

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**LEONARDO ROSA DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE AMBIENTAL EM ÁREA DE EXPLORAÇÃO  
MINERAL NAS MINAS DO CAMAQUÃ EM CAÇAPAVA DO SUL - RS**

**Caçapava do Sul - RS  
2019**

**LEONARDO ROSA DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE AMBIENTAL EM ÁREA DE EXPLORAÇÃO  
MINERAL NAS MINAS DO CAMAQUÃ EM CAÇAPAVA DO SUL - RS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Tecnologia Mineral - PPGTM da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Daniel da Cunha Kemerich

**Caçapava do Sul - RS  
2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S586c Silva, Leonardo Rosa da Silva  
Caracterização da Qualidade Ambiental em Área de Exploração  
Mineral nas Minas do Camaquã em Caçapava do Sul - RS /  
Leonardo Rosa da Silva Silva.  
111 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM TECNOLOGIA MINERAL, 2019.  
"Orientação: Pedro Daniel da Cunha Kemerich Kemerich".

1. Mineração. 2. Fragilidade. 3. Camaquã. 4. aquífero. 5.  
ambiental. I. Título.

**LEONARDO ROSA DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE AMBIENTAL EM ÁREA DE EXPLORAÇÃO  
MINERAL NAS MINAS DO CAMAQUÃ EM CAÇAPAVA DO SUL - RS**

Dissertação apresentada ao Curso Pós-graduação em Tecnologia Mineral - PPGTM da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia Mineral.

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Dissertação defendida e aprovada em: 05 de Agosto de 2019.  
Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Pedro Daniel da Cunha Kemerich  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr<sup>a</sup> Anelise Marlene Schmidt  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr Régis Sebben Paranhos  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr Willian Fernando de Borba  
UFSM

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por mais esta conquista.

A minha mãe Simony pelo apoio, compreensão e incentivo.

A minha namorada Milene Priebe pela paciência, pela ajuda e por me apoiar em tudo que faço.

Ao professor Pedro Kemerich pela orientação.

A Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Mineral (PPGTM) pelo auxílio financeiro.

Ao Instituto Federal Farroupilha pelo apoio com as análises.

A todo mundo que de alguma forma contribuiu para esta realização.

## RESUMO

A mineração é parte essencial da sociedade, fornecendo matéria-prima para bens de consumo e apoiando o desenvolvimento industrial e tecnológico, sendo iminentes expansões futuras. No entanto, as atividades de mineração possuem grande potencial de causar desestabilização e degradação do meio ambiente. Esse tipo de atividade demanda práticas que minimizem a capacidade de degradação ambiental, como medidas de controle, técnicas de monitoramento e levantamentos de dados. Desta forma, o presente estudo teve como objetivo a caracterização da qualidade ambiental de uma área de exploração mineral na região das Minas do Camaquã em Caçapava do Sul, RS. O local pesquisado compreende uma área de 8.955 hectares composta por sub-bacias que desaguam no Rio Camaquã. Esta área esteve sob influência de mineração de cobre por mais de um século, e seu encerramento ocorreu no ano de 1996. Em 2006 foram retomadas as pesquisas minerais, estando previsto a abertura de uma nova mina para extração de concentrados de zinco, chumbo e cobre. O estudo compreendeu etapas de análises e monitoramentos ambientais. A fragilidade ambiental foi avaliada através da análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados proposta por Ross (1994), levando em consideração a geomorfologia, pedologia, climatologia e uso e ocupação do solo. As análises químicas dos sedimentos fluviais foram realizadas por fluorescência de raio-x e a caracterização física seguindo o que dispõe a NBR 6502/95. Para os ensaios de permeabilidade foi utilizando o permeâmetro de Guelph. Realizou-se uma investigação geofísica através da técnica de eletrorresistividade com caminhamento elétrico utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo. A determinação da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação foi realizada utilizando o método AVI. A partir dos produtos cartográficos gerados, identificou-se um local, predominantemente, composto por classe de fragilidade ambiental média. Os sedimentos mostraram-se em grande maioria arenosos, para as análises químicas as maiores concentrações foram identificadas para o zinco, cobre e óxido de ferro indicando um possível impacto proveniente da antiga mineração de cobre. Para a permeabilidade do solo os valores encontrados foram compatíveis com a litologia da área. Os levantamentos geofísicos forneceram relevantes informações sobre a hidrogeologia do local. Os resultados para a vulnerabilidade do aquífero indicaram grande sensibilidade à contaminação das águas subterrâneas. Em linhas gerais, estudo contribuiu para a identificação da realidade ambiental da região, historicamente impactada pela mineração, em que essas informações poderão servir de base para questões de planejamento ambiental e territorial, visando à conservação dos recursos naturais em consonância com o tipo de atividade econômica da área.

Palavras-chave: Aquífero. Fragilidade. Impacto. Mineração. Vulnerabilidade.

## ABSTRACT

The mining industry is fundamental to society, supplying raw materials for the consumption and development of industrial and technological with imminent future expansions. However, mining activities have the potential to have severe adverse effects on the environment. This activity needs techniques for minimizing environmental impacts such as control measures, monitoring techniques and data survey. The aim of this study was to characterize the environmental quality of the area influenced by Copper mine in the region of Minas do Camaquã, at Caçapava do Sul, RS. The study area extends over about 8,955 hectares composed of sub-basins that contributes to Camaquã River, influenced by copper mining for more than a century. The study comprised stages of environmental and monitoring analysis. Environmental fragility was evaluated according to the empirical analysis of the fragility of natural and anthropic environments proposed by Ross (1994), using the geomorphology, pedology, climatology and land cover variables. The chemical analyzes of fluvial sediments were performed by EDXRF and the physical characterization followed by NBR 6502/95. For the permeability assays a Guelph permeameter was used. The geophysical surveys consisted in applying electroresistivity method and a dipole-dipole configuration was employed. The determination of the natural vulnerability of the aquifer to the contamination used the AVI method. The analysis of the environmental fragility maps permitted the observation, predominantly, of medium environmental fragility class. The sediments showed to be mostly sandy, for the chemical analyzes the highest concentrations were identified for Zn, Cu and  $Fe_2O_3$  indicating a possible impact from the old copper mining. For soil permeability, the values found were compatible with the lithology. Geophysical results provided relevant information about hydrogeology. The results of the vulnerability of the aquifer indicate the possibility of contamination of the groundwater. Thus, this study contributed to the identification of the environmental reality of the region, historically impacted by mining. This information will help support environmental and territorial planning issues, aiming at the preservation of natural resources in line with the type of economic activity of the area.

Keywords: Aquifer. Fragility. Impact. Mining. Vulnerability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição vertical da água no solo e subsolo. ....	29
Figura 2 - Tipos de aquíferos. ....	30
Figura 3 - Mapa de localização e acesso à área de estudo. ....	36
Figura 4 - Mapa geológico da área de estudo. ....	37
Figura 5 - Mapa hipsométrico da área em estudo. ....	39
Figura 6 - Localização da Bacia hidrográfica do Rio Camaquã.....	43
Figura 7 - Cruzamentos de informações cartográficas. ....	49
Figura 8 - Mapa de localização das coletas de sedimentos. ....	50
Figura 9 - (a) Ponto amostral no Rio Camaquã; (b) coleta de sedimentos no Arroio João Dias; (c) amostras dispostas em sacos plásticos identificados. ....	51
Figura 10 - Mapa de localização dos ensaios de permeabilidade do solo e levantamentos geofísicos. ....	53
Figura 11 - (a) realização do furo no solo com o auxílio de um trado; (b) montagem do equipamento; (c) posicionamento do equipamento no furo feito pelo trado; (d) liberação de carga hidráulica no furo (5 cm de carga hidráulica); (e) permeâmetro Guelph pronto para utilização.....	54
Figura 12 - (a) resistímetro Syscal Pro com bateria extra; (b) eletrodo conectado ao cabo com conexão jacaré; (c) linha de caminhamento elétrico montada. ....	56
Figura 13 - Área de estudo composta por um conjunto de sub-bacias. ....	59
Figura 14 - (a) Mapa de declividade; (b) Mapa de classes de fragilidade referente à declividade. ....	61
Figura 15 - (a) Mapa de solos da área; (b) Mapa de classes de fragilidade (tipos de solos).....	63
Figura 16 - Mapa de Fragilidade Potencial.....	66
Figura 17 - (a) Mapa de uso e cobertura do solo; (b) mapa de classes de fragilidade (uso e cobertura do solo). ....	70
Figura 18 - Mapa de Fragilidade Emergente (Ambiental).....	71
Figura 19 - Diagrama triangular de Shepard com os percentuais de Areia, Silte e Argila. ....	80
Figura 20 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG1 com sua interpretação geoeletrica. ....	82

Figura 21 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG2 com sua interpretação geométrica. ....	83
Figura 22 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG3 com sua interpretação geométrica. ....	84
Figura 23 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG4 com sua interpretação geométrica. ....	85
Figura 24 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG5 com sua interpretação geométrica. ....	86
Figura 25 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG6 com sua interpretação geométrica. ....	87
Figura 26 - Mapa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero (AVI). ....	88
Figura 27 - Mapa de espessura da zona não saturada acima do aquífero. ....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de declividade com suas respectivas classes de fragilidade.....	46
Tabela 2 - Tipos de solos com suas respectivas classes de fragilidade. ....	47
Tabela 3 - Classes de uso e ocupação do solo com suas respectivas classes de fragilidade.....	48
Tabela 4 - Características pluviométricas com suas respectivas classes de fragilidade.....	48
Tabela 5 - Classes de fragilidade com respectivos valores numéricos. ....	49
Tabela 6 - Classes de vulnerabilidade à contaminação AVI. ....	57
Tabela 7 - Dados de classes de declividade. ....	60
Tabela 8 - Dados de classes de solos e suas classes de fragilidade.....	62
Tabela 9 - Resultados da fragilidade potencial.....	67
Tabela 10 - Dados de uso e ocupação do solo e suas classes de fragilidade. ....	68
Tabela 11 - Resultados da fragilidade ambiental correspondente a áreas da bacia. ....	72
Tabela 12 - Resultados das análises granulométricas. ....	73
Tabela 13 - Resultados de concentrações de elementos químicos nos sedimentos.....	74
Tabela 14 - Matriz de correlação estatística de Pearson aplicada entre os elementos encontrados nos sedimentos.....	77
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica.....	78
Tabela 16 - Resultados do método AVI.....	92

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	14
1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	14
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
2.1	<b>Histórico da Mineração nas Minas do Camaquã</b> .....	15
2.2	<b>Impactos Ambientais na Mineração</b> .....	17
2.2.1	Impactos no Meio Físico .....	19
2.2.2	Impactos no Meio Biótico.....	21
2.3	<b>Planejamento Ambiental em Bacia Hidrográfica</b> .....	23
2.4	<b>Fragilidade Ambiental</b> .....	24
2.4.1	Vulnerabilidade a Processos Erosivos.....	25
2.4.2	Sistemas de Informações Geográficas e Geoprocessamento .....	26
2.5	<b>Águas Superficiais e Subterrâneas</b> .....	27
2.5.1	Tipos de aquíferos .....	29
2.5.2	Avaliação de vulnerabilidade de aquíferos .....	30
2.5.3	Geofísica aplicada à investigação ambiental .....	32
2.5.4	Qualidade das águas e sedimentos.....	33
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	35
3.1	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	35
3.1.1	Localização e acesso da área em estudo.....	35
3.1.2	Geologia .....	36
3.1.3	Hidrogeologia.....	38
3.1.4	Geomorfologia .....	38
3.1.5	Pedologia.....	40
3.1.6	Hidrografia .....	42
3.1.7	Características climatológicas .....	43
3.1.8	Vegetação .....	44
3.2	<b>ANÁLISE EMPÍRICA DA FRAGILIDADE AMBIENTAL</b> .....	45
3.2.1	Delimitação de Bacia hidrográfica .....	45
3.2.2	Mapa de Declividade .....	46
3.2.3	Mapa de Solos.....	46
3.2.4	Uso e Ocupação do Solo .....	47

3.2.5	Regime Pluviométrico .....	48
3.2.6	Cruzamento de Dados .....	49
3.3	<b>Coleta e Análise de Sedimentos .....</b>	<b>50</b>
3.4	<b>Ensaio de Permeabilidade .....</b>	<b>52</b>
3.5	<b>Levantamento Geofísico .....</b>	<b>55</b>
3.6	<b>Vulnerabilidade do Aquífero à Contaminação .....</b>	<b>57</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>59</b>
4.1	<b>Fragilidade Ambiental .....</b>	<b>59</b>
4.1.1	Declividade.....	60
4.1.2	Solos .....	62
4.1.3	Precipitações.....	64
4.1.4	Fragilidade Potencial.....	65
4.1.5	Uso e Ocupação do Solo .....	68
4.1.6	Fragilidade Ambiental.....	71
4.2	<b>Qualidade dos Sedimentos.....</b>	<b>73</b>
4.3	<b>Condutividade hidráulica do solo .....</b>	<b>78</b>
4.4	<b>Caracterização subsuperficial.....</b>	<b>80</b>
4.5	<b>Índice de vulnerabilidade à contaminação do aquífero .....</b>	<b>87</b>
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

AVI - *Aquifer Vulnerability Index*

BNDS - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BRCBC – Barragem de Rejeitos da Companhia Brasileira do Cobre

CBC - Companhia Brasileira do Cobre

CGBHRC - Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

EDXRF - Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FGTS - Fundo de Garantia do Tempo de Serviço

GPS - Sistema de Posicionamento Global

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM - Instituto Brasileiro de Museus

IDW - *Inverse Distance Weighting*

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

LATRAM – Laboratório de Lavra e Tratamento de Minério

MDE – Modelo Digital de Elevação

MMA - Ministério do Meio Ambiente

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

SCP – *Semi-Automatic Classification Plugin*

SDD – *Silicon Deriva Detector*

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

TIN - Triangular Irregular *Network*

USGS - *United States Geological Survey*

## 1 INTRODUÇÃO

A exploração mineral começou há milhares de anos, mas, foi com o passar do tempo, os avanços da tecnologia e da sociedade que as atividades de mineração expandiram, contribuindo com a descoberta de novas jazidas e o crescimento na exploração destes recursos da natureza, e conseqüentemente, aumentando a necessidade de práticas que minimizem os impactos resultantes deste tipo de empreendimento.

Metais de cobre, zinco e chumbo, por exemplo, são essenciais para a indústria, sendo as principais aplicações do Cobre a fabricação de fios para condução elétrica, tubulações, utilizado na construção civil e na indústria automotiva; do zinco na produção de ligas metálicas e na galvanização de estruturas de aço; e do chumbo na fabricação de baterias (ZOLIN, 2016).

Considerando que a mineração possui grande potencial de modificação do ambiente, o planejamento ambiental, que envolve coleta, organização e análise sistematizada das informações, por meio de procedimentos e métodos, torna-se indispensável, pois permite o desenvolvimento socioeconômico em consonância com a estabilidade do ambiente.

Na mineração um dos principais impactos referem-se à remoção das camadas superficiais do solo, onde acabam sendo expostos os horizontes inferiores, podendo resultar em perdas de nutrientes e erosões aceleradas que podem evidenciar a perda da estabilidade natural, levando a alterações que irão se refletir nos ambientes fluviais e na qualidade das águas.

A utilização de água na mineração abrange etapas, desde as fases de pesquisa até o beneficiamento. As inúmeras formas de uso da água geram grandes volumes de efluentes, que devem ser tratados e armazenados de forma adequada, pois sem o devido tratamento, podem, eventualmente, causar a contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, causando danos em escala local e regional (PAIVA, 2006). Nesse sentido, a análise de sedimentos pode fornecer importantes informações a respeito da qualidade das águas, pois, retratam a acumulação de elementos químicos usados ou produzidos por estas atividades.

Desta forma, o monitoramento ambiental deve ser contínuo, já que é muito comum nestes empreendimentos a interrupção das atividades, que retornam apenas quando há viabilidade técnica e econômica. Cita-se como exemplo a exploração

mineral nas Minas do Camaquã, em Caçapava do Sul, RS, local de estudo do presente projeto, que teve suas atividades mineradoras iniciadas em 1880, passando pela administração de diversos empreendedores, sendo paralisada por 3 vezes e encerrada com o esgotamento das jazidas de Cobre no ano de 1996. Em 2006 foram retomadas as pesquisas minerais na região, constatando-se a viabilidade de abertura de uma nova mina para exploração de concentrados de zinco e chumbo, o que justifica a realização desta pesquisa.

Neste sentido, esse trabalho abrange etapas de análise e monitoramento ambiental, que poderão contribuir com a estabilidade do ambiente, permitindo a adoção de técnicas preventivas adequadas para a área em questão. Além disso, os resultados gerados colaborarão no conhecimento científico associado à implantação de mineradoras, servindo como subsídio, principalmente, para futuros estudos ambientais e de mineração.

### **1.1 Objetivo geral**

O trabalho tem como objetivo geral a caracterização da qualidade ambiental de uma área de exploração mineral na região das Minas do Camaquã, visando contribuir para estudos ambientais aplicados ao planejamento ambiental em áreas de mineração.

### **1.2 Objetivos específicos**

O trabalho tem como objetivos específicos:

- a) avaliar o grau de fragilidade ambiental da área referente a processos erosivos;
- b) identificar a qualidade química e física dos sedimentos fluviais;
- c) determinar a condutividade hidráulica do solo;
- d) avaliar as características subsuperficiais do solo e identificar zonas saturadas;
- e) determinar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Histórico da Mineração nas Minas do Camaquã

A procedência da exploração das Minas do Camaquã tem como marco inicial a descoberta de rochas com tonalidade esverdeada pelo proprietário das terras e coronel João Dias dos Santos Rosa, em meados de 1865. Porém, foi um grupo de geólogos ingleses que analisaram e identificaram a qualidade dos minerais. Os ingleses exploraram a região durante os anos de 1870 e 1887 e estabeleceram uma infraestrutura incipiente e necessária para a execução de uma atividade lucrativa através da exploração do cobre e ouro. Porém a exploração foi efetuada de maneira bastante precária e rudimentar (NOGUEIRA, 2012).

Uma nova fase de exploração se deu entre as décadas de 1889 e 1899, quando o controle das minas estava novamente nas mãos da família de João Dias dos Santos da Rosa. Em abril de 1889 a família firmou um contrato de concessão para pesquisa e exploração com empresários e comerciantes alemães (OLIVEIRA, 1944). Porém, severas dificuldades na exploração das minas levaram os empresários a abandonarem o empreendimento. Dessa maneira, diante de empecilhos para a obtenção da lucratividade os empresários intermediaram negociações entre o proprietário da mina, João Dias dos Santos Rosa, e investidores belgas da empresa Minem de Cuivre Camaquam S.A. (OLIVEIRA, 1944). A companhia promoveu as atividades mineradoras durante o período de 1899 até 1908.

A empresa belga foi responsável por um grande avanço técnico nas atividades mineradoras na região. Conforme Bettencourt (1992), isso ocorreu principalmente devido à introdução de novas tecnologias de exploração e contratação de trabalhadores experientes.

A empresa belga encerrou suas atividades devido a problemas econômicos em relação à exportação do cobre.

As atividades mineiras foram retomadas somente em 1942, com a fundação da Companhia Brasileira do Cobre (CBC), tendo como principais acionistas o Governo do Estado do Rio Grande do Sul e a Laminação Nacional de Metais LTDA, pertencente ao Grupo Pignatari.

Atrelados ao expansionismo econômico do período ocorreram grandes investimentos no desenvolvimento de pesquisas para desenvolver novas tecnologias para a exploração das lavras nas Minas do Camaquã. É este processo de implementação da mineração em escala industrial que acarretou na montagem de uma infraestrutura urbana para auxiliar a mão de obra produtiva das minas.

A partir da década de 1970, a mineração entrou em franco declínio. O grupo Pignatari enfrentava dificuldades e não podia realizar investimentos necessários, nesse contexto, a mina passou a ser controlada pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDS), e, em 1975, foram paralisadas as atividades da empresa.

As atividades de mineração foram restabelecidas somente a partir da década de 1980, através de um processo altamente mecanizado. Foram encaminhados estudos detalhados das minas que resultaram, na reavaliação das reservas, apresentando-se um relatório final chamado de Projeto Expansão Camaquã. Este previa a realização da mineração a céu aberto, um novo modelo de extração, reavaliando as reservas existentes. O estudo e prospecção destas reservas surgiam como uma importante oportunidade de revitalizar a extração do cobre nas Minas do Camaquã (NOGUEIRA, 2012).

