do Brasil, Nogami e Vilibor (1995) separaram-nas em três tipos, conforme o seu material de origem:

a) Arenosas ou Tradicionais: caracterizadas por se desenvolver em solos de predominância arenosa e tem na sua cabeceira, influência periódica ou contínua do lençol freático, geralmente associada a presença de um horizonte superficial menos permeável. Apresentam traçado de predominância retilínea, bordas bem agudas, condicionando processos de descalçamento. Essas voçorocas podem se desenvolver em terrenos de topografia pouco inclinada e no fim do seu canal, exibem marcas de extensa deposição de areia. Várias voçorocas são de dimensões muito grandes, que ameaçam cidades e trechos de obras viárias e, além disso, apresentam indícios de terem sua origem pela ação das águas pluviais superficiais.

b) Siltosas: se formam quando as ravinas ultrapassam o horizonte subsuperficial laterítico e atinge o saprolítico de natureza essencialmente siltosa. As cabeceiras dessas voçorocas são encontradas frequentemente no alto das encostas,

aprofundando rapidamente encosta abaixo e tendem a formar um conjunto de canais interligados em um padrão dendrítico.

c) Argilosas: desenvolvem-se, sobretudo, pela desagregação consequente ao processo de molhagem e secagem dos solos saprólitos de folhelhos, argilitos e, raramente, basaltos e outras rochas que sofrem o processo de “pastilhamento”. De forma geral, os canais apresentam um padrão dendrítico, bordas arredondadas, intenso pastilhamento das paredes e nenhum acúmulo de material na porção final.

Em um estudo em que discute alguns assuntos pertinentes aos processos erosivos, Magalhães (2001) concluiu que existem três tipos de voçorocas: a) Ovoides, sendo as mais típicas e apresentam configuração de um anfiteatro de paredes íngremes na parte superior e um canal estreito à jusante; b) Formas Coalescentes, constituídas por mais de um anfiteatro à montante que resultam de reentrâncias nas paredes laterais que evoluem de forma independente; c) Formas Lineares, que apresentam um grande desenvolvimento longitudinal se assemelhando a um cânion, mas terminando igualmente por um canal estreito.

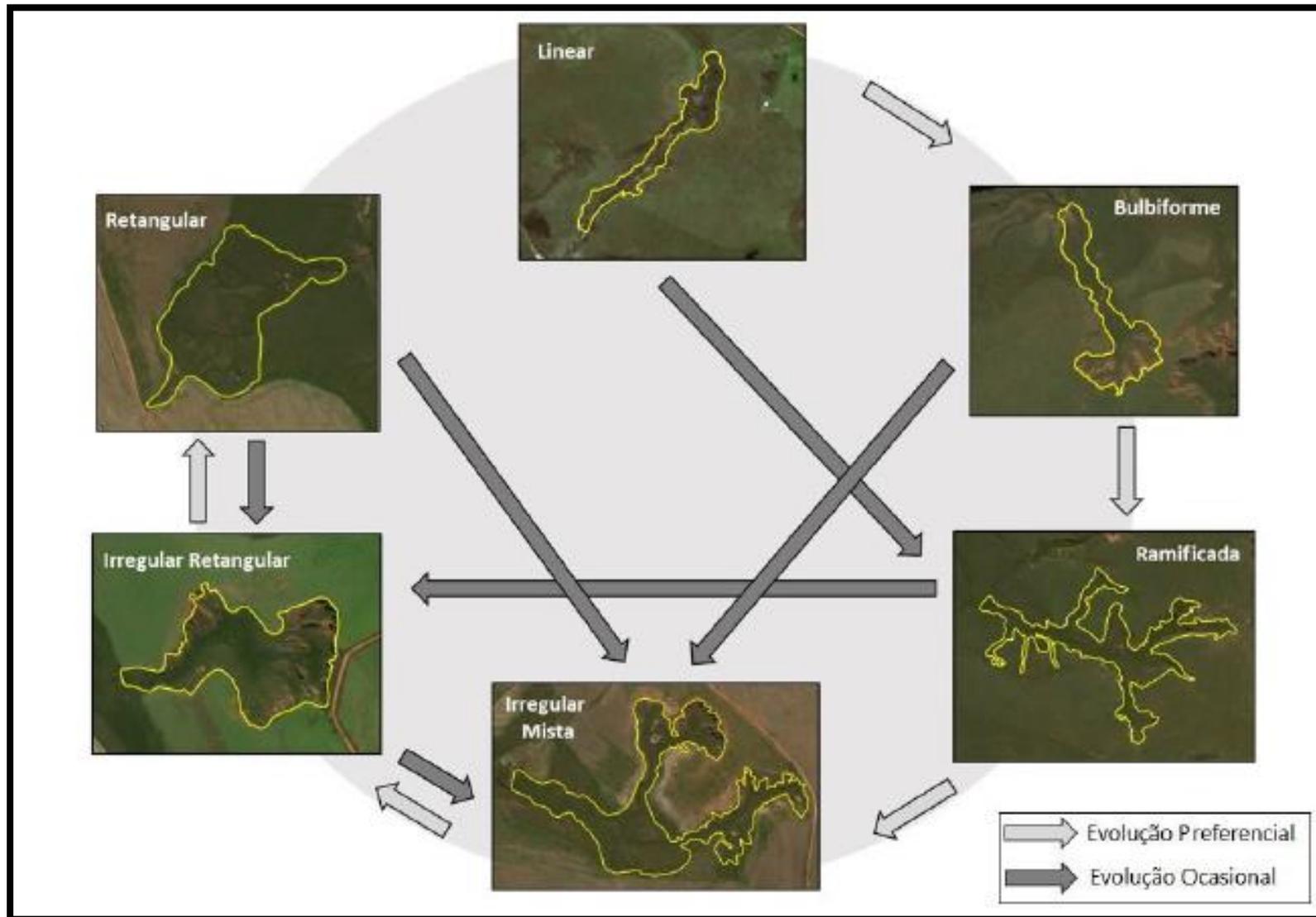
Autores como Frevert (1963), Houghton e Charman (1986), Bergsma et al (1996), Vieira e Albuquerque (2004) classificaram as voçorocas quanto ao seu tamanho, levando em consideração fatores como o comprimento, largura, profundidade, área de abrangência e área erodida. Uma das classificações de magnitude mais utilizada foi desenvolvida por Vieira e Albuquerque (op cit.) para analisar as voçorocas em uma porção do estado do Amazonas, onde eles distinguem as feições em muito pequenas (perda de material de até 999 m³), pequena (perda entre 1000 e 9999 m³), média (entre 10000 e 19999 m³), grandes incisões (perda entre 20000 e 40000 m³) e muito grande (superior a 40000 m³).

Por sua vez, Dobek et al (2011) definiram que a configuração da secção transversal de uma voçoroca e sua relação com a localização do relevo inicial e as formas de uso do solo, na maioria das vezes, permitem determinar as razões para o seu desenvolvimento. Sendo assim, os autores mapearam cinco tipos de secções transversais de voçorocas, observadas ao longo da direção de escoamento condicionado pelo relevo: 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) secção com trajeto arborizado.

Ao estudar as sub-bacias do município de Cacequi/RS, Cabral (2018) a partir de índices morfométricos (área, perímetro, largura, profundidade, volume, índice de

circularidade, hipsometria, declividade, morfologia, orientação, comprimento, plano e perfil de curvatura das vertentes, lineamentos estruturais) definiu um cenário de evolução das voçorocas (Figura 3), seguindo uma ordem de desenvolvimento, iniciando pela forma Linear, considerada o estágio inicial até se chegar a Retangular, que é considerada a forma mais avançada da erosão linear. A autora ainda classificou as voçorocas em Irregular Mista que é o estágio mais combinado no quadro evolutivo, pois mantém uma base linear, com abertura na média vertente e ramos no topo, e em alguns casos, os ramos apresentam características bulbiformes. Essa classe pode ainda se desenvolver para uma forma Irregular Retangular, onde estaria ligada principalmente a um aumento da sua circularidade, resultando em uma forma retangular.

Figura 3 - Cenário de evolução das voçorocas no município de Cacequi.



Fonte: Cabral (2018).

Tendo como base o fato de que a erosão por voçorocas é causada por diferentes mecanismos que atuam em escalas temporais e espaciais, tendo sua origem através das rotas que o fluxo d'água percorre em superfície ou subsuperfície, Oliveira (1999, 2015) pontuou os mecanismos envolvidos no processo erosivo de forma genérica e ordem física:

a) Deslocamento de partículas por impacto das gotas de chuva: acarreta na compactação da superfície do terreno através da remobilização de silte e argila nos espaços intergranulares e causa a erosão através da projeção de partículas para fora da zona de impacto.

b) 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.

c) Transporte de partículas por fluxos concentrados: ao convergir para micro depressões do terreno, o escoamento superficial se transforma em fluxo concentrado, formando as feições erosivas.

d) Erosão por quedas d'água: tem origem a partir da água do escoamento superficial que desemboca no interior das feições.

e) Solapamento das bases de talude: pode ocorrer por outros mecanismos além da erosão por cascatas, onde a atuação dos filetes subverticais de escoamento superficial é outro efeito da erosão por quedas d'água.

f) Liquefação de materiais de solo: ocorre quando materiais inconsolidados são submetidos a fracas tensões cisalhantes de natureza cíclica. Esse processo surge quando os materiais do solo estão saturados.

g) Movimentos de massa localizados: podem ser verificados em voçorocas e dependem basicamente da resistência dos materiais.

h) Arraste de partículas por percolação: ocorre como resultado da água que atravessa um meio poroso após aflorar ao longo de uma superfície exposta.

i) Arraste de partículas por fluxos concentrados em túneis e dutos: ocorre sob o efeito de água do 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 que dão origem as feições erosivas.

Por sua vez, Oliveira e Méis (1985) apresentaram quatro tipos de mecanismos para a evolução das voçorocas, fundamentados em observações empíricas realizadas

a campo, considerando o grau de atividade da forma erosiva, marcas deixadas nos entalhes pelos processos mais recentes e as variações de altura e a largura do canal erosivo entre as seções de montante e jusante:

a) O primeiro mecanismo apresenta os setores mais elevados da encosta, afetados pela erosão. A variação da largura e altura do canal é positiva, ou seja, ambas as dimensões diminuem à jusante e não existe ligação direta com qualquer canal de ordem superior à jusante e é sugerido como determinante a predominância dos fluxos superficiais.

b) No segundo momento, os setores mais baixos das encostas são afetados de forma progressiva para o alto da mesma e os canais são mais largos e mais profundos para jusante. O mecanismo estimado é o predomínio de fluxos subsuperficiais, atuando no desenvolvimento da erosão por solapamento das bases e ocorrendo invariavelmente a ligação com um canal de ordem superior.

c) O terceiro caso é descrito como complexo, já que toda a encosta é afetada pela erosão e não é observado nenhum indício de fator deflagrador do processo. As formas erosivas são muito antigas, apresentam vegetação no canal e afloramento de fluxo da base, parecendo resultar da integração dos dois casos anteriores.

d) O quarto mecanismo é denominado atípico e compreende variações dos demais tipos. As voçorocas encontram-se associadas com cortes de estradas, em setores intermediários das encostas e apresentam formas exóticas resultantes de processos recentes, como marcas de escoamento superficial descontínuo, cicatrizes de erosão superficial variando abruptamente para a formação de túneis subterrâneos e vice-versa.

Para concluir, torna-se importante salientar que ainda existem as feições de retrabalhamento das voçorocas que se formam ao longo da incisão e são resultantes de diferentes mecanismos que atuam nos processos erosivos. Essas feições possuem formas e dimensões variadas que dependem da natureza do solo ou tipo de rocha na qual foram desenvolvidas, da origem da água, além da intensidade do escoamento ou percolação.

2.3 FATORES CONDICIONANTES DA EROSÃO LINEAR

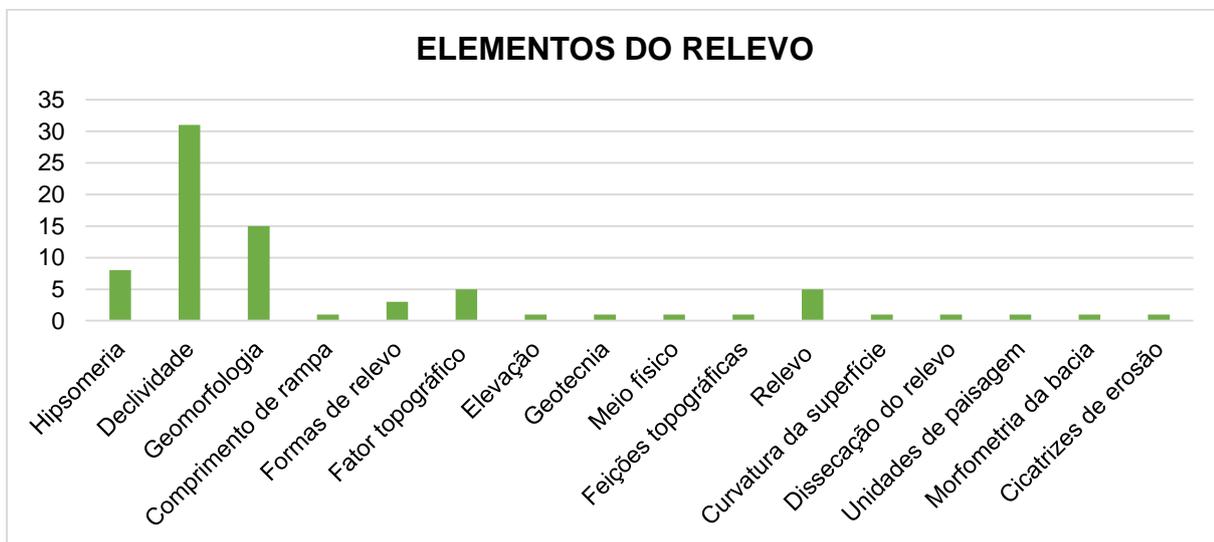
Com o intuito de justificar a seleção dos fatores condicionantes para o estudo na BHRI, realizou-se um levantamento detalhado dos parâmetros considerados na

análise da suscetibilidade, fragilidade ou até da vulnerabilidade frente aos processos erosivos. No decorrer da pesquisa, constatou-se que não existe um fator único ou um consenso de parâmetros a ser utilizado entre os autores e dessa forma, optou-se por escolher aqueles fatores que por número de vezes que apareciam nos artigos, além do conhecimento prévio da área de estudo. Os fatores condicionantes escolhidos são discutidos a seguir:

2.3.1 Relevo

Durante a leitura dos artigos, identificou-se vários elementos que foram considerados para o estudo do relevo, no qual em alguns trabalhos o relevo era representado por um conjunto de fatores e em outros, era caracterizado apenas por um único atributo. O Gráfico 1 traz uma compilação dos elementos que foram identificados nos artigos para o estudo do relevo.

Gráfico 1 - Elementos identificados no estudo do relevo como um condicionante da suscetibilidade erosiva.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Inseridos em uma série de fatores que controlam a distribuição dos processos erosivos, os atributos do relevo ou características da vertente, apresentam sua importância a erosão originada pelo fato de que a topografia condiciona a intensidade e a direção dos fluxos hídricos pluviais, que por sua vez, representam os principais

agentes erosivos (COELHO NETTO, 1998; LEPSCH, 2002, 2010; GUERRA, 2003; CABRAL, 2018).

Dentre as características do relevo que podem ter reflexos diretamente nos processos erosivos, têm-se a declividade, o comprimento e a forma da encosta como as mais decisivas na potencialização ou não da erosão. Autores como Bigarella e Mazuchowski (1985), Infanti Junior e Fornasari Filho (1998) e Morgan (2005) definem que nas encostas com elevado grau de declividade, a água tem menos tempo para infiltrar, assim como os obstáculos e resistência ao escoamento são menores, possibilitando que ocorra um maior escoamento superficial. Entretanto, uma encosta de baixa declividade e comprimento de rampa maior também pode ter alta intensidade erosiva, desde que sujeita a grande vazão do escoamento superficial.

Com relação ao comprimento da encosta, Guerra (1999, 2015) ressalta que esse parâmetro deve ser analisado em conjunto com outros elementos, como a declividade, propriedades dos solos e a forma das encostas, representando um importante papel na questão da erodibilidade. Morgan (2005) ainda fala sobre a importância das cristas longas, com encostas curtas e convexas, como sendo as características morfológicas que propiciam a erosão dos solos. Corroborando com isso, Guerra (2015) salienta que as encostas convexas com topo plano podem armazenar água que se liberada em fluxo concentrado, dão origem as erosões lineares do tipo ravinas e voçorocas. Em outra condição, Bacellar (2000) destaca que os vales de cabeceira de drenagem que possuem formas côncavas funcionam como coletora de água e com isso, são mais suscetíveis a ocorrência de processos erosivos.

No estudo realizado por Renard et al (1997), os autores definiram que o relevo é formado principalmente pelo grau de declive e pelo seu comprimento. Além disso, ele é influenciado pela forma do perfil (côncava, convexa ou retilínea). Assim, as alterações na inclinação do terreno e na forma do relevo também provocam a erosão laminar e em sulcos, pois influenciam no volume e na velocidade da enxurrada. Bastos (1999) ainda reforça que a declividade e o comprimento de rampa são os fatores de maior importância no controle dos processos erosivos, pois influem particularmente no escoamento superficial, onde terrenos com maiores declividades e comprimento de rampa, possuem maior velocidade de escoamento e capacidade erosiva.

Por outro lado, Bertoni e Lombardi Neto (1999, 2005) salientam que é comum a associação da erosão com a declividade sem levar em consideração o comprimento de rampa, o que para eles significa um grande equívoco, pois é um dos fatores de

maior relevância, pois rampas mais extensas tendem a perder mais solos do que as menores em condições semelhantes de tipos de solos, declividades e uso e manejo. Os autores ainda reforçam que o comprimento de rampa não é menos importante que o declive, pois ao passo que o caminho percorrido vai aumentando, não somente as águas vão se avolumando, mas também sua velocidade de escoamento vai crescendo progressivamente. Em suma, quanto maior o comprimento de rampa, mais enxurrada se acumula e maior será a erosão.

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

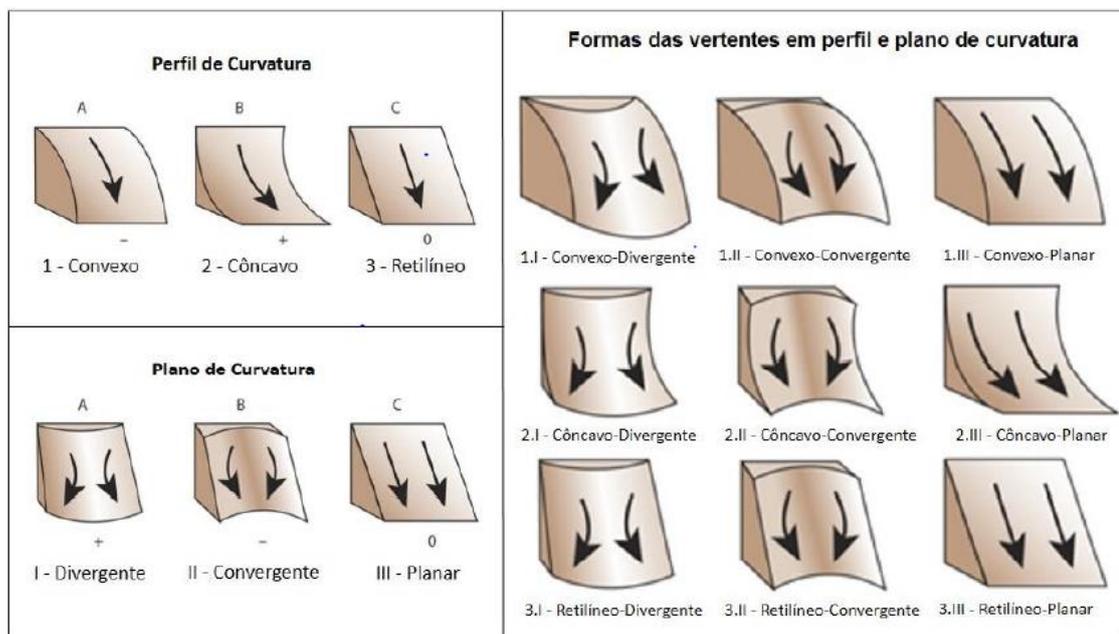
Sobre as características das encostas, Mathias (2016) dá destaque aos atributos morfométricos que podem ser apontados como condicionantes da evolução erosiva, seja através do comprimento da vertente, como pela sua inclinação. Desse modo, as formas das vertentes estabelecem as condições mais ou menos propícias à erosão, mediante a concentração das águas do escoamento superficial.

Com relação as vertentes (Figura 4), é importante salientar que elas correspondem a um elemento da superfície inclinado em relação a horizontal, apresentando um gradiente e uma orientação no espaço e assim, podem ser classificadas conforme sua orientação no plano e no perfil. São nelas que ocorrem o intemperismo, transporte, deposição e o estudo dos processos atuantes carece de uma descrição minuciosa e precisa, que geralmente é feita com referência ao seu perfil, onde é traçada uma linha sobre o terreno descrevendo a sua inclinação. Essa inclinação é expressa por um ângulo ou gradiente e sua orientação é determinada pelos pontos cardeais.

A curvatura no plano é a taxa de variação de declividade na direção ortogonal a da orientação da vertente e se refere a forma divergente e convergente do terreno, enquanto a curvatura no perfil é a taxa de variação da declividade na direção de sua orientação e está atrelada a face convexa (valor de curvatura negativo), retilínea (valor de curvatura nulo) e côncava (valor de curvatura positivo) do terreno, sendo decisiva na aceleração ou desaceleração dos fluxos. As vertentes com curvas de nível

côncavas e perfil côncavo e convexo, são concentradoras de fluxo superficial e podem induzir facilmente a ocorrência de processos erosivos. Por outro lado, as vertentes com curvas de nível convexas e perfil côncavo ou convexo, fazem com que as linhas de fluxo sejam dispersadas (VELOSO, 2002; GUERRA, 2003; VALERIANO, 2003; ANJOS et al., 2011; JESUS, 2013).

Figura 4 - Modelo de curvatura das vertentes.



Fonte: Cabral (2018) adaptado da *Curvature function* (Esri, ArcMap).

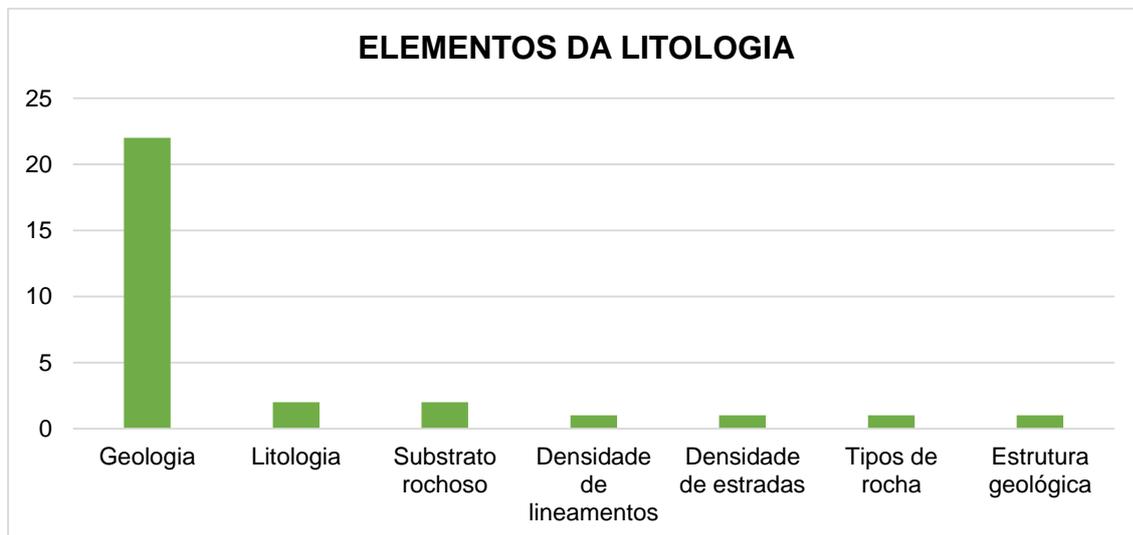
Ao realizar uma pesquisa na bacia hidrográfica do Taboão - RS, Viero (2004) ainda considera que outros parâmetros também podem ser incorporados no estudo do relevo frente aos processos erosivos, como as encostas, o comprimento da vertente, a densidade de eixos de drenagem e a declividade acima da cabeceira da voçoroca, a distância entre a cabeceira do divisor de água, dentre outras.

Sendo assim, para o estudo dos processos erosivos lineares na BHRI, a caracterização dos atributos do relevo levou em consideração a hipsometria, a declividade e a curvatura das vertentes, que foram discutidos separadamente e ao final foi realizado um agrupamento das características que detalham melhor o relevo da área de estudo.

2.3.2 Litologia

Durante a leitura dos artigos, identificou-se vários elementos que foram considerados para o estudo das litologias, no qual em alguns trabalhos ele era representado por um conjunto de atributos e em outros, era caracterizado apenas pela descrição minuciosa da litologia/geologia e o quanto elas eram importantes aos processos erosivos. Com base nisso, o Gráfico 2 compila esses elementos identificados no estudo das litologias no decorrer da pesquisa.

Gráfico 2 - Elementos identificados no estudo da litologia como um condicionante da suscetibilidade erosiva.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Conforme as proposições de Bacellar (2000), a litologia e a estrutura são muito importantes na progressão das erosões, atuando de forma passiva, quando controlam a resistência à erosão e, ativa, quando conduzem o direcionamento dos fluxos subsuperficiais. O autor ainda explica que as informações geológicas possibilitam entender a concentração das voçorocas em determinadas áreas, o direcionamento de seus canais e a inexistência desses fenômenos em outras áreas aparentemente suscetíveis.

Autores como Casseti (1995) considera o substrato litológico como um fator de extrema importância, pois pode apresentar discontinuidades e pontos de fraqueza, onde há o escoamento preferencial da água, além de fornecer material para a

formação do solo, interferindo na sua estrutura, mineralogia e textura. Além de responder pelo comportamento e fornecer material para a formação do solo, a natureza da rocha intervém no perfil da vertente, no seu declive médio e na velocidade de seu recuo ou evolução. Corroborando com isso, Drumond (2006) salienta que os fatores geológicos que atuam como condicionante do processo de voçorocamento estão associadas as litologias e as estruturas geológicas planares (foliações, falhas e fraturas).

Em seu trabalho com as voçorocas no sudeste da Austrália, Beavis (2000) avalia a importância da litologia e das estruturas para determinar a localização das feições erosivas na área de estudo. O estudo ainda demonstrou 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.

Com relação aos movimentos neotectônicos do período Terciário Superior e início do Quaternário, Phillips e Schum (1987), Silva e Ferreira (2014) definem que eles 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, a análise da drenagem torna-se fundamental, já que a partir dela, é possível identificar se existe controle estrutural na distribuição da drenagem na superfície, estando associada geralmente a fraturas, falhas e dobramentos.

Por sua vez, os padrões de lineamentos estruturais podem ser avaliados por meios de imagens de satélites ou fotografias aéreas. Viero (2004) utilizando das discussões de O'Leary et al (1976) caracteriza um lineamento como uma feição linear da superfície, mapeável, simples ou composto, cujas partes estão alinhadas de uma forma retilínea ou levemente curvilínea e que se difere dos padrões das feições adjacentes e baseados em indícios que refletem um fenômeno de subsuperfície. Mantelli e Rossetti (2009) alegam ainda que os lineamentos na drenagem, a confluência de canais em ângulos de 90° e a ruptura de declives e vales assimétricos, indicam a presença de movimentos tectônicos recentes.

Silva et al (2006) ratifica salientando em suas pesquisas, que as anomalias na drenagem podem ser definidas como uma discordância local da drenagem e/ou dos padrões de canais. Com isso, os terraços fluviais assimétricos, trechos retilíneos,

ocorrência localizada e abrupta de curvas meândricas e captura fluvial, indicam a presença de atividades recentes.

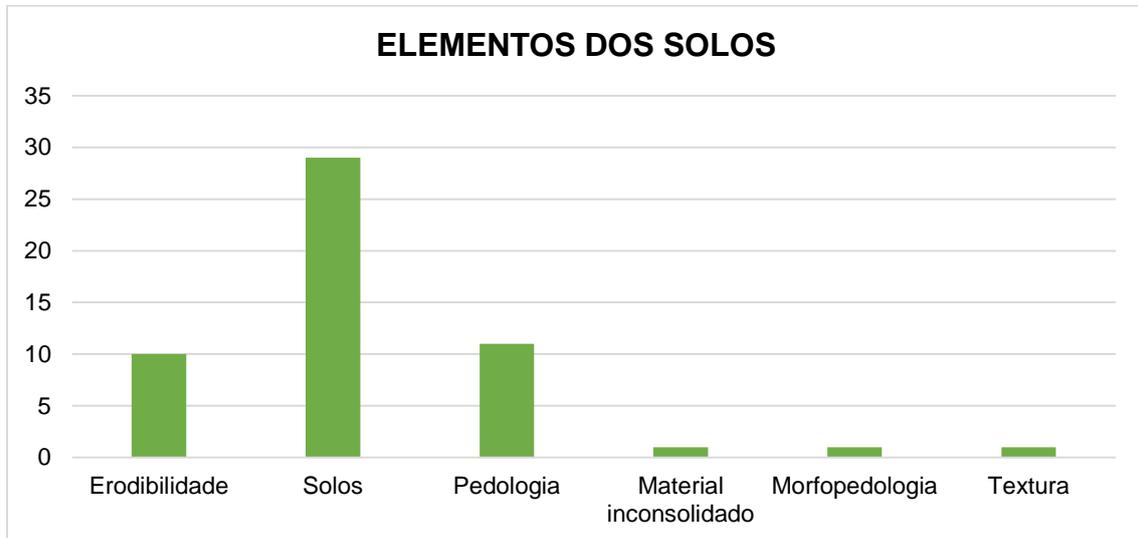
Os lineamentos são resultantes de falhamentos e fraturamentos e podem representar zonas de aumento de porosidade e permeabilidade em áreas com rochas maciças, significativas para o acúmulo e movimentação de água subterrânea e utilizadas como indicadores do controle exercido pelas estruturas geológicas nos processos erosivos lineares. Além disso, fornece suporte na observação de eventos tectônicos e neotectônicos (ERDÉLYI E GÁLFI, 1988; CABRAL, 2018).

Na discussão e caracterização dos aspectos litológicos da BHRI, dividiu-se as rochas em grupos mais ou menos suscetíveis e a partir disso foi detalhado cada litologia presente na área de estudo, apontando o quanto ela é ou não responsável por acelerar e influenciar nos processos erosivos lineares.

2.3.3 Solos

Durante a leitura dos artigos, identificou-se vários elementos que foram considerados para o estudo dos solos, no qual em alguns trabalhos ele era representado por um conjunto de atributos e em outros, era caracterizado apenas pela classe de solo propriamente dita e quanto ela era suscetível frente a erosão. Com isso, o Gráfico 3 traz uma compilação dos elementos que foram identificados no estudo dos solos no decorrer da pesquisa.

Gráfico 3 - Elementos identificados no estudo dos solos como um condicionante da suscetibilidade erosiva.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Conforme Teixeira (2000) há uma definição simples que se adapta aos propósitos da Ciências da Terra e que considera o solo como um produto do intemperismo, do remanejamento e da organização das camadas superiores da crosta terrestre sob a ação da atmosfera, hidrosfera, biosfera e das trocas de energia envolvidas. Os solos encontrados na superfície terrestre apresentam grande variação em função das diferentes combinações de seus fatores de formação.

Para Brady (1989), a influência de fenômenos que definem a formação dos solos, ocorre em razão de determinados fatos que se manifestam simultaneamente, em diferentes intensidades, denominados processos pedogenéticos. Sua formação tem início a partir do intemperismo físico, com a desintegração física e mecânica das rochas; e químico, na presença de água e temperatura favorável ao desenvolvimento de reações, que alteram os minerais. Portanto, os solos são definidos, com frequência, em prol das características decorrentes das influências combinada de clima e atividades bióticas, modificadas pela topografia que atua sobre os materiais originários, com o decorrer do tempo.

Autores como Mota (1997), Bastos (1999) e Pruski (2009) destacam que o comportamento dos solos diante dos processos erosivos, é conhecimento comumente na literatura como erodibilidade, que representa a sua suscetibilidade à erosão, constituindo uma propriedade intrínseca que depende da capacidade de infiltração e

do armazenamento de água, além das forças de resistência do solo a ação da chuva e o escoamento superficial. Bastos (1999) ainda considera que a erodibilidade é um dos principais condicionantes da erosão, pois ela retrata a maior ou menor facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo, pois ela constitui uma das propriedades de comportamento dos solos de maior complexidade em função do grande número de fatores físicos, biológicos e mecânicos intervenientes.

Guerra (1998, 2005) recorda que muitas pesquisas consideram a textura, densidade aparente, porosidade, teor de matéria orgânica, teor e estabilidade dos agregados e o pH do solo são os principais fatores controladores do processo erosivo. Em seu livro sobre a erosão dos solos nos trópicos, Lal (1990) apresentou diversos fatores que influenciam na erodibilidade, como as propriedades físicas/hidrológicas, químicas/mineralógicas, biológicas/bioquímicas, características do perfil e as propriedades físicas que afetam a resistência dos solos. Esses fatores são sequenciados a seguir: a) Propriedade Mecânica, que envolve aspectos relacionados a textura, estrutura, tamanhos dos torrões e a formação da crosta; b) Resistência ao Cisalhamento, importante no desprendimento, rolamento e deslizamento de grãos; c) Propriedade Hidrológica, com os processos de retenção de água, infiltração e permeabilidade; d) Propriedade Reológica, que envolve o sistema solo/água, onde a umidade influi na suscetibilidade a erosão por afetar, resistência ao cisalhamento, consistência e plasticidade; e) Matéria Orgânica, influenciando na granulometria, diminuindo a compactação e aumentando a resistência a desagregação e dispersão; f) Argilominerais, que influenciam na estrutura do solo e sua resistência; g) Características do Perfil, que atuam direta ou indiretamente na erosão, através do escoamento subsuperficial e no crescimento vegetativo.

Na visão de Bigarella (2003), a erodibilidade depende de fatores como a intensidade da chuva, capacidade de infiltração, propriedades físicas e químicas que controlam a desintegração do solo e determinam sua coesividade e a vegetação que afeta diretamente a estabilidade. Para o autor, a erodibilidade decresce quando a superfície do terreno se apresenta suficientemente compactada. Entretanto, o efeito do escoamento acaba suplantando o da compactação.

Em outra perspectiva, Bertoni e Lombardi Neto (1999) salientam que o conhecimento das principais características como a cor, textura, estrutura e porosidade são de suma relevância na orientação de trabalhos de seu manejo e

controle da erosão: a) Cor, uma das características mais facilmente distinguíveis dos solos, que de forma geral, apresentam diversas tonalidades de cor parda. Por via de regra, o solo é da cor do material de origem, mas essa propriedade é alterada pela presença de matéria orgânica, água e óxidos de ferro; b) Textura, que é a distribuição quantitativa das classes de tamanho de partículas que compõem o solo. São consideradas partículas as pedras, seixos, cascalhos, areia, silte e argila; c) Estrutura, a forma como se arranjam as partículas elementares do solo. Ela determina a maior ou menor facilidade de trabalho das terras e permeabilidade a água, resistência a erosão e as condições ao desenvolvimento das raízes das plantas; d) Porosidade, refere-se a proporção de espaços ocupados pelo líquidos e gases em relação ao espaço ocupado pela massa de solo; e) Permeabilidade, capacidade que o solo tem de deixar passar água e ar através do seu perfil.

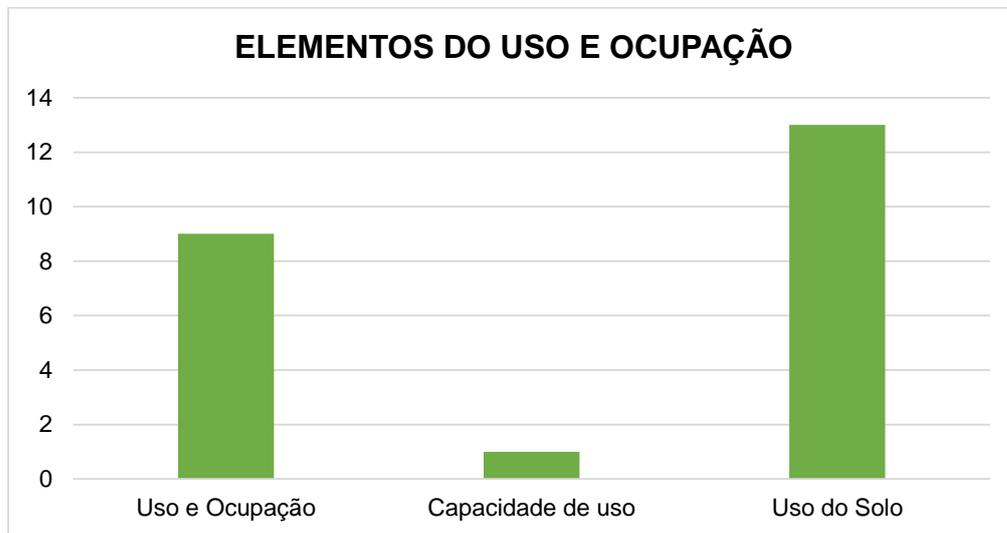
Dessa forma, Robaina e Trentin (2004) contextualizam que os processos erosivos ocorrem com maior intensidade nos solos que apresentam texturas da classe areia e com baixos teores de matéria orgânica. Já em solos com teores de argila mais expressivos, o grau de agregação das estruturas é maior e assim, os processos erosivos são atenuados. Ao utilizar as discussões de Setzer (1953), Vieira (1984) também conclui que os solos mais propícios para a formação de erosão, são do tipo arenosos, secos e ácidos, com predomínio de cores claras e horizontes mais baixos.

Para concluir, destaca-se que para o estudo dos processos erosivos lineares na BHRI, a caracterização dos solos levou em consideração as classes presentes na área que foram agrupadas em classes mais ou menos suscetíveis e que foram caracterizadas levando em consideração a textura, estrutura, porosidade, dentre outros aspectos pertinentes no estudo da erosão.

2.3.4 Uso e Ocupação

Durante a pesquisa nos artigos, identificou-se três elementos que foram levados em consideração para o estudo do condicionante “Uso e Ocupação”. Em alguns trabalhos, os autores levavam em consideração apenas a capacidade de uso do solo, porém, na sua maioria, era discutido todo o processo de uso e ocupação dessas áreas. Assim, o Gráfico 4 traz a compilação desses elementos encontrados no decorrer da pesquisa.

Gráfico 4 - Elementos identificados no estudo da litologia como um condicionante da suscetibilidade erosiva.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tendo a vegetação como um fator de influência na erosão, Galeti (1973) salienta que: a) quanto mais vegetado estiver o solo, menor será a erosão; b) a planta protege o solo em três níveis - na copa, na superfície e no interior do solo; c) a vegetação acrescenta matéria orgânica nos solos, tornando-os porosos, facilitando a penetração e a retenção na água; d) quando morrem, as raízes das plantas enterradas nos solos deixam orifícios que facilitam a penetração da água; e) as plantas funcionam como “bombas”, tiram a água do solo e jogam na atmosfera (transpiração); f) sombreiam o solo diminuindo a evaporação e a queima de matéria orgânica.

Na visão de Tricart (1977), a erosão pluvial é muito retardada ou até mesmo impedida por uma cobertura vegetal herbácea densa e por uma camada de detritos composto principalmente por folhas mortas. Portanto, a cobertura vegetal pode intervir de duas formas: a) pela interceptação das precipitações com seus aspectos energéticos e hidrológicos; b) pelo fornecimento à superfície do solo de detritos vegetais, que desempenham papel amortecedor (absorção de energia).