As atividades mineradoras arcaicas foram superadas em virtude do grande avanço técnico, da busca de lucratividade. Entretanto, a produção não alcançou as expectativas e projeções e a empresa acabou endividada. Em 1987, o sistema BNDS assumiu o endividamento bancário da empresa e reconheceu perdas da ordem de U\$ 29,7 milhões, como forma de buscar a compatibilização do valor econômico da CBC com sua capacidade de geração de rendas (RONCHI; LOBATO, 2000).

Devido ao endividamento o governo decidiu privatizar a CBC através de leilões, fato este não consumado diante da falta de compradores. Diante disto, um grupo de funcionários da CBC elaborou uma proposta de compra, mediante a utilização das ações e do FGTS, para que, assim, continuassem a administrar a empresa. Esta compra foi denominada de Bom Jardim Sociedade Anônima (NOGUEIRA, 2012).

A  *Holding Bom Jardim*, mesmo passando por dificuldades, conseguiu saldar suas dívidas com o BNDES e continuou as explorações de cobre até o esgotamento

total das jazidas, em abril de 1996. O fechamento definitivo da empresa ocorreu março em 1997.

Em 2006 foi retomada as pesquisas minerais no depósito Santa Maria através da *Joint Venture* entre IamGold e CBC. Em 2009 houve a intensificação das atividades de pesquisa mineral conduzidas pela Mineração Santa Maria LTDA que é uma *Joint Venture* entre Votorantim Metais e IamGold.

Em 2014 foram finalizadas as pesquisas minerais, totalizando mais de 100.000 metros de sondagens além de levantamentos geofísicos (EIA-RIMA PROJETO CAÇAPAVA DO SUL, 2016, v1, p.21). Ao todo, o depósito mineral possui 29 milhões de toneladas de minério (Cobre, Zinco e Chumbo). A extração desses recursos se dará em uma mina a céu aberto, com vida útil prevista de 20 anos. O “Projeto Caçapava do Sul” contempla a produção de dois concentrados, chumbo e zinco, sendo estes responsáveis pela viabilidade econômica do projeto.

Atualmente o empreendimento se encontra em fase de licenciamento ambiental.

## **2.2 Impactos Ambientais na Mineração**

Moreira (1993) define impacto ambiental como “qualquer alteração no meio ambiente em um ou mais de seus componentes, provocada por uma ação humana”. Sanchez (2008), por sua vez, traz impacto ambiental como sendo “qualquer alteração no sistema físico, químico, biológico, cultural ou socioeconômico que passa a ser atribuído às atividades humanas relativas às alternativas em um estudo para satisfazer as necessidades de um projeto”.

Considera-se impacto ambiental, de acordo com a Resolução do CONAMA nº 001 de 1986:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais (Brasil, 1986).

Toda atividade de exploração mineral gera algum tipo de impacto ao meio ambiente, seja de forma direta ou indireta, por outro lado, possui uma enorme importância para o desenvolvimento econômico. Os principais impactos ambientais gerados pela mineração referem-se à contaminação das águas, degradação de solos, supressão de vegetação, poluição atmosférica e geração de ruídos e vibrações. Além de impactos decorrentes de acidentes e desastres.

Citam-se como exemplos, os dois piores desastres ambientais já ocorridos no Brasil. O desastre na barragem de rejeitos da SAMARCO Mineração S.A., ocorrido em Mariana (MG) no ano de 2015, onde foi liberando um volume estimado entre 55 a 62 milhões de metros cúbicos de lodo rico em quartzo e óxido de ferro, resultando em diversos impactos que se estenderam por centenas de quilômetros de distância (o desastre representa atualmente a maior distância percorrida por rejeitos em um evento de falha na barragem na América do Sul), além de causar a morte de 19 pessoas (FERNANDES, 2016). Três anos depois a barragem do Córrego do Feijão, da Vale S.A., em Brumadinho (MG), rompeu matando cerca de 300 pessoas e impactando 3.485 (ARMSTRONG, 2019). A lama de rejeitos atingiu uma extensão de aproximadamente 250 km (FREITAS, 2019). Conforme Pereira (2019), 297,28 ha de terras foram soterradas pelos rejeitos, sugerindo impactos graves nos meios físico e biótico, além de desestabilização socioeconômica. Os impactos social, ambiental e material desses eventos catastróficos ainda estão sendo avaliados, estudados e monitorados devido à complexidade e dimensões.

De acordo como Ribeiro (2013) a mineração gera impactos de diversos graus, tanto dos fatores bióticos quanto abióticos, além de produzir interferências diversas nos meios social e econômico. Fernandes et al. (2014) argumentam que a atividade de mineração modifica consideravelmente o meio físico, provocando erosões, contaminação dos recursos hídricos, aumento da dispersão de metais pesados e alterações da paisagem. Além de afetar a fauna, a flora e a qualidade de vida das populações vizinhas às áreas mineradas.

Cabe salientar que os diversos impactos causados associam-se diretamente ao tipo de mineração. Por exemplo, minas de exploração de brita e calcário, levantam grandes porções de poeira, vibrações e ruídos, visto que necessitam do uso de explosivos para serem retirados do solo. Já minérios como o ferro, que são explorados em áreas montanhosas, necessitam da construção de taludes que geram problemas como o alto carregamento de sedimentos pela drenagem, causando

assoreamentos, e ainda, dificultando a regeneração natural de minas desativadas (LANA, 2015).

### 2.2.1 Impactos no Meio Físico

No solo um dos fatores impactantes, referem-se à remoção da camada superficial (camada orgânica), onde acabam sendo expostas as camadas inferiores podendo resultar em perdas de nutrientes, desestabilizações e erosões, que por sua vez, podem acarretar no assoreamento dos recursos hídricos.

Atividades de decapeamento, remoção de estéril, abertura de acessos, a própria retirada da camada mineralizada, produzem um impacto na maioria das vezes irreversível, pois dificilmente o perfil topográfico original será mantido. Outro fator que deve ser considerado é a deposição de estéril e minério, onde podem acabar gerando grandes pilhas, que alteram a topografia original, além de causarem alterações pontuais das propriedades originais do solo, tais com porosidade e compactação (PAIVA 2006). Os estéreis e rejeitos, na maioria das vezes, são armazenados em pilhas na própria região de mineração, podendo ser carregados pelas águas e causar danos aos corpos d'água (LANA, 2015).

A utilização de água na mineração abrange inúmeras etapas, desde fases de pesquisa até o beneficiamento de determinados minérios. A água pode ser utilizada em etapas como extração mineral, caso da lavra por dragagem em leito de rios, na desagregação do minério, caso do método de desmonte hidráulico, no beneficiamento de minério via úmida, tais como moagem, ciclonagem, flotação, cianetação, na mitigação de outros impactos, como a emissão de particulados, controlada por aspensão de água, nas águas de chuvas, que circulam por toda a área da mina, na geração de efluentes oriundos de refeitórios e sanitários (PAIVA, 2006).

As inúmeras formas de uso da água geram grandes volumes de efluentes, que devem ser tratados e armazenados de forma adequada, pois sem o devido tratamento, podem, eventualmente, causar a contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

A turbidez dos cursos d'água a jusante das regiões de exploração mineral, devem ser monitoradas, pois podem sofrer alterações causadas pelo carreamento de sedimentos. As águas também podem sofrer contaminações por substâncias,

contidas nos efluentes dos empreendimentos, tais como metais pesados, óleos, graxas, entre outros (MECHI; SANCHES, 2010). A liberação desses poluentes para o meio pode ocorrer por meio da lixiviação de rejeitos estocados, dos efeitos de erosão e do rompimento de barragens e, uma vez nos corpos aquáticos, podem ser transportados ocasionando contaminação de ambientes distantes das fontes de poluição (PAOLIELLO, 2001)

No ar, os problemas estão relacionados à poluição causada por particulados suspensos pela atividade de lavra, como perfurações, desmontes, escavações, carregamentos, transporte e descarga, além de emissões originadas no beneficiamento de alguns minérios (RODRIGUES, 2004). Outra fonte de geração é a emissão de gases originados na queima de combustíveis fósseis utilizados em equipamentos e veículos. Segundo Paiva (2006) os cortes de taludes, pilhas de estéril e outras superfícies desnudas também são fontes de geração de poeira.

Por ação dos ventos, as partículas mais finas podem ser transportadas por grandes distâncias, e quanto menores estas partículas, mais nocivas à saúde humana (NETO, 2012).

O aumento de particulados em suspensão, em valores fora dos parâmetros legais, pode ocasionar uma alteração da qualidade do ar, desconforto ambiental e comprometimento da saúde dos trabalhadores, com a retenção de partículas inaladas nos pulmões, gerando diversas doenças respiratórias (PAIVA, 2006). Bisquert (2017) argumenta que a emissão de poeira por empresas de mineração tem efeitos adversos sobre as populações que residem nas áreas adjacentes.

Silva et al. (2018) em Petrolina - PE, identificou os principais impactos ambientais decorrentes da ocupação de uma mineradora de gnaisses, concluindo que um dos principais impactos, refere-se a geração de poeira, que por sua vez, estava causando problemas respiratórios e irritação nos olhos de trabalhadores e de residentes próximos à área de exploração mineral. Em um estudo realizado por Drumond et al. (2017), em Itapemirim - ES, em uma região de extração mineral de rochas ornamentais e calcário, identificou níveis de concentrações acima dos limites permitidos pelas legislações, provocando alterações na qualidade do ar da região.

Os gases e poeiras afetam, ainda, a fauna e a flora, pois o material particulado próximo às vegetações encobrem as folhas e caules alterando a cor das plantas e posteriormente causam interferências nas funções dos vegetais que servem de alimentos e refúgio aos animais (SILVA, 2007).

Outros impactos ao meio ambiente estão associados a ruídos, sobrepressão acústica e vibrações no solo associados à operação de equipamentos e explosões (MECHI; SANCHES, 2010). Os ruídos e vibrações são identificados desde as operações de lavra até as etapas de beneficiamento do minério, incluindo as detonações com explosivos.

O impacto de vibração apresentado por Silva; Maia (2006), Bacci (2006) e Silva (2007), apresenta-se como impactante ao causar fuga da fauna que habita a área de mineração, bem como causa sérios transtornos à população circunvizinha.

### 2.2.2 Impactos no Meio Biótico

Os impactos no meio biótico estão estritamente ligados às alterações do meio físico, pois os dois meios integram um ecossistema. O ecossistema forma uma unidade fundamental do meio físico e biótico, em que coexistem e interagem uma base inorgânica e uma base orgânica constituída por organismos vivos (turfeira, brejo, floresta de terra firme, cerradões e pradarias, entre outras) (ACIESP, 1997 apud PAIVA, 2006).

A atividade de exploração mineral provoca alterações no meio onde está inserida, e conseqüentemente compromete o equilíbrio dos ecossistemas. O equilíbrio pode ser quebrado, primeiramente com a remoção da vegetação, ocasionando o afugentamento da fauna local. Posteriormente pode ocorrer um novo afugentamento, por ocasião dos ruídos e vibrações e, em alguns casos, alterações nos ecossistemas aquáticos.

Os gases e poeiras também podem interferir no desenvolvimento dos vegetais, causando a emigração dos animais para outras localidades. O desmate acarreta perdas de diversidade de flora e exposição do solo, além da supressão de nichos de alimentação e reprodução faunística. O êxodo da fauna em direção aos remanescentes florestais mais próximos origina o desaparecimento de espécies e também pode provocar comportamentos predatórios motivados pela disputa por nichos de alimentação, abrigo e reprodução (PAIVA, 2006). No ambiente aquático o assoreamento dos rios e a contaminação das águas podem afetar diretamente a fauna e a flora aquática, assim como, as espécies dependentes desses ambientes.

Conforme Sanchez (1995) os impactos da mineração sobre o meio antrópico se organizam em impactos sociais, econômicos e culturais.

Os principais impactos sociais são: impacto visual; impactos sobre a saúde e desconforto ambiental; alteração na dinâmica demográfica; qualificação da mão de obra; alterações na forma de uso do solo; interferências em comunidades.

Os impactos econômicos referem-se a: substituição ou incremento das atividades econômicas; aumento da demanda por serviços sociais e de infraestrutura; aumento local de preços; alteração das opções de uso do solo; aumento da oferta de empregos; aumento da arrecadação tributária; indução ao desenvolvimento regional; incremento no tráfego rodoviário.

Os impactos culturais dizem respeito a: perda do patrimônio histórico-cultural; alteração das relações socioculturais.

Inevitavelmente a paisagem natural será afetada pela implantação do empreendimento, provocando impactos visuais. Conforme Silva (2007) a degradação da paisagem causa desconfortos visuais à população local.

Problemas de saúde e desconforto ambiental estão relacionados às alterações no meio físico e no meio biótico. Essas alterações acabam afetando os ecossistemas e conseqüentemente a qualidade de vida da população.

A alteração na dinâmica demográfica ocorre em decorrência da expectativa de empregabilidade das populações que migram para áreas onde se localizam grandes empreendimentos minerários (PAIVA, 2006).

IBRAM (2013); Naves; Fernandes (2015) apontam que as atividades minerárias trazem para as comunidades o desenvolvimento local, contribuindo na renda, na geração de emprego, no pagamento de tributos e compensações financeiras, muitas vezes em lugares inóspitos ou de difícil acesso, assim como auxiliam no índice de desenvolvimento humano dos municípios recebedores da compensação financeira pela exploração de recursos minerais.

Contudo a atividade de exploração mineral pode ser fonte de problemas socioambientais, como conflito no uso do solo, causando transtornos a população e danos à cobertura natural do solo. A depreciação de imóveis e infraestrutura pública afeta diretamente a população (BITTAR, 2007).

A implantação de um empreendimento minerário em uma área remota ou que se mantenha isolada e não atingida por costumes exteriores, afetará o cotidiano da população, intervindo em seus hábitos, costumes, aspectos religiosos e até mesmo linguísticos (bens intangíveis), além de afetar de diversas formas os bens culturais

físicos (bens tangíveis), como construções históricas, quedas d'água, cavernas, fósseis, artefatos, antiguidades e etc (PAIVA, 2006).

### **2.3 Planejamento Ambiental em Bacia Hidrográfica**

Bacia hidrográfica é definida como uma área de captação natural de água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no exutório (TUCCI, 2012). Uma bacia hidrográfica pode compreender diferentes dimensões, sendo possível a fragmentação em sub-bacias, porém mantendo conectividades através de seus sistemas hídricos.

Segundo Santos (2004) os estudos em pequenas bacias ou sub-bacias são facilitados, pois garantem a participação social dando ênfase aos problemas principais.

Ao adotar-se a bacia hidrográfica como célula básica na análise ambiental é possível conhecer e analisar seus vários componentes (solo, água, ar e vegetação) e os processos e interações nela existentes (a infiltração, o escoamento, a erosão e a contaminação) e assim mensurar o equilíbrio e a qualidade ambiental da mesma, possibilitando uma análise integrada do reflexo das atividades humanas no ambiente (BOTELHO; SILVA, 2004).

Conforme a descrição de Santos (2004) o planejamento ambiental se caracteriza por:

Um processo contínuo que envolve coleta, organização e análise sistematizada das informações, por meio de procedimentos e métodos, para se chegar a decisões e escolhas acerca das melhores alternativas para o aproveitamento dos recursos disponíveis em função de suas potencialidades, e com a finalidade de atingir metas específicas no futuro, tanto em relação a recursos naturais quanto à sociedade (SANTOS, 2004).

Guerra (1999) argumenta que o planejamento ambiental em bacias hidrográficas tem o poder de diminuir substancialmente as chances de ocorrência de impactos ambientais decorrentes da ação antrópica, com o objetivo de orientar a ocupação humana, para que sejam resguardadas as áreas de importância

ambiental, tendo em vista a conservação dos recursos naturais, a forte instabilidade, fragilidade ambiental ou a alta suscetibilidade à erosão e movimentos de massa que certas porções da paisagem podem apresentar.

A adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento é aceita por estudiosos em diversas partes do mundo (BEHERA; PANDA, 2006; TEODORO et al., 2007; QUEIROZ et al., 2014; AHER et al., 2014; ARAÚJO et al., 2015). Dessa maneira, a bacia hidrográfica torna-se a unidade ideal para se efetuar trabalhos de planejamento de um modo geral, fornecendo subsídios para que sejam efetuados diversos estudos que se tornem necessários, como por exemplo, o estudo da fragilidade ambiental (GHEZZI, 2003).

Percebe-se que o planejamento ambiental é utilizado para definir todo estudo ou projeto que leve em consideração fatores físico-naturais e socioeconômicos, para avaliação do uso do território e/ou exploração dos recursos naturais, ainda que com foco em algum fator.

## **2.4 Fragilidade Ambiental**

Fragilidade ambiental é a susceptibilidade do ambiente de sofrer intervenções, ou de ser alterado. Está relacionada com fatores de desequilíbrio de ordem tanto natural (expresso pela própria dinâmica do ambiente), como em situações de elevadas declividades e alta susceptibilidade erosiva dos solos, quanto antropogênica (uso inadequado da terra e de intervenções em regimes fluviais) (TAMANINI, 2008). A poluição também pode ser considerada como um fator de desequilíbrio para a fragilidade ambiental de uma determinada área.

A fragilidade ambiental pode ser potencial ou emergente. conforme Santos (2005), a fragilidade potencial é caracterizada pela fragilidade natural do meio, ou seja, características relacionadas a declividade, pluviosidade, tipo de solo, entre outros, enquanto que a fragilidade emergente além de levar em conta as características naturais também considera o elemento humano, com suas ocupações e utilização do meio.

Segundo Ross (1994 apud SANTOS; VITTE, 1998) em estudos de fragilidade ambiental, os conhecimentos relativos aos recursos naturais (solos, relevo, rochas e minerais, água, clima, flora e fauna) devem ser avaliados de forma integrada,

baseado no princípio de que a natureza apresenta funcionalidade intrínseca entre suas componentes.

Em relação a modificações nos diferentes componentes da natureza, Spörl; Ross (2004) afirmam que qualquer alteração no relevo, solo, vegetação, clima e recursos hídricos, resultam em comprometimento da funcionalidade do sistema, quebrando o seu estado de equilíbrio dinâmico, gerando estados de desequilíbrio temporário ou permanente. Deste modo, a exploração de recursos naturais, a supressão de cobertura vegetal para a implantação de culturas ou pastagem, a ocupação desordenada, entre outros, levam ao estado de desequilíbrio diante dos processos erosivos.

A variedade de tipos de solos e sua distribuição espacial influenciam na eficiência dos usos e ocupações, e na intensidade dos impactos ambientais (TRENTIN, 2012). Já a declividade pode ser considerada um importante fator de análise no estudo da fragilidade ambiental de um local, pois, os processos erosivos podem ser acelerados conforme o grau de inclinação da bacia. Entretanto, esse fator não pode ser analisado de forma isolada, mas sim combinado com alguns fatores como tipo de uso e ocupação do solo (PADILHA, 2013).

Existem modelos para análise de fragilidade ambiental, como por exemplo, os modelos de Ross (1994), Crepani et al. (2001), entre outros, os quais tem o objetivo de auxiliar no planejamento estratégico ambiental.

Os estudos relativos às fragilidades dos ambientes são de extrema importância ao planejamento ambiental. A identificação dos ambientes naturais e suas fragilidades proporcionam uma melhor definição das diretrizes e ações a serem implementadas no espaço físico-territorial, servindo de base para o zoneamento e fornecendo subsídios à gestão do território (SPÖRL; ROSS, 2004).

#### 2.4.1 Vulnerabilidade a Processos Erosivos

A erosão é classificada em duas formas: a geológica ou natural e a acelerada ou antrópica. A erosão geológica se desenvolve em condições de equilíbrio com a formação do solo, onde o trabalho mecânico de destruição é exercido pelas águas correntes carregando sedimentos e depositando-os em áreas baixas.

A erosão acelerada envolve a intervenção do homem no meio físico, alterando os processos geológicos e ocasionando o desequilíbrio no sistema.

Os processos erosivos permitem destacar dois importantes eventos iniciais: o impacto das gotas de chuva na superfície do solo e o escoamento superficial das águas, permitindo o transporte das partículas.

Dependendo da forma do escoamento superficial ao longo da vertente, pode se desenvolver dois tipos de erosão: erosão laminar ou lençol, causada por escoamento difuso das águas das chuvas, resultando na remoção progressiva dos horizontes superficiais do solo; erosão linear, provoca a concentração das linhas de fluxo das águas de escoamento superficial, resultando em incisões na superfície do terreno, na forma de sulcos, ravinas e voçorocas (OLIVEIRA, 1994).

Vulnerabilidade define o nível em que uma mudança pode prejudicar ou destruir um sistema, esse nível depende tanto da sensibilidade/suscetibilidade, isto é, da reação ou mudança ocorrida com a mínima variação nas condições externas, como da capacidade do sistema em retornar as condições originais após ser afetado por ações de distúrbios externos (CHRISTOFOLETTI, 1999). Isso quer dizer que em um sistema com alta vulnerabilidade, as menores alterações poderão desencadear grandes e intensos efeitos modificadores.

A vulnerabilidade à erosão é avaliada de acordo com as características dos elementos dos meios físico e ambiental, estudadas de forma integrada. É estabelecida a partir da análise dos principais condicionantes do processo erosivo, que envolve principalmente a chuva, as peculiaridades do solo, a topografia, a cobertura vegetal e a geologia.

Para Bertoni; Lombardi Neto (2008), a erosão é causada por forças ativas associadas às chuvas, às características do declive do terreno e à capacidade que tem o solo de absorver água, e também por forças passivas, representadas pela resistência do solo à ação erosiva da água e à densidade da cobertura vegetal. Guerra (2003) afirma que a intervenção do homem pode alterar esses fatores, apressando ou retardando os processos erosivos.

Nesse sentido, os estudos de fragilidade ambiental, com ênfase susceptibilidade a erosão dos solos, podem auxiliar na identificação e caracterização de locais vulneráveis, proporcionando subsídios para um melhor planejamento e gestão territorial.

#### 2.4.2 Sistemas de Informações Geográficas e Geoprocessamento

Os produtos gerados por um Sistema de Informação Geográfica (SIG), no geral, vinculam-se ao espaço físico, podendo, entretanto, trabalhar-se fenômenos climáticos, humanos, sociais, econômicos, entre outros. A partir desses espaços devidamente “mapeados” e trabalhados pelo SIG, pode-se conhecer melhor uma região, possibilitando, assim, o fornecimento de subsídios para uma futura tomada de decisões (FITZ, 2008).

Ações vinculadas ao planejamento, à gestão, ao monitoramento, ao manejo, à caracterização de espaços urbanos ou rurais certamente serão melhor trabalhadas com o auxílio de um SIG. Outra aplicação bastante prática dos SIG, diz respeito à realização de análises de cunho espacial por meio de mapas temáticos. Uma das técnicas trabalha a sobreposição. Cada mapa contendo um tema específico, o qual constitui um plano de informação, é sobreposto a outro de temática diferente, mas de igual dimensão, para a obtenção de um produto deles derivado.

Segundo Oliveira (2013), os SIG podem ajudar no aprimoramento dos processos de tomada de decisão a partir da representação das informações disponibilizadas na base de informações, apresentada em mapas geográficos temáticos. Essa compreensão sobre as funcionalidades dos SIG permite que o processo de observação de problemática, o pesquisador possa elencar questões relevantes na concepção de hipóteses.

O sensoriamento remoto tem papel significativo no ambiente SIG, como uma das alternativas mais viáveis para extração de informações sobre os diversos usos do solo, assim, gerando grande número de informações e possibilitando programação de ações adequadas para tomada de decisões por constituir ferramentas de articulação e informações geoespaciais (FUSHITA et al., 2013).

## **2.5 Águas Superficiais e Subterrâneas**

Aproximadamente 70 % de toda superfície da Terra está coberta por água, diante disso, 97,5 % dessa água é considerada salgada, oriunda dos mares e oceanos, e apenas uma pequena parte, correspondendo a 2,5 %, é caracterizada como água doce. Destes 2,5 %, cerca de 68,9 % formam as calotas polares e geleiras, 0,9 % é relativo a umidade do solo e pântanos, 0,3% aos rios e lagos e ainda, 29,9 % correspondem as águas subterrâneas (MMA, 2007). Os recursos hídricos superficiais representam uma importante reserva de água, pois, é a fonte de

mais fácil captação para o uso das atividades humanas. Porém a maior disponibilidade de água doce está presente nos aquíferos em reservatórios subterrâneos.

Conforme a definição de Tucci (2004), as águas superficiais são as que escoam ou estão armazenadas na superfície da Terra, devido à contribuição das águas de precipitação, de recarga de aquíferos ou do escoamento superficial de outros recursos hídricos superficiais. Essas águas tendem a sofrer escoamento superficial através de condicionantes morfológicos e topográficos, representando as reservas hídricas superficiais disponíveis nas bacias e sub-bacias hidrográficas. Já as águas subterrâneas são constituídas pela parcelada de água precipitada sobre a superfície, que infiltra no solo para serem armazenadas no subsolo e rochas (DELLEUR, 1998).

A água, quando penetra no solo, sofre a ação da força gravitacional e depende das características do solo, sedimentos ou rochas, sendo o seu movimento controlado pelas forças de atração entre as moléculas e a tensão superficial.

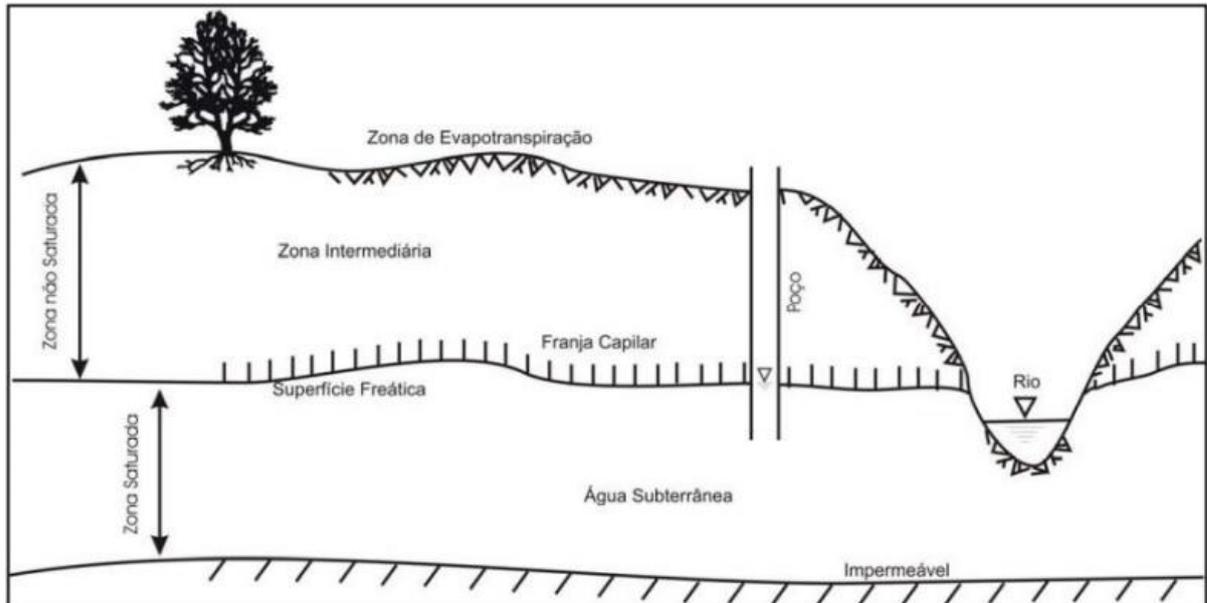
Abaixo da superfície do terreno a água contida no solo e nas formações geológicas é dividida ao longo da vertical, em duas zonas horizontais, a zona saturada e a zona não saturada.

A zona saturada fica situada abaixo da superfície freática e todos os poros e espaços vazios encontram-se preenchidos com água, a superfície entre a zona não saturada e a zona de saturada, denomina-se lençol freático, onde toda água abaixo dessa superfície é considerada água subterrânea (TUCCI, 2000). Esta zona se estende verticalmente para baixo até o ponto em que a permeabilidade e a porosidade da rocha permitir, variando de dezenas de metros a alguns quilômetros de profundidade em determinados locais.

A zona não saturada se situa entre a superfície freática e a superfície do terreno, onde os poros estão parcialmente preenchidos por ar e água. A mesma divide-se em três partes: zona capilar, a qual se estende da superfície freática até o limite de ascensão capilar da água, zona intermediária que está compreendida entre o limite de ascensão capilar da água e o limite de alcance das raízes das plantas e a zona de água no solo, também chamada de zona de evapotranspiração, que situa-se entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno (MANOEL FILHO, 2008). A distribuição vertical da água está representada na Figura 1. A espessura da zona não saturada depende principalmente da topografia e do clima,

onde, em regiões secas e montanhosas pode se estender a centenas de metros, enquanto em locais de alta pluviometria, pode situar-se a alguns metros da superfície.

Figura 1 - Distribuição vertical da água no solo e subsolo.



Fonte: Feitosa e Manoel Filho (1997).

As águas subterrâneas permanecem em aquíferos, que são camadas ou formações geológicas que armazenam água e permitem seu movimento em condições naturais e quantidades significativas.

### 2.5.1 Tipos de aquíferos

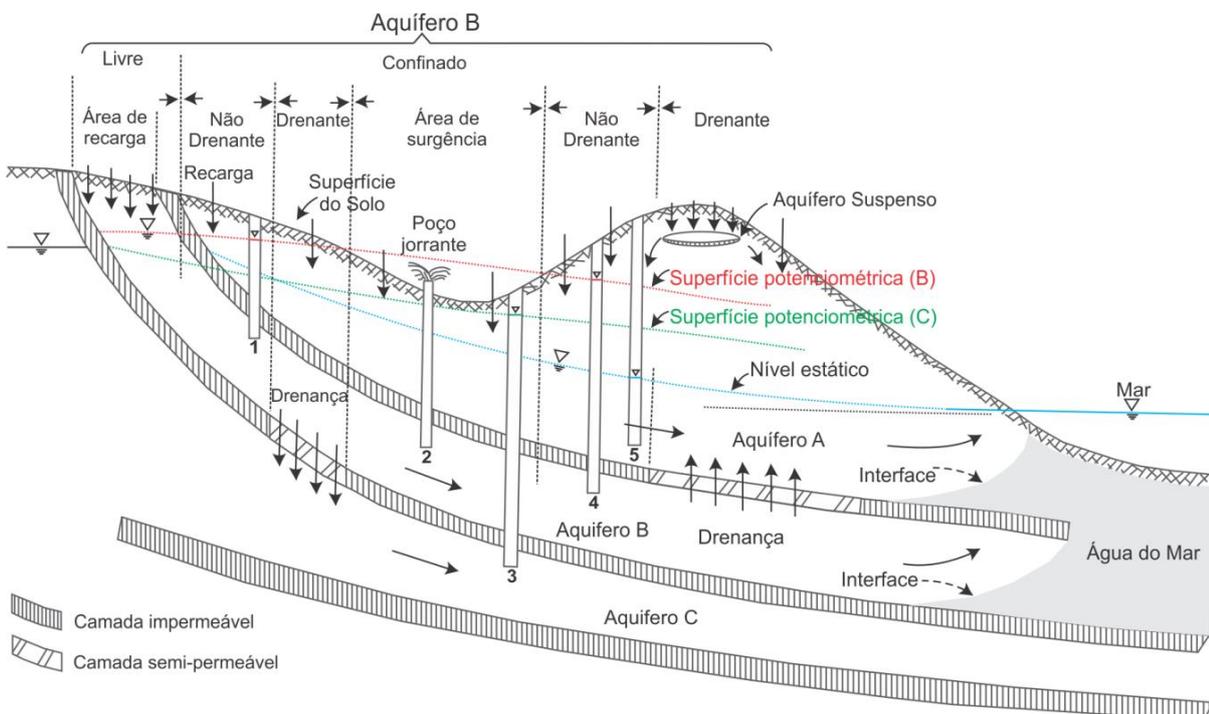
Rebouças et al. (2002) definem um aquífero como sendo uma formação geológica abaixo da superfície, que se constitui essencialmente por rochas permeáveis e porosas, cujos espaços vazios nas rochas sendo poros, fraturas e falhas estão preenchidos por água ou outro fluido que possibilita a transmissão. Assim os aquíferos podem ser classificados baseando-se nas características hidráulicas e na porosidade da rocha.

Conforme Feitosa; Manoel Filho (2008) e Capucci et al. (2001) os aquíferos podem ser classificados em função da pressão das águas nas suas superfícies limítrofes. Os aquíferos livres ou freáticos têm sua base representada por uma rocha ou formação rochosa impermeável e seu limite superior por uma superfície hídrica

livre, ficando sujeito a pressão atmosférica, o que os torna mais vulneráveis à contaminação. Sendo assim a água que se infiltra no solo percola por toda a zona não saturada, recarregando o aquífero.

Os aquíferos confinados se encontram entre duas camadas impermeáveis, apresentando-se saturados em toda sua espessura, com pressão superior a pressão atmosférica. Este aquífero é representado por dois tipos: confinado não drenante e confinado drenante. No confinado não drenante ou artesiano, a camada saturada está confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis, de forma que a pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto. Se a pressão for suficientemente forte a água poderá jorrar espontaneamente pela boca do poço. Já no confinado drenante ao menos uma das camadas limitantes é semipermeável, fazendo com que a entrada e saída da água pelo topo e/ou pela base se faça por drenança. No aquífero semi-confinado, onde a base e o topo são rochas semi-permeáveis, ocorre além do fluxo horizontal da água, também um fluxo vertical. Os tipos de aquífero estão representados na Figura 2.

Figura 2 - Tipos de aquíferos.



Fonte: Feitosa e Manoel Filho (1997).

## 2.5.2 Avaliação de vulnerabilidade de aquíferos

O conceito de vulnerabilidade do aquífero é usado para medir a susceptibilidade de um aquífero a ser afetado negativamente por uma carga de contaminantes imposta da superfície terrestre (FOSTER et al., 2013).

Hirata; Fernandes (2008) afirmam que a vulnerabilidade do aquífero irá depender de um conjunto de características naturais ou intrínsecas tanto físicas, químicas e/ou biológicas, da zona não saturada e o aquífero confinante, impedindo a chegada do contaminante na água subterrânea. Assim, essa característica é dependente do meio em que o aquífero está inserido (MACHIWAL et al., 2018).

A técnica de avaliação de vulnerabilidades inclui o método do índice de sobreposição (método qualitativo) (NESHAT et al., 2014), o método estatístico (método qualitativo) (SORICHETTA et al., 2011) e o método baseado em processos (método quantitativo) (MILNES, 2011). Numerosos estudos foram realizados para avaliar sistematicamente o potencial de um ambiente hidrogeológico à contaminação. Alguns destes métodos incluem AVI (VAN STEMPOVOORT et al., 1993), DRASTIC (ALLER et al., 1987), GOD (FOSTER, 1987), SINTACS (CIVITA, 1994), SEEPAGE (CIVITA; DE REGIBUS, 1995), EPIK (DOERFLIGER; ZWAHLEN, 1997), ISIS (NAVLUR; ENGEL, 1997), IS (RIBEIRO, 2000), entre outros. Esses métodos integram vários parâmetros hidrológicos e hidrogeológicos em diferentes combinações definidas por classificações e pesos. Além, de integrar o SIG aos métodos, abrindo portas para uma maior popularidade e aplicações.

O método AVI, proposto por Van Stempvoort et al. (1993), calcula o índice de vulnerabilidade do aquífero com base na resistência hidráulica calculada como uma razão entre a espessura de cada unidade sedimentar acima do lençol freático e a condutividade hidráulica estimada de cada uma dessas camadas. Sendo a resistência hidráulica um indicador inverso da vulnerabilidade: pode ser usado como uma estimativa aproximada do tempo de deslocamento vertical da água através das camadas não saturadas. Mesmo havendo muitas metodologias que considerem os processos que ocorrem na zona vadosa, o índice AVI é talvez o mais adequado em áreas constituídas por camadas sedimentares e de grande escala.

O conceito de vulnerabilidade reduz a lacuna de comunicação entre os hidrogeólogos e os planejadores e tomadores de decisão, visando identificar e priorizar as áreas ou regiões mais vulneráveis de uma bacia que podem causar contaminação da água subterrânea e fornece uma base científica para a proteção das águas subterrâneas e o planejamento do uso da terra (MACHIWAL et al., 2018).

### 2.5.3 Geofísica aplicada à investigação ambiental

Os métodos geofísicos de investigação são um conjunto de procedimentos, que baseiam-se em propriedades físicas e ferramentas matemáticas. São aplicados à exploração do subsolo, podendo ser utilizados em buscas e estudos de depósitos de substâncias úteis ou perigosas, corpos estranhos, caracterização hidrogeomorfológica, entre outros.

A natureza não invasiva dos métodos geofísicos, aliada ao baixo custo operacional, rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios, torna-os uma excelente ferramenta para ser aplicada em estudos ambientais. De uma forma geral, a utilização da geofísica fornece diversas informações sobre o ambiente, como por exemplo, a profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo, profundidade do substrato rochoso, identificação de falhas e fraturas na rocha, plumas de contaminação, entre outros. (LAGO et. al., 2006).

Os métodos geofísicos elétricos são bastante utilizados em pesquisas de água subterrânea e fontes geotermiais (CAVALCANTI et. al.; 2001; TELFORD et al., 1990; PINTO; ABRÃO,1991). Estudos realizados por Cavalcanti et al. (2001) utilizando método geofísico elétrico, identificaram a topografia do embasamento e a configuração do nível do lençol freático com indicação das principais direções do fluxo subterrâneo. Os autores Castro (2008) e Silva; Malagutti Filho (2009) aplicaram métodos geofísicos, em estudos ambientais, em distintos meios aquíferos, identificando o nível freático e a existência de plumas de contaminação. Zanato (2016), utilizando método geoeletrico, pode identificar zonas de maior saturação do solo.

A eletrorresistividade é um método geofísico cujo princípio está baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais geológicos ou não, permitindo uma estimativa da distribuição deste parâmetro em subsuperfície. O método é amplamente utilizado, devido à possibilidade de aplicação nos diversos campos de estudo, como mineração, geologia de engenharia, hidrogeologia e estudos ambientais.

De maneira geral, a inclusão da geofísica em estudos hidrogeológicos e ambientais fornece uma gama informações sobre a subsuperfície com o mínimo de impacto ambiental, possibilitando uma melhor gestão de uso dos recursos naturais.

#### 2.5.4 Qualidade das águas e sedimentos

A qualidade da água de uma região é determinada por processos naturais (intensidade das precipitações, intemperismo, cobertura vegetal) e pela influência antrópica (agricultura, concentração urbana, atividade industrial e uso excessivo da água). A exploração incorreta dos solos pode representar uma fonte de poluição difusa constante ao longo de todo um ano, enquanto que o escoamento superficial é um fenômeno sazonal, extremamente afetado pelas condições climáticas da bacia (VEGA et al., 1998). Já a contaminação das águas subterrâneas pode ocorrer de duas maneiras: uma, pelo transporte dos poluentes pelas águas de chuva, que se infiltram até alcançar o lençol freático; e outra, quando os poluentes já atingiram o aquífero, e se locomovem lateralmente.

Os poluentes são produtos de ação antrópica, principalmente oriundos de atividades domésticas, industriais, agrícolas e de extração mineral. Os principais contaminantes são os organismos patogênicos e os metais pesados com baixa mobilidade, compostos inorgânicos, orgânicos sintéticos, halogenados e hidrocarbonetos (HIRATA, 2001).

Metal pesado é um termo para o grupo de substâncias químicas com densidade atômica mais pesada que  $4,0 \text{ g/cm}^3$ , como arsênio, cádmio, cromo, chumbo, mercúrio, cobre e zinco (EDELSTEIN; BEN-HUR, 2018).

A análise de sedimentos pode fornecer importantes informações a respeito da qualidade do ambiente aquático, já que sedimentos agem como memória do ecossistema, fornecendo um retrato de sua evolução com o tempo, registrando as informações dos episódios de impactos ambientais e acumulando espécies químicas usadas ou produzidas pelas atividades humanas.

A absorção de espécies metálicas é cumulativa e o sedimento pode agir como uma fonte potencial, já que o elemento acumulado pode ser convertido em outras espécies mais tóxicas ou mais solúveis na fase aquosa, afetando dessa forma as propriedades do ambiente aquático. Esses acontecimentos podem induzir mudanças significativas em sua qualidade (VIEIRA et al., 2005).