Já para Bertoni e Lombardi Neto (1985), a vegetação é um fator decisivo na conservação do solo e na possível redução dos processos erosivos. No entanto, sua existência e vigor dependem da disponibilidade de nutrientes e umidade do solo, fatores que normalmente se encontram em níveis insuficientes nas áreas onde ocorrem erosões profundas do tipo voçorocas. Nesse sentido, Cunha e Guerra (2009)

ainda reforçam que a cobertura vegetal exerce um importante papel sobre os processos erosivos, sobretudo no que se refere a proteção do solo ao impacto das chuvas e o escoamento superficial. Além de influenciar na interceptação da água da chuva, a vegetação atua de forma direta na produção de matéria orgânica, que por sua vez, age na agregação das partículas constituintes dos solos. Ademais, influencia no controle da erosão em três formas: agindo sobre o *runoff*⁶, balanço hidrológico e variações sazonais da interceptação.

Diante disso, torna-se necessário destacar sobre a importância da cobertura vegetal na redução do impacto das gotas de chuva, que promove o estabelecimento de uma camada de matéria orgânica em decomposição que favorece a atividade microbiana, de insetos e animais, contribuindo para formar caminhos preferenciais para o movimento da água no solo. A cobertura vegetal também é responsável por agir no sentido de reduzir a velocidade do escoamento e, assim, contribui para aumentar o volume de água infiltrada. Essas características estão ligadas com o sistema radicular das plantas e criam caminhos preferenciais para o movimento de água no solo que, conseqüentemente, aumentam a taxa de infiltração (TUCCI, 1997).

Para concluir, Guerra (2003) ainda destaca que a densidade da cobertura vegetal é um fator determinante no processo de escoamento superficial e na perda de solo, pois o tipo de cobertura e a sua porcentagem de recobrimento podem reduzir os efeitos dos fatores naturais. Além de influenciar na interceptação da água da chuva, ela atua diretamente na produção de matéria orgânica que ajuda na agregação das partículas constituintes do solo. Em uma área com alta densidade de cobertura vegetal, o escoamento superficial e a erosão são baixos, especialmente se houver uma serapilheira no solo que intercepta as gotas de chuva que caem através de folhas e galhos. Já em áreas cobertas parcialmente pela vegetação, o escoamento e a perda de solo podem aumentar rapidamente, como geralmente ocorre em zonas semiáridas agrícolas de pastoreio e onde os solos apresentam menos de 70% da cobertura vegetal.

A ação do homem sobre o meio físico através do desmatamento, construção de estradas ou até mesmo a criação e a expansão de núcleos urbanos, sobretudo quando ocorre de modo desenfreado, constitui o fator decisivo para a origem e a potencialização da erosão. Sobre a interferência antrópica nos processos erosivos,

⁶ Escoamento superficial.

Bertoni e Lombardi Neto (1999, p. 73) fazem as seguintes considerações sobre as atividades rurais como agente potencializador:

O homem, ao explorar o solo, destrói a vegetação protetora, rompe com o arado a superfície do terreno para semear as espécies vegetais úteis às suas necessidades de alimentação e abrigo, e submete a terra à aração periódica com ferramentas de preparo do solo; então, o processo erosivo adquire velocidade e intensidade. A natureza, porém, continua transformando a rocha em solo com a mesma lentidão, enquanto o desgaste do solo pelo mau uso se acelera progressivamente. Para avaliar esse desequilíbrio, basta ter em conta que são necessários vários séculos para formar um centímetro de solo e que em um terreno em declive mal protegido, bastam poucos anos para arrastar uma camada dessa espessura.

Nas discussões de Mathias (2016), o autor salienta que a influência antrópica é quase unânime entre os pesquisadores, no âmbito de prever que ela funciona como agente catalisador dos processos erosivos. Em um primeiro momento, essa ação pode ser sentida pela retirada da cobertura vegetal. Posteriormente, os diferentes tipos de uso, como a atividade agropecuária intensiva, contribuem e muito para o processo de fragilização do solo.

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

No cenário do Rio Grande do Sul, Souto (1985) discute que entre as décadas de 1960 e 1970 ocorreu um estímulo acentuado por parte do governo, através de linhas de crédito para o desenvolvimento de atividades agropecuárias, principalmente na porção sudoeste do estado. Assim, influenciados pela sucessão trigo/soja que permitia o uso intensivo de maquinários, os agricultores ampliaram suas áreas agrícolas até o limite de suas propriedades. Dessa forma, essa porção do território sul-rio-grandense que até então tinha como atividade predominante a criação de gado extensivo é incorporado a lógica agrícola com o uso sucessivo e intensivo dos solos. Além disso, é importante ressaltar que os solos oriundos de substrato vulcânico obtinham melhor rendimento que àqueles sobre substrato arenítico, devido a superioridade de suas pastagens naturais. Isso fez com que os proprietários optassem

pelo arrendamento dos solos menos aptos a atividade agrícola, favorecendo assim, a atividade erosiva (ROBAINA E TRENTIN, 2004).

Embora substancialmente alterada, as paisagens do sudoeste do Rio Grande do Sul ainda permitem reconhecer com certa precisão o seu estado original. Robaina e Trentin (2004) sinalizam que a característica mais notável dessa região é a grande predominância das formações campestres e a vegetação selvática é restrita a certas encostas dos chapadões de arenito, sobretudo no norte do rio Ibicuí, bem como em faixas que acompanham os principais cursos d'água, caracterizando um habitat que é favorecido por um suprimento mais regular de água.

Para concluir, destaca-se que para o estudo da BHRI, o condicionante Uso e Ocupação levou em consideração o uso atual da área, que foi discutido e identificado em quais locais o uso contribui para a aceleração ou até mesmo a diminuição dos processos erosivos lineares.

2.4 GEOTECNOLOGIAS E UTILIZAÇÃO DE MÚLTIPLOS CRITÉRIOS PARA O ESTUDO DOS PROCESSOS EROSIVOS

As últimas quatro décadas foram marcadas por um acelerado desenvolvimento das ferramentas digitais que auxiliam a Geografia no monitoramento e planejamento do uso consciente dos recursos naturais. Rosa (2005) ressalta que as geotecnologias têm sido frequentemente utilizadas em face da rápida transformação dos recursos naturais por meio do uso e ocupação da terra. Assim, o geoprocessamento tem contribuído em estudos de escala global, ao passo que os sistemas de informações geográficas, a cartografia, o sistema de posicionamento global, sensoriamento remoto e a aerofotogrametria, são tecnologias que permitem a coleta, processamento, análise e oferta de informações com referências geográficas. Esse conjunto de técnicas é conhecido na literatura por geotecnologias.

As geotecnologias, segundo Fitz (2008), correspondem a toda e qualquer tecnologia ligada as geociências e áreas afins, que possibilitam avanços significativos no desenvolvimento de pesquisas, como também em ações de planejamento, processos de gestão, manejo e em outras questões referentes a estrutura do espaço geográfico. Através de um banco de dados georreferenciado, as geotecnologias permitem a interpolação de informações do meio físico, possibilitando o seu ordenamento para a execução de diferentes tipos de análises.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), por sua vez, podem ser entendidos como um conjunto de programas ou *softwares* que tornam possível o armazenamento e o tratamento de dados no espaço geográfico. O primeiro SIG foi desenvolvido em 1962 no Canadá pelo geógrafo Roger Tomlinson e foi batizado de *Canadian Geographic Information System* (CGIS) e possuía como característica, um sistema projetado que era capaz de atender mais de uma aplicação específica, como por exemplo, a interpolação de feições cartográficas.

No ano de 1964, o Serviço de Saúde Pública dos Estados Unidos automatizou a Divisão de Fornecimento de Água e Controle da Poluição, superpondo dados de diferentes temas como qualidade da água, cursos fluviais, processo e localizações de tratamento. Ainda nesse período, foi criado o primeiro SIG voltado para o gerenciamento dos recursos naturais do serviço florestal norte-americano (AVELINO, 2004).

O Brasil passou por um impulso tecnológico após a 2ª Guerra Mundial, onde um dos principais eventos que marcaram a ciência geográfica foi o mapeamento do território brasileiro, com cerca de 70% do recobrimento. É importante lembrar que as guerras também foram responsáveis pelo avanço de outras ferramentas, como por exemplo, a utilização de receptores de sinal *Global Positioning System* (GPS), que engloba o *Global Navigation Satellite System* (GNSS).

Sobre o GNSS, Groves (2013) caracteriza-o como um sistema de navegação que fornece aos seus usuários um posicionamento tridimensional (latitude, longitude e altitude), usando sinais de rádio transmitidos por satélite em órbita. Esse sistema é sustentado em auto posicionamento, onde a posição desejada é calculada através de um receptor que não transmite nenhum sinal para fins de posicionamento. Diversos sistemas fornecem cobertura global, sendo que o mais conhecido é o *Navigation Satellite with Time and Ranging - Global Positioning System* (NAVSTAR-GPS) operado pelos Estados Unidos. Além desse, existe o *Global Orbiting Navigation Satellite System* (GLONASS) desenvolvido pela antiga União Soviética e operado atualmente pela Rússia, o GALILEO controlado pela Agência Espacial Europeia e o *BeiDou Navigation Satellite System* (BDS) operado pela China.

Conforme as discussões de Silva (2001), a utilização das ferramentas do geoprocessamento e dos SIG's no território brasileiro teve início a partir de 1975 com a criação do Projeto RADAMBRASIL, que necessitava de um sistema que visasse racionalizar a geração, armazenamento, recuperação e a análise do amplo acervo de

dados primários e interpretativos (geomorfologia, geologia, vegetação, solos e uso potencial da terra), gerados pelo projeto e que deveriam recobrir todo o território brasileiro. Aliado a isso, ressalta-se que foi a partir do início da década de 1980 que a utilização de ferramentas computacionais para a análise e modelagem espacial passou a ser uma tendência seguida por pesquisadores no Brasil e no mundo.

Na visão de Câmara (1995), o termo SIG é aplicado em sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. Devido a sua ampla aplicabilidade, existem três formas de se utilizar um SIG: a) como uma ferramenta para produzir mapas; b) como suporte para análise espacial de fenômenos; c) como um banco de dados geográfico com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

Sendo assim, é de grande interesse no contexto da modelagem de dados do meio físico em SIG, a possibilidade de simular digitalmente técnicas de medição de variáveis topográficas. Nessa perspectiva, Valeriano (2008, p. 73) diz que “[...] os estudos aplicados a caracterização da paisagem com variáveis morfométricas tem sido favorecido com o desenvolvimento de métodos automáticos de extração dessas variáveis”.

Para Florenzano (2002, 2008) os avanços tecnológicos dos novos sensores remotos que produzem imagens com melhores resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal, além do recurso estereoscópio, também permite ao pesquisador mapear, medir e estudar uma diversidade de fenômenos geomorfológicos com maior rapidez e precisão. Assim, o sensoriamento remoto corresponde a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida. Sua origem está vinculada ao surgimento da fotografia aérea e se divide em dois momentos: a) de 1860 a 1960, baseado no uso de fotografias aéreas; b) de 1960 até os dias atuais, caracterizado por uma variedade de tipos de fotografias e imagem.

Atualmente, os processos de degradação do solo constituem um grave problema que traz consequências ambientais, sociais e econômicas. Estudos que avaliam a suscetibilidade dos diferentes tipos de solos aos processos erosivos, as taxas com que eles ocorrem e suas consequências na paisagem são de fundamental importância. A partir disso, as técnicas ligadas ao Geoprocessamento emergem com sucesso enquanto ferramenta para a avaliação da perda dos solos por erosão e aplicação de modelos teóricos que relacionam as variáveis geradoras dos processos

erosivos. Neste âmbito, a modelagem cartográfica possibilita a visualização de uma série de mapas em uma base comum, onde cada mapa representa uma variável a ser analisada por meio de operações matemáticas tradicionais. Assim, trabalhos que se propõe a construir modelos são importantes para auxiliar no planejamento de uso e ocupação de solo, de forma a inibir ou restringir a mesma, além de tentar amenizar os problemas relacionados à degradação do ambiente (BARBOSA et al., 1998; SOUZA et al., 2011).

Na literatura os estudos relacionados as análises de dinâmica de desenvolvimento e ocorrência de processos erosivos, bem como, os riscos oferecidos ao meio, estão inseridos em abordagens ambientais teórico-metodológicas consagradas nas áreas de ciências da terra e engenharias, sendo a grande maioria subsidiada pela utilização de SIG's em plataformas computacionais (KOCHENDERTER, 1970; BURROUGHS E KING, 1989; SOUZA, 2001; CASTRO et al., 2006; CORREIA et al., 2007; PRADHAN E LEE, 2010; HYUN-JOO OH E PRADHAN, 2011; POURGHASEMI et al., 2012; DEVKOTA et al., 2013; BUI et al., 2014; REGMI et al., 2014; SOUZA, 2015).

Em um dos seus estudos, Ai e Shi (2013) realizaram a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e análise espacial em plataforma SIG através de uma metodologia nomeada de “árvore difusa de decisão”, onde as variáveis ambientais foram ponderadas por meio de análises baseadas nas chamadas *erosion response units*. Essa pesquisa alerta sobre necessidade do desenvolvimento de metodologias de análise da suscetibilidade ambiental em grandes áreas, salientando a dificuldade de transposição dos modelos ambientais de predição de perdas de solo para outras regiões que não sejam as mesmas testadas na área selecionadas. Como justificativa, os autores ainda questionam a necessidade da ampla quantidade de dados de entrada para a aferição de modelos quantitativos, uma vez que os modelos qualitativos são simplificados e altamente eficientes, capazes de facilitar a investigação sobre mecanismos físicos, responsáveis pelos processos erosivos.

No decorrer de suas pesquisas, Spörl e Ross (2004) e Spörl (2007) discute consagradas metodologias de suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. Dos três modelos metodologicamente aplicados, dois foram propostos por Ross (1994), sendo um baseado nos Índices de Dissecação do Relevo e outro nas Classes de Declividade. Um terceiro modelo foi proposto por Crepani et al. (2001) tomando como base as Unidades Territoriais Básicas (UTB's). As áreas de estudo

foram caracterizadas por diversos atributos: rochas, relevo, solo, cobertura vegetal, uso da terra, pluviosidade; e os mapeamentos identificaram e analisaram os ambientes em função dos seus diferentes níveis de fragilidade. No entanto, esses modelos apresentam diferenças na operacionalização dos métodos, bem como, nas variáveis analisadas, resultando em três mapeamentos distintos. Segundo a autora, tais diferenças são discutidas apenas do ponto de vista das ponderações consideradas e dos procedimentos metodológicos utilizados na elaboração de cada um, pois nenhum dos três modelos discutidos é validado a partir de registros de processos erosivos obtidos em campo e que certa forma, limita as análises referentes as suas aplicabilidades.

Na sequência e ancorada pela necessidade um novo modelo, Spörl (2007) desenvolve uma metodologia para a elaboração do modelo de suscetibilidade face aos processos erosivos, aplicando-se técnicas de inteligência artificial “Redes Neurais Artificiais” (RNAs), buscando a minimização das limitações apresentadas nos modelos citados anteriormente.

Por sua vez, Pourghasemi et al (2012) testaram modelos de mapeamento de suscetibilidade ambiental para áreas de risco no Irã. Assim, os autores realizaram uma comparação da lógica *fuzzy* e da *analytical hierarchy process* (AHP) em SIG, no qual esses métodos são utilizados em abordagens que envolve a análise de grande número de variáveis, fazendo com que o processo de mapeamento exija a ponderação dos dados analisados. Dessa forma, esse procedimento baseia-se na definição do grau de pertinência de cada plano de informação e de cada um de seus atributos para a construção do resultado. Sendo assim, para esse estudo de caso os autores demonstraram que os resultados do modelo de lógica *fuzzy* (89,7%) teve um melhor desempenho do que o AHP (81,1%).

Ainda quanto ao uso dessa tecnologia para o estudo dos processos erosivos, Nobajas et al (2017) destacam que o desenvolvimento de VANT's, conhecidos popularmente como drones, fornecem uma plataforma ideal que é capaz de adquirir as imagens de alta resolução, necessárias para o entendimento de feições como ravinhas e voçorocas de grande escala em três dimensões de áreas remotas. Dessa forma, cada vez mais as geotecnologias se revelam como um instrumento eficaz na geração de informações integradas auxiliando na compreensão dos processos socioambientais, bem como, na orientação de melhores estratégias de planejamento e gestão dos recursos naturais.

Na análise dos processos erosivos, sobretudo na erosão linear, essa tecnologia tem sido amplamente empregada na parametrização e extração de dados de avanço das cabeceiras e da perda de solo. Entretanto, devido a ampla quantidade de informações que podem ser obtidas a partir do uso de VANT's ainda existem diversos campos a serem explorados, principalmente no que tange as feições internas das voçorocas (OLTMANN et al., 2012; VERDONK, 2015; LIU et al., 2016; GUTIÉRREZ et al., 2018; HOSSEINALIZADEH et al., 2019).

Dentre as ferramentas de apoio a tomada de decisão incorporadas dentro dos SIG's, têm-se os *Multi Criteria Evaluation* (MCE)⁷, que permitem comparar diferentes cenários segundo alguns critérios. Para a *United States Geological Survey* (USGS, 2012), os métodos MCE agregam um valor substancial a informação, pois não só permitem a abordagem de problemas complexos, como também dão a esse processo clareza e transparência, auxiliando os usuários a definirem melhor o objetivo e revisar sistematicamente suas decisões.

Na década de 1970, começaram a surgir os primeiros métodos voltados para problemas discretos de decisão, no ambiente multicritério ou multiobjetivo, ou seja, métodos que utilizam uma abordagem diferenciada para essa classe visando a representação multidimensional dos problemas, mas também incorporando uma série de características bem definidas quanto a sua metodologia (GOMES et al., 2009). Conforme Zeleny (1982) e Eastman (1997) na análise multicritério se trabalha com a estratégia de decisão, que combina critérios úteis com o objetivo de proceder a uma determinada avaliação a fim de escolher entre as possíveis alternativas. O procedimento e a forma para a escolha dos critérios, além da metodologia para combiná-los são denominadas regras de decisão, que são os algoritmos para combinar graus de adequabilidade de múltiplos critérios para determinado objetivo.

Uma das grandes dificuldades encontradas em um processo de decisão que envolve múltiplos critérios é a forma como se deve quantificar a importância relativa entre cada um deles. Assim, faz-se necessário definir um grau de importância relativa de cada critério no processo de decisão, o que é feito atribuindo-se pesos a cada um deles. A correta atribuição dos pesos é essencial para que sejam mantidas as preferências do decisor. Importante salientar ainda, que metodologias de apoio a decisão multicritério não substituem a função do decisor, mais auxiliam na escolha da

⁷ Método de avaliação de multicritérios.

melhor ou mais adequada decisão, a partir do cenário apurado e das prioridades definidas, considerando também as alternativas conhecidas e os resultados esperados (ZELENY, 1982; EASTMAN, 1997; COSTA, 2009).

Na visão de Zuquette e Gandolfi (2004), a avaliação multicritério é uma metodologia que permite a análise de um grande número de atributos e os intervalos de valores. No âmbito da cartografia, esse método tem como base a seleção, a hierarquização do atributo e a forma de uso e ocupação como objetos de análise.

Duas escolas de pensamento se destacam entre as metodologias de apoio a decisão multicritério, sendo elas a Escola Americana e a Escola Francesa. Os dois principais métodos da Escola Americana são a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) e o AHP. Já na Escola Francesa, os mais utilizados são os métodos ELECTRE e o PROMETHEE (GOMES et al., 2009). Para esse trabalho será utilizado o método de AHP proveniente da Escola Americana.

O Processo Analítico Hierárquico⁸ tem origem em 1971, quando Thomas L. Saaty trabalhava no Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Seu desenvolvimento ocorreu no ano de 1972, em um estudo para a Fundação Nacional de Ciência dos Estados Unidos sobre o racionamento de energia para indústrias. Nesse mesmo ano, Saaty também criou a escala que relaciona as opiniões aos números. Esse método chegou a sua maturidade aplicativa com o Estudo de Transportes do Sudão em 1973 e houve um grande enriquecimento teórico entre 1974 e 1978 (JORDÃO E PEREIRA, 2006).

O AHP é um método apropriado para tratar problemas com uma definição ou formulação menos clara. Já não existe mais a função-objetivo e as restrições, mais sim um objetivo a ser alcançado, com a seleção de vários critérios que permitem o atingimento do objetivo. Ele emprega uma abordagem hierárquica para estabelecer os critérios e identificar as alternativas, pois usa um procedimento de comparação par a par para comparar as alternativas para critério, ou seja, efetuado por meio de avaliações em uma escala semântica de cinco níveis, apresentada de forma explícita tendo nove níveis no total, pois se há hesitação do decisor, valores intermediários são considerados entre os cinco níveis. Esses critérios também são comparados entre si e o método utiliza as escalas de razão para todas as avaliações. Assim, o método

⁸ Análise Hierárquica Ponderada.

introduz a possibilidade de avaliar inconsistências no julgamento do valor pelo decisor (COLIN, 2007).

O AHP auxilia a tomada de decisão, baseando-se em critérios qualitativos e quantitativos, tendo como intuito analisar o julgamento de especialista no processo de decisão, dividindo problemas complexos em problemas mais simples (SAATY, 1991). Assim, tem como ideia central realizar o estudo de sistemas por meio de uma sequência de comparações, aos pares, dos condicionantes (elementos) que têm influência no sistema considerado. O AHP divide o problema geral em avaliações de menor importância, enquanto mantém, ao mesmo tempo, a participação desses problemas menores na decisão global, ou seja, ao encarar um problema complexo, é mais fácil dividi-lo em outros menores, pois quando solucionados integralmente e depois integrados, representam a decisão do problema inicial buscada.

Para a elaboração da hierarquia, Saaty (1991, 2001) apresenta algumas sugestões: a) Identificar o problema geral; b) Definir os objetivos específicos da proposta geral; c) Identificar os critérios que devem ser satisfeitos; d) Identificar os subcritérios abaixo de cada critério, que podem ser especificados em termos de faixas de valores de parâmetros ou em termos de intensidades como alta, média e baixa; e) Identificar os atores, seus objetivos e suas políticas; f) Investigar opções de resultados; g) Para decisões sim-não, tomar o resultado mais preferível e comparar os benefícios e custos para tomar a decisão correta; h) Realizar uma análise de custo-benefício usando valores marginais.

Uma das principais fases da solução de um problema é o seu entendimento e a sua estruturação e dessa forma, o método AHP divide o problema em níveis hierárquicos onde o topo representa o objetivo principal. Autores como Marins et al (2009) e Gomes et al (2009) reforçam que é nessa etapa que o problema é entendido e estruturado em níveis hierárquicos, possibilitando que o decisor tenha uma visão geral do sistema com todos os seus componentes e interações.

Conforme Colin (2007) a metodologia do AHP é dividida em quatro partes:

- a) Representação da hierarquia: corresponde ao desenvolvimento da hierarquia de decisão associada aos vários níveis de elementos inter-relacionados;
- b) Comparação de pares: avaliação de preferências com relação a cada elemento de decisão em um dado nível hierarquia;

c) Método do autovetor: utilizado para estimar os pesos relativos dos elementos de decisão em um dado nível e avaliar a consistência das preferências estabelecidas nas comparações de pares;

d) Agregação das prioridades: para avaliar e realizar as considerações referentes ao objetivo propostos.

Sendo assim, pode-se salientar que a construção dessa hierarquia requer experiência e conhecimento do tema técnico-científico referente ao problema. Dois tomadores de decisão podem normalmente estruturar duas diferentes hierarquias de um mesmo problema e assim, uma hierarquia não será única. Por outro lado, mesmo quando duas pessoas constroem a mesma hierarquia, suas preferências podem produzir diferentes trajetórias. Entretanto, um grupo de pessoas pode trabalhar em conjunto para atingir um consenso em ambas as hierarquias e nos julgamentos de suas sínteses. Em razão disso, para esse estudo, definiu-se que essa metodologia seria a mais adequada para entender como cada fator condicionante está associado a suscetibilidade erosiva da BHRI.

3 CAMINHO METODOLÓGICO

No decorrer desse capítulo são apresentados os materiais utilizados e os procedimentos metodológicos adotados na construção dessa pesquisa, procurando atender ao objetivo geral e aos objetivos específicos propostos para esse trabalho.

Enquanto concepção teórica, a metodologia adotada para essa pesquisa, empregou o método dedutivo⁹ de investigação, que se utiliza de uma cadeia de raciocínio descendente, que parte do objetivo até a conclusão, indo assim, ao encontro da proposta metodológica adotada por Saaty (1991). Os procedimentos técnicos e operacionais estão resumidos no fluxograma da Figura 5.

3.1 ETAPA DE GABINETE

Essa etapa teve início a partir do levantamento de materiais cartográficos disponíveis para a área de estudo, além de bibliografias que serviram de aporte para a construção da revisão bibliográfica da tese, abordando as considerações teóricas sobre os processos erosivos, as erosões lineares com ênfase em ravinas e voçorocas, fatores condicionantes da erosão linear e geotecnologias com a utilização de múltiplos critérios para o estudo da suscetibilidade erosiva.

Sobre a escolha dos fatores condicionantes para o estudo da suscetibilidade erosiva da BHRI, realizou-se uma pesquisa em artigos publicados no período entre 2005 e 2020 em revistas nacionais com qualis CAPES A1, A2, B1 e B2 que justificaram o porquê da escolha de tais fatores, além de auxiliaram na opção de utilizar o AHP para esse estudo.

Posteriormente, iniciou-se a organização do banco de dados dessa pesquisa, no qual foram utilizados os seguintes materiais:

a) Banco de Dados da Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA, 2015): essa base serviu para definir o limite natural da BHRI.

b) Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul: desenvolvida por Hasenack e Weber (2010) na escala 1:50.000, essa base foi utilizada para extrair a rede hidrográfica e o sistema viário da área de estudo.

⁹ Cabe salientar que a proposta metodológica desenvolvida por Saaty em alguns momentos faz uma certa “mistura” de método. Entretanto, no entendimento da autora e na aplicabilidade para essa pesquisa, optou-se por definir o método dedutivo de investigação.

c) Malha Digital do IBGE (2015): também na escala 1:50.000, essa base auxiliou na demarcação dos limites dos municípios que integram a BHRI.

d) Imagens de *Radio Detection and Ranging* (RADAR) da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM): com resolução de 3 *arc-second* (90 metros)¹⁰ e adquiridas junto ao USGS na *web site* - <https://earthexplorer.usgs.gov/> - foram utilizadas na elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia.

e) Imagens do Serviço *Basemap World Imagery*: encontradas no *software* ArcGIS® e disponibilizadas pela *Digital Globe, WorldView-2 Satellite Images* desde julho/2017 e com resolução espacial de 50 cm, foram utilizadas para ajustes na base de dados da bacia e auxiliar na localização das feições erosivas da área de estudo.

f) Mapa Geológico do Rio Grande do Sul: elaborado por Wildner et al (2006) na escala 1:750.000, esse mapeamento serviu para a identificação dos litótipos aflorantes na BHRI.

g) Base de Solos do Brasil: desenvolvido pelo IBGE (2013) em escala 1:250.000, auxiliou na identificação dos tipos de solos predominantes na bacia.

h) Mapeamento Anual de Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomas Coleção 5 - 2019): desenvolvido pelo Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima (SEEG/OC) com escala de 1:250.000, esse mapeamento foi utilizado para a identificação do uso e ocupação da BHRI.

i) ArcGIS® 10.7: *software* utilizado para a elaboração do banco de dados georreferenciado, elaboração mapas temáticos e a interpolação dos mesmos para a interpretação do resultado final.

j) GPS *Garmin Etrex* e GPS *Ruide R90*: sistemas de posicionamento utilizados para a localização dos pontos de controle obtidos durante os trabalhos de campo.

A elaboração de mapas temáticos correspondeu ao primeiro passo para a estruturação de um banco de dados georreferenciado. Na interface do usuário do *software* ArcGIS® 10.7 foi criado *um New File Geodatabase*¹¹, onde foi definido como sistema de referência, o Sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), com *Datum* do Sistema de referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000). É necessário salientar que em face da grande extensão territorial da BHRI, que abrange

¹⁰ Para a elaboração do Modelo Digital de Elevação da área de estudo realizou-se um teste com as imagens SRTM de 30 metros e 90 metros, onde concluiu-se que as imagens de 90 metros apresentavam resultados mais satisfatórios. Dessa forma, optou-se por essas imagens para a elaboração do MDE da BHRI.

¹¹ Novo banco de dados.

dois fusos (21 e 22 Sul), houve a necessidade de criar um fuso intermediário¹² de modo que não ocorresse “conflitos” na geração dos mapas temáticos da área de estudo.

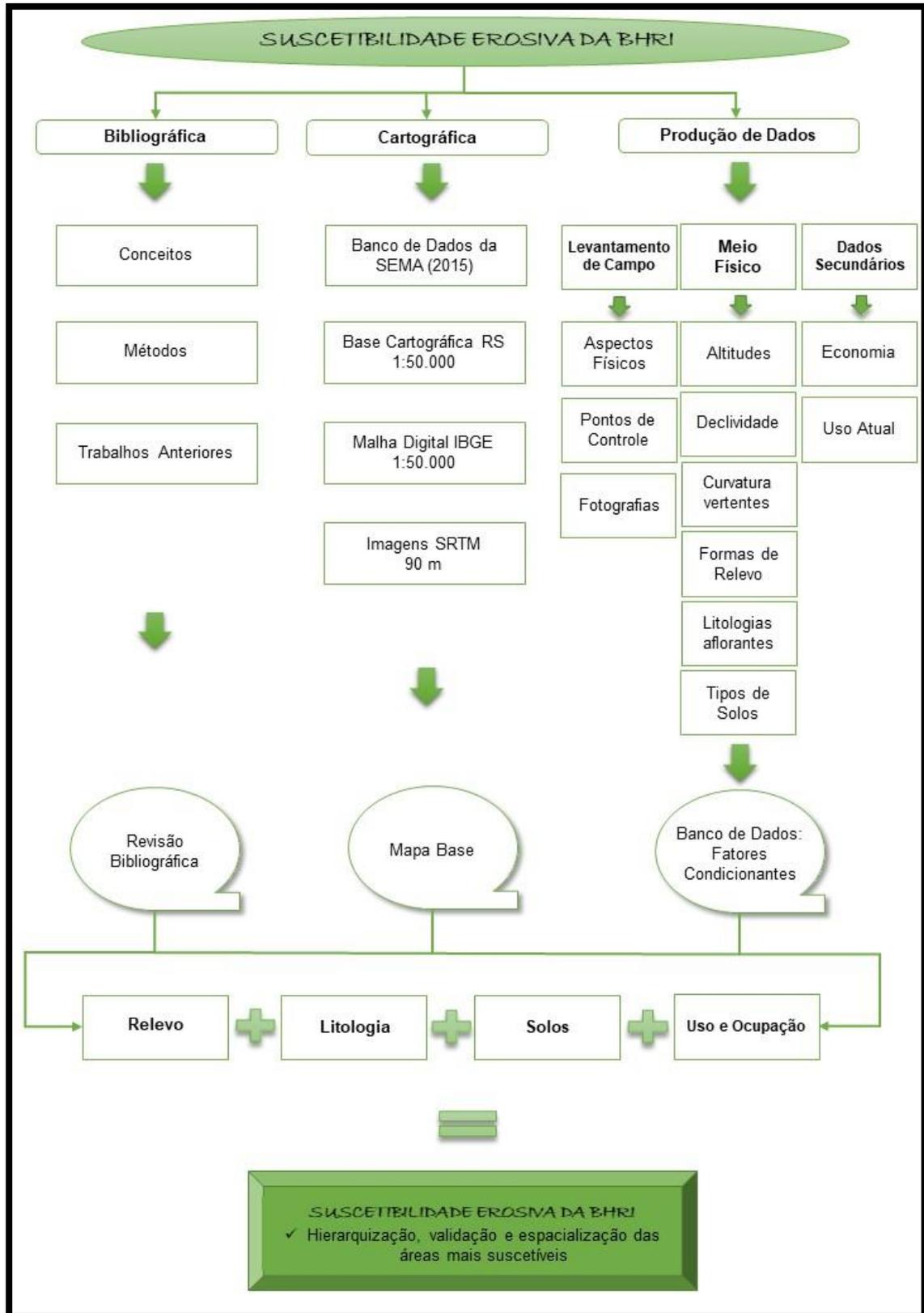
3.2 ESTRUTURAÇÃO DO AHP

Para Saaty (1991) o objetivo central da teoria AHP é a redução do estudo de sistemas a uma sequência de comparação entre pares, onde a principal utilidade desse método é tomada de decisões, resultando na minimização de falhas. Conforme salienta o autor, essa teoria reflete o método natural de funcionamento da mente humana, ou seja, diante de um grande número de elemento (controláveis ou não), a mente os agrega em grupos segundo propriedades comuns.

Diante disso, pode-se destacar que o AHP consiste em uma metodologia de suporte a tomada de decisão, baseada na comparação pareada das variáveis e seus atributos em função de escalas prioritárias, tendo como característica a capacidade de mensurar a consistência dos julgamentos. O problema é dividido em níveis hierárquicos (Figura 6), onde no topo encontra-se o objetivo principal. Assim, possibilita ao decisor ter uma visão geral do sistema com todos seus componentes e interações (SAATY, 1991, 2001, 2008; MARINS et al., 2009).

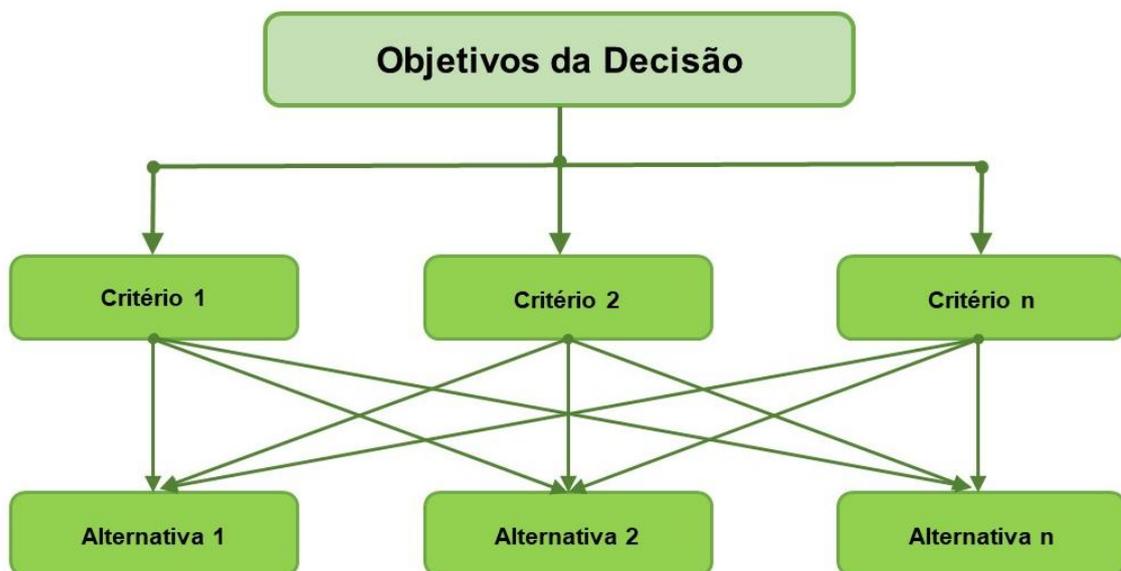
¹² Para a criação do fuso intermediário, utilizou-se como base o meridiano central -54° e assim definiu-se o fuso SIRGAS 2000 UTM 21,5 S para a área de estudo.

Figura 5 - Representação dos procedimentos metodológicos adotados na pesquisa.



Com estrutura semelhante a uma árvore, no topo tem-se o objetivo, com fatores mais específicos e, os mais extremos, são os fatores ou critérios de avaliação. Quanto mais genéricos os atributos, mais altos eles estarão na hierarquia. Assim, as alternativas correspondem a base da estrutura, logo após o último nível de atributos. Essa configuração permite ao decisor identificar cada parte e todo o complexo do problema, para assim obter as prioridades através de uma comparação par a par baseada nos dados obtidos pelo usuário. Por meio da comparação aos pares, em cada nível de hierarquia, os participantes atribuem pesos relativos aos condicionantes para diferenciar a importância relativa de cada elemento (GANDZOL, 2005; BESTEIRO et al., 2009).

Figura 6 - Modelo hierárquico do AHP.



Fonte: Modificado de Saaty (1991), Marins et al (2009) e Gomes et al (2009).

Dessa forma, durante o julgamento, compara-se cada elemento da linha com cada um da coluna e registra-se o valor do julgamento na matriz da posição linha e coluna referente aos elementos comparados. Como exemplo, a Tabela 1 mostra, de forma resumida, a matriz de julgamento das n alternativas (a_1, a_2, \dots, a_n) à luz do critério C_1 , onde x_{ij} representa as entradas de julgamento variando i e j de 1 a n . Na comparação entre os dois elementos, deve-se levar em consideração qual é o mais importante e qual a intensidade dessa importância.

Tabela 1 - Matriz de julgamento.

C₁	a₁	a₂	...	a_n
a₁	1	X ₁₂	...	X _{1n}
a₂	1/X ₁₂	1	...	X _{2n}
...
a_n	1/X _{n1}	1/X _{n2}	...	1

Fonte: Modificado de Saaty (1991).

No raciocínio de Saaty (1991), a matriz de comparação gera relações recíprocas. Assim, para cada julgamento registrado na posição de linha i e coluna j , representado por x_{ij} , há um valor igual a $1/x_{ij}$ na posição recíproca, isto é, na posição de linha j e coluna i . Considerando as posições de elementos de linha e coluna i e j , respectivamente, variando de 1 a n , os elementos x_{ij} obedecem às seguintes regras:

Regra 1: Se $x_{ij} = \alpha$, então $x_{ji} = 1/\alpha$, $\alpha \neq 0$, onde α é o valor numérico do julgamento baseado na escala de Saaty (op cit.). Logo, conclui-se que $x_{ji} = 1/x_{ij}$.

Regra 2: Se a_i é julgado de igual importância relativa a a_j , então $x_{ij} = 1$ e $x_{ji} = 1$ e, em particular, $x_{ij}=1$, $\forall i=j$.

O julgamento deve ser baseado na “Escala de Saaty”, buscando no primeiro momento, o julgamento conceitual e, posteriormente, a conversão para a escala numérica a fim de registrá-lo na matriz, como também, o julgamento recíproco associado (Quadro 1). Assim, é necessária a realização de $n(n-1)/2$ comparações pelo decisor, sendo n o número de elementos comparados.

Quadro 1 - Comparações do AHP.

ESCALA	AVALIAÇÃO	RECÍPROCO	EXPLICAÇÃO
Igual importância	1	1	Os dois critérios contribuem igualmente para os objetivos.
Importância moderada	3	1/3	A experiência e o julgamento favorecem um critério levemente sobre o outro.
Mais importante	5	1/5	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente em relação a outro.
Muito importante	7	1/7	Um critério é fortemente favorecido em relação a outro e pode ser demonstrado na prática.
Extremamente importante	9	1/9	Um critério é favorecido em relação a outro com o mais alto grau de certeza.
Valores intermediários	2, 4, 6, 8		Quando se procura condições de compromisso entre duas definições. Nessa ponderação é necessário um acordo.

Fonte: Modificado de Saaty (1991).

Conforme Gomes et al (2009), a escala mostrada acima varia de 1 a 9, onde 1 significa a indiferença de importância de um critério em relação a outro e 9 representa a extrema importância de um critério sobre outro, com estágios intermediários de importância - 3, 5, 7 - entre esses níveis. Além disso, têm-se os valores 2, 4, 6, 8, que representam valores intermediários entre os adjacentes.

Desconsiderando as comparações entre os próprios critérios que representam 1 na escala, apenas metade das comparações precisa ser feita, pois a outra metade constitui-se em valores recíprocos na matriz de comparação. Essa matriz é expressa por meio da construção em conformidade com a importância de um critério (linha) frente a outro critério (coluna). Caso o fator linha seja mais importante que seu respectivo fator coluna na matriz simétrica, avalia-se o peso com valores de 1 a 9 (1 = igual importância; 9 = extremamente importante). Por outro lado, se o fator linha for menos importante que seu respectivo fator coluna o peso é considerado com valores abaixo de 1 até 1/9 (1 = igual importância; 1/9 = extremamente menos importante). Os resultados obtidos com os julgamentos, por meio da comparação paritária, são colocados em uma matriz quadrada $n \times n$. Esse procedimento se repete para todos os elementos (SAATY, 1991; GOMES et al., 2009).

A próxima fase consiste em calcular as prioridades locais e globais, que tem como princípio determinar a contribuição relativa de cada elemento da estrutura hierárquica em relação ao objetivo imediato e ao principal. Resumidamente, Vargas (2010) explica que no primeiro momento, é realizado o cálculo das prioridades de cada elemento (nó) em relação ao seu elemento imediatamente superior, encontrando-se a prioridade média local do nó.

Posteriormente, calcula-se a prioridade global (em relação ao objetivo principal) do respectivo elemento, multiplicando sua prioridade média local pelas prioridades médias locais dos nós hierarquicamente superiores. De acordo com Saaty (1991), as prioridades médias locais dos elementos comparados na matriz de julgamento podem ser obtidas por meio de operações matriciais, calculando-se o principal autovetor da matriz e normalizando-o em seguida.

Entretanto, o referido autor apresenta outros procedimentos mais simples para gerar o vetor de prioridades com valores aproximados. Um desses procedimentos foi utilizado por Vargas (2010) e foi adotado no presente trabalho: a) calcula-se o somatório dos julgamentos registrados em cada coluna da matriz de julgamentos; b) cria-se uma nova matriz normalizada, onde cada elemento é inicializado pelo elemento da matriz original dividido pelo total de sua respectiva coluna; c) calcula-se a prioridade por meio da média aritmética dos elementos de cada linha de matriz normalizada.

O resultado obtido em cada linha corresponde ao total percentual relativo de prioridades ou preferências em relação ao objetivo imediato. O vetor de prioridades resultante é chamado de autovetor da matriz e o somatório de seus elementos é igual a 1. Após o cálculo das prioridades locais em relação a cada nó imediatamente superior, é realizado o cálculo da consistência de tais julgamentos.

Ao se considerar as dificuldades intrínsecas do ser humano em tomar decisões diante de problemas com muitas informações e múltiplos critérios, Saaty (1991) propôs um procedimento para calcular inconsistências derivadas do julgamento de valor entre elementos comparados em um elemento complexo de decisão. Para o autor, é admitido uma tolerância de 10% para as inconsistências. Diante disso, os passos para a consistência dos julgamentos são resumidos a seguir:

No primeiro passo, calcula-se o maior autovetor da matriz de julgamento (λ_{Max}) por meio do somatório do produto de cada total da coluna j da matriz original de julgamentos por cada elemento na posição j do vetor de prioridades, considerando $j a$

coluna da matriz de julgamento que varia de 1 a n . Analisando a matriz de julgamento, o vetor de prioridades e a ordem (n) da matriz, o cálculo do autovetor é representado pela seguinte fórmula.

$$\lambda_{Max} \sum_{j=1}^n T_{jx} P_j$$

onde:

T_j = somatório da coluna j da matriz de julgamento

P_j = prioridade calculada para o critério localizado na linha j

No segundo passo, é o calculado o índice de consistência, ou também conhecido por *Consistency Index* (CI).

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1}$$

Já no terceiro passo, é calculado a razão de consistência, também denominada de *Consistency Ratio* (CR).

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

onde:

RI = índice randômico.

De acordo com Saaty (1991), o índice randômico ou *Random Index* (RI) significa o índice de consistência de uma matriz recíproca gerada, randomicamente, pelo laboratório Oak Ridge¹³. A Tabela 2 mostra os índices randômicos calculados pelo laboratório para matrizes recíprocas quadradas de ordem n .

¹³ Laboratório nacional de ciência e tecnologia patrocinado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.

Tabela 2 - Valores de IR em função da ordem da matriz quadrada.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fonte: Saaty (1991).

Por fim, para a validação do método AHP é necessário determinar a razão de consistência (RC), que representa a mensuração da consistência dos julgamentos e é representado pela fórmula a seguir.

$$RC = \frac{IC}{RI}$$

Para a aceitação da matriz, a RC deve ser menor que 0,1 (ou 10%), significando que quando os valores encontrados forem menores que o mínimo, considera-se que os resultados obtidos estão consistentes e adequados na comparação de pares. Caso contrário, ou seja, se o valor de RC for superior a 0,1 indica inconsistências, sendo necessário refazer uma revisão dos julgamentos par a par.

Para um melhor entendimento e visualização da metodologia, Chan et al (2004) resume os passos recomendados para a aplicação do AHP:

a) Definir o problema e o que se procura saber. Expor as suposições refletidas na definição do problema, identificar as partes envolvidas, checar como ela definem o problema e quais as suas formas de participação no AHP.

b) Decompor o problema desestruturado em hierarquias sistemáticas, ou seja, do topo (objetivo geral) para o último nível (fatores mais específicos, usualmente as alternativas). Caminhando do topo para a extremidade, a estrutura do AHP contém objetivos, critérios e classificação de alternativas. Cada nó é dividido em níveis apropriados de detalhes. Quanto mais critérios, menos importante cada critério individual se torna e a compensação é feita pela atribuição de pesos para cada um desses critérios. É imprescindível certificar-se de que os níveis estejam consistentes internamente, completos e, que as relações entre eles estejam claras.

c) Construir uma matriz de comparação paritária entre os elementos de nível inferior e os do nível imediatamente acima. Em hierarquias simples, cada elemento de nível inferior afeta todos os elementos do nível superior. Em outras hierarquias,

elementos de nível inferior afetam somente alguns elementos do nível superior, requerendo a construção de matrizes únicas.

d) Fazer os julgamentos para completar as matrizes. Para isso, são necessários $n(n-1)/2$ julgamentos para uma matriz $n \times n$, sendo “ n ” o número de linhas e colunas. O analista ou grupo participante julga se “A” domina o elemento “B”, se afirmativo, insere o número que representa o grau de domínio, conforme valores da escala de comparação, na célula da linha de “A” com a coluna de “B”. A posição coluna “A” com linha “B” terá o valor recíproco. Assim, prossegue-se o preenchimento da matriz.

e) Calcular o IC e a RC e se as condições fixadas no AHP não forem atendidas, é necessário refazer os julgamentos. O IC mede a coerência dos julgamentos, sendo que quanto mais próximo estiver de zero, mais será a consistência global da matriz de comparação. Já a RC indica a confiabilidade do julgamento dos especialistas.

f) Analisar as matrizes com o resultado das prioridades locais e globais. Utiliza-se o vetor de prioridades obtidas pela técnica AHP para priorizar as alternativas. O vetor de prioridades auxilia o gestor de risco a selecionar a melhor opção.

3.2.1 Hierarquização do Relevô

O estudo do relevo da BHRI levou em consideração as altitudes da área, as declividades e a forma das encostas através da curvatura das vertentes. O mapa final do relevo é resultante da hierarquização desses elementos.

a) Hipsometria

O estudo topográfico da BHRI foi realizado a partir de uma análise prévia do MDE, seguindo as “quebras naturais do relevo”¹⁴ e que permitiu a definição de quatro classes hipsométricas para a área de estudo: <100 metros, 100 a 200 metros, 200 a 300 metros, >300 metros.

Assim, para a elaboração do mapa hipsométrico foi utilizado como MDE as imagens de RADAR SRTM com resolução espacial de 3 *arc-second* (90 metros), que passaram pelo processo de preenchimento e correção dos pixels nulos, a partir da utilização da ferramenta “*Fill*”, disponível no módulo “*Spatial Analyst*” do ArcGIS. Após

¹⁴ Método de *Natural Jenks*.

a correção da base cartográfica, foi realizada a classificação por meio da utilização da ferramenta “*Reclassify*”, seguindo as classes hipsométricas definidas anteriormente. Posteriormente, houve o processo de hierarquização das altitudes definidas na BHRI (Tabela 3).

Tabela 3 - Hierarquização das altitudes da BHRI.

	A	B	C	D	Soma	Autovetor	Matriz
A	1	0,33	0,14	0,11	1,59	0,044749	4
B	3	1	0,33	0,20	4,53	0,127799	
C	7	3	1	0,33	11,33	0,319639	
D	9	5	3	1	18,00	0,507812	
					35,45	1	

	Produto vetorial	λ	λ médio	IC	IR	RC
A	0,188871	4,220654	4,103113	0,034371	0,9	0,03819
B	0,469091	3,670523				
C	1,18386	3,703736				
D	2,50847	4,939762				

Legenda: (A) Altitudes <100 metros; (B) Altitudes entre 100 e 200 metros; (C) Altitudes entre 200 e 300 metros; (D) Altitudes >300 metros.

Fonte: Elaborado pela autora (2021) com base na proposta de Saaty (1991).

Após a hierarquização e a confirmação da consistência das informações (RC < 0,1), os autovetores referentes a hipsometria da BHRI foram importados para o *software* ArcGIS, que através da utilização da ferramenta “*Raster Calculator*” deu origem ao mapa ponderado da hipsometria. A fórmula para a elaboração do produto referente a hipsometria é apresentada a seguir:

$$\text{Float}(\text{Con}(\text{"RecHippo.tif"}==1,0.044749, \text{Con}(\text{"RecHippo.tif"}==2,0.127799, \text{Con}(\text{"RecHippo.tif"}==3,0.319639, \text{Con}(\text{"RecHippo.tif"}==4,0.507812))))))$$

A partir dessa fórmula, realiza-se uma multiplicação de cada classe hipsométrica pelo seu autovetor correspondente. Importante lembrar ainda, que para o desmembramento dessa multiplicação o arquivo de entrada deve estar no formato “tif”.

b) Declividade

Com o objetivo de avaliar a inclinação das vertentes, o estudo das declividades representa um importante parâmetro para entender como se vincula os processos de dinâmica superficial, como a deposição, erosão e os movimentos de massa. Sendo assim, para a BHRI foram definidas as quatro classes de declividade de forma que retratassem melhor o comportamento das vertentes: <2%, de 2% a 5%, de 5% a 15%, 15% a 45%, >45%. A escolha pelas classes segue a proposta de classificação estabelecida pelo IPT (1981) e Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA, 1999) e são caracterizadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização das classes de declividade.

Classe	Características
<2%	Áreas muito planas onde ocorre a presença dos processos de inundação e deposição de sedimentos fluviais.
2% - 5%	Áreas planas a levemente onduladas onde predominam os processos de deposição.
5% - 15%	Áreas onduladas onde os processos erosivos passam a ser mais significativos. O limite de 15% representa o fim do processo de mecanização agrícola.
15% - 45%	Áreas com relevo fortemente ondulado, propícias a ocorrência de movimentos de massa.
>45%	Predominância de áreas íngremes de regiões montanhosas, onde nenhum tipo de máquina agrícola pode trafegar e o escoamento superficial é muito rápido.

Fonte: Modificado do IPT (1981) e EMBRAPA (1999).

A elaboração do mapa de declividade ocorreu por meio da utilização da ferramenta “*Slope*”, disponível no módulo “*Spatial Analyst*” do ArcGIS e teve como base as imagens SRTM de 90 metros. Esse arquivo foi classificado com a utilização da ferramenta “*Reclassify*”, seguindo as classes de declividade definidas anteriormente. Posteriormente, houve o processo de hierarquização das classes de declividades definidas na BHRI (Tabela 5).

Tabela 5 - Hierarquização das declividades da BHRI.

	A	B	C	D	E	Soma	Autovetor	Matriz
A	1	0,33	0,11	0,140	0,20	1,781	0,031078	5
B	3	1	0,140	0,20	0,33	4,67	0,081485	
C	9	7	1	3	5	25,00	0,436216	
D	7	5	0,33	1	3	16,33	0,284936	
E	5	3	0,20	0,33	1	9,53	0,166285	
						57,31	1	

	Produto vetorial	λ	λ médio	IC	IR	RC
A	0,179585	5,778522	5,28288	0,07072	1,12	0,06314
B	0,34765	4,266431				
C	2,972547	6,8144				
D	1,552714	5,449343				
E	0,747402	4,494696				

Legenda: (A) >2%; (B) 2% a 5%; (C) 5% a 15%; (D) 15% a 45%; (E) >45%.

Fonte: Elaborado pela autora (2021) com base na proposta de Saaty (1991).

Após a hierarquização e a confirmação da consistência das informações, os autovetores referentes as declividades da BHRI foram importadas para o *software* ArcGIS, que através da utilização da ferramenta “*Raster Calculator*” deu origem ao mapa ponderado da declividade. A lógica para a elaboração desse produto é a mesma utilizada para a elaboração do mapa de hipsometria, onde é realizado a multiplicação de cada classe de declividade pelo seu autovetor correspondente.

c) Curvatura das Vertentes

Respondem como condicionantes aos fluxos de energia das encostas, que determinam a orientação, intensidade do escoamento e infiltração do fluxo. Assim, a análise das vertentes da BHRI foi realizada por meio do perfil e do plano de curvatura, que foram classificados a partir da utilização da ferramenta “*Curvature*” do módulo “*Spatial Analyst*” do ArcGIS. Como base cartográfica, utilizou-se o MDE oriundo das imagens SRTM de 90 metros, onde o produto final da operação corresponde a dois arquivos *raster*, sendo um referente ao perfil e outro ao plano de curvatura.

O perfil de curvatura foi analisado a partir de um histograma de frequência, onde foram definidos valores negativos para as vertentes convexas e valores positivos para as côncavas. As vertentes retilíneas não foram utilizadas, pois apresentam valor

de curvatura nulo no histograma e são incomuns na área de estudo. Por conseguinte, o plano de curvatura também foi classificado seguindo os mesmos critérios, onde foram definidos valores negativos para as vertentes convergentes e positivos para as divergentes. A classe planar também não foi considerada, pois assim como os perfis retilíneos, não são comuns na BH e apresentam valor de curvatura nulo.

Posteriormente, com a finalidade de combinar o perfil e o plano de curvatura, utilizou-se a ferramenta “*Combine*” e como entrada de dados, anexou-se os arquivos obtidos na classificação do perfil e do plano. Dessa forma, como resultado final, obteve-se quatro classes para as formas das vertentes: convexo-convergente, convexo-divergente, côncavo-convergente e côncavo-divergente, que foram hierarquizados e são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Hierarquização da curvatura das vertentes da BHRI.

	A	B	C	D	Soma	Autovetor	Matriz
A	1	7	3	9	20	0,509468	
B	0,14	1	0,20	3	4,34	0,110554	
C	0,33	5	1	7	13,33	0,339645	4
D	0,11	0,33	0,14	1	1,58	0,040333	
					39,26	1	

	Produto vetorial	λ	λ médio	IC	IR	RC
A	2,66528	5,2315				
B	0,370808	3,354071	4,200584	0,066861	0,9	0,07429
C	1,34457	3,95875				
D	0,180776	4,482105				

Legenda: (A) Côncavo-Convergente; (B) Côncavo-Divergente; (C) Convexo-Convergente; (D) Convexo-Divergente.

Fonte: Elaborado pela autora (2021) com base na proposta de Saaty (1991).

Após a hierarquização e consistência das informações, os autovetores referentes a curvatura das vertentes foram importados para o ArcGIS, que a partir da utilização da ferramenta “*Raster Calculator*” deu origem ao mapa ponderado da forma das vertentes. A lógica para a elaboração desse produto também a mesma utilizada para a elaboração dos mapas de hipsometria e declividade, onde é realizado a multiplicação de cada classe de curvatura pelo seu autovetor correspondente.

Por conseguinte, a combinação desses três parâmetros (hipsometria, declividade e curvatura) deu origem ao mapa de relevo da BHRI. Para isso, realizou uma nova ponderação desses atributos, que estão representados pela Tabela 7.

Tabela 7 - Hierarquização do relevo da BHRI.

	H	C	D	Soma	Autovetor	Matriz
Hipsometria	1	0,14	0,20	1,34	0,07	
Curvatura	7	1	3,00	11	0,59	3
Declividade	5	0,33	1	6,33	0,34	
				18,67	1	

	Produto vetorial	λ	λ médio	IC	IR	RC
H	0,2	3,09403				
C	2,1	3,579091	3,077439	0,03872	0,58	0,066758
D	0,9	2,631912				

Fonte: Elaborado pela autora (2021) com base na proposta de Saaty (1991).

Após a hierarquização e a confirmação da consistência das informações, os autovetores referentes a hipsometria, curvatura de vertentes e declividades da BHRI foram importados para o *software* ArcGIS, que através da utilização da ferramenta “*Raster Calculator*” deu origem ao mapa ponderado do relevo. A lógica para a elaboração desse produto é muito parecida com a utilizada para a elaboração dos mapas anteriores, porém, além da multiplicação de cada parâmetro pelo seu autovetor correspondente é realizado um somatório de cada plano de informações, dando origem assim ao mapa final do relevo da área de estudo. Importante lembrar ainda, que todos os arquivos devem estar em formato “tif”. A fórmula dessa ponderação é ilustrada a seguir:

$$\text{Float}(\text{Con}(\text{"RecHippo.tif"} == 1,0.07 + \text{Con}(\text{"RecDecliv.tif"} == 1,0.34 + \text{Con}(\text{"RecCurv.tif"} == 1,0.59))))$$

3.2.2 Hierarquização da Litologia

A análise do comportamento e distribuição das litologias na BHRI teve como base o “Mapeamento Geológico do Estado do Rio Grande do Sul” desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil com escala 1:750.000 (WILDNER et al., 2006), além do

auxílio de trabalhos desenvolvidos por Robaina et al (2015) que realizaram um zoneamento morfológico na BHRI relacionando com os processos superficiais e o uso do solo de Trentin et al (2015) que estudaram os litótipos aflorantes na bacia.

Após a coleta das informações, as litologias da área de estudo foram refinadas, detalhadas e agrupadas a partir dos resultados obtidos por meio da realização de trabalhos de campo na BHRI. Assim, foram identificadas as seguintes sequências geológicas na área de estudo: Rochas Cristalinas (formada pelas rochas do Grupo São Bento, Formações Acampamento Velho e Hilário, Complexo Anelar-Leões, Monzogranitos, Granito Campinas e Complexo Granulítico Santa Maria-Chico); Arenitos Conglomeráticos (com a presença das Formações Santa Tecla e Taciba); Arenitos Coesos (com as formações Guará e Botucatu); Lamitos (representados pelas rochas das Formações Santa Maria, Rio do Rasto, Irati, Rio Bonito e Palermo, além do Subgrupo Estrada Nova); Arenitos (composto pelas rochas das Formações Caturrita, Sanga do Cabral, Piramboia, Tupanciretã e também pelos Depósitos Aluvionares). Assim, as litologias da BHRI foram hierarquizadas e estão representadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Hierarquização do AHP para as litologias da BHRI.

	RC	AC	ACO	L	A	Soma	Autovetor	Matriz
RC	1	0,33333	0,33333	0,14285	0,11111	1,92063	0,03293	5
AC	3	1	0,33333	0,25	0,14285	4,72619	0,08103	
ACO	3	3	1	0,33333	0,14285	7,47619	0,12818	
L	7	4	3	1	0,2	15,2	0,26061	
A	9	7	7	5	1	29	0,49723	
						58,3230	1	

	Produto vetorial	λ	λ médio	IC	IR	RC
RC	0,19515	5,92603	5,39940	0,09985	1,12	0,089153
AC	0,358744	4,42703				
ACO	0,627989	4,89904				
L	1,299277	4,98538				
A	3,561242	7,16215				

Legenda: (RC) Rochas Cristalinas; (AC) Arenitos Conglomeráticos; (ACO) Arenitos Coesos; (L) Lamitos; (A) Arenitos.

Fonte: Elaborado pela autora (2021) com base na proposta de Saaty (1991).

Após a hierarquização e a confirmação da consistência das informações, os autovetores referentes as litologias da área de estudo foram importadas para o

software ArcGIS, que através da utilização da ferramenta “*Raster Calculator*” deu origem ao mapa ponderado da litologia da bacia. A lógica para a elaboração desse produto é a mesma utilizada para a elaboração dos mapas anteriores (exceto o mapa final do relevo), onde é realizado a multiplicação de cada classe da litologia pelo seu autovetor correspondente.

3.2.3 Hierarquização dos Solos

Em um primeiro momento, a análise dos solos da BHRI realizou-se tendo como base o “Mapeamento dos Solos do Brasil” desenvolvido pelo IBGE (2013) na escala 1:250.000, que foram refinadas e detalhadas a partir dos resultados obtidos com a realização dos trabalhos de campo. Assim, as classes de solos da área de estudo foram identificadas e agrupadas conforme o índice de o quanto eram ou não suscetíveis a erosão: Grupo 1 (Gleissolos, Planossolos e Vertissolos); Grupo 2 (Cambissolos e Neossolos); Grupo 3 (Chernossolos, Luvisolos e Plintossolos); Grupo 4 (Latosolos e Nitossolos); Grupo 5 (Argissolos). Posteriormente, ocorreu a hierarquização dos solos da área de estudo (Tabela 9).

Tabela 9 - Hierarquização dos solos da BHRI.

	A	B	C	D	E	Soma	Autovetor	Matriz
A	1	0,33333	0,2	0,11111	0,11111	1,75555	0,02777	5
B	3	1	0,33333	0,14285	0,11111	4,58730	0,07257	
C	5	3	1	0,33333	0,2	9,53333	0,15082	
D	9	7	3	1	0,33333	20,3333	0,32168	
E	9	9	5	3	1	27	0,42715	
						63,2095	1	

	Produto vetorial	λ	λ médio	IC	IR	RC
A	0,16533	5,95286	5,31432	0,07858	1,12	0,07016
B	0,29958	4,12802				
C	0,70006	4,64169				
D	1,67450	5,20546				
E	3,04942	7,13897				

Legenda: (A) Grupo 1 - Gleissolos, Planossolos e Vertissolos; (B) Grupo 2 - Cambissolos e Neossolos; (C) Grupo 3 - Chernossolos, Luvisolos e Plintossolos; (D) Grupo 4 - Nitossolos e Latossolos, (E) Grupo 5 - Argissolos.

Fonte: Elaborado pela autora (2021) com base na proposta de Saaty (1991).

Após a hierarquização e a consistência das informações, os autovetores dos solos foram importados para o *software* ArcGIS, que através da utilização da ferramenta “*Raster Calculator*” deu origem ao mapa ponderado dos solos predominantes na BHRI. A lógica para a elaboração desse produto também é a mesma empregada para a elaboração dos mapas anteriores, onde é realizado a multiplicação de cada classe de solo pelo seu autovetor correspondente.

3.2.4 Hierarquização do Uso e Ocupação

Para entender a configuração do uso e ocupação na área de estudo, utilizou-se o Mapeamento Anual de Uso e Cobertura da Terra no Brasil que foi desenvolvido pelo SEEG/OC no ano de 2019. A partir disso, identificou-se as seguintes classes de uso para a BHRI:

a) **Corpos d’água:** composta pela rede hidrográfica, reservatórios e pelos açudes e lagos da área de estudo.

b) **Área Urbana:** local onde se concentra grande parte da população dos municípios.

c) **Vegetação arbóreo-arbustiva/Florestas:** áreas de cobertura vegetal com características naturais, compostas principalmente pela mata ciliar e pela vegetação em áreas íngremes.

d) **Campos:** consistem nas áreas com cultivo de pastagens, onde ocorre a prática da pecuária extensiva, através da criação de bovinos. Além disso, ocorre a criação de ovinos, caprinos e equinos em menores proporções. Destaca-se ainda, que nessas áreas não ocorrem muitos cuidados com a vegetação, que vão desde gramíneas até arbustos e árvores de maior porte.

e) **Lavouras:** áreas agrícolas onde ocorre principalmente o cultivo do arroz e da soja. Nessas áreas também foram agrupados os solos expostos, que são locais com reduzida cobertura vegetal, identificadas em períodos de preparo do solo para o plantio.

f) **Silvicultura:** são aquelas áreas onde ocorreu a implantação de espécies exóticas, principalmente pinus e eucaliptos.

Após a definição das classes de uso e ocupação para a BHRI, deu-se início ao processo de hierarquização desses parâmetros, que se encontram detalhados e representados na Tabela 10.

Tabela 10 - Hierarquização do uso e ocupação da BHRI.

	U	F	S	C	L	Soma	Autovetor	Matriz
U	1	0,5	0,2	0,14285	0,11111	1,95396	0,04509	5
F	2	1	0,33333	0,16666	0,25	3,75	0,08653	
S	5	3	1	0,14285	0,2	5,70396	0,13163	
C	7	6	4	1	0,33333	18,3333	0,42307	
L	9	7	5	3	1	25	0,57692	
						43,3333	1	

	Produto vetorial	λ	λ médio	IC	IR	RC
U	0,23922	5,30540	5,39623	0,09905	1,12	0,08844
F	0,43534	5,03061				
S	0,79252	6,02087				
C	1,97677	4,67238				
L	3,51589	6,09422				

Legenda: (U) Urbano; (F) Florestas; (S) Silvicultura; (C) Campos; (L) Lavouras.

Fonte: Elaborado pela autora (2021) com base na proposta de Saaty (1991).

Após o processo de hierarquização e a verificação da consistência das informações, os autovetores do uso e ocupação foram importados para o *software* ArcGIS, que através da ferramenta "*Raster Calculator*" deu origem ao mapa ponderado da configuração do uso e ocupação da BHRI. A lógica para a elaboração desse produto também é a mesma empregada para a elaboração dos mapas anteriores, onde é realizado a multiplicação de cada classe pelo seu autovetor correspondente.

3.3 VALIDAÇÃO DAS INFORMAÇÕES

A partir do cruzamento automatizado das informações referentes aos fatores condicionantes, deu-se origem ao mapa da suscetibilidade erosiva da BHRI. Para a elaboração desse produto final, realizou-se uma hierarquização dos fatores condicionantes referentes ao relevo, solos, litologia e uso e ocupação (Tabela 11).

Tabela 11 - Hierarquização dos fatores condicionantes para a definição da suscetibilidade erosiva da BHRI.

	R	S	L	U	Soma	Autovetor	Matriz
R	1	3	5	6	15	0,49073	4
S	0,333333	1	3	5	9,333333	0,30534	
L	0,2	0,333333	1	3	4,533333	0,14831	
U	0,166667	0,2	0,333333	1	1,7	0,05556	
30,56667						1	
	Produto vetorial	λ	λ médio	IC	IR	RC	
R	2,482007	5,057778	4,18125	0,060417	0,9	0,06713	
S	1,19193	3,903571					
L	0,515085	3,473039					
U	0,24791	4,457516					

Legenda: (R) Relevo; (S) Solos; (L) Litologia; (U) Uso e Ocupação.

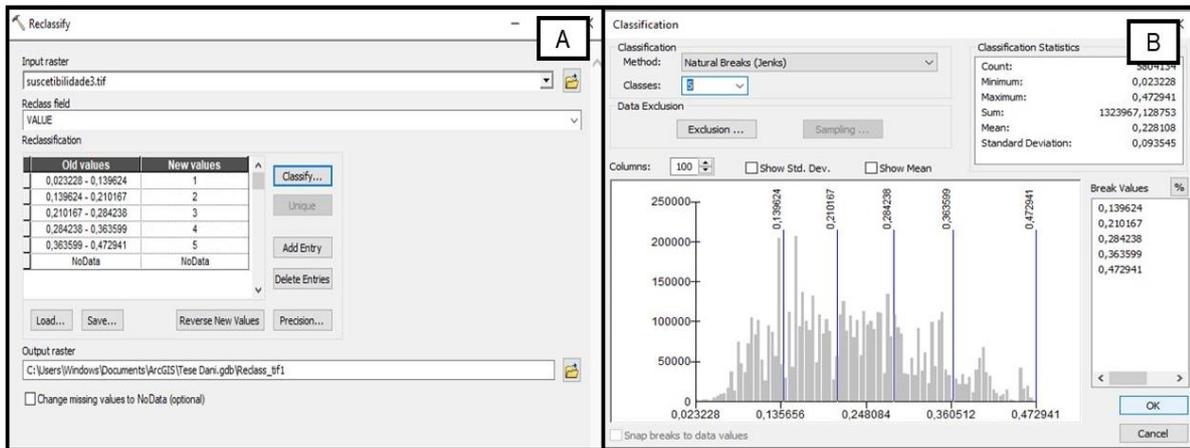
Fonte: Elaborado pela autora (2021) com base na proposta de Saaty (1991).

Após a hierarquização e a confirmação da consistência das informações, os autovetores referentes ao relevo, litologias, solos e uso e ocupação da área de estudo foram importados para o *software* ArcGIS, que a partir da utilização da ferramenta “*Raster Calculator*” deu origem ao mapa final da suscetibilidade erosiva da BHRI. A lógica para a elaboração desse produto é a mesma adotada para a elaboração do mapa final do relevo que multiplica cada parâmetro pelo seu autovetor correspondente e depois realiza um somatório de cada plano de informações, dando origem assim ao mapa final. Importante lembrar ainda, e conforme já salientado no decorrer da metodologia, todos os arquivos devem estar em formato “tif”. A fórmula dessa ponderação é ilustrada a seguir:

$$\text{Float}(\text{Con}(\text{"RecRel.tif"} == 1,0.490731 + \text{Con}(\text{"RecSol.tif"} = \\ = 1,0.305344 + \text{Con}(\text{"RecLito.tif"} == 1,0.14831 + \text{Con}(\text{"RecUso.tif"} = \\ = 1,0.55616))))))$$

Após a utilização do “*Raster Calculator*” para a elaboração do mapa de suscetibilidade, realizou-se uma nova classificação levando em consideração o “Natural Jenks” e que deu origem a cinco classes que deu origem a cinco classes de suscetibilidade erosiva: (1) Muito Baixa, (2) Baixa, (3) Média, (4) Alta e (5) Muito Alta, que estão explicadas na Figura 7.

Figura 7 - (A) Reclassificação da suscetibilidade erosiva da BHRI para a definição das classes finais; (B) Histograma de frequência da suscetibilidade, que utiliza o método de “*Natural Jenks*” para a elaboração do mapa final.



Fonte: Interface do usuário do *software* ArcGIS® 10.7.

Além disso, realizou-se um mapa das feições erosivas da área de estudo, que serviram para reforçar e validar as constatações levantadas durante a pesquisa. Dessa forma, as feições erosivas do tipo ravinas e voçorocas foram identificadas a partir do processo de vetorização manual, com a criação de *shapefiles* no formato “ponto”, no ambiente do *software* ArcGIS. Para isso, utilizou-se como referência as imagens de satélite oriundas do serviço *Basemap (World Imagery)*, disponibilizadas pela *DigitalGlobe, WorldView-2 Satellite Images*, com resolução espacial de 50 cm.

a) Cálculo da Razão de Frequência

A correlação entre as feições erosivas e as classes de suscetibilidade foram analisadas a partir da utilização de um método estatístico bivariado, baseado na razão aritmética entre o número de feições erosivas em cada classe de suscetibilidade pelo número total de feições e também a razão entre a área total de cada classe de suscetibilidade erosiva pela área total da bacia hidrográfica.

Sendo assim, valores com razão de frequência (Fr) maiores que 1 indicam uma correlação alta, enquanto que valores menores que 1 definem uma baixa correlação (ESPER ANGLIERI, 2013; GUADAGNIN, 2019). A razão de frequência é calculada da seguinte forma:

$$Fr = \frac{n}{nt} / \frac{Ac}{At}$$

onde:

n = número de feições erosivas em cada classe

nt = número total de feições

Ac = área de cada classe de suscetibilidade

At = área total da bacia hidrográfica

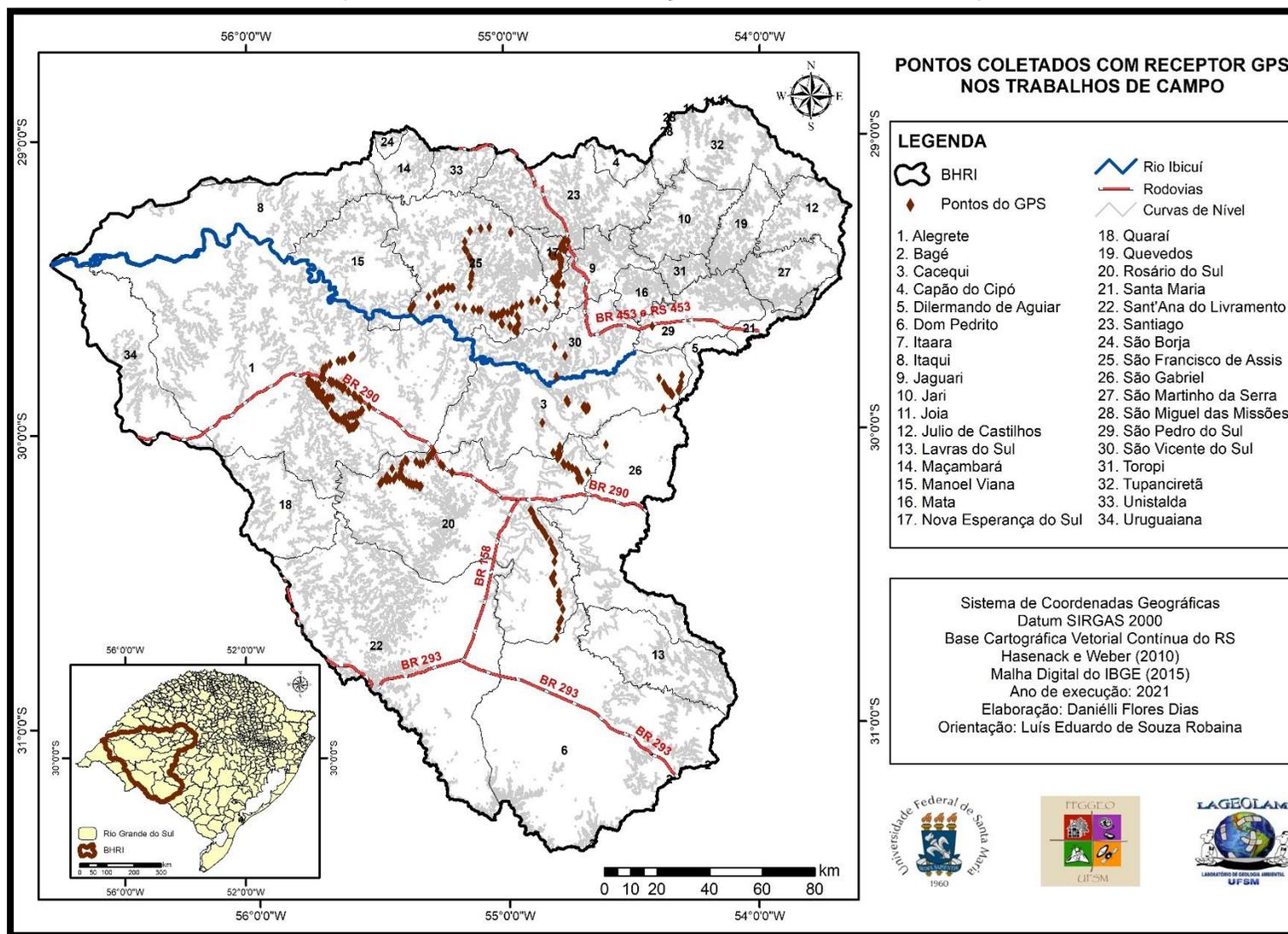
Posteriormente, esses valores foram convertidos em valores percentuais, com o objetivo de indicar em quais classes de suscetibilidade ocorriam com maior expressividade as feições erosivas lineares do tipo ravinas e voçorocas.

b) Trabalhos de Campo

Foram realizados nas áreas com maior indicação de ocorrência de processos com o intuito de observar e comprovar as informações levantadas nas imagens. Diante disso, os trabalhos de campo aconteceram de forma investigativa, tendo como objetivo identificar cinco aspectos na área de estudo: litótipos aflorantes, formas de relevo, solos predominantes, a configuração do uso do solo e entender como os processos erosivos se comportam em diferentes porções da bacia.

Durante o período de doutorado (2017-2021) foram realizados trabalhos de campo nos municípios de Alegrete, Cacequi, Capão do Cipó, Jaguari, Manoel Viana, Nova Esperança do Sul, Rosário do Sul, São Francisco de Assis, São Vicente do Sul e Unistalda, que serviram para que se fizesse um levantamento fotográfico e reconhecimento da área para uma melhor caracterização dos aspectos mencionados acima. Além disso, destaca-se a utilização de um receptor GPS para a coleta de pontos de controle obtidos durante os trabalhos de campo. Esses pontos encontram-se especializados na Figura 8.

Figura 8 - Pontos coletados com o receptor GPS durante a realização dos trabalhos de campo.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015) e elaborado pela autora (2021).

4 DEFINIÇÃO DOS FATORES CONDICIONANTES PARA O ESTUDO DA SUSCETIBILIDADE EROSIVA DA BHRI

Para justificar a escolha dos fatores condicionantes para o estudo da suscetibilidade erosiva da bacia hidrográfica do rio Ibicuí, realizou-se um levantamento e uma análise de 55 artigos publicados em revistas nacionais com qualis A1 a B2, entre os anos de 2005 e 2020, que tinham como objetivo o estudo da erosão sob diversas formas.

No Quadro 2 é apresentado os artigos que foram encontrados em revistas de Qualis A1. Nos quatro artigos analisados, concluiu-se que todos levaram em consideração relevo e solos, porém, o que difere foi a metodologia empregada por cada autor, levando sempre em consideração aquela que se adequa melhor a área de estudo.

No Quadro 3 encontram-se os artigos que foram identificados em revistas de Qualis A2. Nesse item, foram analisados 15 artigos, que abordaram sob diferentes metodologias o estudo da erosão, pois muitos caracterizam-na quanto a fragilidade, suscetibilidade e vulnerabilidade.

O Quadro 4 corresponde aos artigos encontrados em revistas de Qualis B1. Nesse tópico foram identificados 24 artigos que de alguma forma, tratam sobre os processos erosivos. Salienta-se ainda que a maioria dos artigos analisados estão classificados como Qualis B1. Nessa análise, percebeu-se a mistura de métodos empregados, além da diversidade de elementos que são analisados no estudo da erosão.

Por último, o Quadro 5 apresenta os 12 artigos de Qualis B2 encontrados durante a pesquisa. Assim como nos demais blocos de artigos, esses também possuem uma variação de elementos analisados, porém não tão diversa como dos artigos anteriores.

Importante salientar que durante a pesquisa, pode-se perceber a importância de cada fator condicionante, as metodologias empregadas e o porquê de cada autor fazer tal escolha. Isso serviu para reforçar a pesquisa e também para facilitar e justificar melhor a escolha dos fatores condicionantes e a metodologia que seria empregada. Diante disso, o Gráfico 5 apresenta uma compilação de todos os elementos analisados durante a pesquisa.

Quadro 2 - Artigos Qualis A1 analisados durante a pesquisa.