Os metais frequentemente se acumulam nos sedimentos fluviais, levando a uma maior exposição e possível toxicidade aos organismos vivos (BESSER et al., 2015). A liberação de contaminantes pelos sedimentos pode retardar a recuperação

natural dos corpos hídricos em até 15 anos (PAYTAN et al., 2017 ; CHEN et al., 2018).

O sedimento suspenso origina-se principalmente de processos de intemperismo e erosão em bacias hidrográficas. Porém a mineração é uma das principais fontes de contaminação de metais pesados e outros. Como é observado em diversos locais do mundo, como a mineração de bauxita na Malásia (KUSIN et al., 2018) e a mineração de Estanho na China (XIANG-BIN et al., 2015).

Desta forma, a análise dos sedimentos fluviais apresenta-se de suma importância para a caracterização ambiental de áreas contaminadas e/ou com potencial de contaminação.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

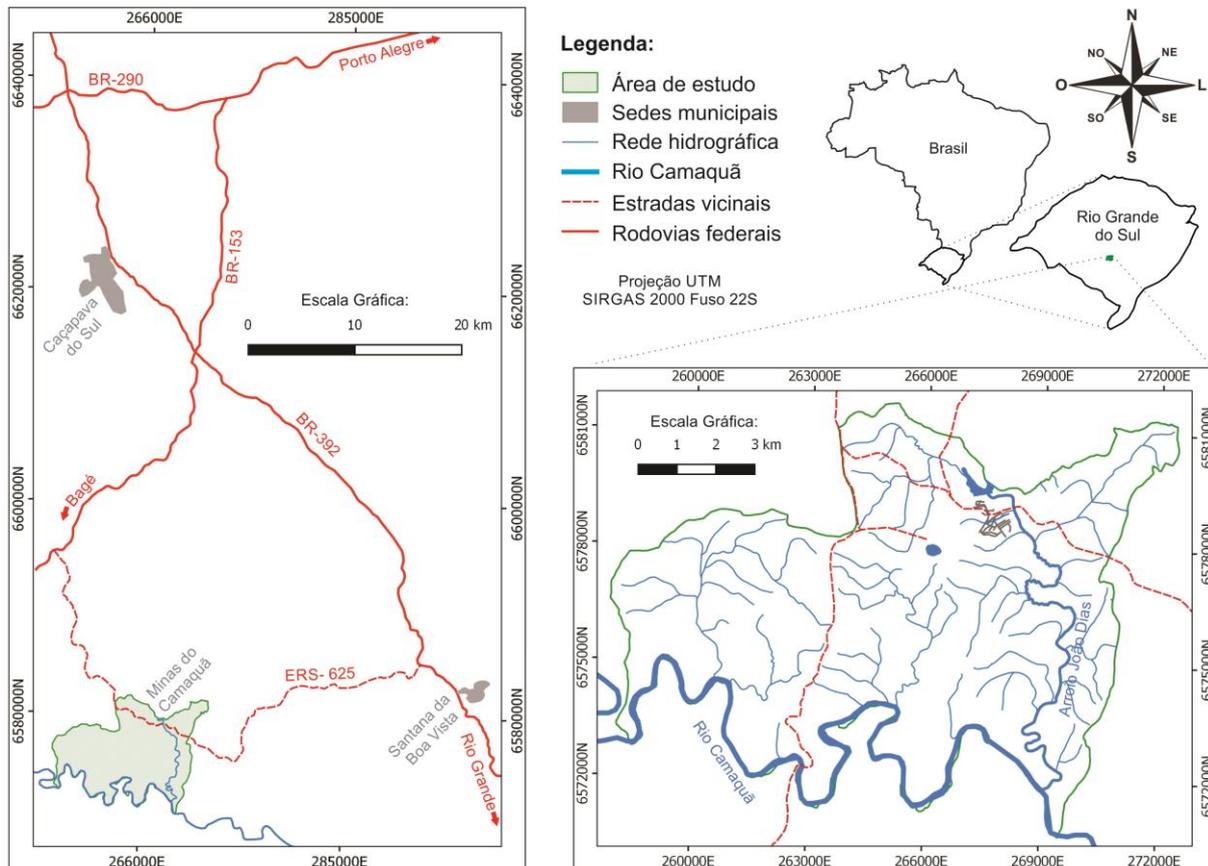
#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

##### **3.1.1 Localização e acesso da área em estudo**

A área em estudo localiza-se na região central do estado do Rio Grande do Sul, na localidade das Minas do Camaquã a aproximadamente 75 km da sede do município de Caçapava do Sul, entre as latitudes 6569000N e 6583000N e longitudes 257000E e 273000E, abrangendo uma área de 8.955 hectares, situando-se em região limítrofe entre os municípios de Caçapava do Sul - RS e Santana da Boa Vista - RS, separados pelo Arroio João Dias, além de fazer divisa com o município de Bagé – RS, a Sul, separados pelo Rio Camaquã.

O principal acesso a área de estudo, partindo de Porto Alegre, se dá pela BR-290, em direção Oeste, até o entroncamento com a BR-153, ingressando em direção Sul até o entroncamento com a ERS-625, a partir desta, percorre-se aproximadamente 25 Km de estrada vicinal não pavimentada até a região das Minas do Camaquã (FIGURA 3).

Figura 3 - Mapa de localização e acesso à área de estudo.



Fonte: O autor.

### 3.1.2 Geologia

O contexto geotectônico regional onde está inserida a área em estudo relaciona-se com a porção sul da província Mantiqueira (ALMEIDA; HASUI, 1984), designada Escudo Sul-Rio-grandense.

Repousam sobre os blocos tectônicos do Escudo Sul Rio-grandense as litologias pertencentes a Bacia do Camaquã, as quais compõem de forma dominante a área de estudo.

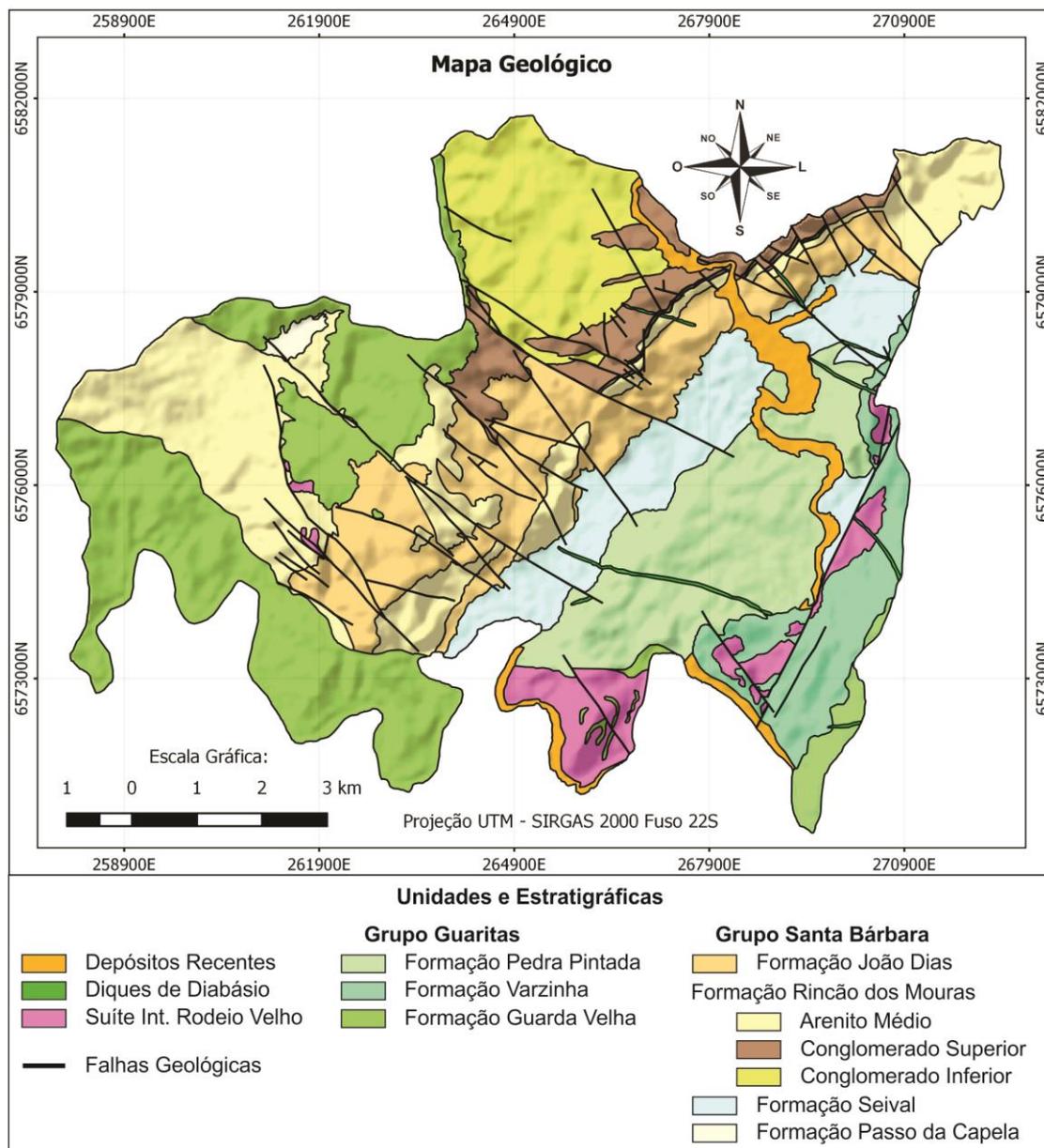
O Supergrupo Camaquã é constituído por rochas sedimentares siliciclásticas e vulcanogênicas e aflora em três sub-bacias alongadas, denominadas Sub-Bacia Camaquã Ocidental, Camaquã Central e Camaquã Oriental.

De acordo com Fragozo et al. (2003), o Supergrupo Camaquã atinge espessura significativamente superior a 6.000 m e é constituído pelas seguintes unidades, do mais antigo para o mais recente: Grupo Maricá, Grupo Bom Jardim, Formação Acampamento Velho, Grupo Santa Bárbara, Grupo Guaritas e Grupo

Rodeio Velho. A área de estudo está incluída apenas no contexto geológico dos Grupos Santa Bárbara e Guaritas.

Na área estudada são encontradas rochas sedimentares siliciclásticas, incluindo arenitos, conglomerados, ritimitos e brechas sedimentares pertencentes ao Grupo Santa Bárbara e, por vezes, uma camada de conglomerados do Grupo Guaritas. Ainda em menor quantidade, rochas intrusivas rasas ou vulcânicas de composição intermediária. Há a presença de corpos de caráter básico a ultrabásico cortando as unidades litológicas como, diques e soleiras (FIGURA 4).

Figura 4 - Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: adaptado de CPRM (2005).

### 3.1.3 Hidrogeologia

Conforme o mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul (CPRM, 2005), a unidade hidrogeológica presente na área estudada é caracterizada como Aquicluda Eo-Paleozoica, constituída de arenitos finos a médios, róseos a avermelhados, muito endurecidos pelos cimentos ferruginosos, calcínicos e silicosos, o que proporciona uma porosidade muito baixa. Ainda que predominem os arenitos, a cimentação praticamente impermeabiliza a rocha, resultando em poços tubulares secos ou com vazão insignificante. Segundo Lisboa et al. (2004), o potencial desse aquífero varia de baixo a muito baixo. Entretanto, as condições de poro-permeabilidade podem alterar-se em zonas de falha, criando assim, locais favoráveis ao armazenamento de águas subterrâneas. Conforme os mesmos autores, falhamentos normais criam importantes diferenças de regimes de fluxo nas laterais dos sistemas aquíferos Eo-paleozoico Guaritas - Santa Bárbara. Zonas de falha podem funcionar como grandes condutos para a água, criando assim zonas aquíferas anômalas com alta produtividade.

As características hidrogeológicas são de aquífero livre em um sistema de aquicludas onde a água subterrânea se encontra disposta dentre fraturas interconectadas (NASCIMENTO, 2015).

Germano; Sotério (2011) propõem que o escoamento de base do Rio Camaquã é mantido essencialmente pelo reservatório representado pelos solos resultantes do intemperismo das rochas. Na região em estudo as camadas de solo têm pequena expressão e o nível freático está próximo à superfície, acompanhando o relevo, porém a zona saturada é pouco espessa, o que compromete a sua capacidade como reservatório de águas subterrâneas.

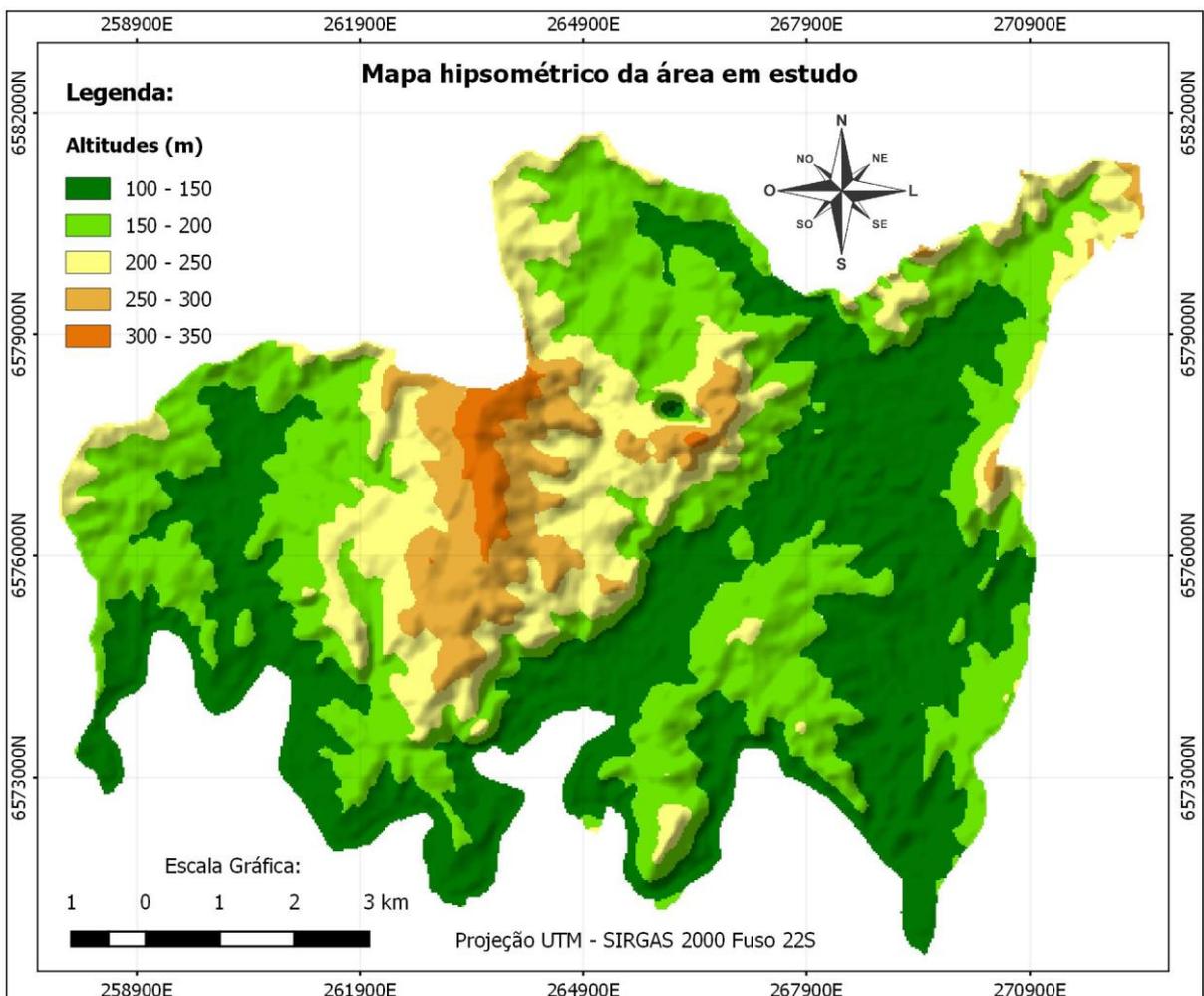
### 3.1.4 Geomorfologia

O estado do Rio Grande do Sul apresenta cinco unidades geomorfológicas, sendo ao norte o Planalto Meridional, a oeste a Cuesta de Haedo, ao centro e sudoeste a Depressão central ou periférica, no centro-sul do estado o Escudo sul-rio-grandense e, limitando-se com o oceano atlântico a leste a Planície Costeira (CEPSRM/UFRGS, 2001).

O local em estudo encontra-se inserido na unidade geomorfológica Escudo Sul-Rio-Grandense. Assim, apresentando relevo montanhoso e bastante acidentado composto por formações rochosas graníticas, metamórficas e estruturas areníticas. Além de solos rasos e pedregosos. De acordo com o Mapa Geomorfológico da Região (IBGE, 2003), a área insere-se no domínio morfoestrutural de Embasamentos em Estilos Complexos, composto por unidades pertencentes a região geomorfológica do Planalto Sul-Rio-Grandense.

A área de estudo apresenta relevos em formas arredondadas do tipo coxilhas, sendo mais brusco para o Norte e suave na direção leste com altitudes variando de 100 a 335 metros (FIGURA 5). Apresentam estratificação, denotando retrabalhamento fluvial. Os topos em geral são convexos, entalhados por sulcos e cabeceiras de drenagens de primeira ordem.

Figura 5 - Mapa hipsométrico da área em estudo.



Fonte: O autor.

### 3.1.5 Pedologia

A caracterização dos solos, da região de estudo, foi realizada a partir de pesquisas, utilizando autores como Hansen; Fensterseifer (1999), Bruch (2014) e Nascimento (2015), além de levantamentos de campo e análises de imagens de satélite. Os solos encontrados na área de estudo são do tipo Neossolos Litólicos (RLd), Neossolo Flúvico (RY), Argissolo Vermelho-amarelo (PVA), Planossolo Hidromórfico (SX) e Horizonte A Antrópico.

Os Neossolos são constituídos por material mineral não hidromórficos ou por material orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações expressivas em pedogenéticos. São solos pouco desenvolvidos que não apresentam horizonte B diagnóstico. Possuem sequência de horizontes A–R, A–C–R, A–Cr–R, A–Cr, A–C, O–R ou H–C (EMBRAPA, 2006).

Os Neossolos Litólicos são solos jovens e pouco desenvolvidos, com horizonte A sobre contato lítico. Apresentam espessura do horizonte A menor que 20 cm, admitindo-se menos de 40 cm quando 50 % ou mais do material for orgânico. É constituído por tecido vegetal na forma de ramos finos, raízes finas, cascas de árvores, folhas e folhas parcialmente decompostas. Por ser um solo jovem, os níveis de argila são baixos, visto que os fragmentos não foram totalmente degradados (EMBRAPA, 1999).

Na área de estudo, os Neossolos Litólicos estão associados a afloramentos rochosos, nas encostas íngremes. Esse tipo de solo apresenta o perfil com horizonte A sobre o C ou diretamente sobre a rocha, apresentando alta suscetibilidade a erosão (HANSEN; FENSTERSEIFER, 1999). Devido a pouca profundidade efetiva para o desenvolvimento das raízes e para o armazenamento de água e, por ocorrerem em regiões de relevo forte, em geral com pedregosidade e afloramento de rochas, apresentam fortes restrições para culturas anuais (STRECK et al., 2008).

Os Neossolos Flúvicos (Aluviais) são originados a partir sedimentos aluviais com horizonte superficial sobre camada ou horizonte C e que apresentam caráter flúvico dentro de 150 cm de profundidade. Solos do tipo Neossolo Flúvico eutrófico podem apresentar argila de atividade alta ( $T \geq 27$  cmolc/kg de argila) ou argila de atividade baixa ( $T < 27$  cmolc/kg de argila) e saturação por bases alta ( $V \geq 50$  %) na maior parte dos primeiros 150 cm da superfície do solo (EMBRAPA, 2006).

Na área em estudo, os Neossolos Flúvicos estão associados a relevos planos ou suavemente ondulados. Predominam ao longo de planícies de inundação dos sistemas de drenagens, representados por córregos e arroios, principalmente por matas ciliares. Não há clara distinção entre os horizontes, mas por vezes, existe um horizonte A, chernozêmico a proeminente, com conteúdo de matéria orgânica, diretamente sobre o C, com ausência do horizonte B textural e incipiente. A predominância é de textura média, laminados, estratificados, mal drenados, hidromórficos, alternando de poucos centímetros a metros de profundidade (HANSEN; FENSTERSEIFER, 1999).