QUALIS A1					
Periódico	Ano	Título	Autores	Elementos analisados	Metodologia
Boletim Goiano de Geografia	2008	Compartimentação pedológica da bacia do rio dos Bois, municípios de Cezarina, Varjão, Guapó e Palmeiras de Goiás (GO), e sua relação com a suscetibilidade e risco à erosão laminar	Fernando Pereira dos Santos; Maximiliano Bayer; Thiago Morato de Carvalho	<p>Morfopedologia: hipsometria, declividade, solos, geomorfologia, geologia</p> <p>Erodibilidade: solos e declividade</p> <p>Suscetibilidade: erodibilidade e declividade</p> <p>Uso e ocupação do solo</p>	Salomão (1999)
	2009	Análise dos compartimentos morfopedológico como subsídio ao planejamento ao uso do solo em Jataí - GO	Potira Hermuche; Margaret Guimarães; Simões de Castro	<p>Morfopedologia: hipsometria, declividade, geologia, geomorfologia e solos</p> <p>Suscetibilidade: erodibilidade, declividade e solos</p> <p>Capacidade das Terras: suscetibilidade e capacidade de uso das terras</p>	Salomão (1999)
GeoUSP - Espaço e Tempo	2013	Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do rio Verde, região nordeste do estado de São Paulo, Brasil	Antonio Carlos Vitte; Juliano Pereira de Mello	Fragilidade Potencial: rede de drenagem, hierarquia fluvial, declividade, hipsometria, geologia, solos e uso.	-
	2013	Mapeamento da fragilidade ambiental no trecho de vazão reduzida do rio Araguari (MG) com técnicas de geoprocessamento	Silvio Carlos Rodrigues; Nilton César de Souza	Fragilidade: declividade, geologia, uso e cobertura vegetal	Ross (1994)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Quadro 3 - Artigos Qualis A2 analisados durante a pesquisa.

QUALIS A2					
Periódicos	Ano	Título	Autores	Elementos analisados	Metodologia
Ateliê Geográfico	2014	Mapeamento de áreas com risco potencial a erosão dos solos no município de Marialva - Paraná	Carlos Henrique da Graça; Hélio Silveira; Paulo Miguel de Bodas Terassi	Suscetibilidade: tipos de solos e suas propriedades (principalmente as físicas) + configuração do relevo (comprimento de rampa e declividade)	Embrapa (1998)
Caminhos de Geografia	2017	Susceptibilidade à erosão no Rio Gualaxo do Norte - MG	João Pedro dos Santos; Guilherme Eduardo Macedo Cota; Brenda Fernandes Limoeiro; Klinsmann Cortezzi Pedras; Adriana Monteiro da Costa; João Herbert Moreira Viana	Suscetibilidade: solos, litologia, uso e ocupação, declividade	AHP
	2018	Análise da suscetibilidade à erosão da bacia hidrográfica do Alto Camaquã (RS)	Henrique Noguez da Cunha; José Maria Filippini Alba; Adalberto Koiti Miura; Dejanira Luderitz Saldanha	Suscetibilidade física: álgebra da geologia, geomorfologia e pedologia	Crepani et al (2001)
Revista Brasileira de Cartografia	2011	Geoprocessamento na modelagem da vulnerabilidade natural à erosão no município de Morro do Chapéu - BA	Jocimara Souza Britto Lobão; Washington de Jesus Sant'Anna da Franca-Rocha; Ardemírio Barros da Silva	Vulnerabilidade: método IMP (geologia, solos, clima e vegetação); método AHP (declividade, hipsometria, feições topográficas).	IMP AHP
	2012	Elaboração da carta de suscetibilidade à erosão na escala 1:50.000 do município de Douradina - PR	Carina Petsch; Jéssica Barion Monteiro	Suscetibilidade: uso do solo, solo, geologia, declividade, formas de relevo e precipitação	Canil (2000) e Zuquette (1987, 1993)
	2016	Análise de vulnerabilidade natural à erosão como subsídio ao planejamento ambiental do oeste da bacia hidrográfica do Camaquã - RS	Manoela Sacchis Lopes; Dejanira Luderitz Saldanha	Vulnerabilidade: geologia, geomorfologia, solos e uso	Crepani et al (2001)
	2016	Vulnerabilidade ambiental e conflito no uso da terra no município de Mirassol D'oeste, Brasil	Jesâ Pereira Kreitlow; João dos Santos Vila da Silva; Sandra Mara Alves da Silva Neves; Laís Fernandes de Souza Neves	Vulnerabilidade: morfopedologia, erodibilidade, fator topográfico, uso e cobertura vegetal	Brasil (2007)

(continua)

(continuação)

	2019	Influência da forma das encostas na suscetibilidade à erosão na bacia hidrográfica do Rio Claro (Santa Rita do Passa Quatro, SP)	Thamiris Cristina Costa Basilio; Jaqueline Tomiê Fujimoto; Thiago Lopes; Gustavo Augusto Mendonça Asciutti; Reinaldo Lorandi; José Augusto de Lollo	Suscetibilidade: formas de relevo, declividade, substrato rochoso, uso e ocupação das terras, materiais inconsolidados	AHP
Revista da ANPEGE	2013	Influência das classes de declividades na construção do mapa de suscetibilidade à erosão laminar	Flávio Alves de Sousa	Suscetibilidade: erodibilidade e declividade	Salomão (1996)
	2014	Trajeto de menor custo ambiental no trecho leste do rodanel metropolitano de São Paulo	Carlos Roberto Libonati Machado; Alfredo Pereira Queiroz Filho	Fragilidade: geomorfologia (dissecação do relevo), solos, cobertura vegetal, uso da terra, clima (regime pluviométrico) Vulnerabilidade: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e clima	Ross (1994) Crepani et al (2001)
	2018	Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares das paisagens de parte dos municípios de Marabá Paulista (SP) e Presidente Epitácio (SP), Brasil	Melina Fushimi; João Osvaldo Rodrigues Nunes	Vulnerabilidade: relevo, declividade, solos, substrato rochoso, uso da terra, cobertura vegetal e curvatura da superfície	Câmara et al (1996)
Revista Brasileira de Geomorfologia	2015	Vulnerabilidade natural à erosão no sudoeste da Amazônia associada aos seus modos de ocupação - o caso do entorno da terra indígena URU EU WAU WAU	Alexis de Sousa Bastos; Vanderlei Maniesi; Fabiana Barbosa Gomes	Vulnerabilidade: geologia, geomorfologia (dissecação do relevo), pedologia (grau de desenvolvimento dos solos), vegetação (densidade), clima (pluviosidade e distribuição sazonal)	Câmara et al (1996, 2001)
Revista do Departamento de Geografia	2012	Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP	Eric Macedo Massa; Jurandy Luciano Saches Ross	Fragilidade: relevo, solo, uso/cobertura vegetal, regime pluviométrico	Ross (1994)
	2015	Mapeamento de fragilidade ambiental por meio de análise geoespacial: uma aplicação na alta bacia dos rios Piracicaba e	Danilo Trovó Garófalo; Marcos César Ferreira	Fragilidade: índice de vegetação (NDVI), probabilidade de ocorrência de chuvas intensas, declividade do	Fuzzy

(conclusão)

	Sapucaí-Mirim, APA Fernão Dias, MG		terreno, densidade de lineamentos estruturais e densidade de estradas
2015	Análise da vulnerabilidade natural à perda de solo de Barão de Cotegipe, RS	Franciele Marmentini Cassol; Wollmann; Delapasse	Francisca Rovani; Roberto Arthur Paulo
			Vulnerabilidade: geomorfologia, geologia, solos, vegetação e uso
			Crepani et al (1996)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Quadro 4 - Artigos Qualis B1 analisados durante a pesquisa.

QUALIS B1					
Periódicos	Ano	Título	Autores	Elementos analisados	Metodologia
Acta Geográfica	2013	Avaliação do potencial à erosão laminar da bacia do Ribeirão Sozinha (GO)	José Carlos de Souza; Claudia Valéria de Lima	Suscetibilidade: erodibilidade e declividade	-
	2016	Susceptibilidade à erosão das terras do alto curso do rio Banabuiú, no Sertão Central do Ceará, usando logica nebulosa	Léya Jéssyka Rodrigues Silva Cabral; Gustavo Souza Valladares; Renê Pedro de Aquino	Suscetibilidade: solos, geomorfologia, declividade e erosividade	Crepani et al (1996), Valladares et al (2002), Valladares e Faria (2004), Meirelles et al (2007).
	2020	Vulnerabilidades ambientais do bioma Cerrado: estudo da região norte goiano – Goiás	Matheus Bleza Santos; Karla Maria Silva Faria	Vulnerabilidade: suscetibilidade (declividade e solos) + potencialidade (classe de uso e ocupação junto com a proposta de Salomão)	Bertoni e Lombardi Neto (1985) Salomão (1999)
Caderno de Geografia	2017	Suscetibilidade erosiva em área suscetível à desertificação, no estado do Piauí: subsídios ao planejamento ambiental	Francílio de Amorim dos Santos; Cláudia Maria Sabóia de Aquino	Suscetibilidade: litologia, declividade, erosividade, erodibilidade, índice de cobertura vegetal	Álgebra de mapas
	2018	Análise da capacidade e conflito de uso da terra na bacia hidrográfica do Córrego do Piraputanga – MT, Brasil	Alexander Webber Perlandim Ramos; Camila Calazans da Silva Luz; Sandra Mara Alves da Silva Neves; Larissa Espinosa de Freitas; Laís Fernandes de Souza Neves	Suscetibilidade: erodibilidade e fator topográfico	Salomão (1999) e Fornelos e Neves (2007)
Estudos Geográficos	2008	Análise de suscetibilidade à erosão laminar no município de Campos dos Goytacazes/RJ através de técnicas de geoprocessamento	Luziane Santos Ribeiro; Maria da Gloria Alves	Suscetibilidade: erodibilidade e declividade	Salomão (1999)
	2008	Confecção do mapa de densidade de drenagem	Paulo Sérgio de Rezende Nascimento; Reinaldo	Fragilidade: tipos de rocha, relevo, solo, declividade, vegetação e uso.	-

(continua)

(continuação)

	através de geotecnologias visando definir a vulnerabilidade aos processos erosivos na sub-bacia do Baixo Piracicaba (SP)	Antônio Petta; Gilberto José Garcia		
	2013	Geomática aplicada na caracterização da vulnerabilidade ambiental dos solos da cidade de Francisco Beltrão (PR)	Tayoná Cristina Gomes; Júlio Caetano Tomazoni; Elisete Guimarães; Juliane Mônica Ruthes	Vulnerabilidade: relevo, tipos de solo, textura e uso Ross (1994)
	2018	Avaliação do estado ambiental das unidades de paisagem de uma bacia hidrográfica do estado brasileiro de Mato Grosso.	Miriam Raquel da Silva Miranda; Sandra Mara Alves da Silva Neves; Cleber Aparecido de Barros	Fragilidade: pedologia, dissecação do relevo, cobertura vegetal, uso da terra, precipitação -
Revista Brasileira de Geografia Física	2011	Caracterização morfométrica e identificação de áreas suscetíveis a erosão na bacia do rio Pajeú, PE: o estudo de caso da bacia do rio Pajeú/PE	Ailton Feitosa; Bruno dos Santos; Maria do Socorro Bezerra de Araújo	Fragilidade/Suscetibilidade: hipsometria, rede de drenagem, solos, geologia, unidades de paisagem, declividade, morfometria da bacia -
	2012	Elaboração das cartas de suscetibilidade e potencialidade à erosão laminar em Douradina, Estado do Paraná	Carina Petsch; Vitor Pagadigorria Zucchi; João Vitor Meza Bravo; Marina Brandt Bueno; Natália da Silva Minakawa	Suscetibilidade: declividade e erodibilidade -
	2014	Indicadores de vulnerabilidade ambiental	Vanderlei Leopold Magalhães; José Edézio da Cunha; Maria Teresa de Nóbrega	Vulnerabilidade: hipsometria, solos e uso do solo -
	2016	Susceptibilidade à erosão relacionada ao escoamento superficial na sub-bacia do Alto Mundaú, Ceará, Brasil	Augusto César Praciano Sampaio; Abner Monteiro Nunes Cordeiro, Frederico de Holanda Bastos	Suscetibilidade: solos, declividade, uso e cobertura, pluviosidade -
	2016	Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia pelo processo analítico hierárquico	André dos Santos Ribeiro; Ronaldo Luiz Mincato; Nilton Curi; Fernando Shinji Kawakubo	Vulnerabilidade: uso do solo, relevo, solo, geologia, clima AHP

(continuação)

	2017	Análise dos processos erosivos em áreas suscetíveis a instabilidade de encostas na barragem do Serro Azul, Palmares – Pernambuco	Jânea Cristina Lopes de Souza; Maria das Neves Gregório; Dyêgo Lins da Silva; Márcia de Souza Carneiro; Eden Cavalcanti de Albuquerque Junior; Tiago César Cavalcante	Suscetibilidade: elevação e declividade	-
	2018	Identificação de riscos erosivos na bacia hidrográfica do rio Beberibe – PE	José Fábio Gomes da Silva; Manuella Vieira de Barbosa Neto	Vulnerabilidade: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, clima	Crepani et al (2001)
	2019	Estudo da erosão no Seridó paraibano como indicador do processo de desertificação: Juazeirinho, Paraíba	Edinete Maria de Oliveira; Vanice Santiago Fragoço Selva	Vulnerabilidade: solos, geologia, geomorfologia, climatologia	Crepani et al (2001)
	2019	Análise da vulnerabilidade erosiva para a bacia hidrográfica do Ribeirão Conquistinha no oeste de Minas Gerais, Brasil	Janiel Lopes de Oliveira; Manfred Fehr	Vulnerabilidade: declividade, hipsometria, densidade de drenagem, solos, geologia, vegetação nativa e cobertura predominante, pluviometria	Crepani et al (2001)
	2020	Validação do mapa de vulnerabilidade a erosão por aprendizagem de máquina	Renata Cristina Mafra; Mayara Maezano Fanta Pinheiro; Rejane Ennes Cicerelli; Lucas Prado Osco; Marcelo Rodrigues Alves; Ana Paula Marques Ramos	Vulnerabilidade: geomorfologia, pedologia, declividade, densidade de drenagem e cobertura da terra.	-
Engenharia Sanitária e Ambiental	2016	Elaboração de carta de adequabilidade ambiental de uma pequena propriedade rural no município de São Miguel Arcanjo, São Paulo, utilizando técnicas de geoprocessamento	Rafael Teofilo Meira; Débora Zumkeller Sabonaro; Darllan Collins da Cunha e Silva	Fragilidade: uso e cobertura vegetal, declividade e solos.	-
GeoUERJ	2009	Fragilidade ecoturística em áreas de atrativos no Parque Estadual de Pedra Branca (RJ)	Nadja Maria Castilho da Costa; Vivian Castilho da Costa; Rodrigo Silva da Conceição; Julia Vicente Martins Ribeiro	Vulnerabilidade: cicatrizes de erosão, declividade, pedologia, uso do solo e geologia.	-

(conclusão)

Geografia (Londrina)	2012	Geoprocessamento aplicado ao estudo da vulnerabilidade à erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão do Pântano nos municípios de São Carlos, Analândia e Descalvado (SP)	Yanayne Benetti Barbosa; Reinaldo Lorandi	Vulnerabilidade: geomorfologia, geologia, solo, vegetação, uso do solo e clima	Crepani et al (2001)
	2020	Caracterização da vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Preto, Maranhão - Brasil	Luiz Carlos Araujo dos Santos; Idevan Gusmão Soares	Vulnerabilidade: solos, declividade, estrutura geológica, uso e cobertura da terra	Crepani et al (2001)
Revista Brasileira de Geociências	2007	Mapeamento da vulnerabilidade geoambiental do estado do Paraná	Leonardo José Cordeiro Santos; Chisato Oka-Fiori; Naldy Emerson Canalli; Alberto Pio Fiori; Claudinei Taborda da Silveira; Julio Manoel França da Silva	Vulnerabilidade: geologia, geomorfologia e pedologia	Ross (1994)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Quadro 5 - Artigos Qualis B2 analisados durante a pesquisa.

QUALIS B2					
Periódicos	Ano	Título	Autores	Elementos analisados	Metodologia utilizada
Revista de Geografia (UFPE)	2010	Relatório final do projeto enchentes - bacia hidrográfica do rio Manhuaçu (MG): uma análise das áreas susceptíveis à erosão dos solos	André Luiz Lopes de Faria; Eliana Elizabet dos Santos; Elipídio Inácio Fernandes Filho; Marcelo de Souza Cerqueira; Carlos Ernesto Schaefer	Suscetibilidade: solos, declividade, geologia, geomorfologia	-
	2018	Avaliação da vulnerabilidade dos solos dos solos à erosão no município de São Carlos - SP	Diego Peruchi Trevisan; Luiz Eduardo Moschini; Bruno Peruchi Trevisan	Vulnerabilidade: uso e cobertura da terra, declividade, pedologia	IPE
	2018	Análise da fragilidade na bacia da barragem Camará, Areia (PB)	Jeferson Mauricio Rodrigues; Gabriel da Nóbrega Monteiro; Jonas Otaviano Praça de Souza	Fragilidade: solo, uso e cobertura, clima, geologia, declividade	Ross (1994), Crepani (1996), Romano (2016)
Geografia (UNESP)	2013	Susceptibility to water erosion of soils from the municipality Salto do Céu, SW Mato Grosso State, Brazil	Maria Cândida Moitinho Nunes; Sandra Mara Alves da Silva Neves; Jesâ Pereira Kreitlow; Antônio Marcos Chimello	Suscetibilidade: erodibilidade e fator topográfico Potencial à erosão: suscetibilidade e capacidade de uso	Salomão (2010)
	2013	Análise da suscetibilidade à erosão e de conflitos no uso da terra por meio de geotecnologias na microrregião de Jauru - Mato Grosso, Brasil	Larissa Espinosa de Freitas; Camila Calazans da Silva; Sandra Mara Alves da Silva Neves; Ronaldo José Neves; Maria Cândida Moitinho Nunes	Suscetibilidade: erodibilidade e fator topográfico Potencial à erosão: suscetibilidade e uso atual da terra	-
	2014	Geoprocessamento aplicado à análise ambiental: vulnerabilidade natural à perda de solo no Morro do Osso, Porto Alegre/RS	Gabriela Camboim Rockett; Eduarda Marques Martins; Viviane Todt; Adriane Brill Thum; Eduardo Guimarães Barboza	Vulnerabilidade: geologia, geomorfologia (amplitude, declividade), dissecação e pedologia, fitogeografia, clima (intensidade e duração)	Crepani et al (2001)
	2017	Diagnoses of potential erosion areas and land use conflicts in the Araputanga municipality, Mato Grosso State (MT), Brazil	Camila Calazans da Silva Luz; Cleber Aparecido de Barros; Sandra Mara Alves da Silva Neves; Ronaldo José	Suscetibilidade: erodibilidade e fator topográfico	-

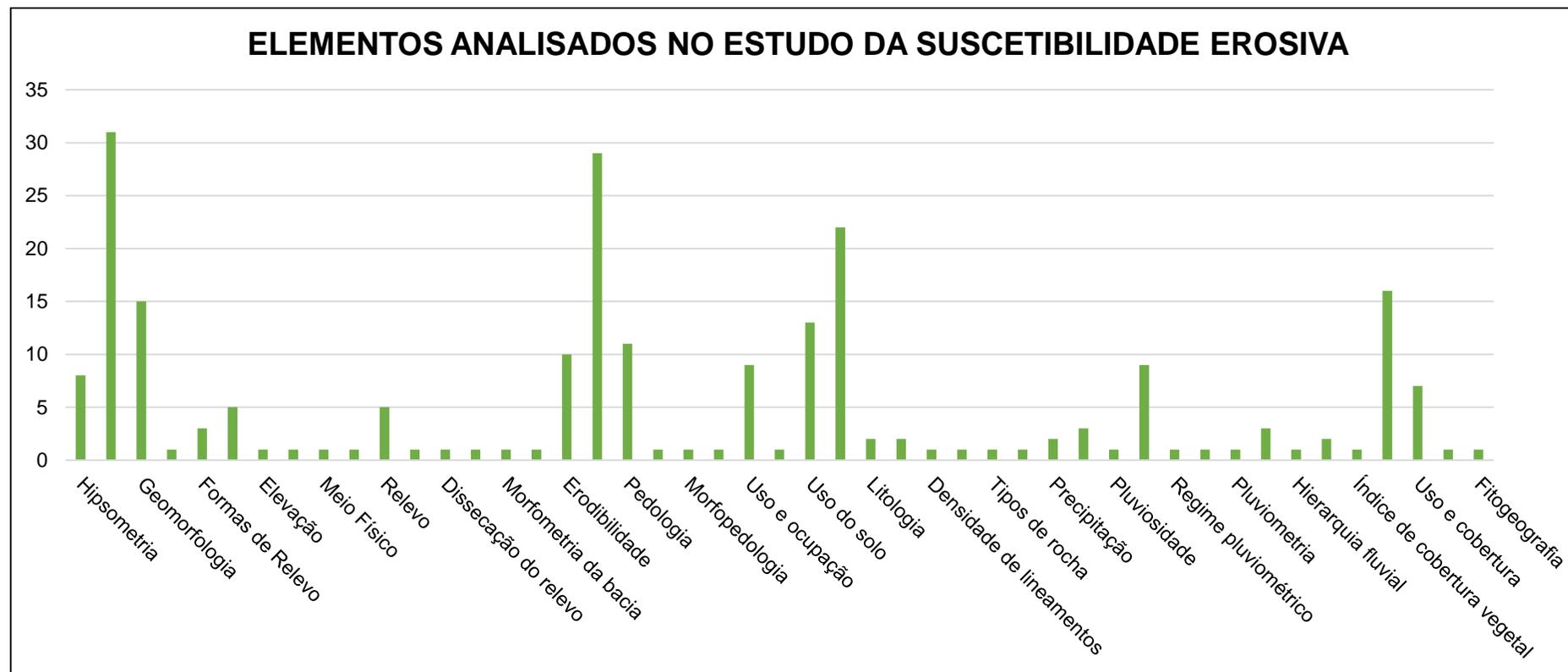
(continua)

(conclusão)

			Neves; Maria Cândida Moitinho Nunes		
Geografia Ensino e Pesquisa	2018	Fragilidade ambiental: subsídio ao planejamento e à gestão da bacia do Ribeirão da Laje (GO), Brasil	Wellmo dos Santos Alves; Alécio Perini Martins; Iraci Scopel	Fragilidade: declividade, solos, uso da terra e cobertura vegetal	Ross (1994)
	2018	Relação de voçorocas e áreas de fragilidade ambiental na microbacia do rio Jarauçú no município de Brasil Novo - Pará	Rangel de Freitas Alves; Sandra Andréa Santos da Silva; Wellington de Pinho Alvarez	Fragilidade: declividade, hipsometria, solos, uso e cobertura vegetal	Ross (1994)
	2020	Uso de investigação multidisciplinar para diagnóstico de processos erosivos lineares urbanos em uma voçoroca no bairro do Bequimão - São Luís - MA	Felipe Ferreira Oliveira; Rodrigo da Cruz de Araujo	Suscetibilidade: caracterização geotécnica, meio físico, uso do solo e cobertura vegetal	Multicritério
Revista Formação	2016	Ocupação das zonas de vulnerabilidade à erosão em Cidade Gaúcha - Paraná	Felipe Rodrigues Macedo; Marta Luzia de Souza	Vulnerabilidade: carta pedológica (geologia e pedologia) + carta topomorfológica (rede de drenagem e formas de relevo) = Cartas de zonas de risco de erosão	ZERMOS
Geoambiente	2017	Análise da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Ribeirão Douradinho, sudoeste de Goiás	Wellmo dos Santos Alves; Alécio Perini Martins; Ana Karoline Ferreira dos Santos; Derick Martins Borges de Moura	Fragilidade: declividade, solos, erosividade, uso da terra e cobertura vegetal	Ross (1994)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

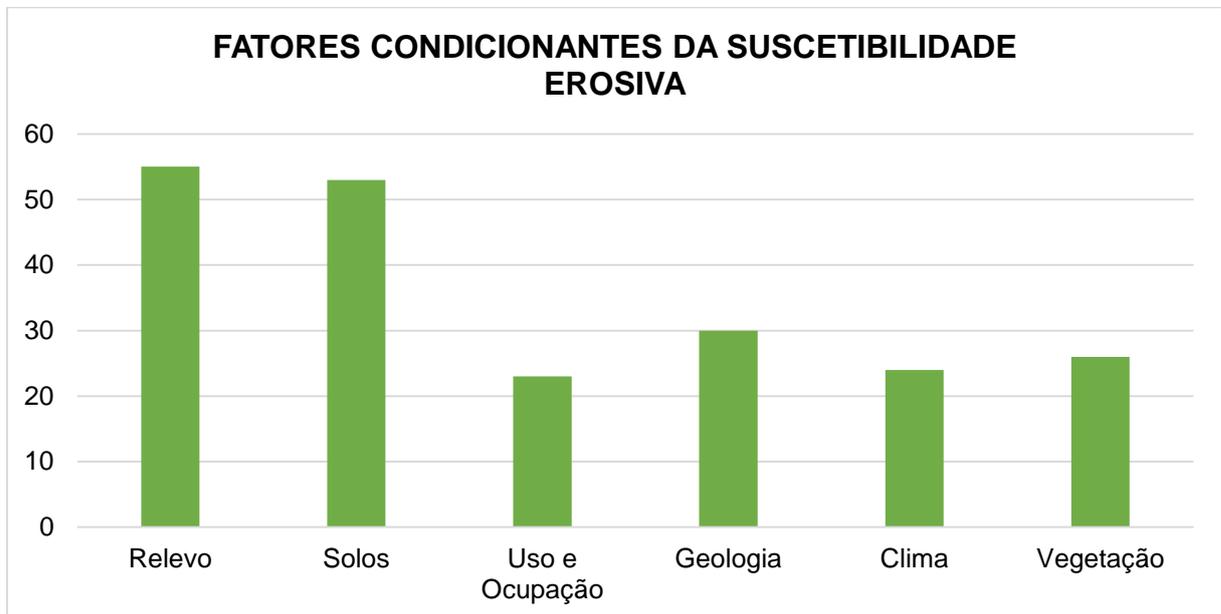
Gráfico 5 - Elementos que foram analisados durante a leitura dos artigos.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O Gráfico acima representou todos os elementos que foram encontrados durante a leitura dos 55 artigos e que foram utilizados para definir a Suscetibilidade, Fragilidade e/ou Vulnerabilidade das áreas de estudo. Para uma análise e entendimento da temática, esses elementos foram agrupados em seis fatores: Relevo (55), Solos (53), Uso e Ocupação (23), Geologia (30), Clima (24) e Vegetação (26), que foram contabilizados em quantos artigos cada elemento se fazia presente, conforme mostra o Gráfico 6.

Gráfico 6 - Fatores condicionantes utilizados nos artigos para o estudo da suscetibilidade erosiva.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A partir da leitura e da análise desses artigos, pode-se escolher quais critérios seriam adotados e justificados para a realização desse trabalho. Dessa forma, escolheram-se as variáveis referentes ao Relevo, Solos, Uso do Solo e Geologia para estudar os processos erosivos da BHRI. Destaca-se ainda que embora sejam extremamente importantes, para esse trabalho não foi considerado os fatores Clima e Vegetação, pois são parâmetros que exigem uma pesquisa e um entendimento bastante complexo da temática, uma vez que existem muitos estudos que focam apenas no entendimento e discussão de um desses fatores. Além disso, durante a discussão do condicionante “Uso do Solo” é discutido resumidamente sobre a

vegetação, pois ela é um fator importante no processo de uso e ocupação da BHRI. Ademais, a análise desses artigos serviu para definir que o “AHP” seria a metodologia a ser utilizada nesse estudo e, além disso, adotar-se-ia o termo “Suscetibilidade” para caracterizar as áreas que mais sofrem com a atuação da erosão linear.

4.1 CONFIGURAÇÃO DO RELEVO

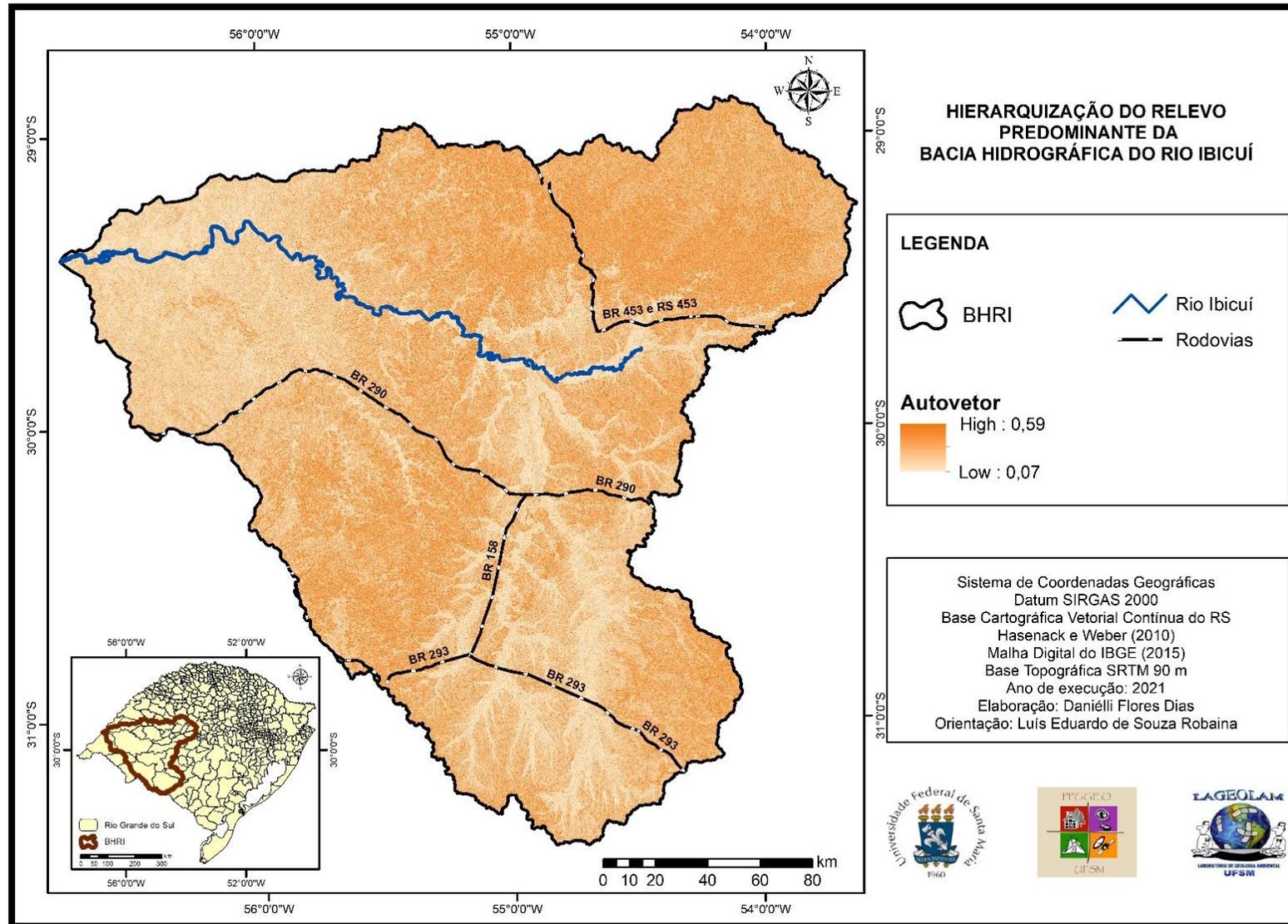
A bacia hidrográfica do rio Ibicuí apresenta uma grande variação nas formas de relevo, onde suas características mais comuns são observadas em toda a porção que corresponde a fronteira oeste do Rio Grande do Sul, no qual ocorre o predomínio de colinas suaves e onduladas, além de algumas formas ruiniformes. A Figura 9 apresenta a hierarquização do relevo da área de estudo.

Para uma descrição mais detalhada desse condicionante, optou-se por dividir a BHRI em unidades de relevo, levando em consideração atributos da hipsometria e declividade, além do conhecimento prévio da área de estudo e o auxílio de alguns trabalhos desenvolvidos pelo Laboratório de Geologia Ambiental (LAGEOLAM/UFSM) na região (TRENTIN, 2007, 2011; DE NARDIN, 2009; DIAS, 2014, 2017; SCCOTI, 2015, 2017; KNIERIN, 2015; SANTOS, 2015, 2018; RADEMANN, 2019). Diante disso, foram definidas as seguintes unidades de relevo: Áreas Planas, Colinas Suaves, Colinas Onduladas, Associação de Morros e Morrotes.

A unidade das Áreas Planas ocorre nas altitudes inferiores a 100 metros, declividades menores que 2% e estão associadas as planícies de inundação e as áreas próximas dos principais rios e arroios, afluentes do rio Ibicuí. Nessa porção da bacia, as litologias são constituídas por depósitos aluviais e os solos são identificados como hidromórficos.

As Colinas Suaves predominam nas altitudes entre 100 e 200 metros e em altitudes superiores a 300 metros, caracterizando as colinas de altitudes do Planalto da Serra Geral. Suas declividades correspondem ao intervalo de 2 a 5%, apresenta interflúvios amplos e suas litologias são constituídas por rochas sedimentares e vulcânicas. Essa unidade de relevo demarca o limite em que os processos de deposição são superados pelo de degradação e inicia-se os processos erosivos.

Figura 9 - Hierarquização e espacialização das formas de relevo da área de estudo.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015) e elaborado pela autora (2021).

A unidade das Colinas Onduladas espacializa-se predominantemente nas porções norte, nordeste e sudoeste da bacia. Caracteriza-se por apresentar altitudes superiores a 100 metros, declividades entre 5 e 15% indicando o predomínio dos processos erosivos e o fim do processo de mecanização agrícola, interflúvios curtos e onde se localiza o alto curso e as nascentes dos principais afluentes do rio Ibicuí.

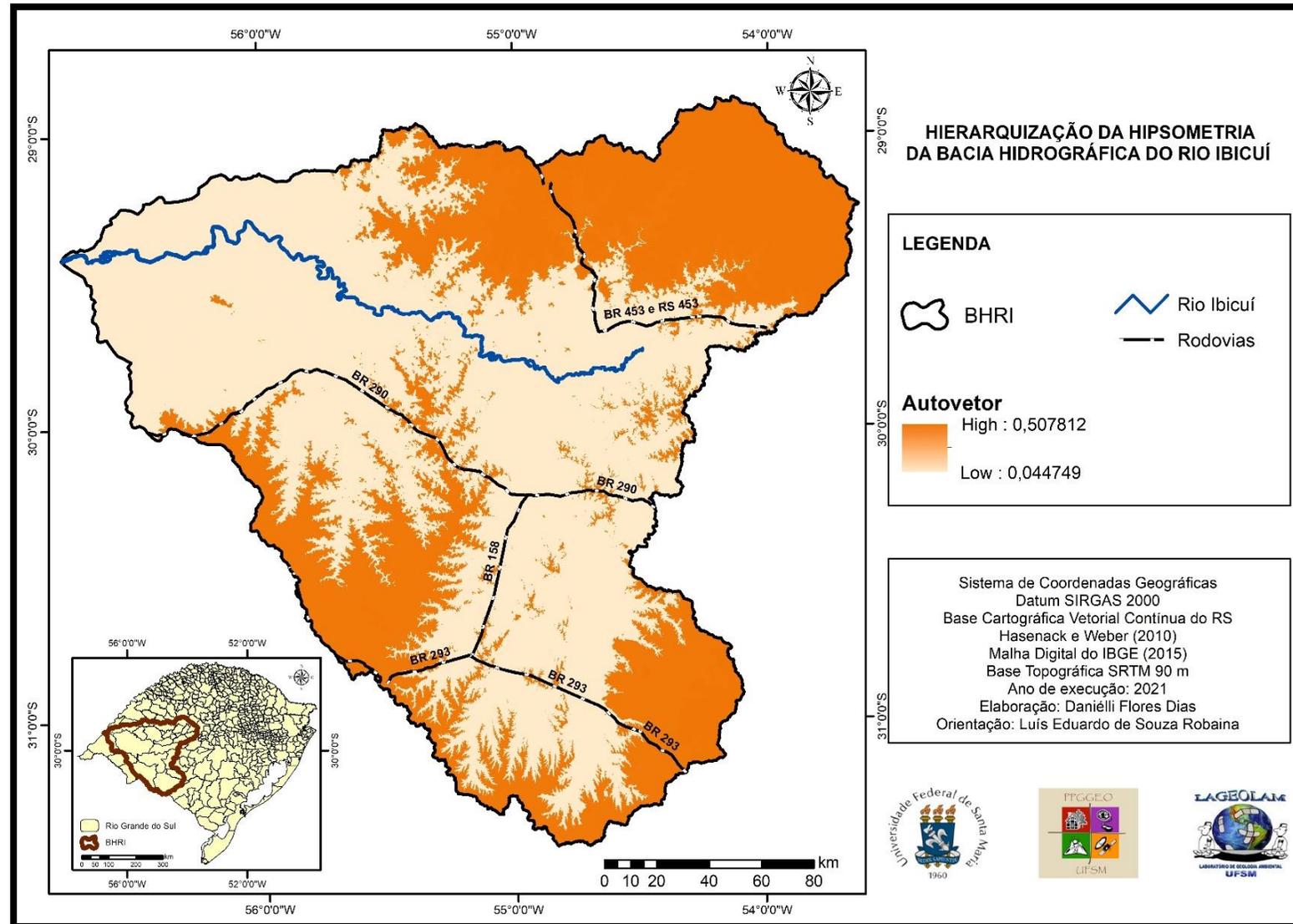
Por fim, a unidade da Associação de Morros e Morrotes predomina nas altitudes entre 100 e 300 metros (Serra do Caverá) e superiores a 300 metros (Serras do Sudeste e Planalto da Serra Geral) com declividades acima de 15%, demarcando áreas íngremes sujeitas aos processos de movimentos de massa.

Para a análise do relevo como um fator condicionante da suscetibilidade erosiva, levou-se em consideração os atributos referentes a hipsometria, declividade e as curvaturas das vertentes, que foram hierarquizadas e avaliadas individualmente e em conjunto para o estudo do relevo da BHRI.

Com relação aos atributos hipsométricos, a bacia hidrográfica do rio Ibicuí apresenta como menor cota altimétrica 36 metros, junto a foz do rio Ibicuí na fronteira do Brasil com a Argentina; e como maior cota o valor de 540 a nordeste da área de estudo junto ao Planalto da Serra Geral, resultando em uma amplitude altimétrica de 504 metros. Para o estudo da suscetibilidade erosiva, as altitudes foram hierarquizadas e caracterizadas, conforme o grau de importância frente aos processos erosivos: Classe 1 - altitudes inferiores a 100 metros; Classe 2 - altitudes entre 100 e 200 metros; Classe 3 - altitudes entre 200 e 300 metros; Classe 4 - altitudes superiores a 300 metros. A Figura 10 apresenta a hierarquização e a distribuição da hipsometria na área de estudo.

A classe hipsométrica com altitudes inferiores a 100 metros, apresenta potencial erosivo de 0,04%, que indica uma tendência muito baixa de ocorrer processos erosivos, e espacializa-se na porção noroeste da bacia na foz do rio Ibicuí, no limite entre os municípios de Alegrete, Itaqui e Uruguaiana e indo em direção do rio Uruguai e Argentina, correspondendo a uma área de planícies com depósitos de sedimentos fluviais. Já em porções do centro, sudeste e leste da bacia, essas altitudes abrangem todo o curso dos rios Ibicuí, Ibicuí da Armada e Cacequi; médio e baixo curso dos rios Santa Maria, Ibirapuitã, Itu, Ibicuí-Mirim e os arroios Caverá, Ibirocai, Inhanduí e Pai-Passo; e baixo curso dos arroios Miracatu e Touro Passo.

Figura 10 - Hierarquização e espacialização da hipsometria da área de estudo.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015) e elaborado pela autora (2021).

Com potencial erosivo de 0,12% indicando baixa tendência a erosão, as altitudes entre 100 e 200 metros são as mais expressivas na bacia hidrográfica e predominam nas porções oeste, sul, leste e em trechos do norte e nordeste, correspondendo ao alto curso dos rios Ibirapuitã, Itu, Ibicuí-Mirim, Santa Maria e os arroios Caverá, Ibirocai, Inhanduí e Pai Passo; alto e médio curso dos arroios Miracatu e Touro Passo e baixo curso dos rios Jaguari e Jaguarzinho.

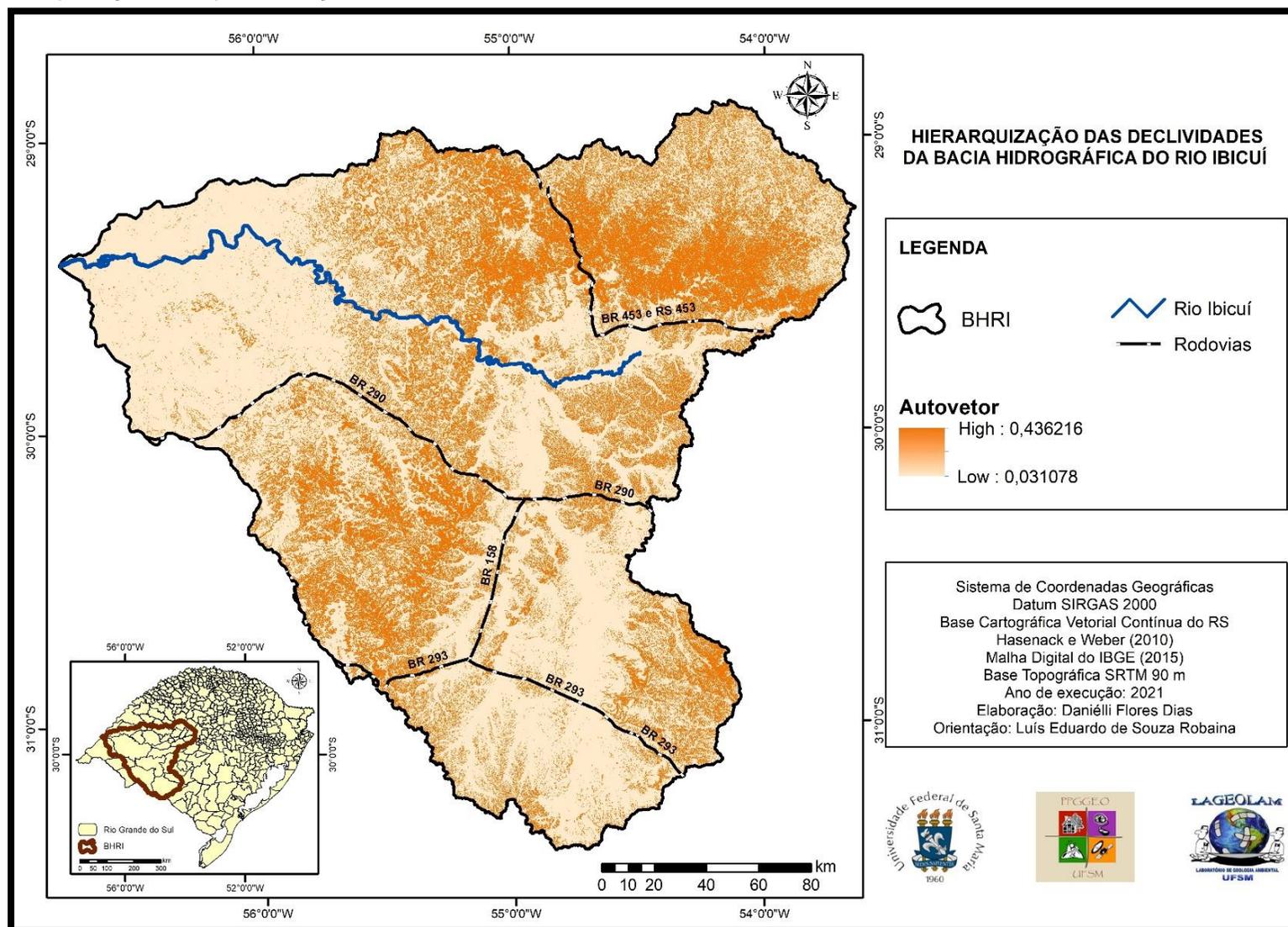
A classe que corresponde ao intervalo de 200 a 300 metros apresenta potencial erosivo de 0,31%, indicando probabilidade média de erosão, predomina nas porções sudoeste, sudeste, norte e em alguns trechos do sul e nordeste, caracterizando um patamar de transição entre as altitudes mais baixas e as zonas mais elevadas da bacia hidrográfica.

Por último, as altitudes superiores a 300 metros possuem potencial de 0,50%, que condiz um alto potencial erosivo, representam as áreas que correspondem ao rebordo e o Planalto da Serra Geral (nordeste), Planalto da Campanha representado pela Serra do Caverá (sudoeste) e o Escudo Cristalino com as Serras do Sudeste. Essas porções ainda compreendem as nascentes dos rios Ibicuí-Mirim, Itu, Jaguari, Jaguarzinho, Santa Maria e Toropi.

A análise das declividades na BHRI teve por objetivo avaliar a inclinação das vertentes e quais as áreas mais suscetíveis aos processos de dinâmica superficial, com maior ênfase no estudo dos processos erosivos. Diante disso e conforme já apresentado na metodologia, foram definidas e hierarquizadas cinco classes de declividades para a área de estudo: Classe 1 - menor que 2%; Classe 2 - entre 2% e 5%; Classe 3 - de 5% a 15%; Classe 4 - declividade entre 15% a 45%; Classe 5 - declividade superiores a 45%. A Figura 11 espacializa as declividades da BHRI.

As declividades inferiores a 2% possuem potencial erosivo de 0,03%, indicando muito baixa suscetibilidade erosiva, distribuem-se nas porções oeste e centro e avançam em direção ao sul da bacia, associando-se aos canais principais dos rios Ibicuí, Santa Maria, Ibicuí da Armada, Ibicuí-Mirim, Ibirapuitã, Cacequi e os arroios Inhanduí e Ibirocai. Essa classe corresponde as áreas de planícies e as vertentes levemente onduladas. Frente aos processos agradacionais predominantes, observa-se nessas áreas a deposição de sedimentos fluviais oriundos de porções mais elevadas, assim como, o assoreamento dos cursos d'água com a formação de bancos de areia, especialmente nos rios Ibicuí, Ibicuí da Armada, Santa Maria e Cacequi.

Figura 11 - Hierarquização e espacialização das declividades da área de estudo.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015) e elaborado pela autora (2021).

As declividades entre 2% e 5% distribuem-se com maior predomínio nas porções oeste, centro e sul da bacia e nessas áreas, por apresentar um relevo mais suave, o uso do solo está associado as atividades agropastoris. Com potencial erosivo de 0,08%, essa classe apresenta baixa suscetibilidade erosiva na área de estudo.

A classe de declividade com intervalo entre 5% e 15% distribui-se nas porções norte, nordeste, sudeste e sudoeste em terras drenadas pelos rios Itu, Jaguari, Jaguarzinho, Toropi e os arroios Caverá, Miracatu, Pai-Passo e Touro Passo. Apresenta um relevo levemente ondulado e, por vezes mais ondulado com o uso do solo destinado principalmente para agropecuária. Essa classe apresenta potencial erosivo de 0,43% e corresponde a uma área de suscetibilidade muito alta, pois são nessas inclinações que os processos erosivos atuam de forma mais significativa.

A classe com declividade entre 15% e 45% possuem potencial erosivo de 0,28%, que corresponde a áreas com alta suscetibilidade erosiva, distribui-se nas porções nordeste (Planalto da Serra Geral), sudoeste (Serra do Caverá) e uma pequena faixa mais ao sul (Serras do Sudeste), apresentando um relevo fortemente ondulado marcado por vertentes íngremes e mais escarpadas, com a presença de vegetação mais silvestre que compõem as matas de encostas. Além disso, essas áreas correspondem as nascentes dos rios Itu, Jaguari, Jaguarzinho, Toropi e os arroios Caverá, Pai-Passo e Touro-Passo.

Por último, a classe com declividade acima de 45% apresenta potencial erosivo de 0,16%, que está associada a áreas com tendência baixa a média suscetibilidade erosiva e distribui-se nas mesmas porções das declividades caracterizadas anteriormente.

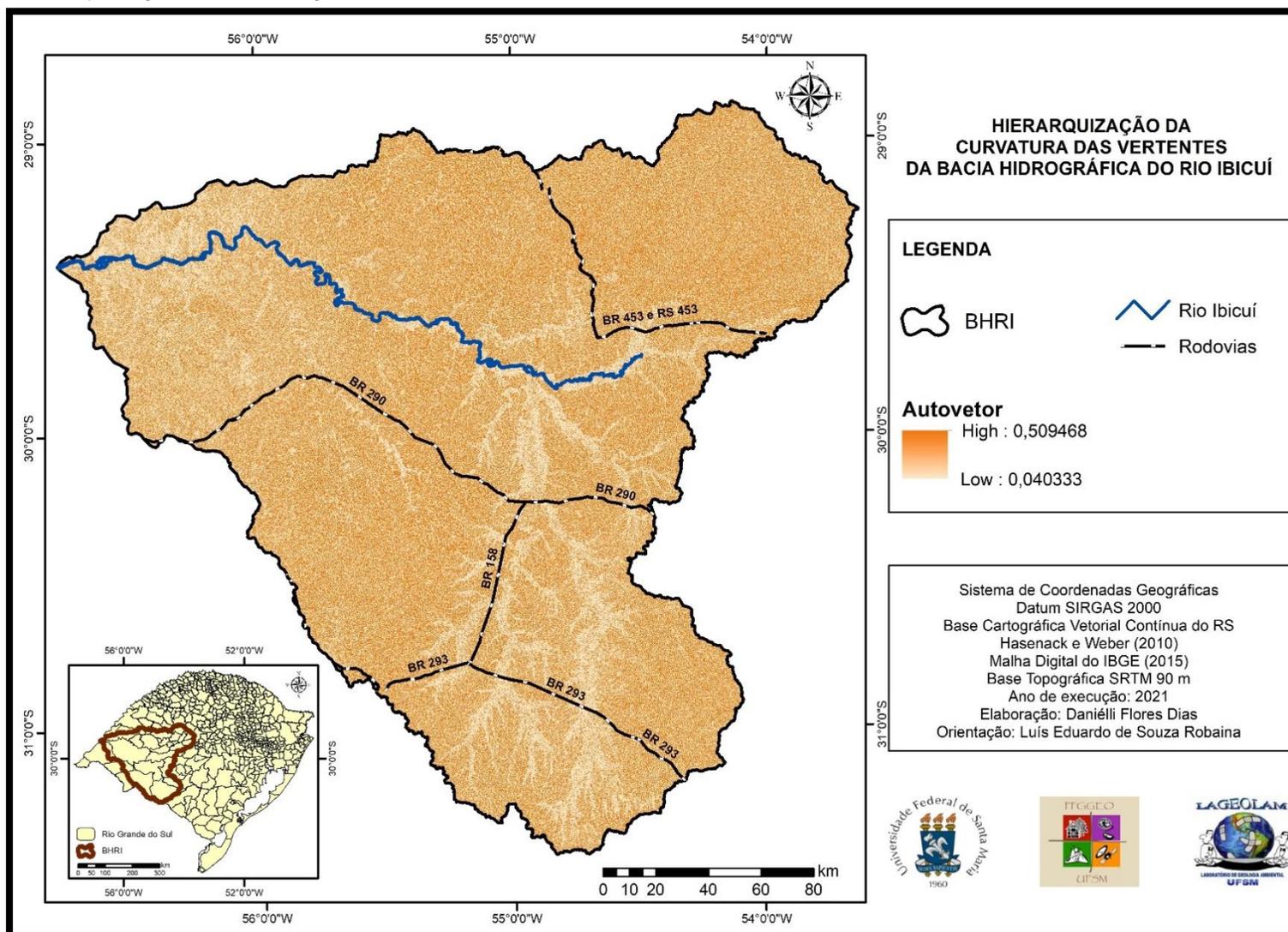
A curvatura das vertentes (Figura 12) foi classificada a partir da combinação dos atributos referentes ao plano e ao perfil de curvatura, resultando assim, em quatro classes de formas de vertentes para a área de estudo: côncavo-convergente, côncavo-divergente, convexo-convergente e convexo-divergente.

Caracterizando o perfil de curvatura, as vertentes convexas associam-se aos segmentos da encosta onde ocorre o início do processo de escoamento, na qual muitos fatores influenciam, como: volume de precipitação, umidade/saturação do solo, tipo de solo e cobertura do solo. Sendo assim, conforme o aumento da velocidade dos fluxos, começam a predominar os processos de escoamento sobre os de infiltração, e isso ocorre a medida em que as declividades do perfil são mais acentuadas nas vertentes. Por sua vez, as vertentes côncavas apresentam-se associadas aos

segmentos de média vertente até a sua base, onde os fluxos são mais significativos, caracterizando-se assim, áreas suscetíveis aos processos de erosão.

Com relação ao plano de curvatura, as vertentes convergentes associam-se principalmente com a rede de drenagem, marcando as áreas das vertentes onde predominam os processos de concentração dos fluxos juntos a sua base, formando a partir disso, os canais da rede de drenagem. As vertentes divergentes representam áreas do topo das vertentes até o seu segmento médio e caracterizam-se pelos processos de dispersão dos fluxos nas encostas.

Figura 12 - Hierarquização e distribuição da curvatura das vertentes da área de estudo.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015) e elaborado pela autora (2021).

A forma côncavo-convergente possui potencial de 0,50% que configura uma alta suscetibilidade erosiva. Corresponde ao segmento médio até a base das vertentes, caracterizando-se pelo acúmulo e a concentração máxima dos fluxos de escoamento das vertentes. Nos sistemas de drenagens, essa classe corresponde ao leito dos segmentos dos canais fluviais, principalmente os de menor hierarquia, como os de primeira e segunda ordem.

A forma côncavo-divergente associa-se desde o segmento médio até a base das vertentes. Quando estão associadas as cornijas e aos morrotes, marcam a sua porção inferior e, nas áreas próximas as drenagens, relacionam-se as áreas de planície com processos predominantes de dispersão dos fluxos associados ao plano divergente e de maior velocidade dos escoamentos no ponto de inflexão do perfil convexo para côncavo, e com velocidades menores, à medida em que a encosta se aproxima da sua base. Possui potencial de 0,11%, conferindo assim, uma baixa suscetibilidade erosiva.

Com potencial erosivo de 0,33% que indica uma tendência média a alta de suscetibilidade, a forma convexo-convergente possui alguns pontos de maior densidade, associando-se as áreas de leito fluvial das sub-bacias hidrográficas. Já nas vertentes, correspondem as áreas superiores da encosta, que vão desde o terço superior até o segmento médio. Destaca-se também, que são nessas áreas que ocorre o aumento da energia dos fluxos superficiais, com o predomínio dos mesmos sobre os processos de infiltração do terreno, bem como, marcam o início da concentração dos escoamentos, devido ao plano de curvatura convergente.

Por último, a forma convexo-divergente apresenta potencial de 0,04% que indicam uma tendência muito baixa de suscetibilidade erosiva, associando-se as áreas de relevo ondulado e/ou fortemente ondulado. Nas vertentes, correspondem a porção que vai desde o topo até o seu segmento médio, caracterizando-se pelo aumento da energia do fluxo, com menor infiltração e máxima dispersão em função do plano divergente, à medida em que as declividades do perfil da encosta são mais significativas.

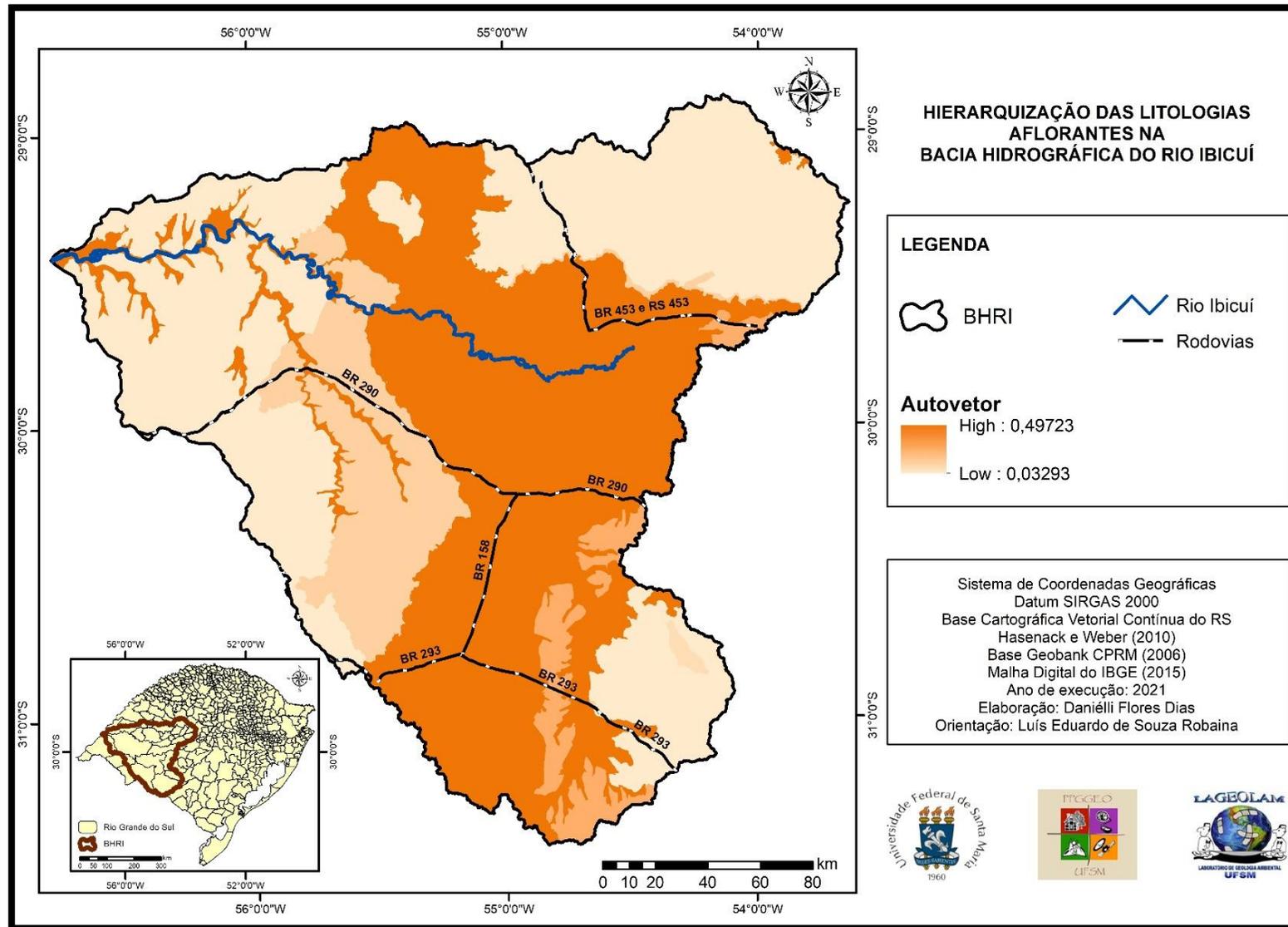
4.1.1 LITOLOGIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ

No estado do Rio Grande do Sul, a complexidade e a intensidade dos processos erosivos são mais expressivos nas regiões que apresentam sedimentos de

face arenosa das sequências sedimentares. Na BHRI, o substrato litológico é composto por sequências vulcano-sedimentar da Bacia do Paraná, aflorantes na Depressão Periférica e no Planalto da Serra Geral, além de uma pequena porção a sudoeste com afloramentos de rochas metamórficas e ígneas do Escudo Sul-riograndense (ROBAINA E TRENTIN, 2004; TRENTIN et al., 2015).

Para o estudo da suscetibilidade erosiva, as litologias foram agrupadas, hierarquizadas e caracterizadas, conforme o grau de importância de cada uma frente aos processos erosivos: Grupo 1 - Rochas Cristalinas; Grupo 2 - Arenitos Conglomeráticos; Grupo 3 - Arenitos Coesos; Grupo 4 - Lamitos; Grupo 5 - Arenitos. A Figura 13 apresenta a hierarquização e a distribuição das litologias da BHRI.

Figura 13 - Hierarquização e espacialização das litologias aflorantes na área de estudo.



Fonte: CPRM (2006), Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015) e elaborado pela autora (2021).

4.1.2 Rochas Cristalinas

É formado pelas rochas do Grupo São Bento (Formação Serra Geral), Formações Acampamento Velho e Hilário, Complexo Anelar-Leões, Granito Campinas e Complexo Granulítico Santa Maria-Chico. Esse grupo espacializa-se nos extremos sudeste e nordeste, além da faixa a oeste da BHRI e apresenta potencial erosivo que corresponde a 0,03%, significando assim, uma área com muito baixa suscetibilidade erosiva.

As rochas pertencentes ao Grupo São Bento são originadas a partir dos derrames provenientes do vulcanismo fissural ocorrido na Bacia Sedimentar do Paraná, que datam da Era Mesozoica e corresponde ao período que se estende desde o Jurássico até o Cretáceo. Os derrames apresentam diferentes características em função da porção observada. Na parte superior dos derrames, encontra-se uma porção rica em vesículas e amígdalas, que são facilmente afetadas pelos processos de alteração e assim, geram solos bem desenvolvidos. A porção central do derrame apresenta um conjunto de juntas verticais e textura cristalina. Já a base apresenta juntas horizontais, que deve ser resultado, pelo menos em parte, do escoamento laminar da lava no seu interior. Os processos de alteração são influenciados pela porção do derrame que está sendo atacada pelos agentes intempéricos. As porções de rocha mais cristalizada e com estrutura maciça, apresentam menor possibilidade de infiltração da água, logo são as mais resistentes.

Conforme as descrições da CPRM (2008), a Formação Serra Geral corresponde a um evento extensivo de lavas basálticas, de imenso volume em áreas cratônicas continentais. Esse evento é resultante da fragmentação do Gondwana Oeste e consequente formação do Proto-Oceano Atlântico Sul. Na BHRI, observa-se três fácies: Alegrete, Caxias e Gramado.

a) Fácies Alegrete: se caracteriza pela presença de derrames de composição intermediária a ácida, variando entre andesitos e riodacitos, com frequentes texturas de fluxo e autobrechas no topo e na base dos derrames. Na área de estudo, essa unidade é formada predominantemente por colinas suaves e ocupa a porção oeste da bacia.

b) Fácies Caxias: corresponde a derrames de composição intermediária a ácida, que variam entre riodacitos e riolitos, com forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciço na porção central, dobras de fluxo, autobrechas frequentes e

vesículas preenchidas por calcedônia e ágata, espacializando-se na porção nordeste do Planalto da Serra Geral.

c) Fácies Gramado: é caracterizada por derrames granulares finos a médio, melanocráticos cinza, horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilitas e saponita, estruturas de fluxo e pahoehoe comuns intercalados com os arenitos da Formação Botucatu. Abrange as porções nordeste (Planalto da Serra Geral), norte (morros e morrotes isolados) e sudoeste (Serra do Caverá).

Ainda falando das rochas cristalinas na BHRI, têm-se a presença da Formação Acampamento Velho, que representa um registro vulcânico ácido com ocorrências efusivas e piroclásticas, especialmente nas regiões do Platô da Ramada (Vila Nova do Sul) e Taquarembó (Dom Pedrito). Nessas porções, encontra-se afloramentos de conglomerados aluviais, ricos em clastos vulcânicos e plutônicos de composição ácida, que gradam verticalmente para ritmitos areno-pelíticos, associados a Aloformação Santa Fé (WILDNER E NARDI, 2002; CPRM, 2008).

Encontra-se ainda nessa porção da bacia, a Formação Hilário, que conforme as discussões de Janikian et al (2003, 2005), é constituída por rochas vulcânicas de composição básica intermediária e ácida (basaltos, latito-basaltos, latitos, andesitos e riolitos) colocados em ambiente subaquático, com subordinadas rochas piroclásticas (lapili-tufos, tufos grossos, líticos e vítreos) colocados por processos de fluxo de gravidade ou decantados em água.

Localizado nas proximidades da área urbana de Dom Pedrito e datado do Neoproterozóico, o Complexo Anelar-Leões constitui um corpo intrusivo bimodal, constituído por quartzo monzodioritos e monzodioritos com ortopiroxênio na parte central e nas bordas (CPRM, 2008). Na BHRI, ocorre o afloramento das seguintes unidades litoestratigráficas: a) Vauthier: composta por dacitos e riodacitos porfiríticos, com matriz microfanerítica de afinidade alcalina; b) Granito Jaguari: representa a última manifestação magmática de natureza alcalina metaluminosa, sendo posterior aos eventos magmáticos tardios do Complexo Granítico de Lavras do Sul e é formado por um granito sub-alcalino grosseiro, avermelhado e estruturalmente discordante; c) Dom Pedrito: é formado por um monzogranito com coloração que varia do rosa ao acinzentado, equigranular médio a porfiríticos, com fenocristais de feldspato em matriz de grão médio a fino; d) Saibro: constituído por sienos e monzogranitos, com granulação que varia de média a grossa.

A unidade denominada Granito Campinas caracteriza-se por granitos monzoníticos a sub-alcálinos leucocráticos, com granulação fina a média e textura porfirítica, com coloração cinza, variando petrograficamente de granodiorito a monzogranito e é composta principalmente por quartzo, feldspato alcalino e muscovita, apresentando localmente disseminações ou agregados irregulares de turmalina e biotita e exercem um controle sobre a gênese e o padrão estrutural da mineralização presente na área (PORCHER E LOPES, 2000; CPRM, 2008). Esse afloramento ocorre no limite sul da BHRI.

Por fim, a sequência mais antiga da área de estudo corresponde ao Complexo Granulítico Santa Maria-Chico que data do Arqueano e é composta por gnaisse bimodal félsico-máfico intercalado, variando entre ortognaisses quartzo-feldspático e máfico, ocorrendo silimanita gnaisse, mármore, metapelito e lentes de lherzolito metamorfizadas na fácies granulito (CPRM, 2008).

4.1.3 Arenitos Conglomeráticos

Com um potencial de 0,08% que indica uma baixa suscetibilidade erosiva, esse grupo espacializa-se um pequeno trecho do sudeste da área de estudo e é composto pelas Formações Santa Tecla e Taciba.

A Formação Santa Tecla, segundo Dani (2013), constitui uma unidade sedimentar que ocorre na porção sudoeste do Escudo Sul-rio-grandense, aflorando como uma unidade de cobertura do relevo se destacando e sustentando a topografia local. A referida autora, baseando-se nos estudos de Carvalho (1932), caracteriza essa formação com uma sequência de arenitos cavernosos de coloração branca, endurecidos por silicificação ou friáveis e ferruginosos, contendo seixos de quartzo sobrepostos a folhelhos estratificados, fraturados, com cores que variam do cinza ao amarelo.

Para completar esse grupo, ainda tem a presença da Formação Taciba, que segundo França e Potter (1988) constitui o terceiro grande ciclo de granodecrescência ascendente do Grupo Itararé¹⁵ e é formada pelos membros Rio Segredo (arenito),

¹⁵ De idade Permocarbonífera, o Grupo Itararé constitui uma das mais expressivas unidades da Bacia Sedimentar do Paraná, aflorando em suas bordas sudeste o noroeste. Atinge uma espessura superior a 1000 metros na porção central da bacia, adelgaçando-se em direção as bordas norte e sul (FRANÇA E POTTER, 1988; ARAB et al., 2009).

Chapéu do Sol (diamictito) e Rio do Sul (ritmito, siltito e folhelho), apresentando um ambiente glácio-marinho.

4.1.4 Arenitos Coesos

É formado pelas rochas das Formação Guará e Botucatu e abrange a faixa centro-oeste da BHRI entre as Rochas Cristalinas do grupo 1 e os Arenitos do grupo 5. Esses arenitos apresentam um potencial erosivo de 0,12%, indicando assim, uma área com média suscetibilidade erosiva.

Correspondendo a uma sequência sedimentar constituída por arenitos finos de origem fluvial, predominando cores esbranquiçadas e amareladas, a Formação Guará teve seu processo de sedimentação no final do Jurássico. Ocorre na porção sudoeste do Rio Grande do Sul, abaixo da Formação Botucatu (Cretáceo Inferior), acima da Formação Caturrita (Triássico Inferior) e suas camadas são semelhantes às da Formação Tacuarembó no Uruguai (SCHERER et al., 2002).

Os grãos são cimentados por sílica, atribuindo a rocha uma maior resistência aos processos intempéricos e erosivos. Entretanto, existem porções pouco cimentadas ou cimentadas com óxido de ferro, que são friáveis e formam pacotes espessos de rocha alterada, apresentando potencial aos processos erosivos acelerados (CPRM, 2008). Na área de estudo, essa formação distribui-se menos elevadas do relevo.

Segundo as descrições de Scherer et al (2002) e a CPRM (2008) a Formação Botucatu é constituída por arenitos médios a finos, com grãos arredondados e bem selecionados. Apresentam coloração cinza-avermelhado e, frequentemente, ocorre a presença de cimento silicoso. Comumente, esses arenitos são encontrados entremeados a derrames vulcânicos, sendo chamados assim de “arenitos intertrápicos”¹⁶, que são altamente silicificados e constituem-se em camadas de arenitos com espessura de até 10 metros, granulometria variando de fina a grossa, predominância de quartzo e em alguns pontos ocorre uma maior concentração de argila. Na área de estudo, essa formação ocorre em um relevo formado por colinas onduladas.

¹⁶ *Intertrapps*.

4.1.5 Lamitos

Com potencial de 0,26% que indica uma área com tendência média a alta suscetibilidade erosiva, esse grupo abrange a porção sudeste em uma faixa entremeada aos Arenitos do grupo 5 e é formado pelas rochas das Formações Santa Maria, Rio do Rasto, Subgrupo Estrada Nova, além das Formações Irati, Rio Bonito e Palermo.

Segundo a caracterização da CPRM (2008), a Formação Santa Maria é composta por arenitos e arenitos conglomeráticos com pelitos subordinados, contendo elementos da flora de *Dicroidum* (Membro Passo das Tropas) e silito argiloso maciço, fauna de tetrápodes fósseis, ambiente continental correspondendo a depósitos de canais fluviais de moderada sinuosidade, de planície de inundação e lacustre (Membro Alemoa).

A Formação Rio do Rasto ocorre em contato em contato concordante com a Formação Piramboia e discordante com o subgrupo Estrada Nova. Litologicamente, é composta por camadas tabulares de arenitos finos a muito finos avermelhados, violáceos ou esbranquiçados, intercalados com argilitos ou silitos da mesma coloração. As estruturas sedimentares presentes, com estratificação cruzada, paralela e formas lenticulares de corpos arenosos, identificam a deposição de paleoambiente continental sob o clima oxidante (CPRM, 2008).

Originada no Permiano Superior, o Subgrupo Estrada Nova possui ambiente deposicional de transição entre o marinho de águas calmas passando para um ambiente com maior energia dominado pela ação das marés do topo. É formado por silitos, argilitos e folhelhos com intercalações milimétricas de arenitos muito finos que são bastante alterados. Em alguns trechos, predominam níveis mais argilosos, sem laminações evidentes de cor cinza claro e oxidações amarelo-laranja-avermelhado (SCHERER et al., 2000; 2002).

A Formação Irati, por sua vez, é composta por silitos, argilitos, calcário, marga e folhelho betuminoso, portador de répteis mesossaurídeos, ambiente marinho de costa-afora, deposição por decantação em águas calmas abaixo do nível de ação das ondas, períodos de estratificação da coluna de água e com influência de tempestades (CPRM, 2008).

Em alguns trechos dessa porção da BHRI, ocorre o afloramento da Formação Rio Bonito que é caracterizado pela presença de arenitos nas porções inferiores e

superiores e por siltitos e folhelhos, com camadas de carvão e calcário, além de algumas intercalações de arenitos na sua porção média. As camadas de carvão apresentam espessuras que variam de alguns centímetros, podendo chegar facilmente até os 2 metros (CPRM, op cit.). Corroborando com isso, Milani (1997) e Milani et al (2007) ainda definem que essa formação representa um conjunto resultante de sedimentação costeira, transicional e progressivamente “afogado” para o topo pelo mar progradante, dando origem a Formação Palermo.

Diante disso, a Formação Palermo tem como característica o predomínio de siltitos e siltitos arenosos, com coloração acinzentada ou amarelo-esverdeado. Em pontos específicos, ocorre a presença de arenitos finos a médios no topo. O seu processo de sedimentação ocorreu em um momento de subsidência acelerada que propiciou a elevação do nível relativo do mar e o nível de máxima inundação da Supersequência Gondwana I (MILANI, 1997).

4.1.6 Arenitos Coesos

Por último, o grupo dos Arenitos é composto pelas rochas das Formações Caturrita, Sanga do Cabral, Piramboia, Tupanciretã e também pelos Depósitos Aluvionares. Com maior expressividade na área de estudo, especializam-se em toda a área que vai de sul a norte, além das áreas próximas as margens dos principais rios. Com potencial de 0,49% esse grupo apresenta porções com alta a muito alta suscetibilidade erosiva.

De acordo com as discussões de Bortoluzzi (1974) e Marques (2018), a Formação Caturrita apresenta arenito predominantemente fino, porém em algumas porções, os grãos grosseiros a muito grosseiros se fazem mais presentes. Possui coloração púrpura, por vezes variando para vermelho-claro ou amarelo ferruginoso quando alterado. As estratificações são cruzadas e em alguns pontos podem ser planares ou acanaladas. O arenito é muito feldspático, o que confere a rocha um aspecto salpicado. Ainda conforme a CPRM (2008), contém tetrápodes fósseis e troncos de coníferas, apresenta ambiente continental, depósitos fluviais e deltas lacustres.

Para Medeiros (1980), essa formação pode ser separada em duas fácies, sendo uma arenosa e a outra argilosa e siltosa, semelhantes aos lamitos da Formação Santa Maria. Por possuir características fluviais, essa formação serve como um meio

de transição entre o ambiente úmido lacustre que deu origem a Formação Santa Maria e o ambiente árido que resultou no grande deserto da Formação Botucatu.

A Formação Sanga do Cabral caracteriza-se pela presença de uma base composta por conglomerados intraformacionais e arenitos conglomeráticos, mal selecionados, com estratificação cruzada acanalada e planar de pequeno e médio porte. Associadas com as litologias, ocorrem arenitos finos com laminação plano-paralela, cujas características sugerem um sistema fluvial entrelaçado (SCHERER et al., 2002; ZERFASS, 2003). Esses arenitos constituem a unidade basal do Grupo Rosário do Sul, apresentam coloração avermelhada e possuem como característica principal a ampla presença de fragmentos de mica, sendo assim denominado de “arenito micáceo”.

Scherer et al (2002) ainda sugere que acima dos arenitos fluviais são encontradas lentes de pelitos e siltitos avermelhados laminados e arenitos finos lenticulares com laminação cruzada cavalgante, representando depósitos lacustres rasos. Sobre os pelitos ocorre o retorno dos arenitos fluviais e conglomerados intraformacionais associados a arenitos finos com laminação horizontal, estruturas indicativas de fluxo superior, sugerindo um sistema fluvial entrelaçado com variações no fluxo e/ou fluvial efêmero. Ocasionalmente, ainda são encontrados arenitos finos a médios, com estratificações cruzadas de grande porte, interpretadas como de origem eólica. Essa formação abrange as porções próximo das planícies de inundação dos rios Santa Maria e Ibicuí da Armada e a área que corresponde ao alto curso do rio Ibicuí.

Ainda na discussão dos Arenitos, têm-se a presença da Formação Piramboia que é constituída por arenitos de ambiente fluvial finos a médios, siltosos, com coloração que varia do branco ao avermelhado, geometria lenticular bem desenvolvida, apresentando estratificações cruzadas acanaladas de baixo ângulo e sigmodais, bem como, estratificações cruzadas planares e laminações plano-paralelas (CPRM, 2008). É importante salientar que os arenitos dessa formação são em geral pouco cimentados, sendo raras as porções com cimento silicoso e, quando existentes, mantêm porções elevadas com afloramentos de rochas no topo das colinas.

O pacote litológico que constitui a Formação Tupanciretã é formado por arenitos conglomeráticos, conglomerados basais e finas camadas de argila. De forma geral, apresentam coloração que varia do vermelho ao amarelo, com granulação fina

a média, mal selecionados e constituídos essencialmente de quartzo, feldspato alterado e caulinita. Ademais, são friáveis, maciços e por vezes, endurecidos por silicificação epigenética, sendo o óxido de ferro o cimento mais comum. Entretanto, podem exibir estratificação plano-paralela e cruzada do tipo fluvial (COULON et al., 1973; GASS et al., 2009).

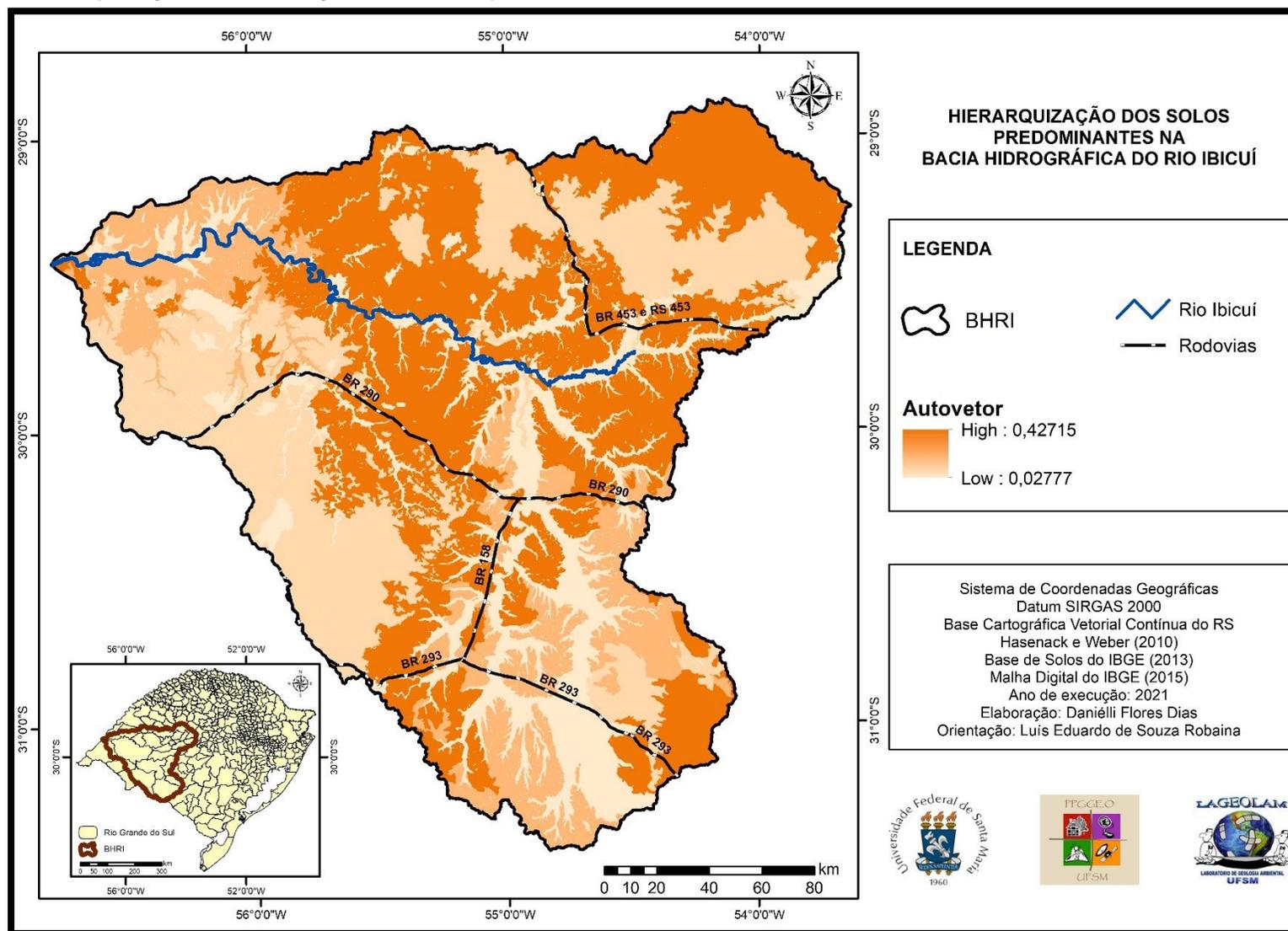
Por último, as litologias mais recentes identificadas na BHRI correspondem aos Depósitos Aluvionares e são encontradas nas planícies de inundação dos principais cursos d'água, como nas margens dos rios Ibicuí, Cacequi e Santa Maria. Conforme a CPRM (2008), os Depósitos Aluvionares (ou depósitos recentes) e os de barra de meandro são compostos por areias grossas, areias arcoseanas, argila, cascalhos, conglomerados e siltes e, são observados em um relevo de planícies onde as altitudes não ultrapassam 100 metros e as declividades são inferiores a 2%.