Os Argissolos são constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico. O horizonte B textural (Bt) encontra-se imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, exceto o hístico (EMBRAPA, 2006). Geralmente os Argissolos ocorrem em relevos acidentados, são comumente usados para a agricultura, desde que não ocorram em área de altas declividades, pois possuem extrema susceptibilidade a erosão hídrica (LEPSCH, 1982).

No local estudado, os Argissolos Vermelho-Amarelos ocorrem em relevo de colinas, associados aos depósitos coluvionares e eluvionares. São normalmente bem drenados, com argila de atividade baixa (Tb). Os horizontes apresentam sub-horizonte A1, A2 proeminente mais consolidado e de aspecto homogêneo e horizonte B textural mais argiloso que A; o sub-horizonte B2 apresenta fragmentos com cerosidade a sua volta sobrepostos ao horizonte C. São distróficos, não hidromórficos pela boa porosidade permitindo a permeabilidade das águas superficiais verticalmente (HANSEN; FENSTERSEIFER, 1999).

Os Planossolos são solos imperfeitamente ou mal drenados, encontrados em áreas de várzea, com relevo plano ou suave ondulado. Apresentam perfis com sequência de horizontes A-E-Bt-C, com o horizonte A geralmente de cor escura e o horizonte E de cor clara, ambos de textura mais arenosa, com passagem abrupta para o horizonte Bt bem mais argiloso e adensado, de cor acinzentada. Os Planossolos Hidromórficos apresentam sérias limitações físicas. A baixa condutividade hidráulica do horizonte plânico determina a formação de um lençol freático suspenso temporário nos períodos chuvosos do horizonte suprajacente,

causando sérios distúrbios nas plantas menos adaptadas a essa condição de hidromorfismo temporário (STRECK et al., 2008).

Na área de estudo, os Planossolos Hidromórficos em geral recobrem depósitos lacustres ou fluviais cenozóicos, situados em depressões planas associados às zonas de várzea e planícies ou suavemente onduladas do terreno. Associam-se a Formação Santa Bárbara, sendo originados principalmente pela desagregação dos pelitos levando a uma saturação de argila no horizonte B. Caracterizam-se pelo horizonte A com pouca espessura, em torno de 70 cm. Apresentam horizonte B iluvial, com textura argilosa de atividade alta, com má drenagem, sendo Hidromórficos e com grande variação granulométrica (HANSEN; FENSTERSEIFER, 1999).

Na concepção de EMBRAPA (1999), o Horizonte A Antrópico é formado ou modificado pelo uso contínuo do solo, pelo homem, como lugar de residência ou cultivo, por períodos prolongados, com adições de material orgânico em mistura ou não com material mineral. O Horizonte A antrópico assemelha-se aos horizontes A Chernozêmico ou húmico e difere destes por apresentar teor de Pentóxido de Fósforo ( $P_2O_5$ ) solúvel em ácido nítrico mais elevado que na parte inferior do *solum*. O Horizonte A Antrópico repousa sobre Planossolos Hidromórficos distróficos, com horizonte A do tipo proeminente e Neossolos Litólicos.

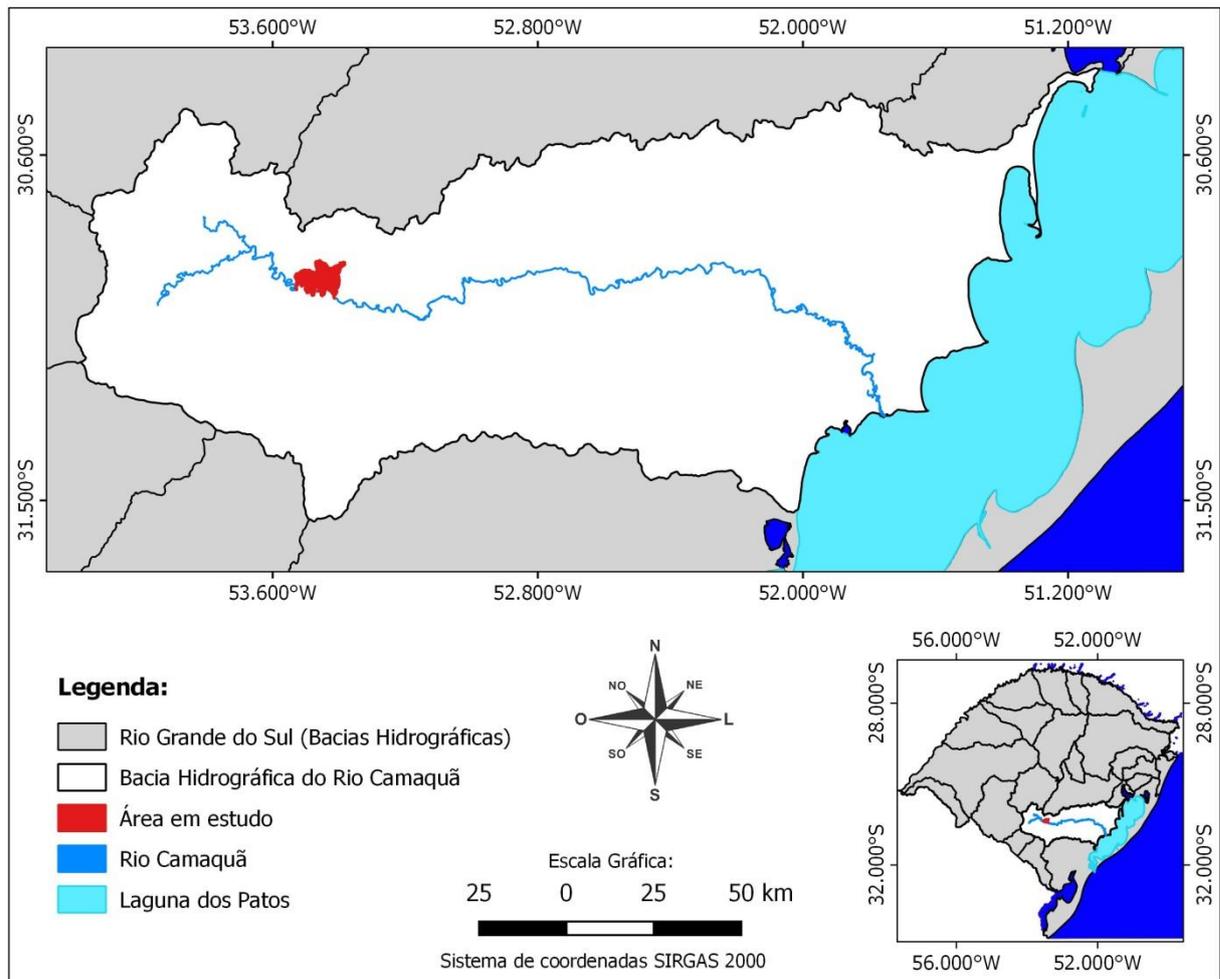
No local de estudo, esta unidade corresponde às áreas mineradas e seus entornos, sobre patamares planos de rejeitos de mineração e também aos locais onde a cava foi preenchida e recuperada, parcialmente. Também faz parte desta classe a área da Vila da Minas do Camaquã (área urbanizada).

### 3.1.6 Hidrografia

A área de pesquisa caracteriza-se como um conjunto de sub-bacias que desaguam no Rio Camaquã, que por sua vez, está inserida junto à bacia hidrográfica do Rio Camaquã. Essa bacia pertence à Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas e encontra-se na porção centro-leste do Estado, abrangendo 28 municípios e uma área de aproximadamente 21.657 km<sup>2</sup> (CGBHRC, 2018). O Rio Camaquã possui extensão de aproximadamente 430 km, desembocando na Laguna dos Patos, entre os municípios de São Lourenço do Sul e Camaquã (FIGURA 6).

Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (2007) o Rio Camaquã próximo a sua foz possui uma vazão média anual de 483,10 m<sup>3</sup>/s e uma vazão mínima anual com 95 % de permanência (Q 95) de 25,88 m<sup>3</sup>/s. A relação entre as vazões mínima e a média anual é da ordem de 4 % indicando forte restrição à disponibilidade hídrica na época de estiagem, que ocorre nos meses de verão.

Figura 6 - Localização da Bacia hidrográfica do Rio Camaquã.



Fonte: O autor.

### 3.1.7 Características climatológicas

A área em estudo encontra-se em área de transição dos tipos climáticos Subtropical, do tipo Cfall1c e estreita faixa característica de Clima Temperado Cfb1, porem, quase totalmente inserido em zona de clima Subtropical. Este caracteriza-se como subtropical úmido, sem estação seca definida, com verões quentes e temperatura média anual de 17,4°C, segundo classificação de Köppen.

Conforme série de dados históricos do Instituto Nacional de Meteorologia (1960 - 1990) os ventos são mais constantes para leste em todos os meses do ano, demonstrando a predominância do Sistema de Alta Pressão do Atlântico Sul sobre os demais sistemas geradores de ventos que atuam na região. As velocidades variam de 2,5 a 3 m/s e velocidade média anual de 2,81 m/s. Os ventos apresentando-se constantes em todos os meses do ano.

A umidade relativa do ar é regular, tendo média anual de 79,2 %, com maior umidade nos meses de junho (85,3 %) e julho (84,9 %) e ar mais seco nos meses de dezembro (71,5 %) e janeiro (73,8 %) (INMET).

As informações pluviométricas foram obtidas da estação pluviométrica de Caçapava do Sul, sob responsabilidade da CPRM. Para determinação do volume médio anual precipitado na área de estudo utilizou-se dados de 16 anos referentes ao período de 2000 a 2015.

Conforme dados da CPRM (2000 – 2015), o regime pluviométrico da região apresenta chuvas bem distribuídas ao longo do ano. As menores precipitações ocorrem nos meses de janeiro com 124,2 mm e março com 110,7 mm, enquanto as maiores se verificaram nos meses de setembro e outubro com precipitações de 191,7 e 187,5 mm respectivamente. A precipitação média anual é de 1728,8 mm para o período analisado.

### 3.1.8 Vegetação

A área em estudo esta inserida no Bioma Pampa, localizada na região fisiográfica da Serra do Sudeste, na porção leste do Escudo Sul Rio-grandense (IBGE, 2004).

Conforme Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE 2012), a região de Minas do Camaquã, encontra-se dentro da denominada Estepe Arborizada, região de solos rasos e líticos. Esta apresenta em sua fitofisionomia a predominância dos campos, que entremeados a eles podem existir, afloramentos rochosos, elementos florestais que estariam ligados às matas de galeria ou de outras florestas mais secas ou ainda indivíduos dispersos na região. Sendo as florestas e os campos as principais formações fitofisionômicas da região, onde nas regiões de maior altitude destaca-se o campo (Estepe) resistente a baixas temperaturas e ventos, com predominância de espécies de gramíneas e nas regiões de altitude inferior ocorrem

as florestas próximas a cursos d'água, com solo mais profundo e protegidas do vento.

### 3.2 ANÁLISE EMPÍRICA DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

A metodologia utilizada baseou-se na adaptação da análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados proposta por Ross (1994). Tal análise é feita a partir de estudos prévios e produtos cartográficos sobre a geomorfologia, pedologia, climatologia e uso do solo/cobertura vegetal.

Cada uma das variáveis é hierarquizada em cinco classes de fragilidade (muito fraca, fraca, média, forte e muito forte), sendo que a correlação entre estes planos de informação estabelece o grau de fragilidade ao qual a área esta exposta.

#### 3.2.1 Delimitação de Bacia hidrográfica

Inicialmente foram realizadas as delimitações das sub-bacias hidrográficas da área em estudo, em plataforma SIG, utilizando dados de curvas de nível em formato *shapefile* e Modelo Digital de Elevação (MDE) em formato *raster*.

O MDE foi elaborado a partir de imagens *SRTM* (*Shuttle Radar Topography Mission*). Os dados *SRTM* consistem em um modelo numérico do terreno que apresenta resolução espacial (horizontal) de três segundos de arco, aproximadamente 90 metros, e resolução vertical de 1 metro. Esses dados são disponibilizados no formato *raster* pela *United States Geological Survey* (USGS), em que cada pixel possui um determinado valor altimétrico.

Para elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizou-se o *software* QGIS 2.18.20, realizou-se uma interpolação do tipo Rede Triangular Irregular (TIN), onde a elevação digital é convertida em um modelo do terreno no qual a superfície é coberta por triângulos conectados. Adotou-se intervalos de 20 metros entre as curvas de nível.

### 3.2.2 Mapa de Declividade

A partir do MDE elaborou-se o mapa de declividade da área, utilizando o *software* QGIS 2.18.20, algoritmo do *GDAL/OGR - Analysis/Slope*. O mapa de declividade foi reclassificado com o algoritmo do *GRASS GIS - r.reclass*.

As classes de declividade apresentam-se como um ótimo indicativo dos processos erosivos existentes em uma bacia hidrográfica, bem como os rios que compreendem. Para estabelecer o intervalo das classes de declividade foram utilizados intervalos consagrados em estudos de aptidão agrícola e estudos geotécnicos. Desta forma, as classes de declividade foram hierarquizadas conforme a classificação de Ross (1994), em cinco categorias que estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classes de declividade com suas respectivas classes de fragilidade.

<b>Classes de Declividade</b>	<b>Classes de Fragilidade</b>
Até 6 %	Muito Fraca
De 6 a 12 %	Fraca
De 12 a 20 %	Média
De 20 a 30 %	Forte
Maior que 30 %	Muito Forte

Fonte: Ross (1994).

### 3.2.3 Mapa de Solos

Para a elaboração do mapa de solos da área estudada, utilizou-se dados do Mapa de Solos do Rio Grande do Sul atualizado por Streck et al. (2008) e dados digitais em formato *shapefile*, além de pesquisas bibliográficas referente as características dos solos presentes na área de estudo.

Os tipos de solo encontrados foram classificados de acordo com grau de fragilidade proposto por Ross (1994), atualizado conforme Embrapa (2006), apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de solos com suas respectivas classes de fragilidade.

<b>Tipos de Solo</b>	<b>Classes de Fragilidade</b>
Latossolo Vermelho Distróférrico, Latossolo Vermelho e Vermelho-Amarelo textura argilosa.	Muito Fraca
Latossolo Amarelo e Vermelho-Amarelo textura média/argilosa.	Fraca
Latossolo Vermelho-Amarelo, Nitossolo, Argissolo Vermelho-amarelo, textura média/argilosa.	Média
Argissolo Vermelho-Amarelo, textura média/arenosa, Cambissolos e Planossolos.	Forte
Argissolo cascalhentos, Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos.	Muito Forte

Fonte: Adaptado de Ross (1994); Embrapa (2006).

### 3.2.4 Uso e Ocupação do Solo

Para realizar a identificação do tipo de uso e ocupação do solo foram utilizadas imagens do Satélite Landsat 8, sensor OLI/TIRS, órbita 98,2º, composição multiespectral, bandas 5-6-7, com resolução espacial de 30 metros e data de passagem em 15-05-2018 as quais são disponibilizadas gratuitamente pelo *United States Geological Survey* (USGS).

Realizou-se a classificação digital supervisionada, utilizado o aplicativo *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP), com o algoritmo de classificação Máxima Verossimilhança (MAX-VER) ou *Maximum Likelihood*. Para a classificação foram selecionadas amostras de interesse, ou seja, o conjunto de pixels representativos das diferentes classes de uso e ocupação do solo. Foi gerada uma matriz de confusão para avaliação da qualidade das amostras.

Após a classificação supervisionada, os usos foram reclassificados conforme o grau de fragilidade, seguindo o proposto por Ross (1994) (TABELA 3).

Tabela 3 - Classes de uso e ocupação do solo com suas respectivas classes de fragilidade.

<b>Classes de Uso do Solo e Ocupação</b>	<b>Classes de Fragilidade</b>
Floresta, Matas naturais, Matas cultivadas com biodiversidade.	Muito Fraca
Campos naturais e Formações arbustivas naturais	Fraca
Pastagem e Agricultura de ciclo curto.	Média
Agricultura irrigada	Forte
Solo exposto e Urbanização	Muito Forte

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

### 3.2.5 Regime Pluviométrico

As informações pluviométricas foram obtidas da estação pluviométrica de Caçapava do Sul, sob responsabilidade da CPRM. Para determinação do volume médio anual precipitado na área de estudo utilizou-se dados de 16 anos referentes ao período de 2000 a 2015.

As características pluviométricas foram classificadas de acordo com o grau de fragilidade, seguindo o proposto por Spörl (2007), conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Características pluviométricas com suas respectivas classes de fragilidade.

<b>Características Pluviométricas</b>	<b>Classes de Fragilidade</b>
Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não superiores a 1000 mm/ano.	Muito Fraca
Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2000 mm/ano.	Fraca
Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 2 e 3 meses no inverno, e no verão com maiores intensidades de dezembro a março.	Média
Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 3 e 6 meses, e alta concentração das chuvas no verão entre novembro e abril quando ocorrem de 70 a 80 % do total das chuvas.	Forte
Situação pluviométrica com distribuição regular, ou não, ao longo do ano, com grandes volumes anuais ultrapassando 2500 mm/ano; ou ainda, comportamentos pluviométricos irregulares ao longo do ano, com episódios de chuvas de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900 mm/ano (semi-árido)	Muito Forte

Fonte: Spörl (2007).

### 3.2.6 Cruzamento de Dados

Após a elaboração dos mapas temáticos de cada variável (declividade, solo, clima e uso do solo/cobertura vegetal) foi realizado o cruzamento dos mesmos, utilizando a álgebra de mapas, obtendo-se a fragilidade potencial e a fragilidade emergente da área em estudo. O cruzamento dos dados foi realizado através da calculadora *raster* no *Software* QGIS 2.28.20.

O peso ou valor das classes de fragilidade de cada variável foi definido conforme a metodologia de Ross (1994) (TABELA 5).

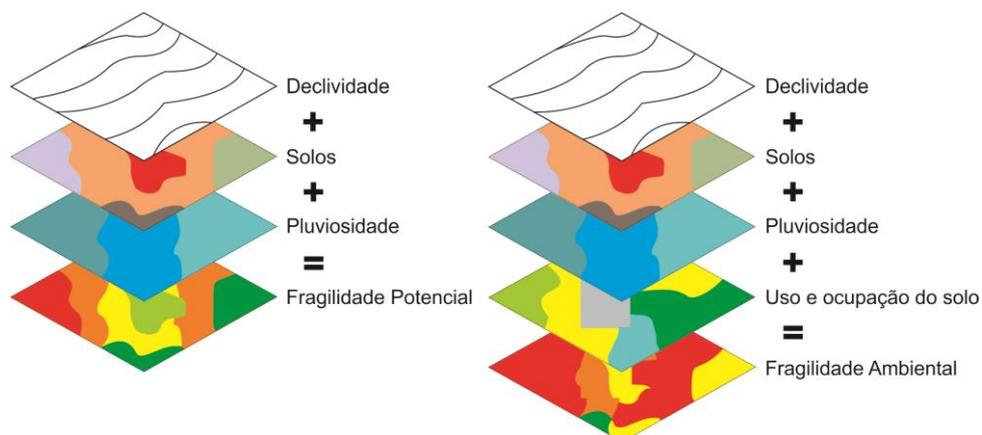
Tabela 5 - Classes de fragilidade com respectivos valores numéricos.

Classes de Fragilidade	Valor Numérico
Muito Fraca	1
Fraca	2
Média	3
Forte	4
Muito Forte	5

Fonte: Ross (1994).

O mapa de Fragilidade Potencial foi gerado a partir do cruzamento da carta de declividade, mapa de solos e informações pluviométricas. O mapa de fragilidade emergente ou fragilidade ambiental, foi elaborado através do cruzamento das informações resultantes do mapa de fragilidade potencial com o mapa de uso do solo/cobertura vegetal. A Figura 7 ilustra as sobreposições realizadas.

Figura 7 - Cruzamentos de informações cartográficas.