4.2 SOLOS PREDOMINANTES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUI

Caracterizados como sendo um recurso natural, os solos são lentamente renováveis e podem ser encontrados sob diferentes condições no meio ambiente. A desagregação e a desintegração das rochas, associadas a diversidade geológica e climática dão origem a variados tipos de solos. Sua identificação é realizada a partir do “perfil”, que mostra a sequência vertical das camadas, que são chamadas de horizontes pedogenéticos e são caracterizadas e diferenciadas pela cor, espessura e textura.

Para o estudo da suscetibilidade erosiva da BHRI, os solos da área estudo foram agrupados, hierarquizados e caracterizados (Figura 14), segundo grau de importância que cada um responde frente aos processos erosivos: Grupo 1 - Gleissolos, Planossolos e Vertissolos; Grupo 2 - Cambissolos e Neossolos; Grupo 3 - Chernossolos, Luvisolos e Plintossolos; Grupo 4 - Latossolos e Nitossolos; Grupo 5 - Argissolos.

Figura 14 - Hierarquização e distribuição dos solos predominantes na área de estudo.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2013, 2015) e elaborado pela autora (2021).

4.2.1 Grupo 1

Formado pelos Gleissolos, Planossolos e Vertissolos e com potencial correspondendo a 0,02% significando que, considerou-se, relevativamente, muito baixa suscetibilidade erosiva na bacia. Esse grupo de solos abrange as áreas próximas aos principais cursos d'água, além de pequenas porções no noroeste e sudeste da bacia, intercalando-se com os solos do Grupo 3.

Conforme a EMBRAPA (2006) e Oliveira et al (2007), são solos hidromórficos, compostos por material mineral, apresentam horizonte glei e que pode ser um horizonte subsuperficial (C, D ou E) ou superficial "A". O horizonte superficial apresenta cores que variam do cinza ao preto e são muito mal drenados em condições normais. Apesar de ser menos resistente a penetração, apresenta tendências de compactação em subsuperfície, indicando uma pequena possibilidade de erosão superficial por saturação, embora esse tipo de solo seja um dos menos suscetíveis a esse tipo de erosão.

Segundo as discussões de Suertegaray et al (2001), os Gleissolos¹⁷ encontram-se constante ou periodicamente saturados por água, desde que sejam drenados artificialmente. A água se conserva estancada internamente ou a saturação acontece por fluxos laterais nos solos. Dessa forma, são caracterizados pela forte gleização, em razão da umidade redutora, potencialmente livre de oxigênio dissolvido, decorrente da saturação da água por um longo período, acompanhando a alta demanda de oxigênio pela atividade biológica.

Posteriormente, tendo como base os apontamentos de Oliveira et al (2007) e Alves e Robaina (2010), os Planossolos¹⁸ são caracterizados por serem solos minerais imperfeitamente ou mal drenados, com evidências de processos de redução, com ou sem segregação de ferro, que se manifesta nos atributos de cor, expressão de desargilização intensa evidenciada pela nítida diferenciação entre o horizonte diagnóstico "B" plânico e os horizontes precedentes "A" ou "E". Apresentam mudança textural abrupta, que os tornam imperfeitamente drenados.

Para Streck et al (2002), caracterizam-se por serem solos imperfeitamente ou mal drenados, encontrados em áreas de várzea, com relevo plano a suavemente ondulado. Apresentam perfis com sequência de horizontes "A-E-Bt-C", com o

¹⁷ Lembra o processo de gleização (redução do ferro) em ambientes alagadiços.

¹⁸ Lembram as áreas planas.

horizonte “A” de coloração mais escura e o horizonte “B” com cores mais claras, sendo ambos com textura mais arenosa apresentando mudança súbita para o horizonte “Bt” que é mais argiloso. Assim, essa mudança dos horizontes mais superficiais (A+E) para o horizonte “Bt” é caracterizada como uma mudança textural abrupta, que distingue os Planossolos dos Gleissolos.

Os Vertissolos¹⁹ são solos minerais não hidromórficos ou com séria restrição temporária a percolação de água, com 30% ou mais de argila ao longo do perfil e que apresentam pronunciada mudança de volume em conformidade com a variação do teor de umidade (SUERTEGARAY, 2006). Para a autora, a maior parte desses solos são utilizadas como pastagens de boa qualidade e, em áreas menos extensas, com culturas anuais, como trigo, milho e sorgo, predominantes do bioma Pampa.

Por sua vez, Guadagnin e Trentin (2014) associam-nos as áreas planas onde são cultivados arroz irrigado, em terrenos próximos a rios e banhados. As características morfológicas mostram a presença de fendas de retração largas e profundas, que se expandem desde o topo do perfil nos períodos secos, superfícies de fricção (*slickensides*) em seções mais internas do perfil portadoras de unidades estruturais grandes e inclinadas em relação ao prumo do perfil, que assim, apresentam baixo risco de erosão, uma vez que se desenvolvem em terrenos bastante úmidos.

Para concluir, Streck et al (2002) lembra que os Vertissolos são solos imperfeitamente ou mal drenados, encontrados em áreas planas a suavemente onduladas. Apresentam perfis pouco profundos de cores escuras ou cinzentas, com horizonte vértico e pequena variação de textura ao longo do perfil.

4.2.2 Grupo 2

Formado pelos Cambissolos e Neossolos e com potencial de 0,07%, apresentam na pesquisa, uma relativa, baixa suscetibilidade erosiva. Espacialmente forma uma grande área do oeste e sudoeste da bacia, trechos menores do sudeste e nordeste, além de algumas porções próximas ao curso dos rios, especialmente o rio Ibicuí e seus formadores.

¹⁹ Lembra solos que modificam suas características físicas por expansão e contração.

Em razão de seu fraco estruturamento e maturidade, os Cambissolos²⁰ são classificados na literatura como suscetíveis a erosão. Caracterizam-se por serem solos minerais com horizonte “B” incipiente (Bi) subjacente ao horizonte “A” de qualquer tipo, exceto o hístico com 40 cm ou mais de espessura, ou o horizonte “A” chernozêmico, quando o “B” incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases altas. Devido a heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características desses solos variam muito de um local para outro (CPRM, 2008).

Conforme salienta Queiroz Neto (2001), essa classe suporta desde solos fortemente a imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, com cores que variam de bruno a bruno amarelada até vermelho-escuro e de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração coloidal, apresentando uma baixa tendência de erosão linear. Para o autor, os Cambissolos ainda se classificam em:

a) Cambissolos Háplicos Tb Distróficos (CXbd): são os solos predominantes de regiões serranas, normalmente associados aos Latossolos vermelho-amarelo, no qual se diferenciam pela pouca espessura do horizonte “B” dos Cambissolos em áreas de relevo montanhoso; ou ainda associados aos solos litólicos nas áreas de relevo mais acidentado das escarpas serranas. Os solos distróficos possuem saturação por base menor que 50% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte “B”, horizonte “A” moderado com textura média argilosa a argilosa de baixa atividade, bem drenado e abancado em um relevo montanhoso.

b) Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos (CXbe): são constituídos por elevadas quantidades de argila e silte e caracterizam-se por apresentar saturação por base maior que 50% em boa parte dos primeiros 100 cm do horizonte “B”, horizonte “A” moderado com textura média argilosa a argilosa de baixa atividade, assentados em um relevo plano, com menor possibilidade de erosão linear.

Por conseguinte, os Neossolos²¹ encontram-se em áreas mais planas a suavemente onduladas, apresentando abaixo do horizonte “A”, um horizonte arenoso (horizonte E) sobre um horizonte argiloso (Bt). Em conformidade com a rocha-mãe, normalmente são ácidos, pobres em nutrientes e suscetíveis a erosão, mas não a linear, que é considerada baixa nesse tipo de solo, embora saibamos que todo solo

²⁰ Lembra um solo em processo incipiente de formação.

²¹ Lembra solos novos, pouco desenvolvidos.

desprovido de vegetação é sempre suscetível aos processos erosivos (BRAGA et al., 2004).

De formação muito recente e encontrados nas mais diversas condições de relevo e drenagem, Streck et al (2002) salienta que, no estado do Rio Grande do Sul os Neossolos foram distinguidos em: Neossolos Litólicos, quando apresentam um horizonte “A” ou “O” sobre a rocha parcialmente alterada (horizonte C) ou a rocha inalterada (camada R); Neossolos Flúvicos, quando o horizonte “A” está assentado sobre os sedimentos fluviais estratificados; Neossolos Quartzarênicos, quando o horizonte “A” está situado sobre os sedimentos muito arenosos, constituídos por grãos soltos de quartzo.

4.2.3 Grupo 3

Representado pelos Chernossolos, Luvisolos e Plintossolos, esse grupo apresenta um potencial de 0,15% que caracteriza uma suscetibilidade erosiva média em relação aos demais solos da bacia. Espacializam-se, predominantemente, nas porções noroeste e sudoeste da BHRI, além de um pequeno trecho na porção central da área de estudo, intercalando-se com os solos do Grupo 1.

Os Chernossolos²² caracterizam-se por conter um horizonte escuro, rico em matéria orgânica, boa espessura e um alto teor de cálcio. Ocorrem em áreas de pradarias, sob vegetação de gramíneas, com clima frio e semiárido. São solos de desenvolvimento não muito avançado, originários de rochas ricas em cálcio e magnésio, além da presença de minerais esmectitos que conferem alta atividade da argila e eventual acumulação de carbonato de cálcio, promovendo reação aproximadamente neutra ou moderadamente ácida a fortemente alcalina, com enriquecimento em matéria orgânica.

Zaroni e Santos (2006) ainda definem que os Chernossolos são classificados pela presença de horizonte diagnóstico superficial “A” chernozêmico de alta saturação por bases, teores elevados de carbono orgânico e de carbonato de cálcio acima de um horizonte “Bt” ou com caráter argilúvico e argila de alta atividade, em conformidade com os critérios definidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Os autores ainda ressaltam que devido as suas características físicas e por serem

²² Lembra solos escuros com alta fertilidade química.

pouco profundos, podem apresentar alguma suscetibilidade aos processos erosivos lineares.

Por sua vez, os Luvisolos²³ são solos pouco profundos, bem a imperfeitamente drenados, onde o horizonte “B” pode ser do tipo textural ou nítico e apresentam boa fertilidade natural. Com cores marcantes, que variam do vermelho ao amarelo, possuem caráter eutrófico, significando a alta saturação por bases nos horizontes subsuperficiais, favorecendo o enraizamento em profundidade. Ainda nesses solos, ocorre a presença de minerais primários facilmente intemperizáveis (STRECK et al., 2002; TRENTIN E ROBAINA, 2006).

Os Plintossolos²⁴, correspondem a solos que apresentam horizonte plíntico, lipoplíntico ou concrecionário, provenientes da segregação localizada de ferro, que atua como agente de cimentação (EMBRAPA, 2006). Uma vez que são formados sob condições de restrição à percolação da água ou sujeitos aos efeitos temporários do excesso de umidade, são normalmente imperfeitos ou mal drenados. Assim, Paula (2006) corrobora salientando que parte dos solos dessa classe, tem ocorrências relacionadas a terrenos de várzeas, áreas com relevo plano ou suavemente ondulado e, com menor frequência, ondulados em zonas geomórficas de baixada. Ocorrem também em terços inferiores de encostas ou áreas de surgências, sob condições de oscilação do lençol freático, seja de alagamentos ou de encharcamento periódicos por efeito de restrição a percolação ou escoamento de água.

4.2.4 Grupo 4

Esse grupo é formado pelos Latossolos e Nitossolos que apresentam um potencial de 0,32% caracterizando áreas com alta suscetibilidade erosiva. Ocupam a porção norte da bacia, além de alguns trechos a nordeste da área de estudo.

Segundo Streck et al (2002), os Latossolos²⁵ são solos bem drenados, normalmente profundos a muito profundos, apresentando uma sequência de horizontes “A-Bw-C”, onde o horizonte “Bw” é do tipo latossólico. Esses solos têm pouco incremento de argila com a profundidade e apresentam transição difusa ou

²³ Significa acumulação subsuperficial de argila.

²⁴ Lembra a ocorrência de plintita, ou seja, segregações de ferro.

²⁵ Lembra solos muito profundos e homogêneos altamente intemperizados.

gradual entre os horizontes, por isso, mostram um perfil muito homogêneo, sendo difícil diferenciar os horizontes.

Por outro lado, Oliveira (2008) salienta que os Latossolos com textura franco-arenosa ou franca, mas com teor de argila inferior a 20%, são bastante erodíveis, apresentando, em igualdade de condições de declive uso, menor resistência a erosão, do que os Latossolos de texturas mais finas.

Os Nitossolos²⁶ são profundos, que apresentam em seu perfil uma sequência de horizontes “A-B-C”, onde o horizonte “B” é do tipo nítico (Bn). Sua aparência é muito semelhante aos Latossolos, pois possuem pouco incremento de argila com a profundidade e transição difusa ou gradual entre os horizontes e com isso, mostram um perfil muito homogêneo, onde é difícil distinguir os horizontes. O que diferencia os Nitossolos é o horizonte “B” com uma estrutura mais desenvolvida, na forma de blocos angulares e/ou subangulares, com revestimento brilhante (cerosidade), característico do horizonte “Bn” (STRECK et al., 2002).

Possuem coloração variando em tons de vermelho, argilosos e muito argilosos, com estruturas em blocos fortemente desenvolvidos, derivados de rochas básicas e ultrabásicas e com diferenciação de horizontes pouco notável. Os Nitossolos correspondem ao que se denominava anteriormente de “Terra Roxa Estruturada” e com grande importância agrícola, fazendo com que esses solos apresentem alto risco de erosão (SUERTEGARAY, 2001; ENRIQUÉZ, 2012; SCCOTI et al., 2013).

4.2.5 Grupo 5

Por fim, o último grupo é formado pelos Argissolos²⁷ que apresentam um potencial de 0,42%, conferindo uma área com mais alta suscetibilidade erosiva na bacia. Esse grupo é o mais expressivo na BHRI, abrangendo os extremos nordeste e sudeste, além de praticamente toda a faixa que vai de sudoeste a nordeste da área de estudo.

Esse conjunto, segundo Oliveira (2008), corresponde aos solos minerais, que apresentam como característica diferencial a presença de horizonte “Bt” de argila de atividade baixa ou alta, conjugada com saturação por bases baixas ou caráter alítico. Para o autor, o horizonte “Bt” encontra-se localizado imediatamente abaixo de

²⁶ Lembra agregados nítidos e brilhantes no horizonte “B”.

²⁷ Deriva da presença de um horizonte subsuperficial mais argiloso no perfil.

qualquer tipo de horizonte superficial, exceto o hístico, sem apresentar, no entanto, as condições instituídas para serem encaixados nas classes dos Gleissolos, Luvisolos, Planossolos e/ou Plintossolos.

Para Zaroni e Santos (2006), esses solos são de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, com coloração avermelhada ou amarelada e, mais raramente, brunadas ou acinzentadas. A textura muda de arenosa para argilosa no horizonte “A” e de média a muito argilosa no horizonte “Bt”, sempre ocorrendo um aumento de argila daquele para esse. Essa relação, quando alcança valores mais elevados, indica solos cada vez mais erodíveis, considerando as mesmas condições de cobertura vegetal e declividade.

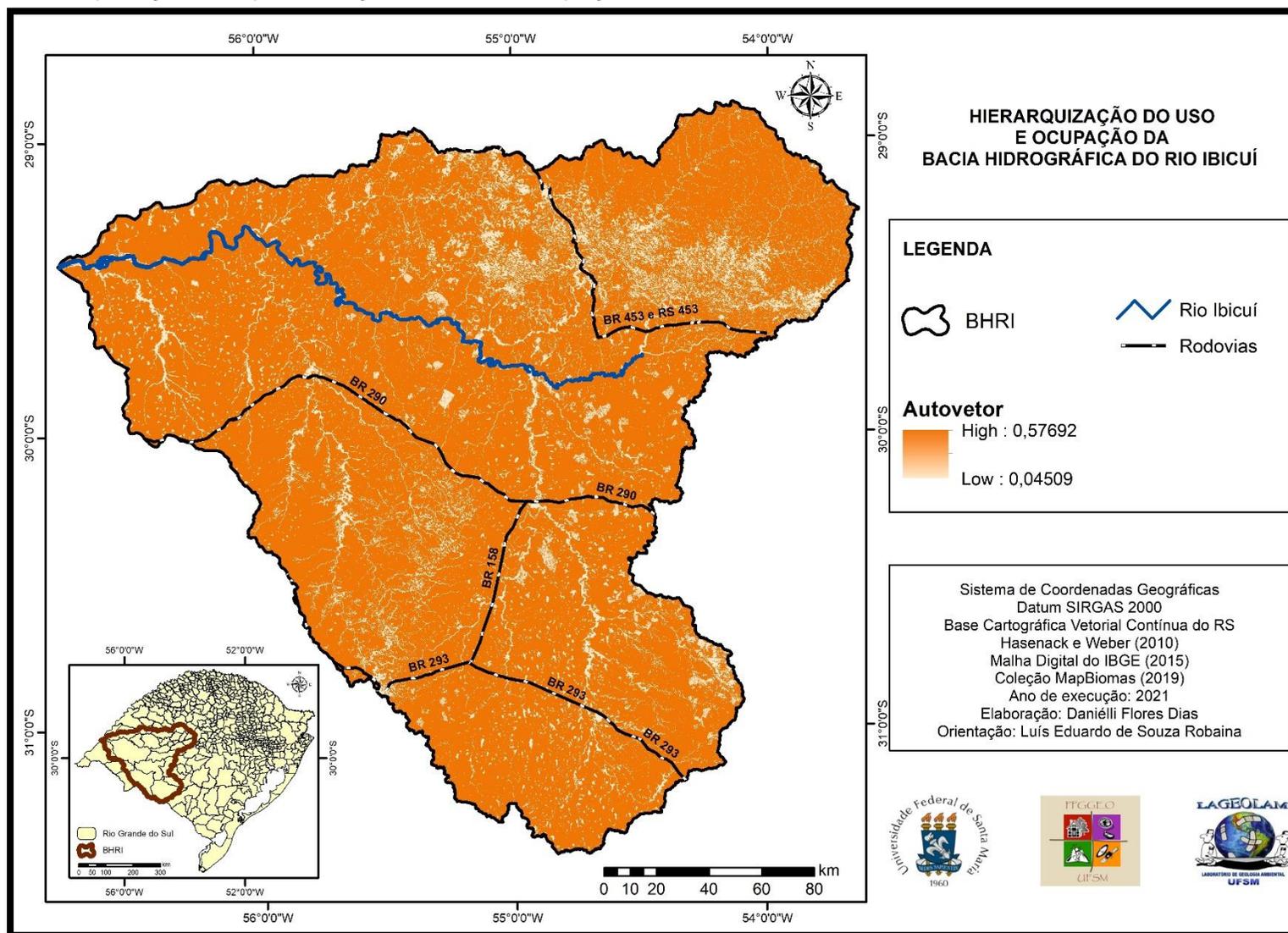
Assim, os autores definem que são suscetíveis a erosão, os Argissolos que apresentam mudança textural abrupta, os quais, no nível de subordem, são identificados pelo termo vermelho-amarelo distrófico abruptico, mas que de forma, conferem uma média a alta suscetibilidade a erosão linear. Diante disso, o horizonte “Bt” pode ser identificado em variadas profundidades, o que implica que entre solos de uma mesma subordem e em mesmas condições de relevo e uso, pode haver condutas variadas, em conformidade com a espessura.

4.3 CONFIGURAÇÃO ATUAL DO USO E OCUPAÇÃO

A caracterização do uso e ocupação na BHRI não tem como objetivo abordar um minucioso resgate histórico e evolutivo das atividades desenvolvidas, mas sim salientar como se dá a configuração do uso e ocupação na área de estudo (Figura 15) e explicar um pouco sobre cada classe definida.

A primeira classe a ser caracterizada corresponde aos “Corpos d’água” que representa os açudes e reservatórios que são utilizados para a irrigação e a dessedentação dos animais, além dos segmentos de canais da rede hidrográfica da BHRI. Importante salientar que essa é a única classe a não ser ponderada, portanto, seu potencial erosivo é de 0,00%, visto que essa classe de uso não é vinculada a definição da suscetibilidade erosiva da área de estudo.

Figura 15 - Hierarquização e espacialização do uso e ocupação da BHRI.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2013, 2015) e elaborado pela autora (2021).

Os Campos apresentam potencial de 0,42% que confere uma, relativa, alta suscetibilidade erosiva na bacia. Predominam nas porções oeste e em alguns trechos do norte e sudeste, ocupando as áreas que são pouco propícias para agricultura, pois de forma geral, estão atreladas as áreas onde os solos são mal desenvolvidos ou até mesmo associados as porções onde ocorrem os afloramentos de rocha. Assim, essa classe de uso é utilizada principalmente para a prática da pecuária, sendo os rebanhos de bovinos e ovinos, respectivamente, aqueles com maior expressividade na BHRI.

Ainda é importante salientar e conforme já foi discutido por Scoti (2017), na porção sudoeste da BHRI próximo a Serra do Caverá, a presença dos campos estão associados a solos bem desenvolvidos arenosos e friáveis, que são classificados como Neossolos Quartzarênicos e/ou Latossolos arenosos, sendo esse último, muito suscetível a erosão linear.

Com um potencial de 0,57% que indica a classe de uso, relativamente, mais suscetível, as Lavouras vêm crescendo consideravelmente ao longo das últimas décadas. Estudos anteriores e observações realizadas ao longo dos trabalhos de campo, constataram que áreas que anteriormente eram utilizadas para a criação de gado, atualmente estão ocupadas por extensas lavouras de soja, que no período de entressafra servem como áreas de pastagem, substituindo o modo tradicional da criação de gado. As áreas de lavouras também estão inseridas nas porções junto as margens dos principais rios e arroios, onde ocorre o plantio de arroz, devido a disponibilidade hídrica e a fertilidade dos solos.

Vale lembrar ainda que as lavouras estão inseridas em áreas com solos bem desenvolvidos, como os Argissolos e Latossolos e ainda, as formas de relevo (predomínio de áreas planas) permitem uma ampla utilização da mecanização agrícola, que são o potencializador dos processos erosivos. Também merece salientar que existem grandes cultivos comerciais que geram inúmeros resíduos tóxicos que são transportados para os rios e arroios da BHRI. Essa classe de uso espacializa-se no sul da bacia e com maior expressividade na faixa que vai de noroeste a nordeste da área de estudo.

A classe das Florestas ou também denominada por Vegetação arbóreo-arbustiva, distribui-se nas porções nordeste (áreas do rebordo e início do Planalto da Serra Geral), sudoeste (cornijas e a Serra do Caverá), além das margens dos principais rios e arroios e é composta por vegetação campestre e vegetação arbórea (mata ciliar ou de galeria), além das áreas de encostas íngremes de morros, morrotes

e cornijas. Possui potencial de 0,08%, o que confere uma baixa suscetibilidade erosiva.

Ainda que apresente uma baixa expressividade em área ocupada, a classe da Silvicultura possui potencial de 0,13% que indica uma condição média de suscetibilidade erosiva, tendo uma importância considerável na bacia. Nessas áreas ocorre a predominância do *Eucalyptus sp.* e *Pinus sp.* e conforme foi observado durante os trabalhos de campo, as áreas com cultivos de espécies exóticas são destinadas para fins comerciais, sendo poucos os casos em que são utilizadas como “quebra ventos” e para a proteção do gado nas pequenas propriedades.

Ademais, as áreas com silvicultura ocasionam muitas perdas ambientais ao local em que estão inseridas, pois geram grandes “desertos verdes”, onde nenhuma outra espécie consegue se desenvolver em consórcio, além de serem grandes usuários de águas subterrâneas. O impacto ainda é maior na BHRI, pois nessas áreas, locais naturalmente compostos por campos, acabam sendo florestados, ocasionando perdas ecológicas. A única exceção se deve ao município de Rosário do Sul, que destina as áreas anteriormente ocupadas para agricultura para a prática da silvicultura. Dessa forma, não ocorre a necessidade da apropriação de áreas com cobertura vegetal nativa, mantendo assim, os campos destinados para a pecuária que é uma atividade tradicional no município (SCCOTI, 2017; DIAS, 2017; DIAS et al., 2020).

Por outro lado, Scoti (2017) conclui que a silvicultura se apresenta como uma alternativa econômica as propriedades e aos municípios inseridos no interior da BHRI, visto que a sua comercialização gera fundos monetários aos municípios em questão. Além disso, as áreas com florestamento, ocupam principalmente os locais onde solos são friáveis ou mal desenvolvidos.

Por fim, as Áreas Urbanas localizadas no interior da BHRI apresentam potencial de 0,04%, consideradas na pesquisa como muito baixas suscetibilidades. Estão representadas por 15 cidades: Alegrete, Cacequi, Dom Pedrito, Jaguari, Manoel Viana, Mata, Nova Esperança do Sul, Quevedos, Rosário do Sul, Santana do Livramento, Santiago, São Francisco de Assis, São Pedro do Sul, São Vicente do Sul e Unistalda. De forma geral, essas cidades apresentam porte pequeno a médio, mas mesmo assim, geram impactos negativos, com o lançamento de águas servidas diretamente na hidrografia, além do acúmulo e transporte de lixo sólido para as margens e o leito dos rios e arroios.

5 SUSCETIBILIDADE EROSIVA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ

O último capítulo desse trabalho corresponde ao mapeamento final da área de estudo. Para a realização dessa etapa, realizou-se uma ponderação e um cruzamento automatizado dos fatores condicionantes (relevo, solos, litologia e uso e ocupação), dando origem ao mapa da suscetibilidade erosiva da BHRI. Para um melhor entendimento dessa caracterização, a suscetibilidade erosiva foi dividida em cinco classes, assim discriminadas: Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta (Tabela 12 e Figura 16)

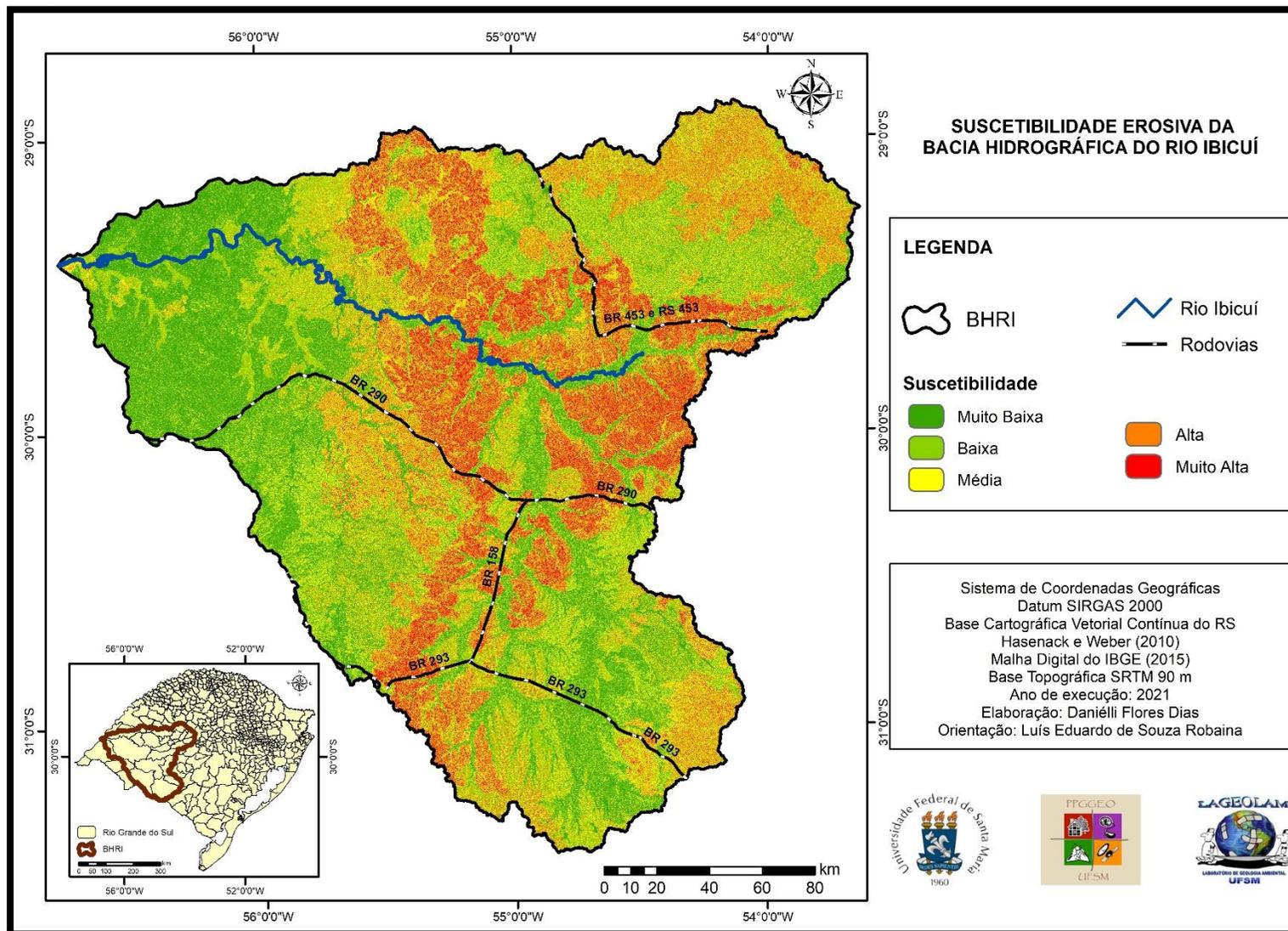
Tabela 12 - Quantificação das classes de suscetibilidade erosiva na BHRI.

Suscetibilidade	Km²	%
Muito Baixa	9.353,99	19,84
Baixa	12.048,51	25,55
Média	13.071,32	27,74
Alta	8.570,97	18,18
Muito Alta	4.097,09	8,69
Total	47.141,88	100

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A classe de suscetibilidade “Muito Baixa” corresponde a 19,84% do total da área da bacia e espacializa-se, predominantemente, nas áreas próximas dos rios e arroios, caracterizando um relevo de áreas planas. Nessa porção, as litologias são formadas por depósitos aluvionares e os solos são identificados como hidromórficos, do tipo Gleissolos e Planossolos. Além disso, as altitudes são inferiores a 100 metros e as declividades não ultrapassam os 2%, indicando que nessas áreas ocorre a atuação dos processos de acumulação.

Figura 16 - Mapa da suscetibilidade erosiva da BHRI.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015) e elaborado pela autora (2021).

Representando 25,55% da área total da bacia, a classe de suscetibilidade “Baixa” abrange praticamente as mesmas porções da classe anterior, entretanto, representa as áreas com relevo variando de áreas planas até associação de morros e morrotes. Nessa porção da bacia, as litologias são representadas por arenitos (principalmente da Formação Caturrita) e rochas cristalinas (vulcânicas fácies Alegrete e Gramado). Além disso, são encontrados diversos tipos de solos nessa área - Gleissolos, Planossolos, Vertissolos, Cambissolos, Neossolos, Chernossolos, Luvisolos e Plintossolos. Por fim, as altitudes variam de 100 a 300 metros e as declividades entre 2% e 45%.

A classe de suscetibilidade “Média” espacializa-se em 27,74% do total da área de estudo, sendo assim, a classe de suscetibilidade mais expressiva da BHRI. Abrange as porções nordeste, sudeste, além de uma ampla faixa que vai de norte a sul da bacia e caracteriza-se por apresentar um relevo que varia de colinas onduladas até associação de morros e morrotes. As litologias são formadas por arenitos (principalmente da Formação Botucatu) e rochas cristalinas (principalmente metamórficas e granitoides do Escudo Sul-rio-grandense) e os solos predominantes são tipo Argissolos, Latossolos e Nitossolos. Por fim, as altitudes são superiores a 200 metros e as declividades variam entre 5% e 45%.

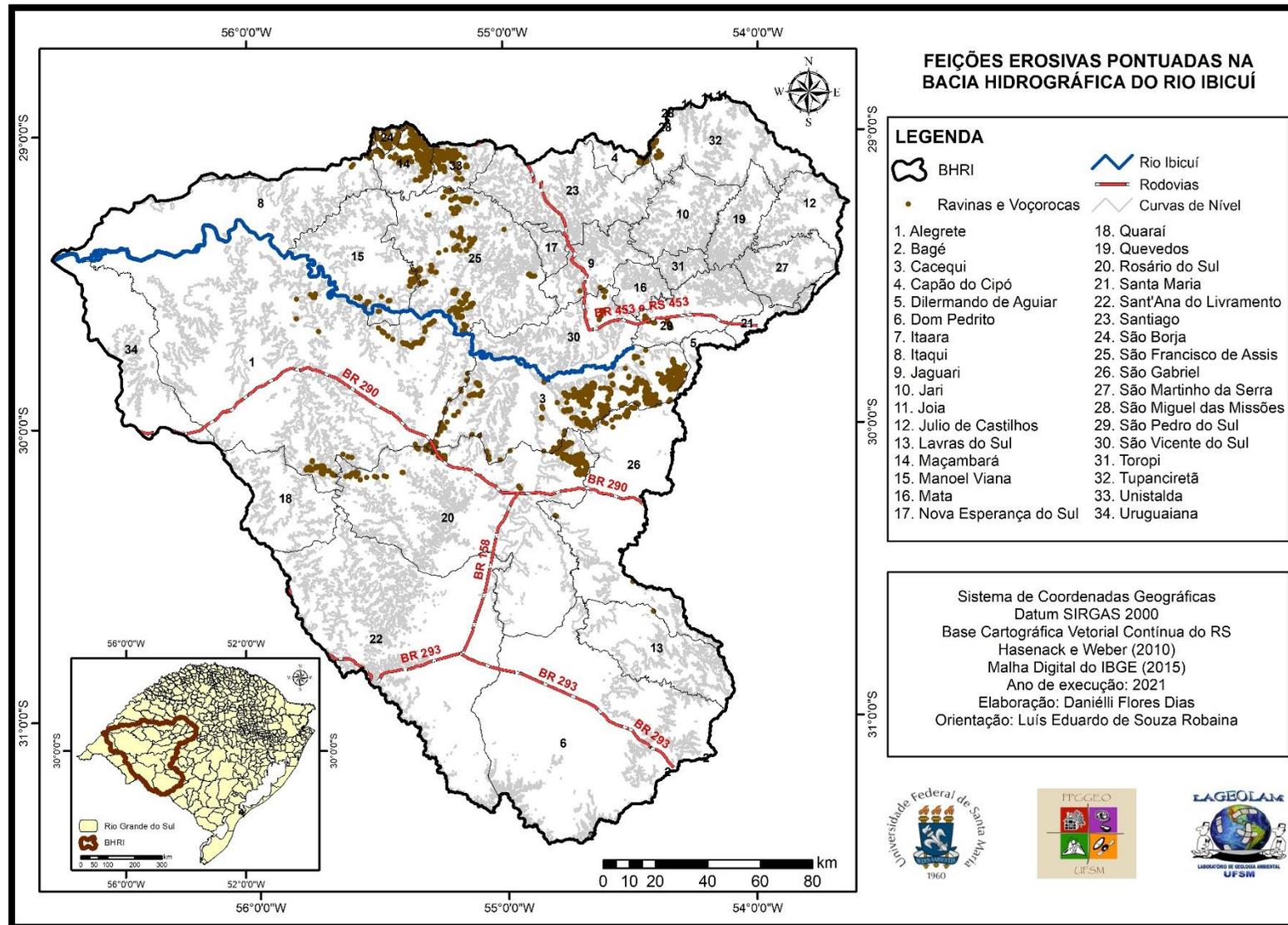
Espacializando-se em 18,18% do total da área de estudo, a classe de suscetibilidade “Alta” abrange uma faixa que vai de sudoeste a norte, além de alguns trechos na porção sudeste e nordeste da bacia, que caracterizam um relevo predominante de colinas onduladas, com declividades que variam entre 5% e 15% e altitudes superiores a 200 metros. As litologias dessa classe são compostas por arenitos das Formações Botucatu, Guará e Piramboia, que indicam alta suscetibilidade e os solos são caracterizados como profundos do tipo argissolos, Latossolos e Nitossolos.

Por fim, a classe de suscetibilidade considerada como “Muito Alta” representa 8,69%, sendo assim, a classe de suscetibilidade menos expressiva na área de estudo. Espacializa-se nas mesmas porções da classe anterior, em um relevo de colinas onduladas, com declividades predominantes entre 5% e 15% e altitudes superiores a 200 metros. Sua litologia é composta por arenitos eólicos e fluviais das Formações Botucatu, Guará, Piramboia e Tupanciretã e os solos são profundos e bem desenvolvidos do tipo argissolos, latossolos e nitossolos.

Com o objetivo de caracterizar com uma maior riqueza de detalhes, realizou-se um levantamento das feições presentes na área de estudo. Sendo assim, foram identificados 2215 processos erosivos lineares do tipo ravinas e voçorocas, que se distribuem predominantemente nos seguintes municípios: Alegrete, Cacequi, Capão do Cipó, Itaqui, Jaguari, Maçambará, Manoel Viana, Rosário do Sul, São Borja, São Francisco de Assis, São Gabriel, São Pedro do Sul, São Vicente do Sul, Tupanciretã e São Pedro do Sul, conforme mostra a Figura 17.

Durante o processo de vetorização das feições erosivas concluiu-se que o município de Cacequi é aquele que concentra o maior número de processos, com um total de 698, que representa 31,51% do total das ravinas e voçorocas da BHRI. Além disso, ao longo dos trabalhos de campo e também pelo auxílio das imagens de satélite do *Basemap* do ArcGIS, pode-se observar onde ocorrem as ravinas e voçorocas e se elas estão associadas ou não a rede de drenagem.

Figura 17 - Espacialização das ravinas e voçorocas identificadas na área de estudo.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015) e elaborado pela autora (2021).

A partir dessas discussões, são apresentados alguns mosaicos com fotografias e a descrição de alguns pontos observados durante os trabalhos de campo realizados no decorrer da pesquisa e que se localizam em áreas de suscetibilidade alta e muito alta.

Conhecida popularmente como “Voçoroca do Areal”, essa feição se localiza nas margens de uma estrada de terra no interior do município de Cacequi, próximo à sede da Estância do Repouso, conforme apontado por Cabral (2004) e Rademann (2019). Caracteriza-se por apresentar uma profundidade por volta de 25 metros, afloramentos de arenitos fluviais da Formação Piramboia, solos profundos do tipo argissolos e latossolos, conectada à rede de drenagem e como pode ser observado na Figura 18, tem a silvicultura como uma das atividades de controle e recuperação.