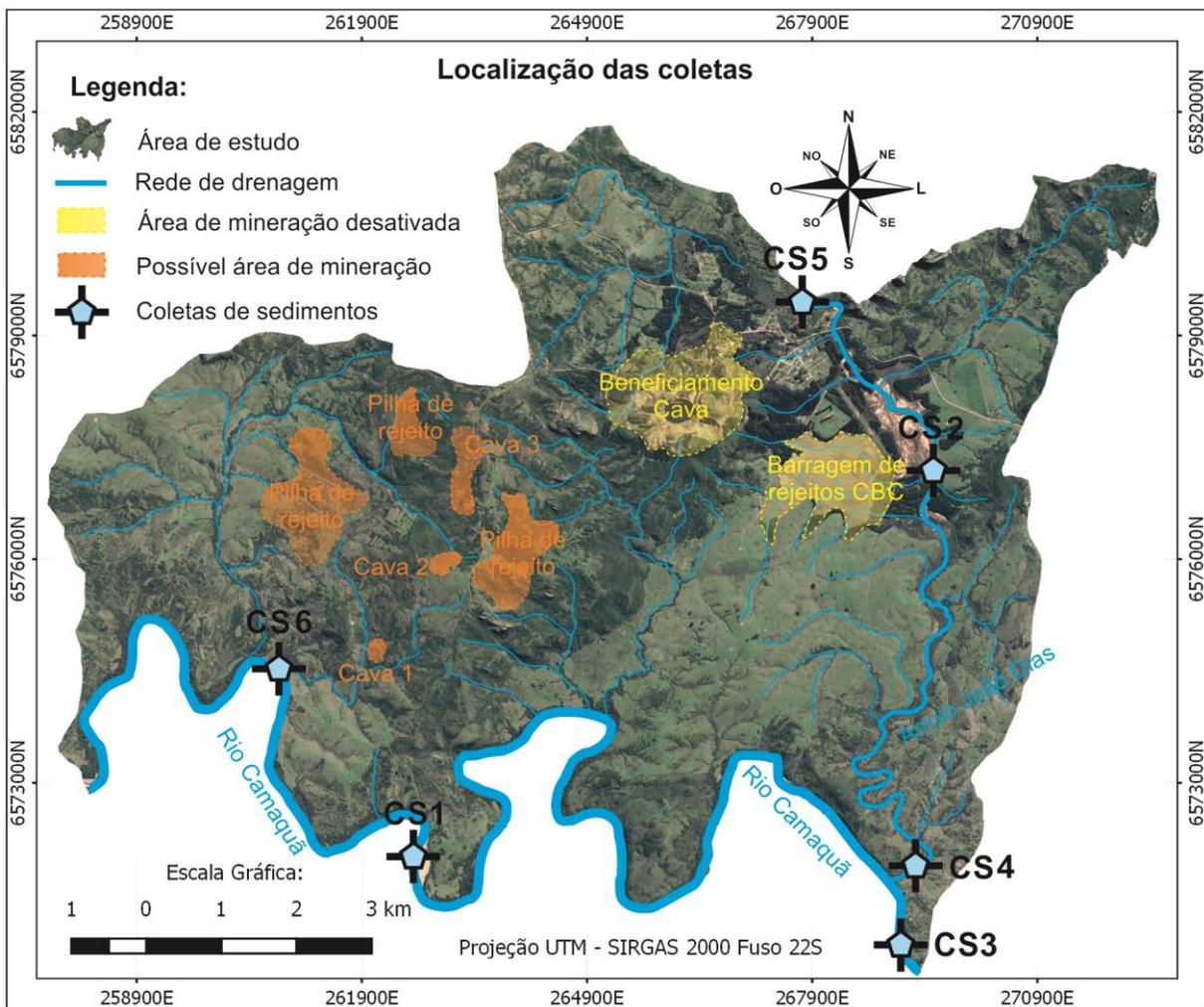


Fonte: O autor.

### 3.3 Coleta e Análise de Sedimentos

As coletas de sedimentos foram realizadas em dois períodos, Julho de 2018 e Fevereiro de 2019, englobando épocas de estiagens e cheias (maiores e menores vazões). Considerou-se 6 pontos amostrais, sendo 3 pontos ao decorrer do Rio Camaquã, trecho de influencia da futura mineração polimetálica (Zn,Cu e Pb) e 3 pontos no decorrer do Arroio João Dias, o qual sofre influencia da antiga mineração de Cobre da Companhia Brasileira de Cobre (CBC) (FIGURA 8).

Figura 8 - Mapa de localização das coletas de sedimentos.

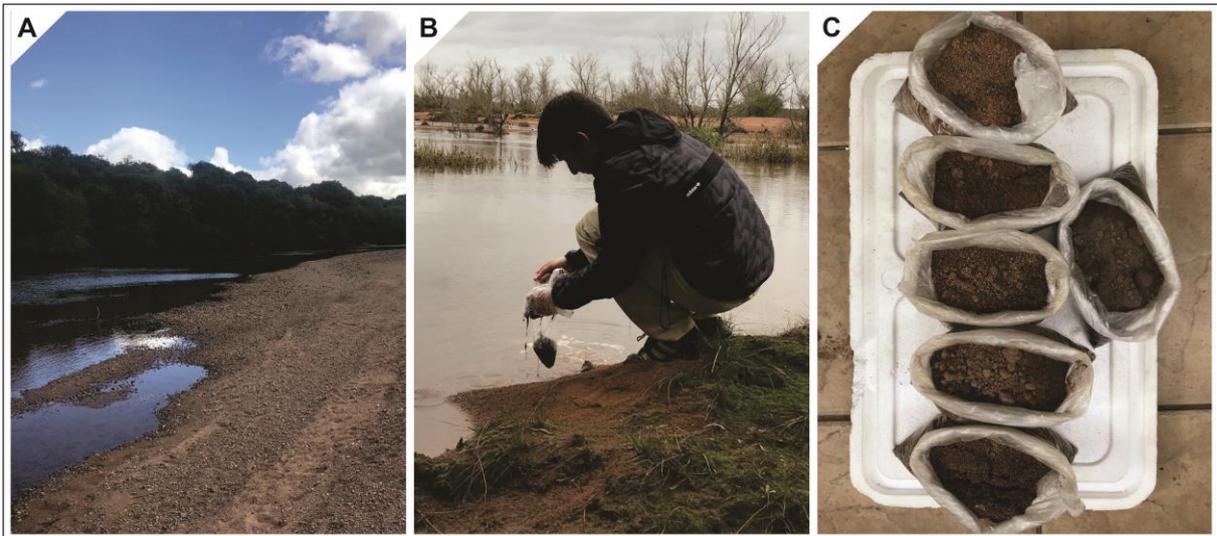


Fonte: O autor.

Durante a coleta, os locais de amostragem foram georreferenciados por meio de um aparelho *Global Position System* (GPS) da marca Garmin, modelo etrex 10.

As amostras de sedimentos foram coletadas em superfície (0,10 m) às margens dos cursos d'água, em locais de baixa energia fluvial, onde favorece o depósito de material mais fino, portanto, de maior interesse para avaliação ambiental (FIGURA 9). Foram coletados aproximadamente 2,0 Kg de sedimentos. O acondicionamento foi feito em sacos plásticos de polietileno com identificação correspondente à localização do ponto (CS1, CS2, CS3, CS4, CS5 e CS6) e data de coleta. Partes das amostras foram reservadas para a realização de análises granulométricas, os ensaios foram realizados no Laboratório de Análises de Solos do Instituto Federal Farroupilha, campus São Vicente do Sul - RS, seguido o que dispõe a ABNT NBR 6502 de 1995.

Figura 9 - (a) Ponto amostral no Rio Camaquã; (b) coleta de sedimentos no Arroio João Dias; (c) amostras dispostas em sacos plásticos identificados.



Fonte: O autor.

As amostras de sedimentos foram preparadas de acordo com o proposto por Silva et al. (2016), onde, foram secas à temperatura ambiente (25°C), posteriormente os materiais indesejados, tais como rochas, galhos, folhas e outros foram retirados. Após secagem foram pesados 30 gramas de amostra e maceradas em gral e pistilo de porcelana, objetivando reduzir ao máximo a granulometria (homogeneizando a amostra) para maior eficiência das análises.

As análises foram realizadas por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF), utilizando um espectrômetro de fluorescência de Raios-X da marca Bruker, modelo S1 Turbo SD. O equipamento é composto por um

tubo de Raio-X do tipo cerâmica metálica de 1 W que vai de 2 a 60  $\mu\text{A}$ , utiliza ânodo de Ag e detector Silicon Deriva Detector (SDD) de 10  $\text{mm}^2$ , com uma resolução de  $\sim 145$  eV a  $\text{MnK}\alpha$ , o que permite manter uma velocidade de contagem 100.000 contagens por segundo. O tempo de exposição de cada amostra foi de 120 segundos. Estas foram realizadas no Laboratório de Lavra e Tratamento de Minérios (LATRAM) da Universidade Federal do Pampa, campus Caçapava do Sul - RS.

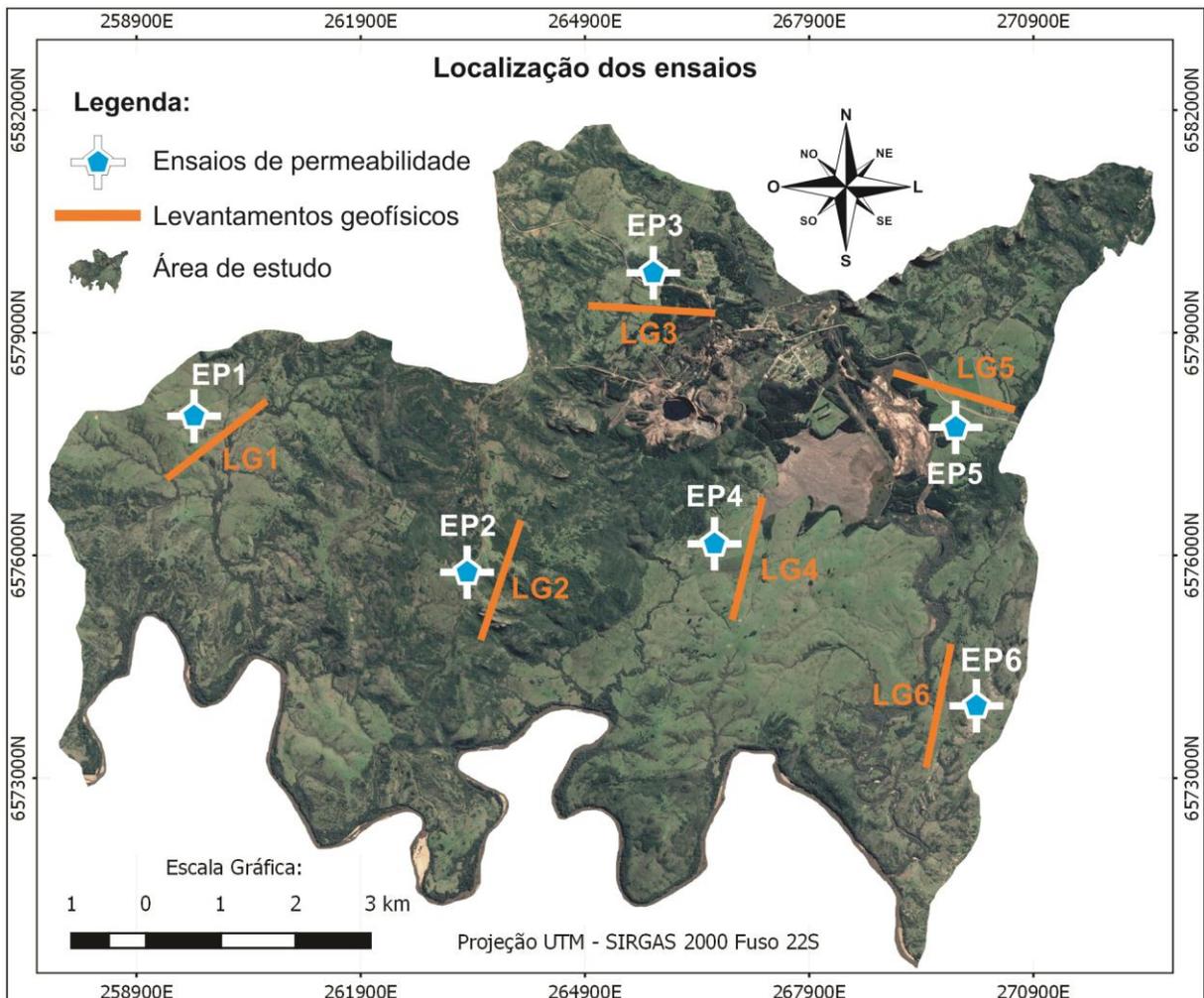
Foi realizada uma análise estatística para os elementos presentes nos sedimentos, utilizando o *software* BioEstat 5.0 (AYRES, 2010). Através da ferramenta *correlation* foi obtida as correlações de Pearson entre todas variáveis estudadas.

Os elementos presentes nas amostras foram qualificados e quantificados e comparados com os limites Nível 1 (limiar abaixo do qual prevê-se baixa probabilidade de efeitos adversos à biota) e Nível 2 (limiar acima do qual prevê-se um provável efeito adverso à biota) para águas doces estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 454 de 01 de novembro de 2012, que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional.

### **3.4 Ensaio de Permeabilidade**

Os pontos para a realização dos ensaios de permeabilidade foram definidos considerando uma distribuição uniforme na área estudada, diferentes tipos de solo, diferentes usos e cobertura vegetal e a declividade do terreno. Desta maneira foram considerados 6 pontos para a realização dos ensaios (EP1, EP2, EP3, EP4, EP5 e EP6), conforme Figura 10.

Figura 10 - Mapa de localização dos ensaios de permeabilidade do solo e levantamentos geofísicos.



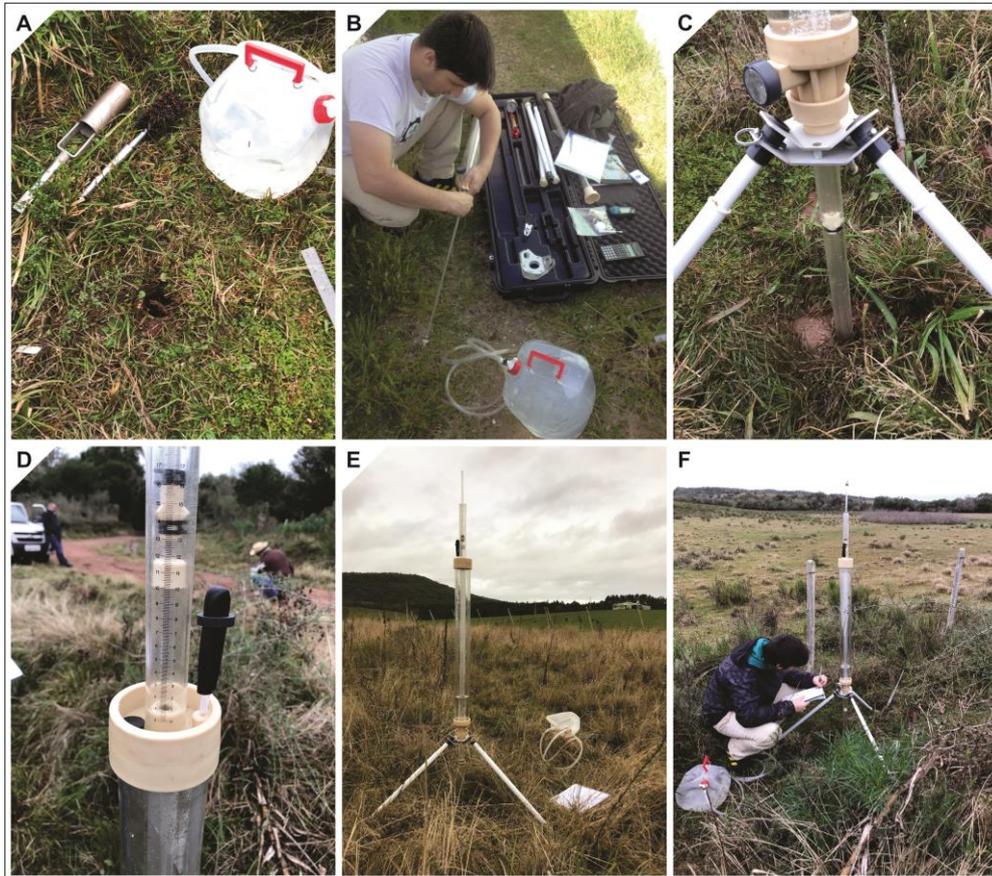
Fonte: O autor.

O método utilizado foi o de carga constante, utilizando um Permeômetro de Guelph modelo 2800 (FIGURA 11). Seguindo a metodologia descrita por Santos (2005) que compreende as seguintes etapas:

- a) escolha de um local de preferência plano;
- b) perfurar o solo com auxílio de um trado a uma profundidade de 40 cm, posicionando o permeômetro sobre a perfuração de forma que fique na vertical;
- c) injetar 5 cm de coluna de água no primeiro momento, formando uma carga hidráulica constante no interior do furo feito pelo trado, sendo a carga hidráulica relativa de acordo com a formação do solo;
- d) após a estabilização da taxa de infiltração, repete-se o procedimento anterior, porém, injetando uma coluna de 10 cm de água, esta unidade de tempo

quem determina é o pesquisador, onde nesse caso o tempo foi cronometrado a cada 2 minutos.

Figura 11 - (a) realização do furo no solo com o auxílio de um trado; (b) montagem do equipamento; (c) posicionamento do equipamento no furo feito pelo trado; (d) liberação de carga hidráulica no furo (5 cm de carga hidráulica); (e) permeômetro Guelph pronto para utilização.



Fonte: O autor.

O volume de água que infiltra no solo por unidade de tempo se torna constante depois de determinado tempo de estabilização. Deve-se escolher a mesma unidade de tempo nas duas cargas hidráulicas.

O cálculo da condutividade hidráulica se deu através da Equação 1 e 2 descrita por *Soil Moisture Corp* (1991):

$$K = [(0,0041)(X)(R_2) - (0,0054)(X)(R_1)] \quad (1)$$

ou

$$K = [(0,0041)(Y)(R_2) - (0,0054)(Y)(R_1)] \quad (2)$$

onde:

$K$  = condutividade hidráulica, em cm/s;

$R_1; R_2$  = taxas de infiltração estabilizadas correspondentes a  $H_1$  (5 cm) e  $H_2$  (10 cm) respectivamente, em cm/s;

$X; Y$  = constantes correspondentes à área do tubo (reservatório d' água) utilizado, em  $\text{cm}^2$ ;

0,0041 e 0,0054 = valores adimensionais que podem ser obtidos através de Soil Moisture Corp (1991).

Foram coletadas amostras de solo para realização de ensaio granulométrico, aproveitando o solo proveniente da abertura dos furos feito com o trado no ensaio de permeabilidade.

O método adotado para as coletas e classificação foi o disposto na Instrução Normativa nº 2, de 9 de Outubro de 2008 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. As análises foram realizadas no Laboratório de Análises de Solos do Instituto Federal Farroupilha, campus São Vicente do Sul, seguido o que dispõe a ABNT NBR 6502 de 1995.

### **3.5 Levantamento Geofísico**

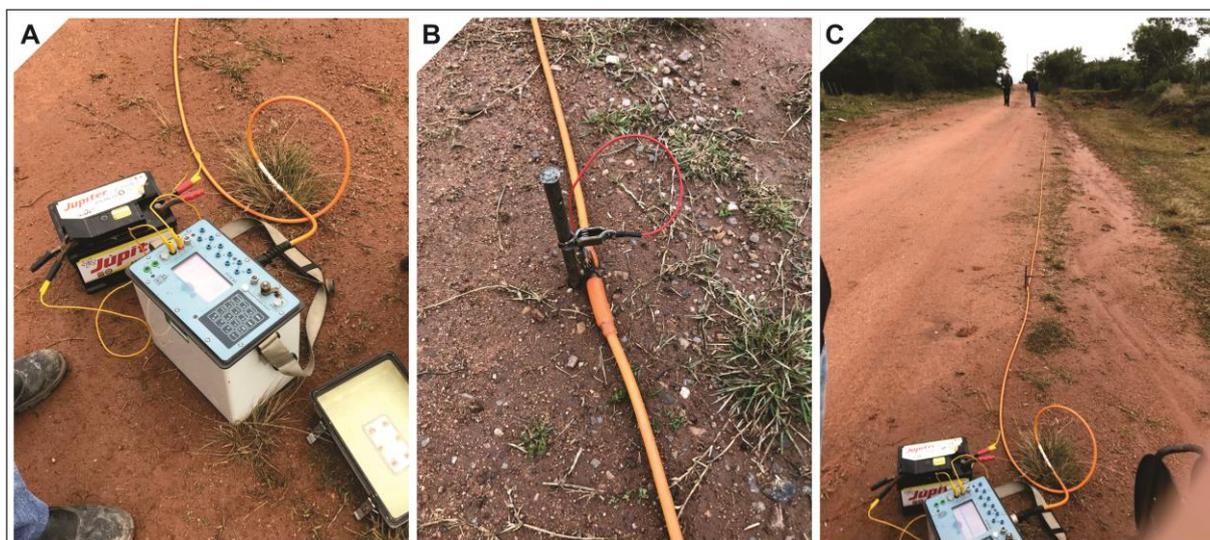
Os levantamentos geofísicos foram realizados próximo aos testes de permeabilidade conforme Figura 12, apresentada anteriormente. Considerou-se 6 pontos para a realização dos caminhamentos elétricos (LG1, LG2, LG3, LG4, LG5 e LG6).