Figura 18 - Voçoroca localizada no interior do município de Cacequi.



A voçoroca abaixo (Figura 19) localiza-se na rodovia de acesso ao município de Cacequi, próximo ao rio Ibicuí e apresenta como características marcantes, áreas com depósitos de areias, solos profundos e afloramentos de arenitos da Formação Piramboia. Nessa área, ainda se observa a presença de anfiteatros com vales estreitos e a formação de um cânion, indicando que ocorre um controle estrutural.

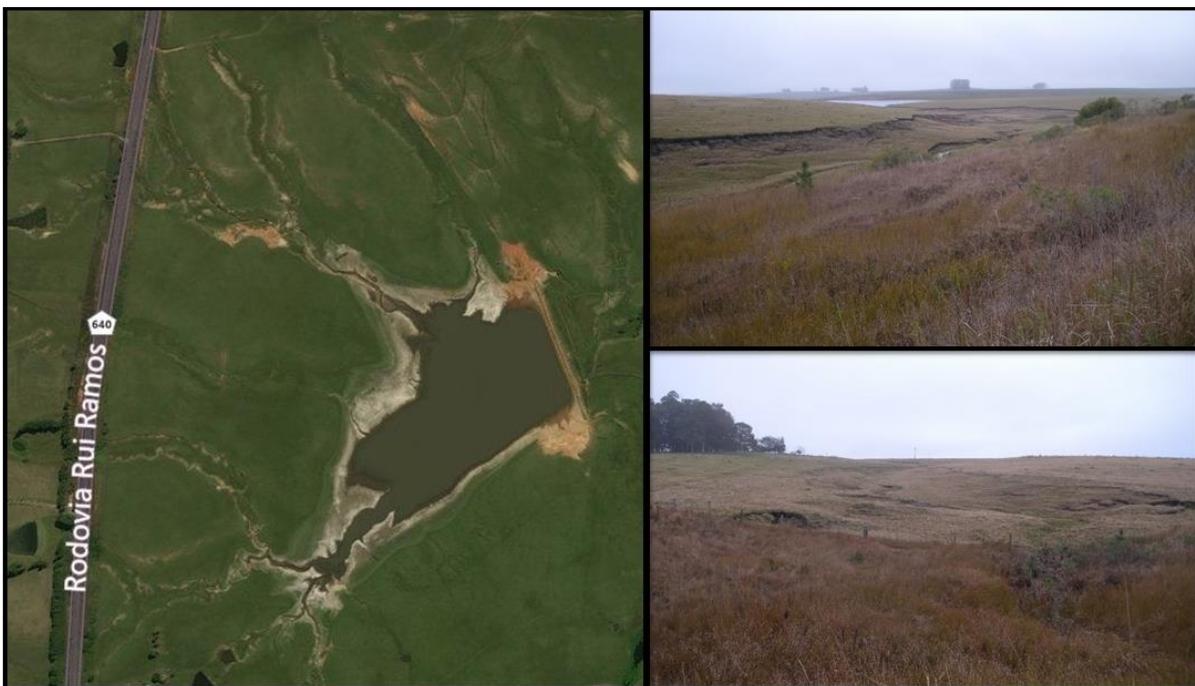
Figura 19 - Voçoroca localizada na estrada de acesso ao município de Cacequi.



Fonte: Trabalho de campo (2018).

Também localizada na rodovia que dá acesso ao município de Cacequi, essa feição caracteriza-se por ser uma ravina com fundo largo e vegetado, com afloramentos de arenitos da Formação Sanga do Cabral. Conforme mostra a Figura 20 e as observações feitas em campo, pôde-se concluir que a estrada contribuiu para o início da erosão e a mesma, avança mais rápido horizontalmente do que verticalmente.

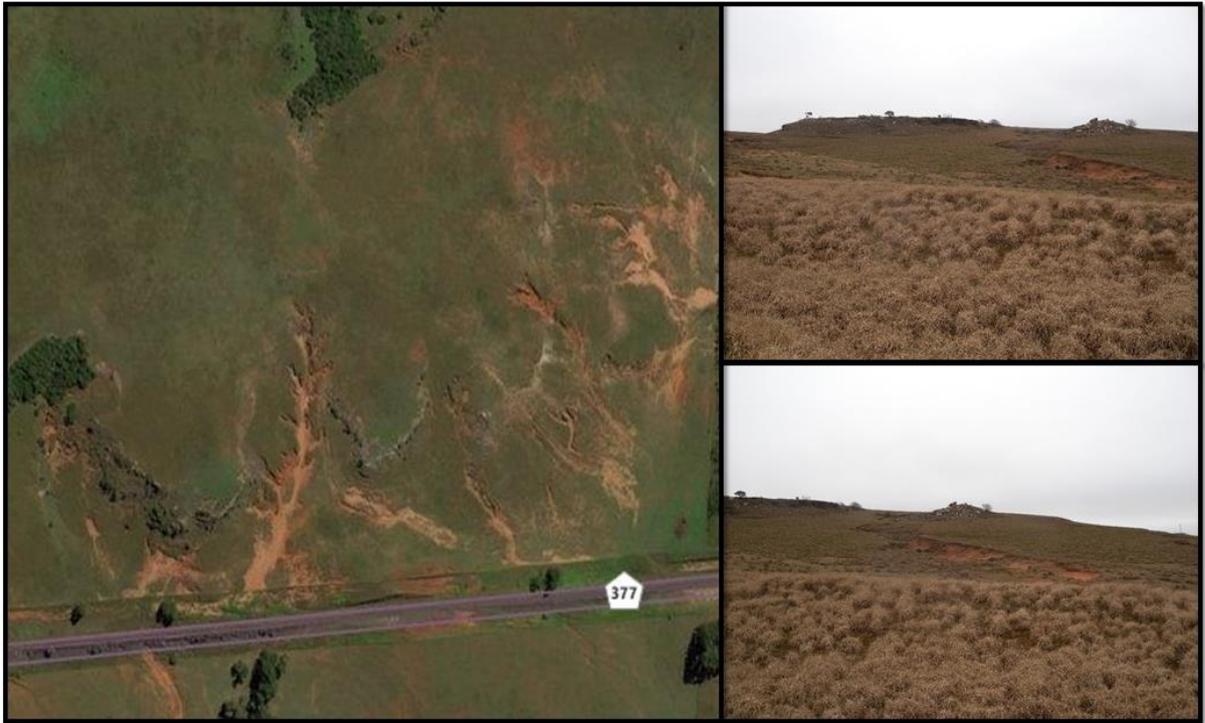
Figura 20 - Ravina próximo à rodovia de acesso ao município de Cacequi.



Fonte: Trabalho de campo (2018).

A feição abaixo representa uma ravina (Figura 21) que se localiza logo após o entroncamento com a estrada que vai em direção a cidade de São Francisco de Assis. Nesse processo erosivo, observa-se a presença de degraus de rochas mais resistentes na base e afloramentos de rochas oriundas da Formação Guará.

Figura 21 - Ravina localizada na estrada de acesso ao município de Manoel Viana.



Fonte: Trabalho de campo (2018).

Localizada próximo a uma estrada de terra do interior do município de São Francisco de Assis, essa feição caracteriza-se por ser uma ravina rasa (Figura 22) e bem dendrítica, seguindo as porções convergentes da encosta.

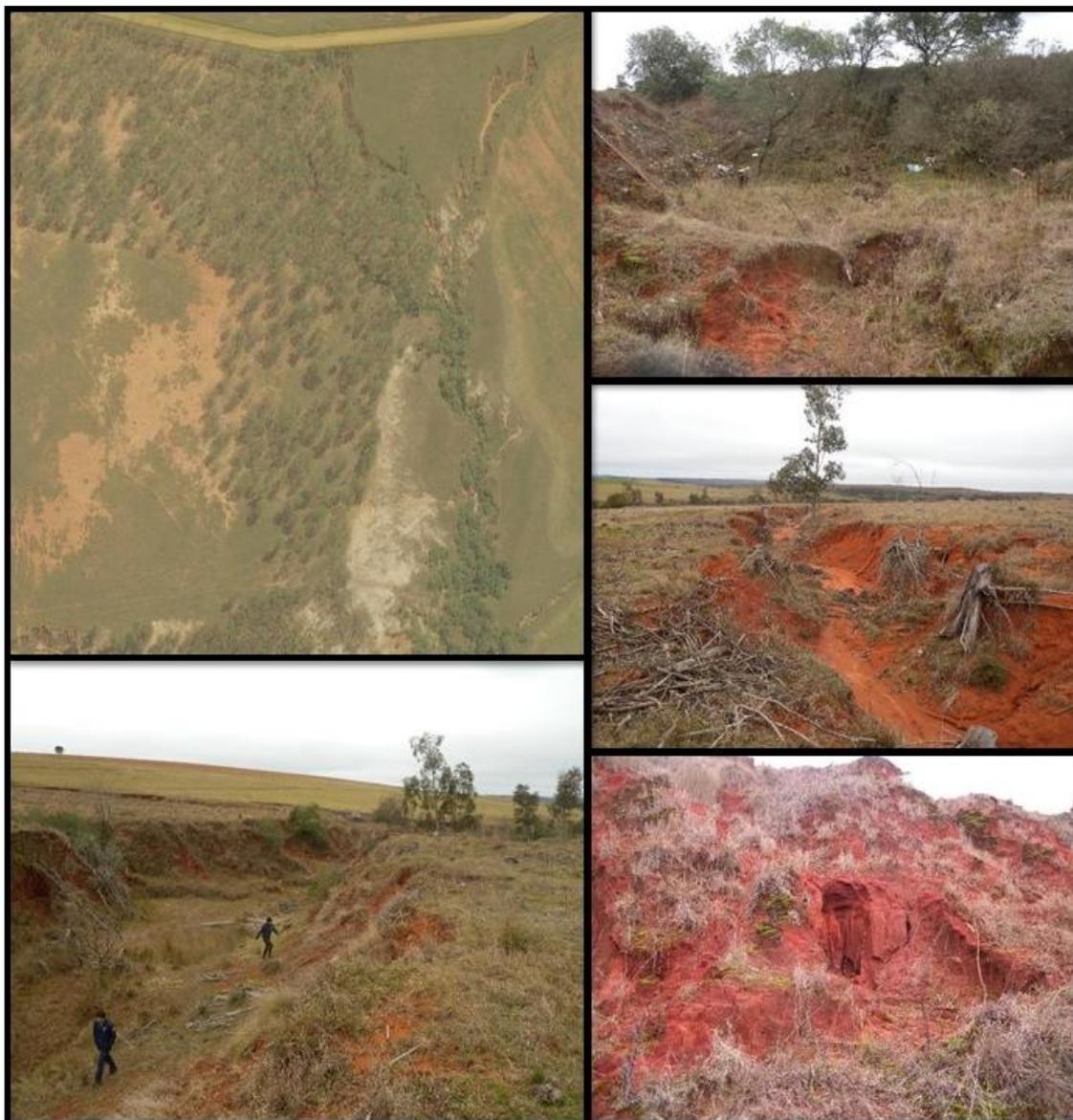
Localizada próximo a uma estrada de terra no interior do município de São Francisco de Assis, essa voçoroca tem influência direta dessa via de acesso. Durante o trabalho de campo e conforme mostra a Figura 23, observou-se que rochas areníticas são mais resistentes na base e antigamente existia uma plantação de eucalipto. Além disso, pode-se contatar a presença de muito lixo na encosta da voçoroca.

Figura 22 - Ravina no interior do município de São Francisco de Assis.



Fonte: Trabalho de campo (2018).

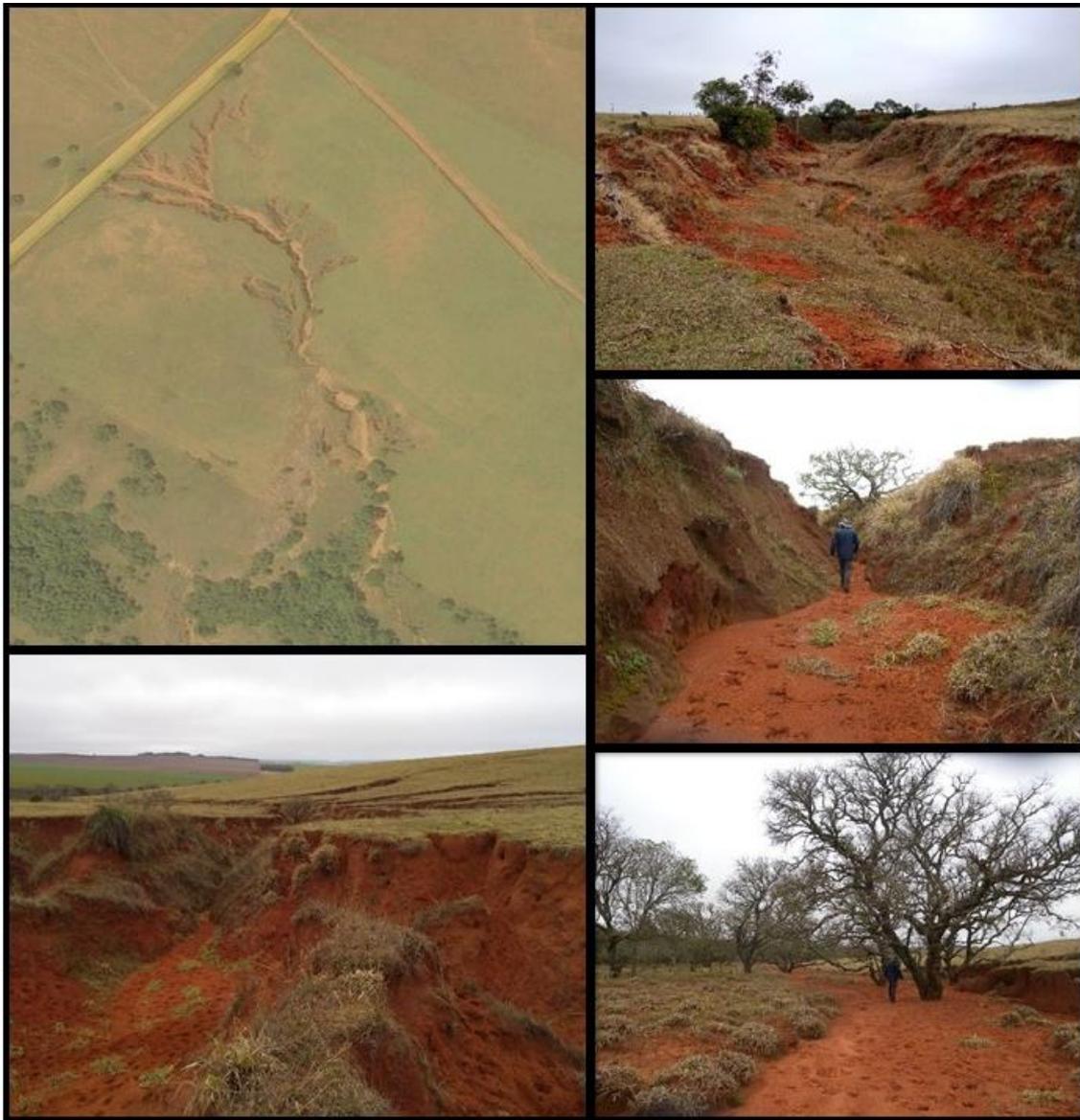
Figura 23 - Voçoroca no interior do município de São Francisco de Assis.



Fonte: Trabalho de campo (2018).

Também localizada no interior do município de São Francisco de Assis, essa voçoroca é rasa e dendrítica com fundo arenoso e paredes mais resistentes (Figura 24). Durante o trabalho de campo, observou-se o afloramento de arenitos da Formação Guará.

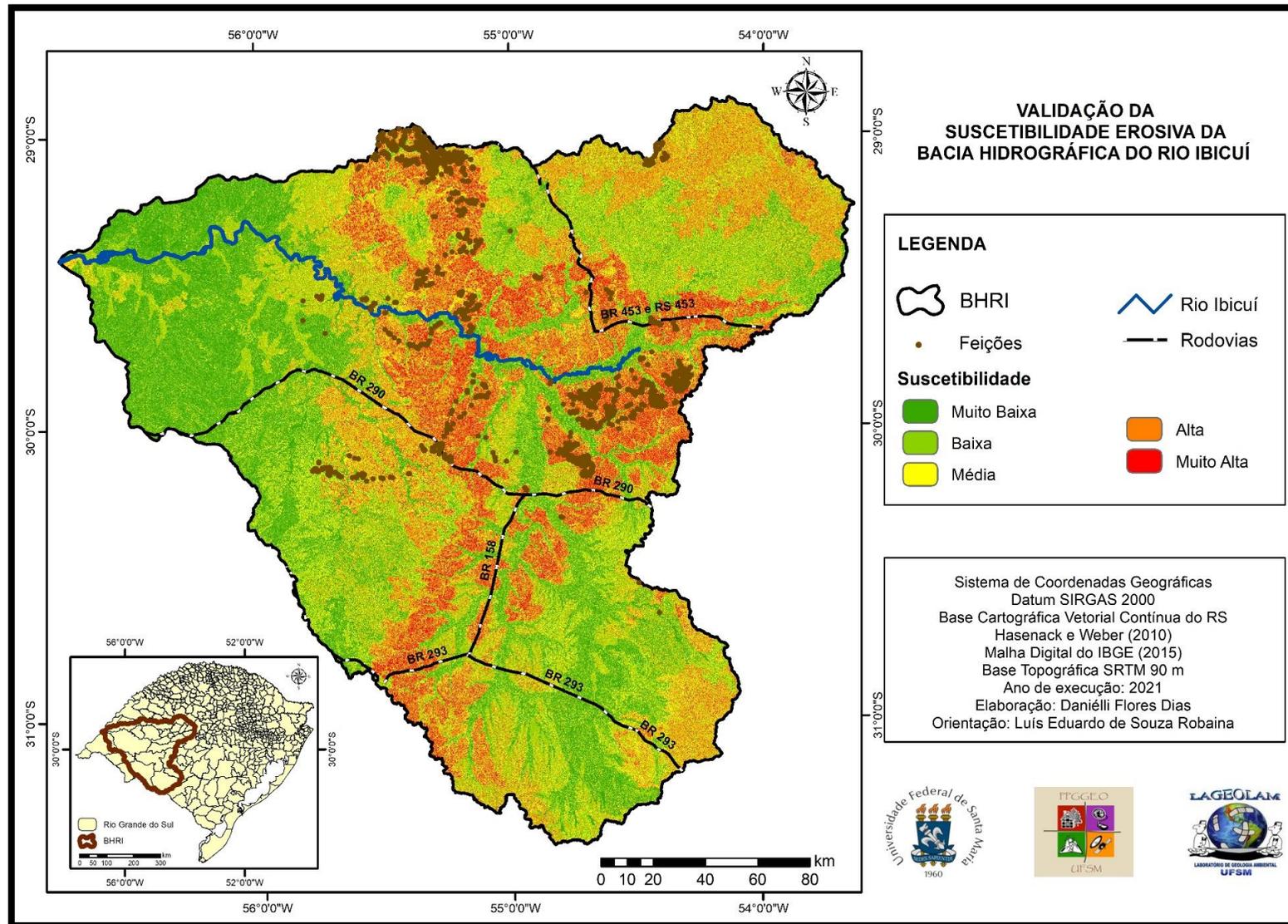
Figura 24 - Voçoroca bem desenvolvida no interior do município de São Francisco de Assis.



Fonte: Trabalho de campo (2018).

Para concluir e validar todas as informações levantadas durante a pesquisa, realizou-se um cruzamento do mapa da suscetibilidade com os mapas das feições erosivas, a fim de entender se as hierarquizações realizadas e as informações refinadas e detalhadas, vão de encontro aos processos erosivos da área de estudo (Figura 25). A Tabela 13 representa o número de feições, a área total, a razão de frequência e o percentual de feições erosivas em cada classe de suscetibilidade. Já a Figura 26 representa algumas feições erosivas identificadas na BHRI.

Figura 25 - Validação final da suscetibilidade erosiva da BHRI.



Fonte: Hasenack e Weber (2010), IBGE (2015) e elaborado pela autora (2021).

Figura 26 - Ravinas e voçorocas identificadas em áreas de suscetibilidade Alta e Muito Alta.



Fonte: Trabalhos de campo (2018, 2019).

Tabela 13 - Quantificação da área total, número feições, razão de frequência e porcentagem de cada classe de suscetibilidade.

Suscetibilidade	Km²	Feições	Fr	%
Muito Baixa	9.353,99	20	0,045	0,69
Baixa	12.048,51	129	0,227	3,46
Média	13.071,32	485	0,789	12,02
Alta	8.570,97	998	2,478	37,72
Muito Alta	4.097,09	583	3,028	46,11
Total	47.141,88	2215	6,569	100

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A classe da suscetibilidade “Muito Baixa” apresenta 20 feições erosivas lineares e razão de frequência de 0,045, indicando assim, uma baixa correlação, estando associadas a um relevo de transição entre colinas suaves a onduladas.

No estudo da classe de suscetibilidade “Baixa” identificou a presença de 129 feições erosivas, que configuram uma baixa correlação, pois apresentam razão de frequência igual a 0,227. Essa classe associa-se as litologias sedimentares e as declividades presentes nessa porção da bacia.

Somando 490 feições erosivas que apresentam razão de frequência de 0,789, configurando uma média correlação, a classe de suscetibilidade “Média” tem suas feições associadas as litologias sedimentares e aos solos de alta suscetibilidade. Além disso, o relevo de colinas onduladas também contribui para a formação dos processos erosivos.

Na classe de suscetibilidade “Alta” espacializam-se 998 feições erosivas que corresponde a uma razão de frequência de 2,478, sendo assim, considerada como uma classe de alta correlação. As litologias sedimentares altamente erodíveis e os solos profundos, associados com um relevo predominante de colinas onduladas, contribuem significativamente para o surgimento de tantas ravinas e voçorocas nessa porção da BHRI.

Para concluir, na classe de suscetibilidade “Muito Alta” encontram-se 583 feições erosivas lineares que apresenta razão de frequência de 3,028, sendo assim, a classe de suscetibilidade com maior correlação na BHRI. As litologias compostas por arenitos altamente erodíveis e os solos profundos e bem suscetíveis, associados com um relevo predominante de colinas onduladas, contribuem para o surgimento das ravinas e voçorocas nessa porção da área de estudo.

Com base nisso, verifica-se que 83,83% das feições lineares identificadas na área de pesquisa estão dentro das classes definidas no cruzamento automático como Alta e Muito Alta. Isso representa a importância do resultado final da pesquisa, além da utilização da metodologia escolhida, que se mostrou amplamente adequada e satisfatória.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo utilizar o método da análise hierárquica ponderada para analisar a suscetibilidade aos erosivos lineares na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. Para isso, realizou-se uma análise automatizada dos fatores condicionantes (relevo, solos, litologia e uso e ocupação) e, posteriormente, um agrupamento dessas variáveis, dando origem a suscetibilidade erosiva da área de estudo.

Os fatores condicionantes elencados para a pesquisa, bem como a metodologia adotada, foram escolhidos a partir da análise de artigos publicados em revistas nacionais no período entre 2005-2020. Após a pesquisa, refinamento e a compilação dados, pode-se entender como os pesquisadores utilizavam cada variável e como eles detalhavam na pesquisa. Sendo assim, foi possível escolher com mais facilidade quais parâmetros seriam trabalhados e qual metodologia seria empregada. Essa etapa foi de extrema importância e conclusiva para determinados pontos dessa pesquisa.

As geotecnologias através dos sistemas de informações geográficas se mostraram hábeis enquanto ferramentas capazes de propiciar elementos para o levantamento de dados do meio físico e do uso e ocupação, gerando assim, informações consistentes e relevantes nos estudos ambientais, principalmente na análise dos processos erosivos lineares. De forma geral, elas se mostraram muito eficientes no estudo e na análise dos fatores condicionantes, uma vez que todo o mapeamento da pesquisa foi realizado de forma automatizada.

Importante lembrar que a erosão não ocorre da mesma forma em solos com diferentes propriedades, pois o seu grau de erodibilidade varia em função de sua permeabilidade, espessura, textura e estrutura. Sendo assim, em muitos casos os atributos físicos e químicos explicam o fato de alguns solos erodirem mais que outros, mesmo quando expostos a uma mesma condição ambiental.

A ação antrópica tende a aumentar a suscetibilidade dos solos aos processos erosivos, uma vez que as áreas com uso destinado para os campos, onde ocorre o pastoreio de gado, muitas vezes acima da capacidade de carga do solo, as feições erosivas tendem a aparecer com mais frequência, uma vez que as erosões do solo são indicadoras de problemas ambientais que carecem de uma maior atenção e detalhamento.

Na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, as áreas com relevo de colinas onduladas e litologias de arenitos eólicos, associadas a solos erodíveis e seu uso destinado a campos, são aquelas que carecem de uma maior atenção, uma vez que esse conjunto de características indicam que essas áreas são altamente suscetíveis e configuram áreas que necessitam a todo tempo de um planejamento ambiental e territorial.

Sobre a utilização da análise hierárquica ponderada para essa pesquisa, concluiu-se que ela foi muito satisfatória e trouxe resultados condizentes com a realidade da área de estudo. Apesar de ser muito conhecida, ela ainda é pouco utilizada por pesquisadores da Geografia, entretanto, se utilizada de forma correta, o seu resultado final será amplamente aceitável e satisfatório.

No mapeamento final que corresponde a suscetibilidade erosiva observou-se que mais de 83% das ravinas e voçorocas ocorriam nas áreas mapeadas como alta e muito alta suscetibilidade. Isso reforça que todo o processo de hierarquização e comparação vem ao encontro de todas as informações levantadas e detalhadas ao longo da pesquisa, podendo ser aplicado em outras áreas de estudo.

Com relação a relevância dessa pesquisa, o foco principal é de que ela sirva para aproximar as discussões para a aplicação do planejamento e ordenamento territorial, com base nas definições dos locais apropriados para os diversos tipos. Assim é de extrema importância um conhecimento detalhado da dinâmica ambiental, para que possam ser sugeridas alternativas que tenham como premissa recuperar ou preservar a paisagem em suas dimensões naturais ou antrópicas.

Como recomendações deixadas após o término dessa pesquisa, sugere-se que outros estudos sejam realizados na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, e que outras metodologias e fatores condicionantes possam ser utilizadas, como o intuito de que se possa fazer uma comparação entre os estudos, a fim de saber qual apresenta um resultado final mais aproximado com a realidade. Ademais, é importante que outros pesquisadores façam estudos com maior riqueza de detalhes, ou seja, desmembrando a área de estudo em sub-bacias ou até mesmo, pesquisando sobre os municípios que pertencem a essa bacia.

Para concluir, a partir dessa iniciativa também existe uma maior possibilidade ocorrer uma aproximação entre o meio acadêmico e a sociedade, com o objetivo de contemplar o interesse de ambas as partes. Sendo assim, em um contexto geral, o estudo dos processos erosivos diversifica a importância das pesquisas realizadas em meio acadêmico, uma vez que os produtos resultantes servem tanto para fins

científicos, como didáticos, de gestão e também para o planejamento de diferentes entidades públicas e privadas, ampliando o campo de atuação profissional e favorecendo a integração entre especialistas de diferentes áreas do conhecimento.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. A revanche dos ventos. Derruição dos solos areníticos e formação de areais na Campanha Gaúcha. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria/RS, v. 11, p. 7-31, 1995.
- AI, L. N. F.; SHI, B. Z. Broad area mapping of monthly soil erosion risk using fuzzy decision tree approach: integration of multi-source data with GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 51, p. 1-18, 2013.
- ALVES, F. S.; ROBAINA L. E. S. Estudo Morfolitológico da Bacia Hidrográfica do Arroio Lajeado Grande - Oeste do RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria/RS, v. 32, n. 2, p. 141-162, 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/9490/5639>>. Acesso: 08 jun. 2018.
- ALVES, R. F.; SILVA, S. A. S. da; ALVAREZ, W. P. Relação de voçorocas e áreas de fragilidade ambiental na microbacia do rio Jarauçú no município de Brasil Novo - Pará. **Geografia Ensino e Pesquisa**, Santa Maria/RS, v. 22, n. 31, p. 1-18, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/31450/pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2020.
- ALVES, W. S.; MARTINS, A. P.; SANTOS, A. K. F. dos; MOURA, D. M. B. de. Análise da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Ribeirão Douradinho, sudoeste de Goiás. **Geoambiente**, Jataí/GO, n. 29, p. 164-183, 2017. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/geoambiente/article/view/47726/25056>>. Acesso em: 21 jun. 2020.
- ALVES, W. S.; MARTINS, A. P.; SCOPEL, I. Fragilidade ambiental: subsídio ao planejamento e à gestão da bacia do Ribeirão da Laje (GO), Brasil. **Geografia Ensino e Pesquisa**, Santa Maria/RS, v.22, n. 34, p. 01-17, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/31267/pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2021.
- ANJOS, D. S.; JUNIOR, M. M.; NUNES, J. O. R. Classificação da curvatura de vertentes em perfil via Modelo Numérico do Terreno. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011. Curitiba/PR. **Anais...** Curitiba/PR: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011.
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Ocorrência de voçorocas em Gouveia/MG: características e processos associados. **Geonomos**, Belo Horizonte/MG, v. 14, n. 1, p. 75-86, 2006.
- AVELINO, P. H. M. A trajetória da tecnologia de sistemas de informação geográfica (SIG) na pesquisa geográfica. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, Três Lagoas/MG, v. 1, n. 1, p. 21-37, 2004.
- BACELLAR, L. A. P. **Condicionantes Geológicas, Geomorfológicas e Geotécnicas dos Mecanismos de Voçorocamento na Bacia do rio Maracujá,**

Ouro Preto, MG. 2000. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

BACELLAR, L. A. P.; MORAIS, F. V. Caracterização dos processos evolutivos de voçorocas em rochas do embasamento cristalino do Complexo Bação, MG. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 1, 2005. Florianópolis/SC. **Anais...** Florianópolis/SC: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2005.

BAPTISTA, G. M. M. **Diagnóstico ambiental da perda laminar de solos por meio de geoprocessamento.** 1997. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

BARBOSA, Y. B.; LORANDI, R. Geoprocessamento aplicado ao estudo da vulnerabilidade à erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão do Pântano nos municípios de São Carlos, Analândia e Descalvado (SP). **Geografia**, Londrina/PR, v. 21, n. 1, p. 103-123, 2012. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/9551>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

BASÍLIO, T. C. C.; FUJIMOTO, J. T.; LOPES, T.; ASCIUTTI, G. A. M.; LORANDI, R.; LOLLO, J. A. de. Influência da forma das encostas na suscetibilidade à erosão na bacia hidrográfica do Rio Claro (Santa Rita do Passa Quatro, SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia/MG, v. 71, n. 1, p. 233-252, 2019. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/47616/25723>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados.** 1999. 303p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BASTOS, A. S.; MANIESI, V.; GOMES, F. B. Vulnerabilidade natural à erosão no sudoeste da Amazônia associada aos seus modos de ocupação - o caso do entorno da terra indígena URU EU WAU WAU. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo/SP, v. 16, n. 2, p. 271-282, 2015. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/386/462>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

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: 21 jan. 2021.

BERGSMA, E.; CHARMAN, P.; GIBBONS, F.; HURNI, H.; MOLDENHAUER, W. C.; PANICHAPONG, S. Terminology for soil erosion and conservation. **Internacional Society of Soil Science**, Holanda, v. 3, p. 1-4, 1996.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** Piracicaba: Editora Livroceres, 1985. 392p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4 ed. São Paulo: Editora Ícone, 1999. 355p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. L. **Conservação do solo**. 5 ed. São Paulo: Editora Ícone, 2005. 355p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8 ed. São Paulo: Editora Ícone, 2012. 355p.

BESTEIRO, A. M.; PAIVA, G.; MIUCCIATO, V.; BUENO, J. **A Utilização do método AHP para traçar, como ferramenta para o auxílio a decisão de um candidato, a escolha de um curso de engenharia**. UFRJ: COPPE, 2009.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996. 875p.

BIGARELLA, J. J.; MAZUCHOWSKI, J. Z. Visão integrada da problemática da erosão. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DA EROSÃO, 3, 1985, Maringá/PR. **Anais...** Maringá/PR: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1985.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2003. p. 877-1436.

BORTOLUZZI, C. A. Contribuição à geologia da região de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas do Instituto de Geociências**, Porto Alegre/RS, n. 4, p. 7-13, 1974.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7 ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

BRITO, A. O. **Estudos da erosão no ambiente urbano, visando planejamento e controle ambiental no Distrito Federal**. 2012. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

BUI, D. T.; HO, T. C.; REVHAUG, I.; PRADHAN, B.; NGUYEN, D. B. **Landslide susceptibility mapping along the national road of Vietnam using GIS-based decision tree classifier and its ensembles**. Cartography from pole to pole. Berlin: Editora Springer Berlin Heidelberg, 2014. p. 303-317.

CABRAL, I. L. L.; MACIEL FILHO, C. L. Estudo de locais susceptíveis à erosão em uma microbacia de Cacequi, RS. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 5, 1993, São Paulo/SP. **Anais...** São Paulo/SP: Universidade de São Paulo, 1993.

CABRAL, I. L. L. **Depressões interfluviais e voçorocas articuladas à rede de drenagem: o exemplo das bacias dos rios Ibicuzinho, Areal do Paredão, Cacequi, Santa Maria e Ibicuí**. 2004. 201p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CABRAL, L. J. R. S.; VALLADARES, G. S.; AQUINO, R. P. de. Susceptibilidade à erosão das terras do alto curso do rio Banabuiú, no Sertão Central do Ceará, usando logica nebulosa. **Acta Geográfica**, Boa Vista/RR, Edição Especial V CBEAGT, p. 103-113, 2016. Disponível em:

<<https://revista.ufr.br/actageo/article/view/3747/2038>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

CABRAL, T. L. **Distribuição e classificação de voçorocas por meio de indicadores morfométricos em sub-bacias no município de Cacequi - RS**. 2018. 191p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

CÂMARA, G. **Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos**. 1995. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995.

CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O. da; FRANCISCO, R. A. Processos erosivos. In: CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M. de; MELO, M. T. da S. (Orgs.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. p. 39-91.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. 2 ed. São Paulo: Contexto, 1995. 168p.

CASTRO, R. A.; FERREIRA, H. L.; SANTOS, L. C. S. Erosão as margens da BR 222 na cidade de Açailândia – MA. In: VI SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6, 2006. Goiânia/GO. **Anais...** Goiânia/GO: Universidade Federal de Goiás, 2006.

CERRI, L. E. S.; SILVA, J. A. F.; SANTOS, P. H. P. Erosão do solo: aspectos conceituais. **Revista Universidade Guarulhos**, São Paulo/SP, v. 2, n. 6, p. 92-98, 1997.

CHAN, F. T. S.; CHAN, H. K. Development of the Supplier Selection Model - A Case Study in the Advanced Technology Industry, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers - Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, v. 218, p. 1807-1824, 2004.

CHEROBIN, S. F. **Estimativa de erosão e sua relação com os diferentes mecanismos erosivos atuantes: estudo da voçoroca Vila Alegre**. 2012. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 98-148.

COELHO NETTO, A. L. Evolução de cabeceiras de drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle

estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo/SP, v. 4, n. 2, p.69-100, 2003.

COELHO NETTO, A. L.; FERNANDES, N. F.; DEUS, C. E. Gullying in the Southeastern Brazilian Plateau, SP. In: PORTO ALEGRE SYMPOSIUM, SEDIMENTS BUDGETS, 1, 1988. Porto Alegre/RS. **Proceedings...** Porto Alegre/RS: IAHS Publication, 1988.

COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas.** Livros Técnicos e Científicos, 2007.

COMITÊ DE GERENCIAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ (COMITÊ IBICUÍ). **Dados Gerais.** Disponível em: <<http://www.comiteibicui.com.br/abaciadorioibicui.php#>>. Acesso em: 11 out. 2018.

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS. **Mapa Geológico do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: CPRM. Mapa colorido em escala 1:750.000, 2008.

CORDEIRO, C.; SANTOS, L. C. A erosão dos solos arenosos da região sudoeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro/RJ, v. 39, 1977.

COSTA, H. G. **Auxílio multicritério à decisão: método AHP.** Rio de Janeiro: ABEPRO, 2006.

COSTA, H. G.; MOLL, R. N. Emprego do método de análise hierárquica (AHP) na seleção de variedades para o plantio de cana-de-açúcar. **Gestão & Produção**, São Carlos/SP, v. 6, n. 3, p. 243-256, 2013.

COSTA, N. M. C. da; COSTA, V. C. da; CONCEIÇÃO, R. S. da; RIBEIRO, J. V. M. Fragilidade ecoturística em áreas de atrativos no Parque Estadual de Pedra Branca (RJ). **GeoUERJ**, Rio de Janeiro/RJ, v. 2, n. 19, p. 138-160, 2019. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/1407/1197>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

COULON, F. K.; GAMERMANN, N.; FORMOSO, M. L. L. Considerações sobre a gênese da Formação Tupanciretã. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre/RS, v. 2, n. 1, p. 79-89, 1973. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21866/12680>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; FILHO, P. H.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial.** São José dos Campos: INPE, 2001. 124p.

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

CUNHA, H. N. da; ALBA, J. M. F.; MIURA, A. K.; SALDANHA, D. L. Análise da suscetibilidade à erosão na bacia hidrográfica do Alto Camaquã (RS). **Caminhos de Geografia**, Uberlândia/MG, v. 19, n. 65, p. 16-28, 2018. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/36004/22255>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 9 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009. 472p.

DANI, A. P. O. **Caracterização faciológica e petrográfica da Formação Santa Tecla, RS**. 2013. 77f. Monografia (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

DE NARDIN, D. **Zoneamento Geoambiental no Oeste do Rio Grande do Sul: um estudo em bacias hidrográficas**. 2009. 230p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DEVKOTA, K. C.; REGMI, A. D.; POURGHASEMI, H. R.; YOSHIDA, K.; PRADHAN, B.; RYU, I. C.; DHITAL, M. R. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. **Natural Hazards**, v. 65, p. 135-165, 2013.

DIAS, D. F. **Proposta de atlas geoambiental para o município de Mata/RS**. 2014. 131p. Trabalho de Graduação (Graduação em Geografia Licenciatura) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

DIAS, D. F. **Zoneamento Geoambiental aplicado ao estudo das potencialidades e suscetibilidades ambientais e de uso e ocupação de Rosário do Sul/RS**. 2017. 184p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

DIAS, D. F.; PONTES, R. C.; AIMON, J. G. S. A silvicultura no município de Rosário do Sul: um estudo de caso no bioma Pampa Sul-rio-grandense. **GeoUERJ**, Rio de Janeiro/RJ, n. 37, p. 1-16, 2020. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/38045/34783>. Acesso em: 14 fev. 2021.

DOBEK, K.; DEMCZUK, P.; RODZIK, J.; HOLUB, B. Types of gullies and conditions of their development in silvicultural loess catchment (Szczecbrzeszyn Roztocze regions, SE Poland). **Landform Analysis**, v. 17, p. 34-42, 2011.

DRUMOND, F. N. **Caracterização e quantificação dos processos erosivos de uma voçoroca na barra do Riacho Manoel Félix no Complexo Metamórfico do Baçõ, Quadrilátero Ferrífero - MG**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

DRUMOND, F. N.; BACELLAR, L. A. Caracterização hidrossedimentológica e dos processos evolutivos de voçoroca em área de rochas gnáissicas do alto rio das

Velhas (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 87-96, 2006. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/81/74>>. Acesso em: 04 ago. 2021.