O comprimento do perfil geoelétrico foi de 80 metros com espaçamento entre os eletrodos de 2 metros. O arranjo utilizado para os caminhamentos elétricos foi o Dipolo-Dipolo.

Para a obtenção das medidas de resistividade utilizou-se um resistímetro modelo *Syscal Pro* de 10 canais desenvolvido pela empresa francesa *IRIS Instruments*. O equipamento é composto por uma unidade transmissora e uma receptora, configuradas para realizar medidas simultâneas de resistividade e cargabilidade. Além do resistímetro, foram utilizados acessórios que compõem o

aparelho como cabos de conexão, conexões (jacaré), eletrodos de aço inoxidável, marreta para inserção dos eletrodos no solo e bateria extra (FIGURA 13).

Figura 12 - (a) resistivímetro Syscal Pro com bateria extra; (b) eletrodo conectado ao cabo com conexão jacaré; (c) linha de caminhamento elétrico montada.



Fonte: O autor.

Posteriormente, os dados foram processados por meio do *software* RES2DINV da Geotomo *Software* para inversão (obtenção das pseudo-seções de resistividade aparente em profundidade) e geração dos perfis com os respectivos isovalores de resistividade interpolados para visualização e interpretação.

Ressalta-se que os resultados não descrevem diretamente situações geológicas, mas sim refletem a distribuição da propriedade física que pode ser anômala quando ocorrem contrastes nesta propriedade. As anomalias detectadas ou respostas padrão observadas precisam ser correlacionadas da forma mais realista possível com a geologia local (CAMPOS et al., 2003). Para isto, utilizou-se estudos de diversos autores, como: Paim, (2000); Hansen; Fensterseifer, (2000); Fambrini, (2003); Lisboa et al. (2004); Almeida, (2005); Machado; Freitas (2005); Bruch, (2014); Nascimento (2015), que descrevem e caracterizam a litologia, características pedológicas e aspectos hidrogeológicos da área, além da utilização de descrições construtivas de poços, cadastrados no CPRM SIAGAS, próximos ao local estudado.

### 3.6 Vulnerabilidade do Aquífero à Contaminação

Para a determinação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação, utilizou-se o método *Aquifer Vulnerability Index* (AVI) (VAN STEMPOORT et al., 1993). Este método foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisa Hidrológica do Canadá (NHRI) com intuito de avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos a partir de parâmetros físicos.

O AVI avalia a resistência hidráulica ao fluxo vertical das águas através das camadas que compõem a zona não saturada (zona vadosa) acima do nível freático, ou seja, o tempo aproximado da passagem de um líquido/poluinte através destas camadas.

O método tem como base dois parâmetros físicos: a espessura de cada camada sedimentar acima da zona saturada e a condutividade hidráulica de cada uma destas camadas. Assim, a resistência hidráulica é definida pela Equação 3.

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{K_i} \quad (3)$$

onde:

$K$ : Condutividade hidráulica (m/s);

$d$ : espessura da camada (m);

$C$ : Resistência hidráulica (s).

A relação entre a vulnerabilidade e resistência hidráulica está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Classes de vulnerabilidade à contaminação AVI.

Resistência Hidráulica C (anos)	Classes de Vulnerabilidade
0 – 10	Extremamente alta
10 – 100	Alta
100 – 1000	Média
1000 – 10000	Baixa
>10000	Extremamente baixa

Fonte: Van Stempvoort et al. (1993).

O método foi escolhido em função de dados quantitativos disponíveis na área de estudo, como dados de condutividade hidráulica, nível da água subterrânea e espessura das camadas não saturadas acima do aquífero. E, também, pela facilidade de aquisição de informações que descrevem os aspectos geológicos, hidrogeológicos e pedológicos da área.

A condutividade hidráulica das camadas superficiais foram obtidas através de ensaios de campo utilizando um permeâmetro Guelph (item 3.3), e das camadas mais profundas através de dados de ensaios de *Slug test* realizados por Nascimento (2015).

O nível da água subterrânea foi obtido a partir de monitoramentos realizados por Arruda Junior (2017), em poços de sondagem nos anos de 2016 e 2017, além dos dados de levantamentos geofísicos mencionados no item 3.4.

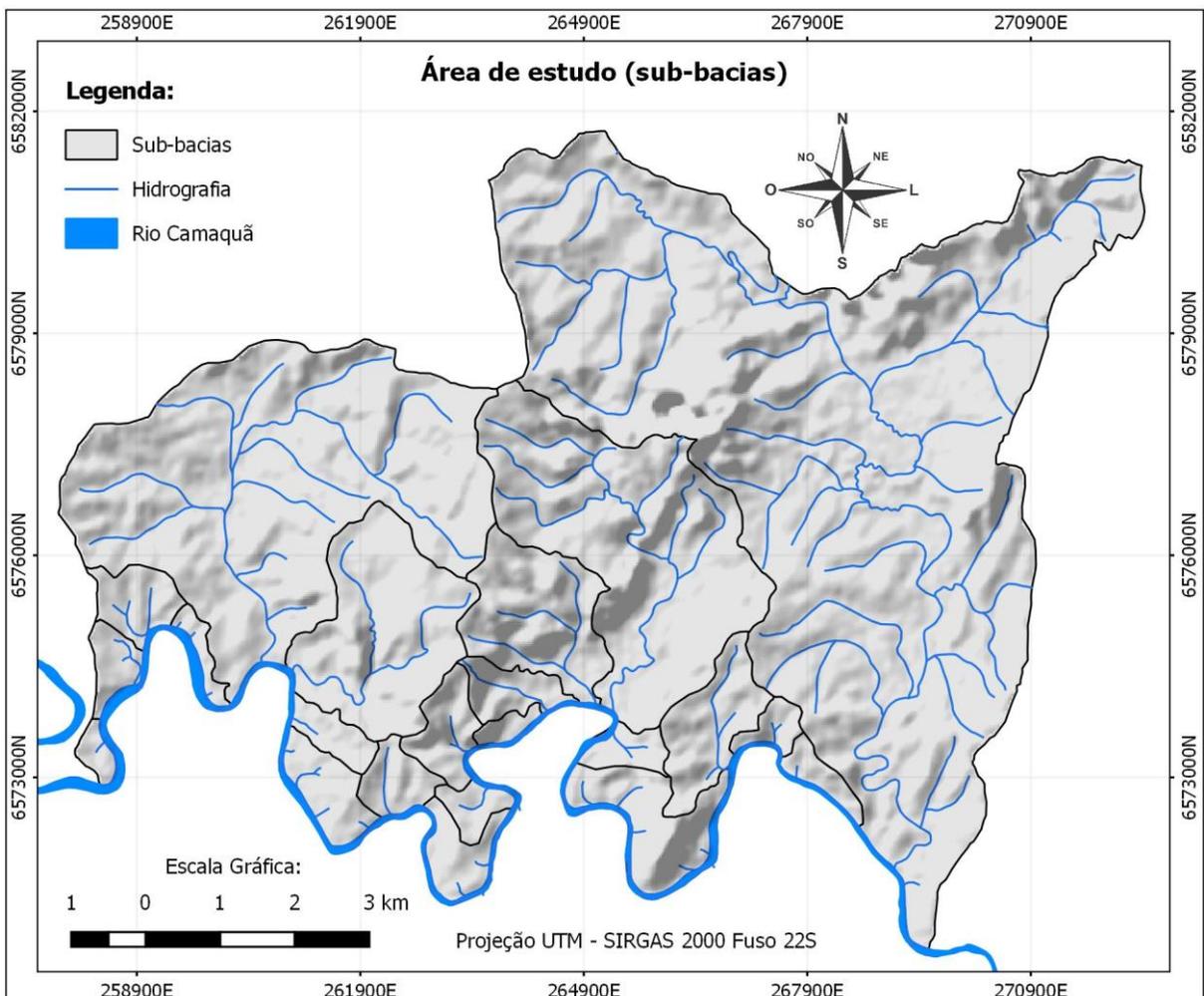
Após a aquisição dos dados os resultados foram submetidos a tratamento estatístico (interpolação IDW) no *software* QGIS 2.18.20, obtendo-se um mapa de vulnerabilidade à contaminação e um mapa da zona não saturada da área estudada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Fragilidade Ambiental

O local pesquisado compreende uma área de 8.955 hectares e perímetro de 67 Km, sendo composta por 22 sub-bacias que deságuam no Rio Camaquã no decorrer de aproximadamente 26 km (FIGURA 13). As altitudes variam de 100 a 335 metros acima do nível do mar e é composta por relevo ondulado em forma de coxilhas e morros.

Figura 13 - Área de estudo composta por um conjunto de sub-bacias.



Fonte: O autor.

#### 4.1.1 Declividade

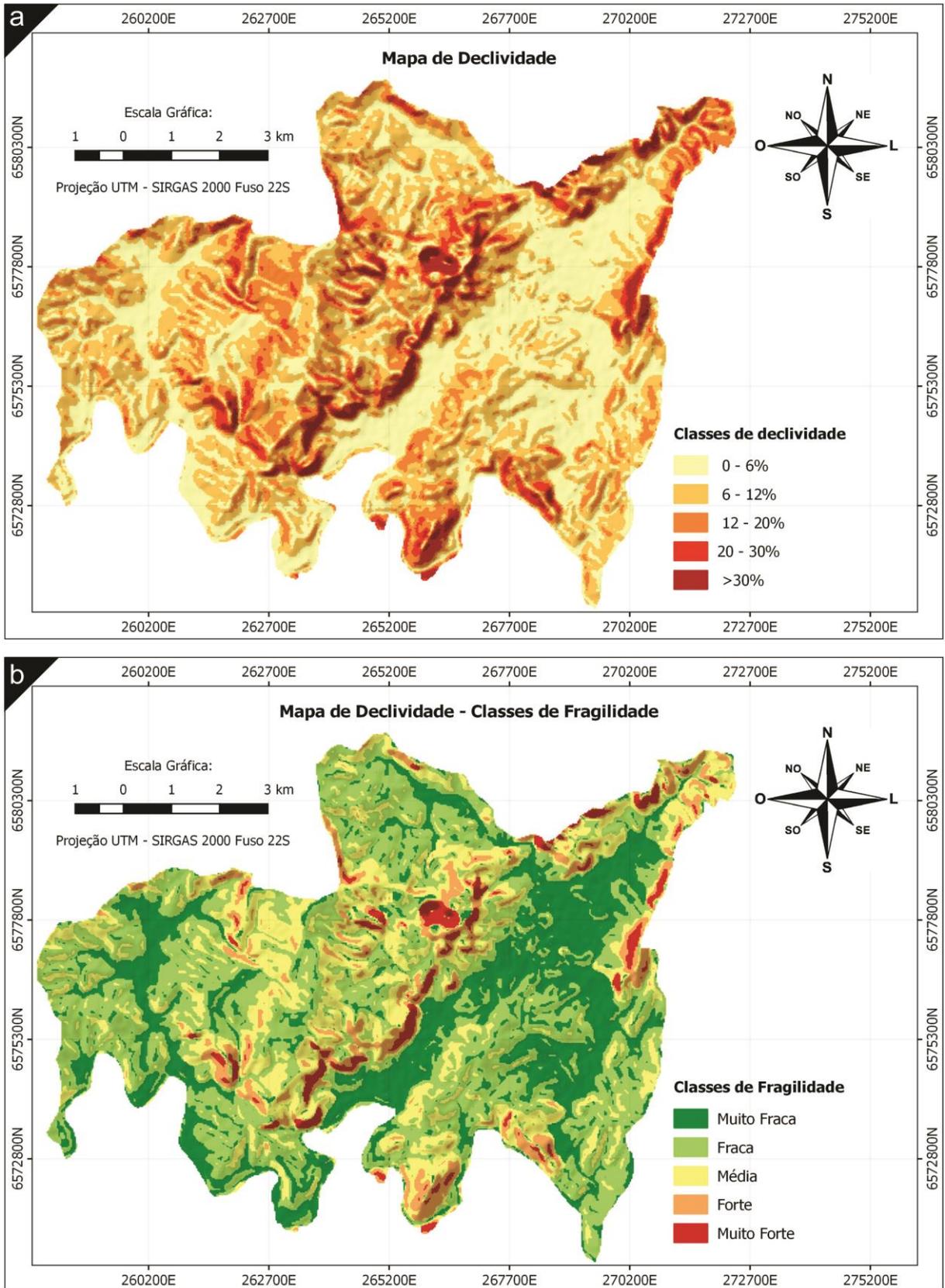
A análise de declividade indicou que 38,22 % da área possui declividades de 6 a 12 %, seguido por 26,1% com declividade de 0 a 6 %, representando mais da metade da área em estudo com classificação de fragilidade muito fraca e fraca. A classe de fragilidade muito forte, que representa declividades acima de 30 %, apresentou a menor parcela de área, com apenas 3,69 % (FIGURA 14). Os dados de cada classe estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados de classes de declividade.

<b>Classes de Fragilidade</b>	<b>Classes de declividade (%)</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
Muito Fraca	0 – 6	2.338,00	26,10
Fraca	6 – 12	3.423,00	38,22
Média	12 - 20	2.123,00	23,70
Forte	20 - 30	741,00	8,27
Muito Forte	>30	330,00	3,69

Fonte: O autor.

Figura 14 - (a) Mapa de declividade; (b) Mapa de classes de fragilidade referente à declividade.



Fonte: O autor.

#### 4.1.2 Solos

A área estudada apresenta cinco tipos de solos, sendo o Argissolo Vermelho-amarelo, o Neossolo Litólico, o Neossolo Flúvico, o Planossolo hidromórfico e o Horizonte A antrópico. (FIGURA 15- a).

Os Planossolos Hidromórficos abrangem a maior porção do local, com 4.556,71 ha representando 50,88 % da área total (TABELA 8). Os Planossolos Hidromórficos podem formar áreas susceptíveis à inundações nos períodos de maiores pluviosidades. Quando desprotegidos de vegetação tendem a formar sulcos que evoluem para ravinas e, posteriormente, atingem o nível freático podendo formar voçorocas (HANSEN; FENSTERSEIFER, 1999).

Os solos classificados como Horizonte A Antrópico, que recobrem solos do tipo Neossolo Litólico e Planossolo, apresentam a menor parcela de área, com apenas 7,21 %, perfazendo 646,16 ha do total.

Tabela 8 - Dados de classes de solos e suas classes de fragilidade.

<b>Classes de Fragilidade</b>	<b>Classes de Solos</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
Muito Forte	Neossolo Litólico	1.765,20	19,71
Muito Forte	Neossolo Flúvico	921,86	10,30
Muito Forte	Horizonte A antrópico	646,16	7,21
Forte	Argissolo Vermelho-amarelo	1.065,07	11,90
Forte	Planossolo Hidromórfico	4.556,71	50,88

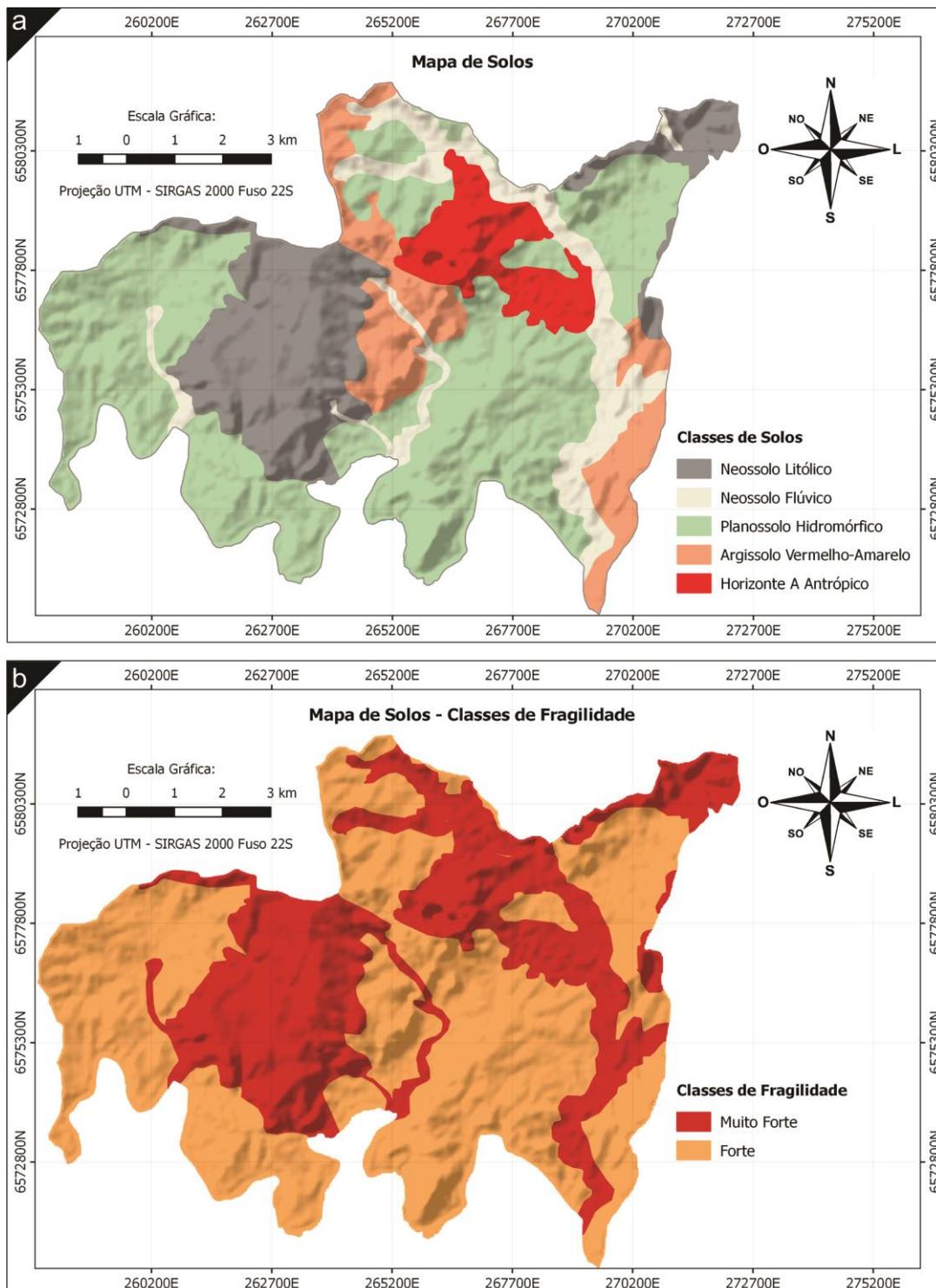
Fonte: O autor.

A área em estudo apresenta duas classes de fragilidade referente a os tipos de solo (FIGURA 15 – b), os solos dos tipos Neossolos e Horizonte A Antrópico apresentam grau de fragilidade muito forte, com 3.333,22 ha, representando 37,22% da área total e os Planossolos e Argissolos possuem fragilidade classificada como forte, com 5.621,78 ha equivalendo a 62,78 % do total da área em estudo.

As diferenças relacionadas as propriedades do solo permitem que alguns sejam mais erodíveis que outros, ainda que variáveis como chuva, declividade e cobertura vegetal sejam as mesmas. As propriedades do solo que influenciam na erodibilidade são aquelas que afetam a infiltração, a permeabilidade, a capacidade total de armazenamento de água e aquelas que resistem às forças de dispersão,

salpico, abrasão e transporte pelo escoamento (BERTONI; LOMBARDE NETO,1999). Desta forma, as características do solo definem a maior ou menor susceptibilidade aos processos erosivos. Sendo esta variável muito importante para estabelecer a fragilidade ambiental.

Figura 15 - (a) Mapa de solos da área; (b) Mapa de classes de fragilidade (tipos de solos).