EASTMAN, J. R. **IDRISI for Windows, Version 2.0: Tutorial Exercises**. Clark University: Worcester, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Livro Técnico. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

ENRÍQUEZ, J. E. I. Dinâmica de flujos de lodos. **Revista Unimar**, Marília/SP, n. 60, p. 43-54, 2012.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS Help Documentation Archive (10.7 and earlier)**. Readlands, Califórnia, EUA. [s.d.]. Disponível em: <<http://resources.arcgis.com/en/help/>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

ERDÉLYI, M.; GÁLFI, J. **Surface and subsurface mapping in hydrogeology**. Budapeste: Akadémiai Kiadó, 1988. 383p.

ESPER ANGLIERI, M. Y. Debris flow susceptibility mapping in a portion of the Andes and Preandes of San Juan, Argentina using frequency ratio and logistic regression models. **Earth Sciences Research Journal**. Bogotá, v. 17, n. 2, p. 159-167, 2013.

FARIA, A. L. L. de; SANTOS, E. E. dos; FERNANDES FILHO, E. I.; CERQUEIRA, M. S.; SCHAEFER, C. E. Relatório final do projeto enchentes - bacia hidrográfica do rio Manhuaçu - Manhuaçu (MG): uma análise das áreas susceptíveis à erosão dos solos. **Revista de Geografia (UFPE)**, Recife/PE, Edição Especial VIII SINAGEO, p. 221-235, 2010.

FEITOSA, A.; SANTOS, B. dos; ARAÚJO, M. S. B. de. Caracterização morfométrica e identificação de áreas suscetíveis a erosão na bacia do rio Pajeú, PE: o estudo de caso da bacia do rio Pajeú/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 4, n. 4, p. 820-836, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232740/26745>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; GARCIAS, C. M.; ZENY, A. S. **Drenagem e controle da erosão urbana**. Curitiba: Champagnat, 1997. 486p.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160p.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficinas de Textos, 2002. 97p.

FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 320p.

FONSECA, A. P. **Análise de mecanismos de escorregamento associados à voçorocamento em cabeceiras de drenagem na Bacia do Rio Bananal (SP/RJ)**. 2006. 373f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatórios do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte I). **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro/RJ, v. 2, n. 4, p. 141-191, 1988.

FRANCISCO, A. B.; NUNES, J. O. R.; TOMMASELLI, J. T. G. Estudo da dinâmica do processo de voçorocamento através de pesquisas de campo no município de Rancharia, SP, Brasil. In: VII SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 1, 2008. Belo Horizonte/MG. **Anais...** Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

FRANCISCO, A. B.; NUNES, J. O. R.; TOMMASELLI, J. T. G. A dinâmica espaço-temporal do processo de voçorocamento no perímetro urbano de Rancharia - SP. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 1-8, 2010.

FREITAS, F. J. de; CANTALICE, J. R. B.; BEZERRA, S. A.; SILVA, M. D. R. O.; SANTOS, P. M. dos; CORREA, R. M.; LIMA, P. A.; FIGUEIRA, S. B. Erosão em entressulcos sob caatinga e culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa/MG, v. 32, p. 1743-1751, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/7xkFtC98TYgbm9NvcDLWq5x/?lang=pt#>>. Acesso em: 02 mar. 2020.

FREITAS, L. E. de; SILVA, C. C. da; NEVES, S. M. A.; NEVES, R. J.; NUNES, M. C. M. Análise da suscetibilidade à erosão e de conflitos no uso da terra por meio de geotecnologias na microrregião de Jauru - Mato Grosso, Brasil. **Geografia (UNESP)**, Rio Claro/SP, v. 40, Número Especial, p. 99-118, 2013.

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

FURLANI, G. M. As boçorocas de Casa Branca e seu significado geomorfológico. **Geomorfologia**, v. 10, p.12-15, 1980.

FUSHIMI, M.; NUNES, J. O. R. Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares das paisagens de parte dos municípios de Marabá Paulista (SP) e Presidente Epitáfio (SP), Brasil. **Revista da ANPEGE**, João Pessoa/PB, v. 14, n. 23, p. 5-27, 2018. Disponível em: <<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/article/view/7087/pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

GALETI, P. A. **Conservação do solo, reflorestamento, clima**. 1 ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 279p.

GALETI, P. A. **Conservação do solo, reflorestamento, clima**. 2 ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1982. 284p.

GALETI, P. A. **Práticas de controle à erosão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1984. 278p.

GANDZOL, J. R. Improving the faculty selection process in higher education: a case study for the analytic hierarchy process, IR Application Using Advanced Tools. **Techniques and Methodologies**, v. 6, p. 2-12, 2005.

GARÓFALO, D. T.; FERREIRA, M. C. Mapeamento de fragilidade ambiental por meio de análise geoespacial: uma aplicação na alta bacia dos rios Piracicaba e Sapucaí-Mirim, APA Fernão Dias, MG. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo/SP, v. 29, p. 212-245, 2015. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/102118/100539>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

GASS, S. L. B.; MASSOLA, J. L.; MONTARDO, D. K. Caracterização geológica-geomorfológica da microbacia do arroio Varejão, município de Chapada, Rio Grande do Sul, Brasil. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009. Natal/RN. **Anais...** Natal/RN: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. **Tomada de Decisão Gerencial: enfoque multicritério**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2009.

GOMES, T. C.; TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E.; RUTHES, J. M. Geomática aplicada na caracterização da vulnerabilidade ambiental dos solos da cidade de Francisco Beltrão (PR). **Estudos Geográficos**, Rio Claro/SP, v.11, n. 1, p. 27-46, 2013. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/939/1/ESTGEO_Gomes%2c%20Tayona%20Cristina_2013.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2020.

GRAÇA, C. H. da; SILVEIRA, H.; TERASSI, P. M. B. Mapeamento de áreas com risco potencial a erosão dos solos no município de Marialva - Paraná. **Ateliê Geográfico**, Goiânia/GO, v. 8, n. 2, p. 108-129, 2014. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/atelie/article/view/24019/17135>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

GROVES, P. **Princípios de sistemas de navegação integrados GNSS, inerciais e multisensores**. 2 ed. Nova York: Editora Artech House, 2013.

GUADAGNIN, P. M. A. **Padrões de distribuição da vegetação florestal na Serra do Caverá - sudoeste do Rio Grande do Sul/Brasil**. 2019. 144p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

GUADAGNIN, P. M. A.; TRENTIN, R. Compartimentação Geomorfométrica da Bacia Hidrográfica do Arroio Caverá-RS. **GeoUERJ**, Rio de Janeiro, v.1, n. 25, p. 183-199, 2014. Disponível em: <<http://www.e->

publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/10030/9928>. Acesso em: 14 mai. 2017.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (Orgs.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 149-209.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (Orgs.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 149-209.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (Orgs.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 17-50.

GUERRA, A. J. T. Encostas e questão ambiental. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **A questão ambiental: diferentes abordagens**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. p. 217-238.

GUERRA, A. J. T. Experiments and monitoring in soil erosion. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo/SP, n. 16, p. 32-37, 2005.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (Orgs.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 10 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015. p. 17-55.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico e geomorfológico**. 5 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 650p.

GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. Erosão dos solos e a questão ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p. 225-256.

HASENACK, H.; WEBER, E. **Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul**. Série Geoprocessamento, Porto Alegre: Centro de Ecologia da UFRGS, 2010. 1 DVD.

HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, G. M. A.; CASTRO, S. S. de. Análise dos compartimentos morfopedológico como subsídio ao planejamento ao uso do solo em Jataí - GO. **GeoUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo/SP, n. 26, p. 113-131, 2009. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/74131/77774>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

HOSSEINALIZADEH, M.; KARIMINEJAD, N.; CHEN, W.; POURGHASEMI, H. R.; ALINEJAD, M.; BEHBAHANI, A. M.; TIEFENBACHER, J. P. Modelagem espacial de ravinas usando dados de UAV e quatro conjuntos de classificadores de melhor decisão (BFTree, Bag-BFTree, RS-BFTree e RF-BFTree). **Geomorfologia**, v. 329, p. 184-193, 2019.

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

HYUN-JOO, O.; PRADHAN, B. Aplicação de um modelo neuro-fuzzy para mapeamento de susceptibilidade a deslizamentos de terras rasas em uma área montanhosa tropical. **Computer Geoscience**, v. 37, n. 9, p. 1264-1276, 2011.

Disponível em:

<https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5057a842e4b01ad7e0288338>. Acesso em: 07 jul. 2021.

INFANTI JÚNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Orgs.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 101-152.

IRELAND, H. A.; SHARPE, C. F. S.; EARGLE, D. H. Principles of gully erosion in the Piedmont of South Carolina. **US Department of Agriculture Technical Bulletin**, n. 633, 1939. 142p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base de Solos do ano de 2013**. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/cartas-tematicas.html>>. Acesso em: 06 nov. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha Municipal do ano de 2015**. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais>>. Acesso em: 18 out. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dados da produção do ano de 2017**. Disponível em:

<<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=431640&search=||infogr%E1ficos:-informa%E7%F5es-completas.>> Acesso em: 14 mar. 2021.

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

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Peixe-Parapanema**. 6 v., São Paulo: IPT, 1986. (Relatório 24739).

KNIERIN, I. S. **Estudo das Formas de Relevo e dos Processos Erosivos no município de Unistalda - RS**. 2015. 125f. Trabalho de Graduação (Graduação em Geografia Licenciatura) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

KREITLOW, J. P.; SILVA, J. S. V. da; NEVES, S. M. A. S.; NEVES, L. F. S. Vulnerabilidade ambiental e conflito no uso da terra no município de Mirassol D'oeste, Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro/RJ, v. 10, n. 68, p. 1917-1936, 2016. Disponível em:

<<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44292/23376>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R. P.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; FAMBRINI, G. L. Redefinição do Grupo Bom Jardim (Neoproterozóico III em sua área-tipo: litoestratigrafia, evolução paleoambiental e contexto tectônico. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 347-360, 2003. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9794/9805>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R. P.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; CORRÊA, C. R. A.; PELOSI, A. P. M. R. Evolução paleoambiental e sequencias deposicionais do Grupo Bom Jardim e da Formação Acampamento Velho (Supergrupo Camaquã) na porção norte da sub-bacia Camaquã Ocidental. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 245-256, 2005. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9466/8838>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

JESUS, A. S. **Investigação Multidisciplinar de Processos Erosivos Lineares: Estudo de Caso da Cidade de Anápolis - GO**. 2013. 340p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

LAFAYETTE, K. P. V.; CANTALICE, J. R. B.; COUTINHO, R. Q. Resistência à erosão em ravinas, em Latossolo argiloarenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa/MG, v. 35, p. 2167-2174, 2011. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/TxD9ymzHXxpzVxYQndqVBHC/?lang=pt>>. Acesso em: 21 out. 2018.

LAL, R. **Soil erosion in the tropics**. New York: McGraw Hill, 1990. 580p.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 149p.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216p.

LOBÃO, J. S. B.; FRANCA-ROCHA, W. J. S. da; SILVA, A. B. da. Geoprocessamento na modelagem da vulnerabilidade natural à erosão no município de Morro do Chapéu - BA. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro /RJ, v. 63, n. 1, p. 101-114, 2011. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43722/22986>>. Acesso em : 20 jun. 2020.

LOPES, M. S.; SALDANHA, D. L. Análise de vulnerabilidade natural à erosão como subsídio ao planejamento ambiental do oeste da bacia hidrográfica do Camaquã - RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro/RJ, v. 68, n. 9, p. 1689-1708, 2016. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44437/23512>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

LOZET, J.; MATHIEU, C. **Dictionnaire de Science du Sol**. Quatrième édition. Paris: Tec & Doc, 2002.

LUZ, C. C. S.; BARROS, C. A. de; NEVES, S. M. A. S.; NEVES, R. J.; NUNES, M. C. M. Diagnoses of potential erosion areas and land use conflicts in the Araputanga municipality, Mato Grosso State (MT), Brazil. **Geografia (UNESP)**, Rio Claro/SP, v. 42, n. 3, Especial Geo Pantanal, p. 71-86, 2017.

MACEDO, F. R.; SOUZA, M. L. de. Ocupação das zonas de vulnerabilidade à erosão em Cidade Gaúcha - Paraná. **Revista Formação**, Presidente Prudente/SP, v. 2, n. 23, p. 230-251, 2016. Disponível em: <<https://revista.fct.unesp.br/index.php/formacao/article/view/4061/3389>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

MACHADO, C. R. L.; QUEIROZ FILHO, A. P. Trajeto de menor custo ambiental no trecho leste do rodovial metropolitano de São Paulo. **Revista da ANPEGE**, João Pessoa/PB, v. 10, n. 13, p.7-27, 2014. Disponível em : <<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/article/view/6475/3454>>. Acesso em : 20 jun. 2020.

MACIEL FILHO, C. L. NUMMER, A. V. **Introdução a Geologia de Engenharia**. 4 ed. Santa Maria: Editora da UFSM, 2014.

MAFRA, R. C.; PINHEIRO, M. M. F.; CICERELLI, R. E.; OSCO, L. P.; ALVES, M. R.; RAMOS, A. P. M. Validação do mapa de vulnerabilidade a erosão por aprendizagem de máquina. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 13, n. 2, p. 1079-1100, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/243054/34832>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

MAGALHÃES, R. A. Erosão: definições, tipos e formas de controle. In: XXIV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 24, 2001. Fortaleza/CE. **Anais...** Fortaleza/CE: Universidade Federal do Ceará, 2001.

MAGALHÃES, I. A. L.; NERY, C. V. M.; ZANETTI, S. S.; PENA, F. E. R.; AVELINO, R. C.; SANTOS, A. R. Uso de geotecnologias para estimativa de perda de solo e identificação das áreas susceptíveis a erosão laminar na sub-bacia hidrográfica do rio Vieira, município de Montes Claros, MG. **Caderno de Geociências**, Salvador/BA, v. 9, n. 2, p. 74-84, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/5917/0>>. Acesso em: 07 out. 2018.

MAGALHÃES, V. L.; CUNHA, J. E. da; NÓBREGA, M. T. Indicadores de vulnerabilidade ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 7, n. 6, p. 1133-1144, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233166/27056>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

MANTELLI, L. R.; ROSSETI, D. F. Significado tectônico de lineamentos de drenagem no sudoeste da Ilha do Marajó. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo/SP, v. 39, n. 1, p. 42-54, 2009.

MARCHIORI, J. N. C. Vegetação e areais no sudoeste rio-grandense. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria/RS, v. 11, p. 81-92, 1995.

MARCHIORO, E.; OLIVEIRA, J. C. Evolução espaço-temporal de voçorocas às margens da rodovia ES-482 em Alegre (ES). **Revista GEONORTE**, Manaus/AM, Edição Especial 4, v. 10, n. 1, p. 125-130, 2014.

MARCHIORO, E.; ANDRADE, E. E.; OLIVEIRA, J. C. Evolução espaço-temporal de voçorocas no Espírito Santo: estudos de caso nos municípios de Afonso Cláudio e Alegre. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo/SP, v. 17, n. 1, p. 191-204, 2016. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/712/528>>. Acesso em: 14 mai. 2020.

MARINS, C. S.; SOUZA, D. O; BARROS, M. S. **O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais - um estudo de caso**. XLI SBPO, Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento, 2009.

MARQUES, R. D. **Progressões denudacionais na Vila São Rafael, zona norte de Santa Maria - RS**. 2018. 261p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

MASSA, E. M.; ROSS, J. L. S. Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo/SP, v. 24, p. 57-79, 2012. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/52754/56609>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

MATHIAS, D. T. **Contribuição metodológica para o diagnóstico da dinâmica erosiva linear e seu prognóstico evolutivo visando subsidiar projetos de recuperação**. 2016. 178f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2016.

MEDEIROS, E. R. **Estratigrafia do Grupo São Bento na região de Santa Maria e considerações sobre paleocorrentes**. 1980. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

MEDEIROS, E. R.; ROBAINA, L. E. S.; CABRAL, I. L. L. Degradação ambiental na região sudoeste do Rio Grande do Sul. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria/RS, v. 11, p. 53-64, 1995.

MEIRA, R. T.; SABONARO, D. Z.; SILVA, D. C. C. Elaboração de carta de adequabilidade ambiental de uma pequena propriedade rural no município de São Miguel Arcanjo, São Paulo, utilizando técnicas de geoprocessamento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro/RJ, v. 21, n. 1, p. 77-84, 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/5gQqGbkJZFfWNLdyZ9WDbPF/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a dinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental**. 1997. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E. J.; MELO, J. H.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro/RJ, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MIRANDA, M. R. S.; NEVES, S. M. A. S.; BARROS, C. A. de. Avaliação do estado ambiental das unidades de paisagem de uma bacia hidrográfica do estado brasileiro de Mato Grosso. **Estudos Geográficos**, Rio Claro/SP, v. 16, n. 2, p. 31-45, 2018. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo/article/view/12885/8755>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3rd edition. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. 304p.

MOSS, G.; MOSS, M. **Projeto Brasil das Águas: rio Ibicuí**. Disponível em: <https://www.brasildasaguas.com.br/margi/docs/RIO_IBICUI.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2019.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 1 ed. São Paulo: ABES, 1997.

NASCIMENTO, P. S. R.; PETTA, R. A.; GARCIA, G. J. Confecção do mapa de densidade de drenagem através de geotecnologias visando definir a vulnerabilidade aos processos erosivos na sub-bacia do Baixo Piracicaba (SP). **Estudos Geográficos**, Rio Claro/SP, v. 6, n. 1, p. 19-35, 2008. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo/article/view/2316/2038>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

NOBAJAS, A.; WALLER, R. I.; ROBINSON, Z. P.; SANGOZALLO, R. Too much of a good thing? The role of detailed UAV imagery in characterizing large-scale badland drainage characteristics in South-Eastern Spain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8-10, p. 2844-2860, 2017. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431161.2016.1274450?needAccess=true>>. Acesso em: 09 abr. 2019.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos laterítico**. São Paulo: Villibor, 1995. 240p.

NOLLA, D. **Erosão do solo: o grande desafio**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura do Rio Grande do Sul, 1982. 412p.

NUNES, M. C. M.; NEVES, S. M. A. S.; KREITLOW, J. P.; CHIMELLO, A. M. Susceptibility to water erosion of soils from the municipality Salto do Céu, SW Mato Grosso State, Brazil. **Geografia (UNESP)**, Rio Claro/SP, v. 38, Número Especial, p. 191-206, 2013.

OLIVEIRA, A. M. M. de; PINTO, S. dos A. F.; LOMBARDI NETO, F. Caracterização de indicadores da erosão do solo em bacias hidrográficas com o suporte de geotecnologias e modelo predictivo. **Estudos Geográficos**, Rio Claro/SP, v. 5, n. 1, p. 63-86, 2007.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. 3 ed. Piracicaba: FEALQ, 2008. 592p.

OLIVEIRA, M. A. T. de. Erosion disconformities and gully morphology: a threedimensional approach. **Catena**, Cremlingen, v. 16, p. 413-423, 1989.

OLIVEIRA, M. A. T.; MEIS, M. R. M. Relações entre geometria do relevo e formas de erosão linear acelerada (Bananal, SP). **Geociências**, São Paulo/SP, n. 4, p. 87-99, 1985.

OLIVEIRA, M. A. T. de; CAMARGO, G. Integração de estruturas de abatimento e erosão por voçorocas. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia/MG, v. 8, n. 15, p. 117-120, 1996.

OLIVEIRA, M. A. T. de. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (Orgs.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 50-94.

OLIVEIRA, M. A. T. de. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (Orgs.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 10 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015. p. 57-99.

OLIVEIRA, E. M. de; SELVA, V. S. F. Estudo da erosão no Seridó paraibano como indicador do processo de desertificação: Juazeirinho, Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 12, n. 3, p. 876-894, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/239813/32643>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

OLIVEIRA, J. L.; FEHR, M. Análise da vulnerabilidade erosiva para a bacia hidrográfica do Ribeirão Conquistinha no oeste de Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 12, n. 7, p.2428-2444, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/241436/34616>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

OLIVEIRA, F. F.; ARAUJO, R. C. de. Uso de investigação multidisciplinar para diagnóstico de processos erosivos lineares urbanos em uma voçoroca no bairro do Bequimão - São Luís - MA. **Geografia Ensino e Pesquisa**, Santa Maria/RS, v. 22, n. 38, p. 1-30, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/37160/pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

OLTMANN, S. O.; MARZOLFF, I.; PETER, K. D.; RIES, J. B. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, v. 4, p. 3390-3416, 2012.

PAISANI, J. C.; OLIVEIRA, M. A. T. Desenvolvimento de incisão erosiva (voçoroca) descontínua e desconectada da rede hidrográfica em área de cabeceira de drenagem: o caso da colônia Quero-Quero (Palmeira - PR). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo/SP, v. 31, n. 1, p. 51-58, 2001.

PAULA, P. M. **Mapeamento de Unidades Litomorfológicas em Bacias Hidrográficas com processos de Arenização, Alegrete-RS**. 2006. 69 f. Dissertações (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PAULA, P. M.; ROBAINA, L. E. S. Estudo das bacias hidrográficas com desenvolvimento de areais no município de Alegrete - RS. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10, 2003. Rio de Janeiro/RJ. **Anais...** Rio de Janeiro/RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

PETSCH, C.; MONTEIRO, J. B. Elaboração da carta de suscetibilidade à erosão na escala 1:50.000 do município de Douradina - PR. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro/RJ, v. 64, n. 3, p. 581-588, 2012. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43805/23069>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

PETSCH, C.; ZUCCHI, V. P.; BRAVO, J. V. M.; BUENO, M. B.; MINAKAWA, N. S. Elaboração das cartas de suscetibilidade e potencialidade à erosão laminar em Douradina, Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 5, n. 2, p. 400-411, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232787/26787>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

PHILLIPS, L. F.; SCHUMM, S. A. Effect of regional slope on drainage networks. **Geology**, v. 15, p. 813-816, 1987.

PONÇANO, W. L.; PRANDINI, F. L. Boçorocas no estado de São Paulo: uma revisão. In: 4º SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 4, 1987. Marília/SP. **Anais...** Marília/SP: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1987.

PORCHER, C. A.; LOPES, R. C. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Folha SH.22-Y-A - Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:250.000**. Brasília: CPRM, 2000. 117p.

PORGHASEMI, H. R.; PRADHAN, B.; GOKCEOGLU, C. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. **Natural Hazards**, v. 63, v. 2, p. 135-165, 2012.

PRADHAN, B.; LEE, S. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. **Environ Earth Science**, v. 60, p. 1037-1054, 2010.

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

QUEIROZ NETO, P.J. Erosão dos Solos Tropicais e seu Controle: O Exemplo do Estado de São Paulo. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 7, 2001, Goiânia/GO. **Anais...** Goiânia/GO: Universidade Federal de Goiás, 2001.

RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Relação das variáveis ambientais com os processos erosivos no município de Cacequi, Rio Grande do Sul. **Revista Geoaraguaia**, Barra do Graças/MT, v. 8, n. 2, p. 32-48, 2018. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/7675/pdf>>. Acesso em: 12 out. 2018.

RADEMANN, L. K. **Identificação e caracterização dos mecanismos erosivos atuantes na Voçoroca do Areal no município de Cacequi/RS com auxílio de veículo aéreo não tripulado**. 2019. 158p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

RAMOS, A. W. P.; LUZ, C. C. S.; NEVES, S. M. A. S.; FREITAS, L. E. de; NEVES, L. F. S. Análise da capacidade e conflito de uso da terra na bacia hidrográfica do Córrego do Piraputanga - MT, Brasil. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte/MG, v. 28, n. 55, p. 812-827, 2018. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/16977>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

REGMI, A. D.; DEVKOTA, K. C.; YOSHIDA, K.; PRADHAN, B.; POURGHASEMI, H. R.; KUMANOTO, T.; AKGUN, A. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, n. 2, p. 725-742, 2014.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. (Coords.). **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)**. Washington: USDA, 1997. 407p.

RENNER, L. C.; PULZ, G. M. Parâmetros técnicos para o aproveitamento ornamental dos Granitoides Jaguari e Santa Rita, Região de Ibaré, oeste do Escudo Sul-Rio-Grandense. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre/RS, v. 32, n. 2, p. 89-99, 2006.

RIBEIRO, L. S.; ALVES, M. G. Análise de suscetibilidade à erosão laminar no município de Campos dos Goytacazes/RJ através de técnicas de geoprocessamento. **Estudos Geográficos**, Rio Claro/SP, v. 6, n. 1, p. 89-100, 2008. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo/article/view/544/2192>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

RIBEIRO, A. S.; MINCATO, R. L.; CURTI, N.; KAWAKUBO, F. S. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia pelo processo analítico hierárquico.

Revista Brasileira de Geografia Física, Recife/PE, v. 9, n. 1, p. 16-31, 2016.

Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232956/26925>>.

Acesso em: 22 jun. 2020.

ROBAINA, L. E. S.; MEDEIROS, E. R.; CASSOL, R. Unidades de *landforms* na bacia do Arroio Cadena, Santa Maria - RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria/RS, n. 24, p. 139-152, 2002.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R. Degradação dos solos: problema ambiental no sudoeste gaúcho. **Interface**, Porto Nacional/TO, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2004.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; LAURENT, F.; SCCOTI, A. A. V. Zoneamento Morfolitológico da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí e sua Relação com os Processos Superficiais e o Uso do Solo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 63-77, 2015. Disponível em:

<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php?journal=rbg&page=article&op=view&path%5B%5D=630&path%5B%5D=444>. Acesso em: 01 abr. 2018.

ROCKETT, G. C.; MARTINS, E. M.; TODT, V.; THUM, A. B.; BARBOZA, E. G. Geoprocessamento aplicado à análise ambiental: vulnerabilidade natural à perda de solo no Morro do Osso, Porto Alegre/RS. **Geografia (UNESP)**, Rio Claro/SP, v. 39, n. 3, p. 465-481, 2014. Disponível em:

<<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/10260/7385>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

RODRIGUES, J. M.; MONTEIRO, G. N.; SOUZA, J. O. P. de. Análise da fragilidade na bacia da barragem Camará, Areia (PB). **Revista de Geografia (UFPE)**, Recife/PE, v. 35, n. 4, p. 231-241, 2018. Disponível em:

<<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/238221/30048>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

RODRIGUES, S. C.; SOUZA, N. C. Mapeamento da fragilidade ambiental no trecho de vazão reduzida do rio Araguari (MG) com técnicas de geoprocessamento.

GeoUSP - Espaço e Tempo, São Paulo/SP, n. 35, p. 129-142, 2013. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/75443/78976>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

ROSA, R. Geotecnologias na Geografia Aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 16, p. 81-90, 2005. Disponível em:

<<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47288/51024>>. Acesso em: 11 fev. 2019.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 8, p. 63-74, 1994. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47327/51063>>. Acesso em: 12 jan. 2019.

ROVANI, F. F. M.; CASSOL, R.; WOLLMANN, C. A.; SIMIONI, J. P. D. Análise da vulnerabilidade natural à perda de solo de Barão de Cotegipe, RS. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo/SP, v. 29, p. 262-278, 2015. Disponível

em: <<https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/102085/100506>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. Tradução de Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: McGraw-Hill, Makron, 1991.

SAATY, T. L. **Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process**. 2nd edition, Pittsburgh: RWS Publications, 2001.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 80-100, 2008

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Orgs.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

SALOMÃO, F. X. T.; IWASA, O. Y. Erosão e ocupação rural e urbana. In: **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente**. ABGE/IPT/DIGEO, 1995. p. 31-57.

SAMPAIO, A. C. P.; CORDEIRO, A. M. N.; BASTOS, F. H. Susceptibilidade à erosão relacionada ao escoamento superficial na sub-bacia do Alto Mundaú, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 9, n. 1, p. 125-143, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge/article/view/233612/27203>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

SANTOS, V. S. **Análise Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari-RS**. 2015. 83f. Monografia (Graduação em Geografia Licenciatura) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SANTOS, F. P. dos; BAYER, M.; CARVALHO, T. M. de. Compartimentação pedológica da bacia do rio dos Bois, municípios de Cezarina, Varjão, Guapó e Palmeiras de Goiás (GO), e sua relação com a suscetibilidade e risco à erosão laminar. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia/GO, v. 28, n. 2, p. 103-124, 2008. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/bgg/article/view/5727>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

SANTOS, F. A. dos; AQUINO, C. M. S. de. Suscetibilidade erosiva em área suscetível à desertificação, no estado do Piauí: subsídios ao planejamento ambiental. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte/MG, v. 27, n. 1, p. 19-37, 2013. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/p.2318-2962.2017v27nesp1p19>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

SANTOS, J. P. dos; COTA, G. E. M.; LIMOEIRO, B. F.; PEDRAS, K. C.; COSTA, A. M. da; VIANA, J. H. M. Susceptibilidade à erosão no Rio Gualaxo do Norte - MG. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia/MG, v. 18, n. 63, p. 286-307, 2017. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/38385/21008>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALLI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T. da; SILVA, J. M. F. da. Mapeamento da vulnerabilidade geoambiental do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo/SP, v. 37, n. 4, p. 812-820, 2007. Disponível em:

<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9251/8730>. Acesso em: 22 jun. 2020.

SANTOS, L. C. A. dos; SOARES, I. G. Caracterização da vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Preto, Maranhão - Brasil. **Geografia**, Londrina/PR, v. 29, n. 1, p. 85-105, 2020. Disponível em:

<https://www.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/36619/26738>. Acesso em: 17 jun. 2021.

SANTOS, M. B.; FARIA, K. M. S. Vulnerabilidades ambientais do bioma Cerrado: estudo da região norte goiano - Goiás. **Acta Geográfica**, Boa Vista/RR, v. 14, n. 34, p. 242-258, 2020. Disponível em:

<<https://revista.ufr.br/actageo/article/view/5260/2931>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

SCCOTI, A. A. V. **Zoneamento Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí da Armada-RS: Potencialidades e Suscetibilidade**. 2015. 151p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SCCOTI, A. A. V.; ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R. Compartimentação do relevo do município de Manoel Viana - RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria/RS, v. 35, n. 1, p. 64-70, 2013. Disponível em:

<<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/11217/6820>>. Acesso em: 12 out. 2020.

SCHERER, C. M. S.; FACCINI, U. F.; LAVINA E. L. Arcabouço Estratigráfico do Mesozoico da Bacia do Paraná. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Eds.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000. p. 335-354.

SCHERER, C. M. dos S.; FACCINI, U. F.; LAVINA, E. L. Arcabouço Estratigráfico do Mesozoico da Bacia do Paraná. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. O. (Orgs.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Centro de Investigação do Gondwana da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. p. 355-374.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA DO RIO GRANDE DO SUL. **Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul**. Disponível em:

<<http://www.sema.rs.gov.br/>>. Acesso em: 12 fev. 2018.

SELBY, M. J. **Hillslope materials & processes**. New York: Oxford University Press, 1982. 450p.

SHIMIZU, T. **Decisão nas organizações**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2006. 419p.

SHIN, Y. B.; LEE, S.; SHUN, S. G.; CHUNG, D. A critical review of popular multi-criteria decision making methodologies. **Issue Information Systems**, v. 14, n. 1, p.

358-365, 2013. Disponível em: <http://iacis.org/iis/2013/225_iis_2013_358-365.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2021.

SILVA, J. X. **Geoprocessamento para análise ambiental**. Rio de Janeiro: Editora Jorge Xavier da Silva, 2001. 228p.

SILVA, J. F. G. da; BARBOSA NETO, M. V. de. Identificação de riscos erosivos na bacia hidrográfica do rio Beberibe - PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 11, n. 5, p. 1709-1720, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234991/30949>. Acesso em: 22 jun. 2020.

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. In: I SIMPÓSIO MINEIRO DE GEOGRAFIA: DAS DIVERSIDADES A ARTICULAÇÃO GEOGRÁFICA, 1, 2014. Alfenas/MG. **Anais...** Alfenas/MG: Universidade Federal de 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)**, Rio de Janeiro/RJ, v. 29, n. 2, p. 210-224, 2006. Disponível em: <http://www.anuario.igeo.ufrj.br/anuario_2006_2/anuario_2006_v29_2_210_224.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2021.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Mapeamento anual de uso e cobertura da terra no Brasil (MapBiomias Coleção 5 - 2019)**. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>. Acesso em: 24 mai. 2021.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of science terms**. Winconsin: Madison, 1975. 34p.

SOUSA, F. A. de. Influência das classes de declividades na construção do mapa de suscetibilidade à erosão laminar. **Revista da ANPEGE**, João Pessoa/PB, v. 9, n. 11, p. 107-117, 2013. Disponível em: <<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/article/view/6495/3476>>. Acesso em 20 jun. 2020.

SOUTO, J. J. P. **Deserto, uma ameaça?** Estudos dos núcleos de desertificação na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, DRNR, Diretoria Geral, 1985. 169p.

SOUZA, N. C. **Geotecnologias na análise da suscetibilidade e risco de processos erosivos em áreas de entorno de linhas férreas - estudo de caso: Malha Paulista - SP (Bacia do Tietê - Sorocaba)**. 2015. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SOUZA, J. C. L. de; LIMA, C. V. de. Avaliação do potencial à erosão laminar da bacia do Ribeirão Sozinha (GO). **Acta Geográfica**, Boa Vista/RO, v. 7, n. 14, p. 123-137, 2013. Disponível em: <<https://revista.ufr.br/actageo/article/view/1350/1002>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

SOUZA, J. C. L. de; GREGÓRIO, M. N.; SILVA, D. L. da; CARNEIRO, M. S.; ALBUQUERQUE JUNIOR, E. C.; CAVALCANTE, T. C. Análise dos processos erosivos em áreas suscetíveis a instabilidade de encostas na barragem do Serro Azul, Palmares - Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 10, n. 3, p. 924-939, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233896/27386>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **GEOUSP**, São Paulo/SP, n. 15, p. 213-234, 2004.

SPÖRL, C. **Modelo de fragilidade ambiental utilizando redes neurais artificiais**. 2007. 183p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLANT, E. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2002. 127p.

SUERTEGARAY, D. M. A. **A trajetória da natureza: um estudo geomorfológico sobre os areais de Quaraí/RS**. 1987. 243p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade São Paulo, São Paulo, 1987.

SUERTEGARAY, D. M. A. **Deserto Grande do Sul: controvérsia**. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998. 109p.

SUERTEGARAY, D. M. A. Desertificação: recuperação e desenvolvimento sustentável. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 6 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

SUERTEGARAY, D. M. A. (Org.). **Terra: feições ilustradas**. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2008. 264p.

SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A.; VERDUM, R. (Orgs.). **Atlas de arenização - sudoeste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Coordenação e Planejamento, 2001. 85p.

SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A.; VERDUM, R.; MEDEIROS, R. M. V.; BELLANCA, E. T.; BERTÊ, A. M. A. Projeto Arenização no Rio Grande do Sul, Brasil: gênese, dinâmica e espacialização. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, 2001, Foz do Iguaçu/PR. **Anais...** Foz do Iguaçu/PR: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A.; PIRES DA SILVA, L. E. (Orgs.). **Arenização: natureza socializada**. Porto Alegre: Compasso Lugar Cultura e Imprensa Livre, 2012. 600p.

TEIXEIRA, W. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos. 2000. 568p.

THOMAS, M. F. **Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes**. Winchester: John Wiley & Sons, 1994.

TRENTIN, R. **Definição de Unidades Geoambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Itu – Oeste do Rio Grande do Sul**. 2007. 140p. Dissertação (Mestrado em Geografia e Geociências) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

TRENTIN, R. **Mapeamento Geomorfológico e Caracterização Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Itu - Oeste do Rio Grande do Sul - Brasil**. 2011. 215f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Mapeamento Morfolitológico da Bacia Hidrográfica do Rio Itú. In: VI SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6, 2006, Goiânia/GO. **Anais...** Goiânia/GO: Universidade Federal de Goiás, 2006.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S.; SCCOTI, A. A. V. Determinação dos litótipos aflorantes na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, RS. **Geografia Ensino e Pesquisa**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 75-95, 2015. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/geografia/article/view/16035/pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2018.

TREVISAN, D. P.; MOSCHINI, L. E.; TREVISAN, B. P. Avaliação da vulnerabilidade dos solos dos solos à erosão no município de São Carlos - SP. **Revista de Geografia (UFPE)**, Recife/PE, v. 35, n. 2, p. 354-370, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/230496/29086>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 1977. 91p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2 ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. 944p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: <<http://srtm.usgs.gov/>>. Acesso em: 04 jan. 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Decision-support systems for natural-hazard and land management issues**. Fact Sheet 2012-3001. Reston, USGS, 2012. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3001/fs2012-3001.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande/PB, v. 7, n. 2, p. 539-546, 2003.

- VALERIANO, M. M. Dados Topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e técnicas atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 72-104.
- VARGAS, R. **Utilizando a programação multicritério (AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio**. PMI Global Congress 2010 - North America Washington - DC - EUA - 2010.
- VELOSO, A. J. G. A importância do estudo das vertentes. **GEOgraphia**, Rio de Janeiro/RJ, v. 4, n. 8, p. 1-5, 2002.
- VERDUM R. **Approche géographique des “deserts” dans les communes de São Francisco de Assis et Manuel Viana, État du Rio Grande do Sul, Brésil**. 1997. 211f. Tese (Doctorat en Géographie et Aménagement) – Université de Toulouse Le Mirail, Toulouse, 1997.
- VIEIRA, A. F. G. **Erosão por voçorocas em áreas urbanas: o caso de Manaus (AM)**. 1998. 240p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- VIEIRA, A. F. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais**. 2008. 310p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- VIEIRA, N. M. **Estudo geomorfológico das boçorocas de Franca - SP**. 1978. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.
- VIEIRA, E. F. **Rio Grande do Sul: geografia física e vegetação**. Porto Alegre: Sagra, 1984. 183p.
- VIEIRA, A. F. G.; ALBUQUERQUE, A. R. da C. Cadastramento de voçorocas e análise do risco erosivo em estradas: BR - 174 (Trecho Manaus - Presidente Figueiredo). In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA E I ENCONTRO SUL-AMERICANO DE GEORMORFOLOGIA, 5, 2004, Santa Maria/RS. **Anais...** Santa Maria/RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2004.
- VIEIRA, C. L.; VERDUM, R. Arenização e erosão hídrica no sudoeste do Rio Grande do Sul: análise dos agentes condicionantes e considerações básicas para intervenções mecânico-vegetativas. **Revista de Geografia**, Recife/PE, v. 32, n. 1, p. 41-65, 2015.
- VIERO, A. C. **Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: bacia do Taboão, RS**. 2004. 141p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- VITTE, A. C.; MELLO, J. P. de. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do rio Verde, região nordeste do estado de São Paulo, Brasil. **GeoUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo/SP, n. 35, p. 192-222, 2013. Disponível em:

<<https://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/75447/78980>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

WILDNER, W.; NARDI, L. W. S. Características geoquímicas e de posicionamento tectônico do magmatismo Neoproterozóico aflorante no Platô do Taquarembó - RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 2, p. 169-184, 2002.

WILDNER, W.; RAMGRAG, G. E.; LOPES, R. C.; IGLESIAS, C. M. F. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750.000. CPRM: Serviço Geológico do Brasil, Escala 1:750.000 Porto Alegre, 2006.

ZARONI, M. J.; SANTOS, H. G. **Definição e característica dos solos**. EMBRAPA: 2006. Disponível em:
<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_19_2212200611543.html>. Acesso em: 31 mai. 2021.

ZELENY, M. **Multiple Criteria Decision Making**. McGraw-Hill, 1982.

ZERFASS, H. **História tectônica e sedimentar do Triássico da Bacia do Paraná (Rio Grande do Sul, Brasil) e comparação geológica com as bacias de Ischigualasto e de Cuyo (Argentina)**. 2003. 191f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.