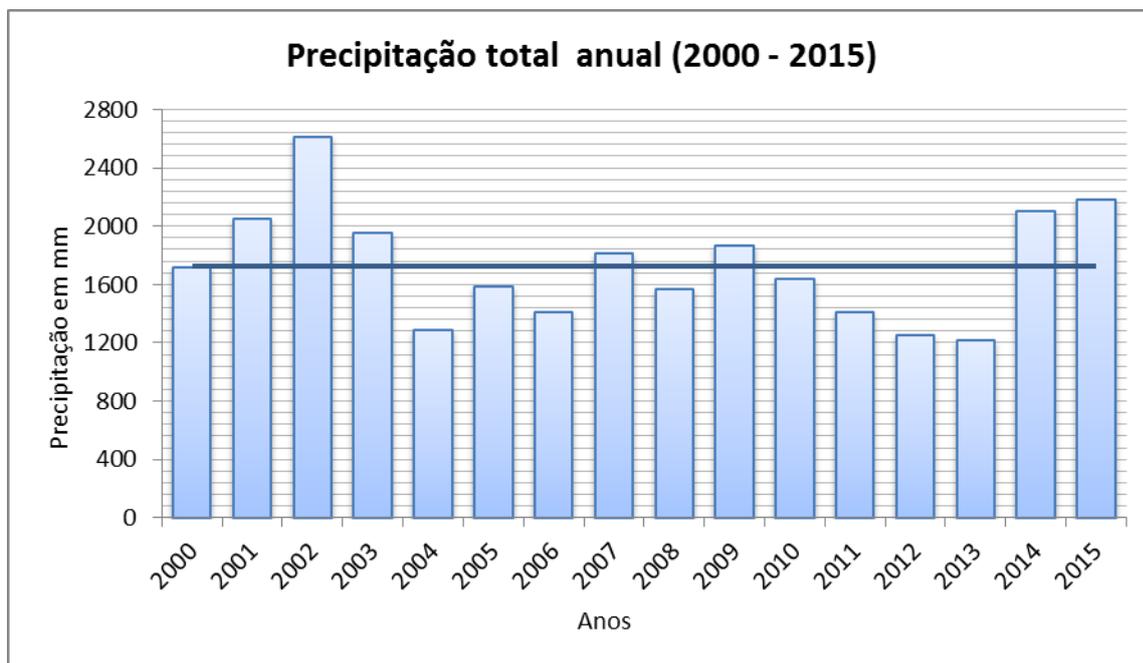


Fonte: O autor.

### 4.1.3 Precipitações

A precipitação é tipicamente subtropical, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano. Para os anos de 2000 a 2015 a precipitação média anual foi de 1728,8 mm, o maior volume pluviométrico acumulado ocorreu ano de 2002 com 2610,4 mm e o menor em 2013 com 1215,7 mm (GRÁFICO 1).

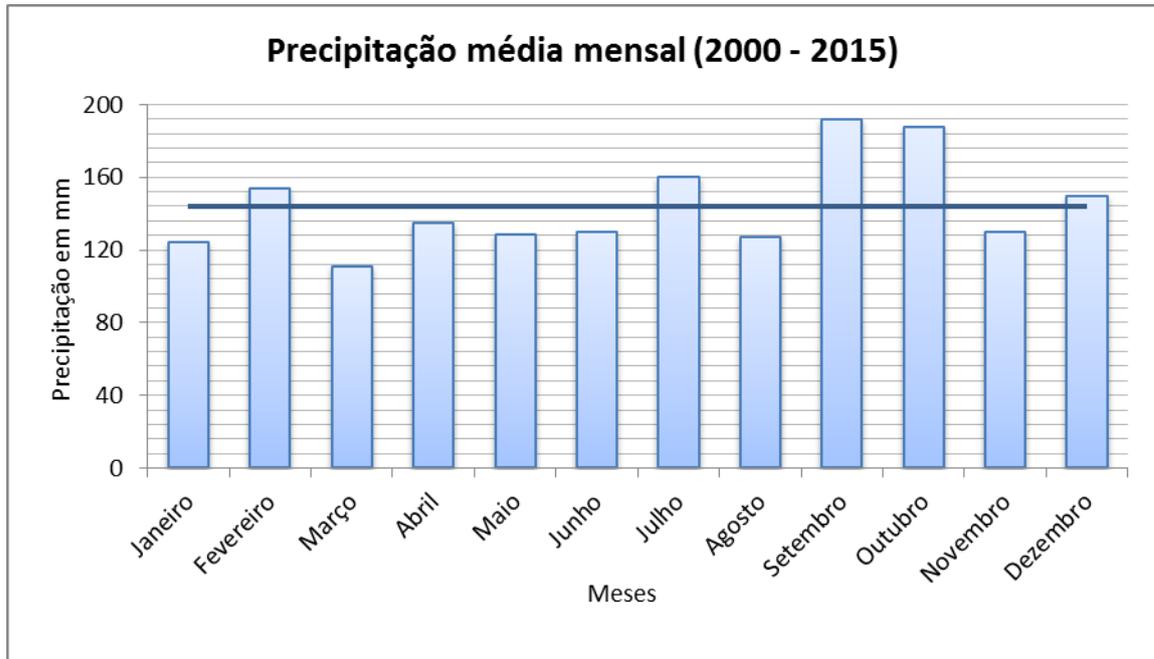
Gráfico 1 – Volume total precipitado no período de 2000 a 2015 no município de Caçapava do Sul - RS.



Fonte: CPRM - Dados da estação pluviométrica de Caçapava do Sul - RS.

A média mensal de precipitação foi de 143,1 mm. As maiores precipitações médias foram verificadas nos meses de setembro e outubro com precipitações de 191,7 e 187,5 mm respectivamente, enquanto as menores ocorreram nos meses de janeiro com 124,2 mm e março com 110,7 mm (GRÁFICO 2).

Gráfico 2 – Precipitação média mensal no período de 2000 a 2015 no município de Caçapava do Sul - RS.



Fonte: CPRM - Dados da estação pluviométrica de Caçapava do Sul - RS.

Considerando-se as precipitações anuais e mensais foi possível classificar o grau de fragilidade do local de estudo referente ao regime pluviométrico. A área em estudo possui grau de fragilidade fraco conforme a classificação de Ross (1994), apresentado volumes de chuva com distribuição regular ao longo do ano e volumes anuais em grande maioria inferiores a 2000 mm. Porém, locais com ausência ou pouca cobertura vegetal merecem atenção especial, visto que as chuvas são as principais responsáveis pela aceleração dos processos erosivos. Conforme Goering (1993) o impacto direto das gotas de chuva e o escoamento superficial ocasionam a degradação das partículas do solo. Segundo Nakashima (2001) precipitações em áreas com forte declividade podem desencadear processos erosivos, tais como sulcos, cicatrizes de escorregamento, ou ainda ravinas e voçorocas podendo fragilizar o ambiente.

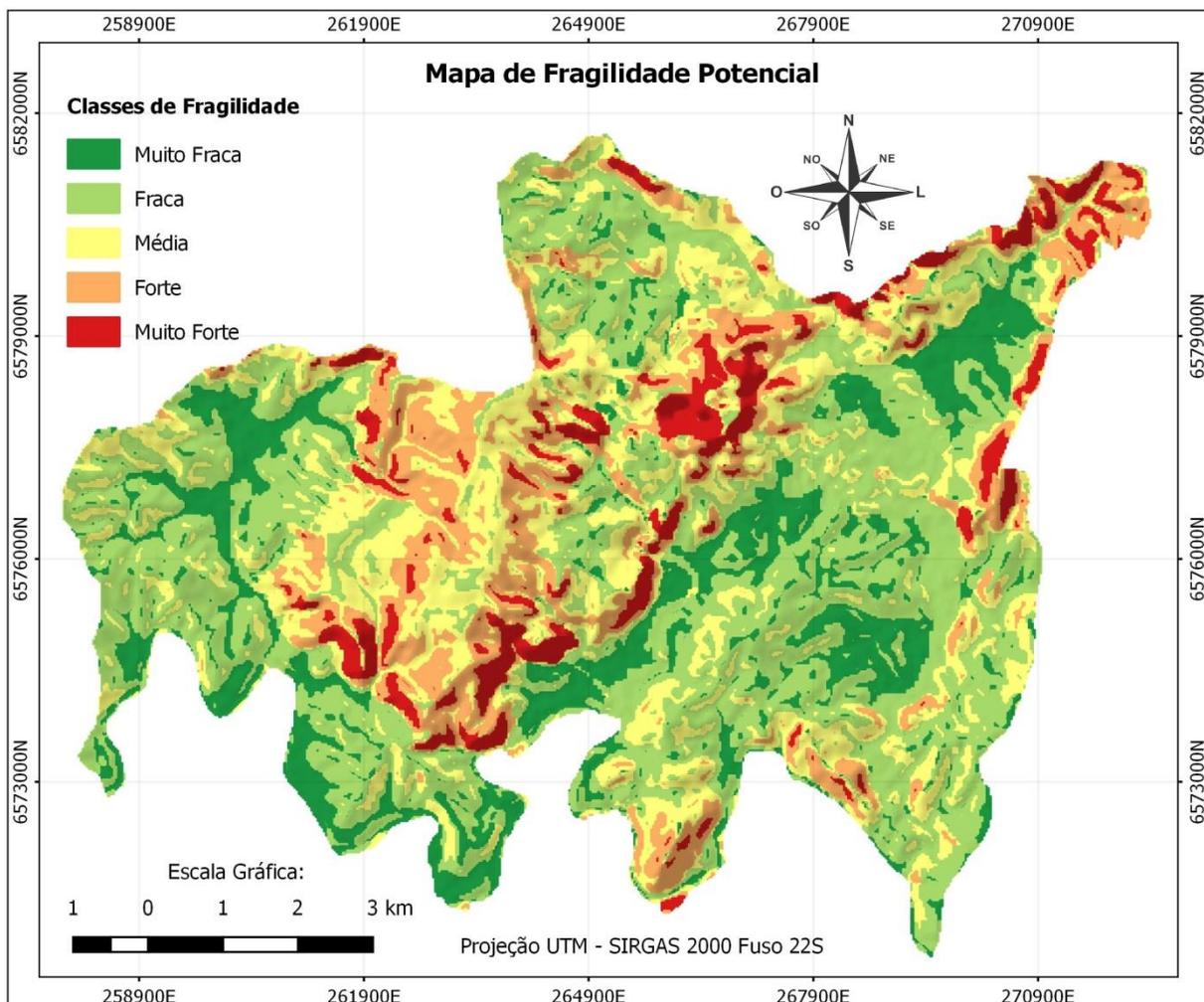
#### 4.1.4 Fragilidade Potencial

A fragilidade potencial da área foi determinada a partir da relação de informações referentes à declividade do terreno, tipos de solo e dados

pluviométricos. Esta análise apresenta as áreas de fragilidade natural, podendo-se discutir a potencialidade de atividades antrópicas a serem realizadas.

A análise gerou um mapa com predominância de áreas classificadas como de fraca e média fragilidade potencial, seguidas por classes muito fraca e forte com grande representatividade e por ultimo a classe de fragilidade muito forte com uma parcela menor de área, porém, com alta expressividade (FIGURA 16).

Figura 16 - Mapa de Fragilidade Potencial.



Fonte: O autor.

As porções com fragilidade potencial fraca representam 35,71 % da área total, com 3.198 ha (TABELA 9), estando estritamente ligadas a locais com declividades muito baixas, de 0 a 6 %, predominando em solos do tipo Planossolo Hidromórfico.

Tabela 9 - Resultados da fragilidade potencial.

<b>Fragilidade Potencial</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
Muito Fraca	1.549,00	17,30 %
Fraca	3.198,00	35,71 %
Média	2.223,00	24,82 %
Forte	1.279,00	14,28 %
Muito Forte	706,00	7,88 %

Fonte: O autor.

A classe expressa como de fragilidade potencial média, com área de 2.223,00 ha (24,82 %), está refletida predominantemente em solos do tipo Neossolo com declividades de 6 a 12 %. Esta classe de solo apresenta alta vulnerabilidade, pois, é composta por solos rasos e mal drenados, possuindo grande suscetibilidade a erosão (HANSEN; FENSTERSEIFER, 1999).

A classe de fragilidade potencial muito fraca apresenta o percentual de 17,30 % da área total, representando 1.549,00 ha. Esta classe encontra-se unicamente nos solos dos tipos Planossolo e Argissolo Vermelho-amarelo, que combinados a o relevo suave com declividades inferiores a 6 % estabelecem o grau de fragilidade potencial muito fraco.

Outra classe de fragilidade representativa é a fragilidade potencial forte, correspondendo a 14,28 % da área total, perfazendo 1.279,00 ha, no qual se destacam os solos classificados como Neossolos e pequenos fragmentos de Planossolos. O gradiente de declividade vai de 12 a 30 % nesta classe.

A fragilidade potencial muito forte representa 7,88 % da área total, correspondendo a 706,00 ha. Esta classe relaciona-se a declividades muito fortes, que vão de 20 % a valores que ultrapassam 30 %, ocorrendo principalmente em solos do tipo Neossolo, que adicionados a características pluviométricas da área em estudo resultam em uma classe de fragilidade potencial muito forte, sendo a mais vulnerável à formação de processos erosivos e por sua vez merecendo maior atenção no que se refere à utilização econômica do solo.

#### 4.1.5 Uso e cobertura do solo

A vegetação da área em estudo é distribuída em florestas e uso agrícola. O uso agrícola se refere ao uso das pastagens naturais (campos) para a criação de bovinos e ovinos e agricultura de ciclo curto em pequena escala (arroz, milho, aveia e etc). De acordo com Trindade et al. (2010) a região das Minas do Camaquã se caracteriza por apresentar um excelente estado de conservação da cobertura vegetal natural. Porém os tipos de solo da região são caracterizados por apresentar um horizonte superficial, mineral ou orgânico, imediatamente acima da camada de rocha alterada ou inalterada (STRECK et al., 2002), sendo comuns na paisagem os afloramentos rochosos. Também a paisagem da área é marcada pela exploração mineral do passado, onde possui passivos ambientais como cavas desativadas, barragens de rejeito e grandes áreas sem cobertura vegetal.

Com base na interpretação e classificação da imagem de satélite foi possível identificar os tipos de uso e cobertura do solo da área em estudo (FIGURA 17 - a).

As florestas ou matas naturais representam a maior parcela de área, constituindo 42,61 % do total, equivalente a 3.816,00 ha (TABELA 10), apresentando um grau de fragilidade muito baixo, o que é um fator positivo, pois esta categoria incorpora alto grau de proteção ao solo. Este tipo de vegetação ocorre em áreas relativamente vulneráveis como encostas, topos de morros, grandes vales ao longo de arroios, córregos e grandes drenagens.

Tabela 10 - Dados de uso e ocupação do solo e suas classes de fragilidade.

<b>Classes de Fragilidade</b>	<b>Uso e ocupação do Solo</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
Muito Fraca	Matas naturais	3.816,00	42,61
Fraca	Campos naturais	1.601,00	17,88
Média	Pastagem e Agricultura	2.058,00	23,0
Forte	Águas superficiais	416,00	4,65
Muito Forte	Solo exposto	1.064,00	11,88

Fonte: O autor.

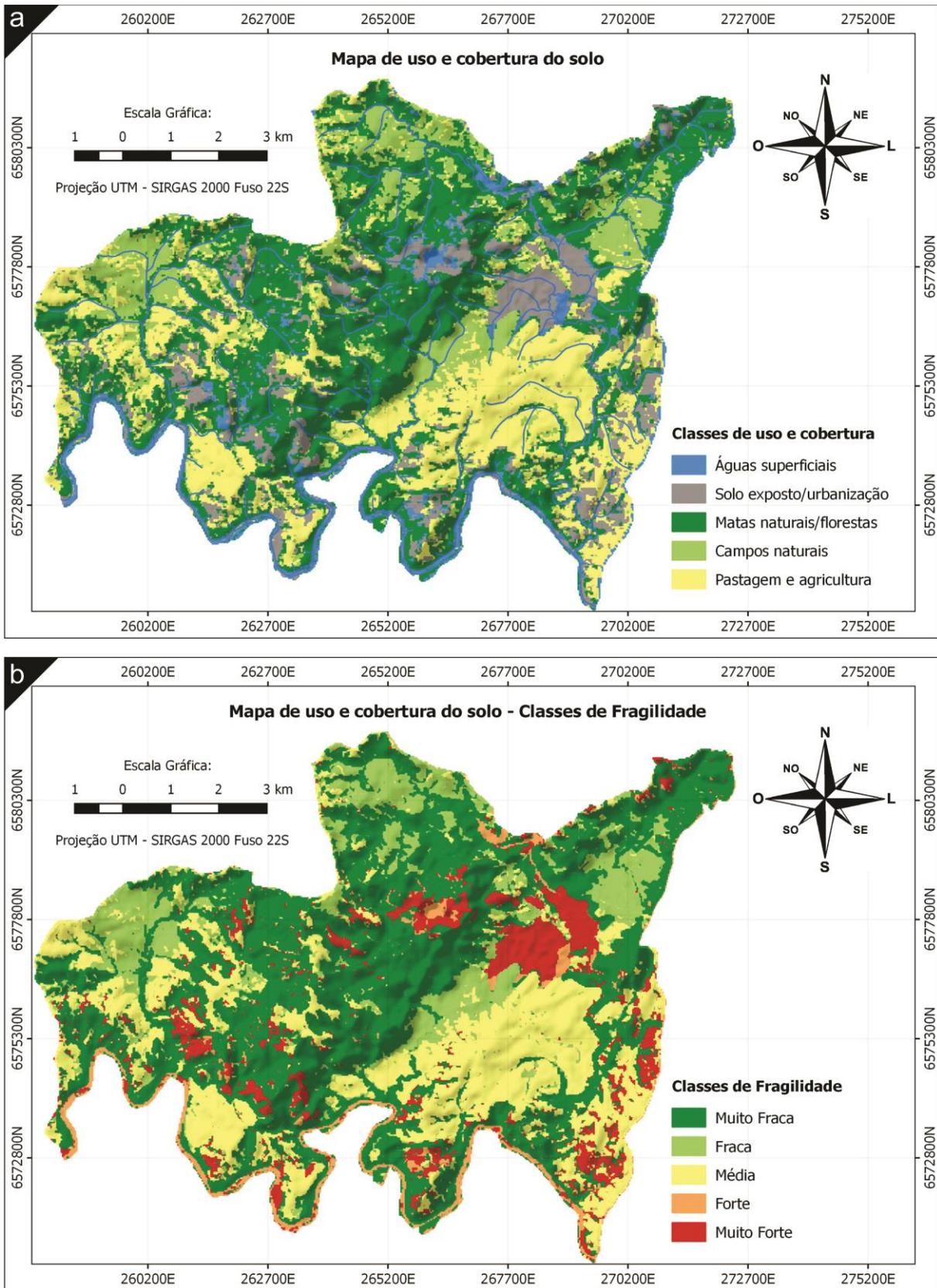
A classe de campos naturais abrange 17,88 % da área, com 1.601,00 ha, localizam-se ao entorno das matas densas, principalmente em locais de cotas

elevadas e bem drenadas. Este tipo de cobertura vegetal possui classe de fragilidade classificada como fraca.

A principal atividade agrícola da área estuda é a pecuária extensiva, com baixa densidade, sem manejo de pastagem. Este tipo de manejo traz impactos positivos para a manutenção das formações campestres, retardando o avanço das florestas sobre os campos naturais (PILLAR; BOLDRINI, 1996). Além da pecuária destaca-se a pratica de agricultura de ciclo curto com finalidade de subsistência e comércio local, sendo cultivado principalmente hortaliças, feijão, milho e aveia. Esta classe possui grau de fragilidade médio, abrangendo uma área de 2.058 ha, representando 23,0 % do total da área estudada (FIGURA 17 - b).

Na área em estudo ocorre a presença de solos expostos, provenientes das atividades mineradoras que se encerraram na década de 1990, as quais se destacam a cava a céu aberto, a barragem de rejeito e áreas de beneficiamento de minério, além de estradas abandonadas. Também há a presença de vilarejos ao entorno da antiga mina, caracterizando áreas urbanizadas. Os afloramentos rochosos, urbanização e estradas, foram incluídos como áreas de solo exposto. A classe de solo exposto apresenta grau de fragilidade muito forte e contribuem com 11,88 % da área total, perfazendo 1.064,00 ha.

Figura 17 - (a) Mapa de uso e cobertura do solo; (b) mapa de classes de fragilidade (uso e cobertura do solo).



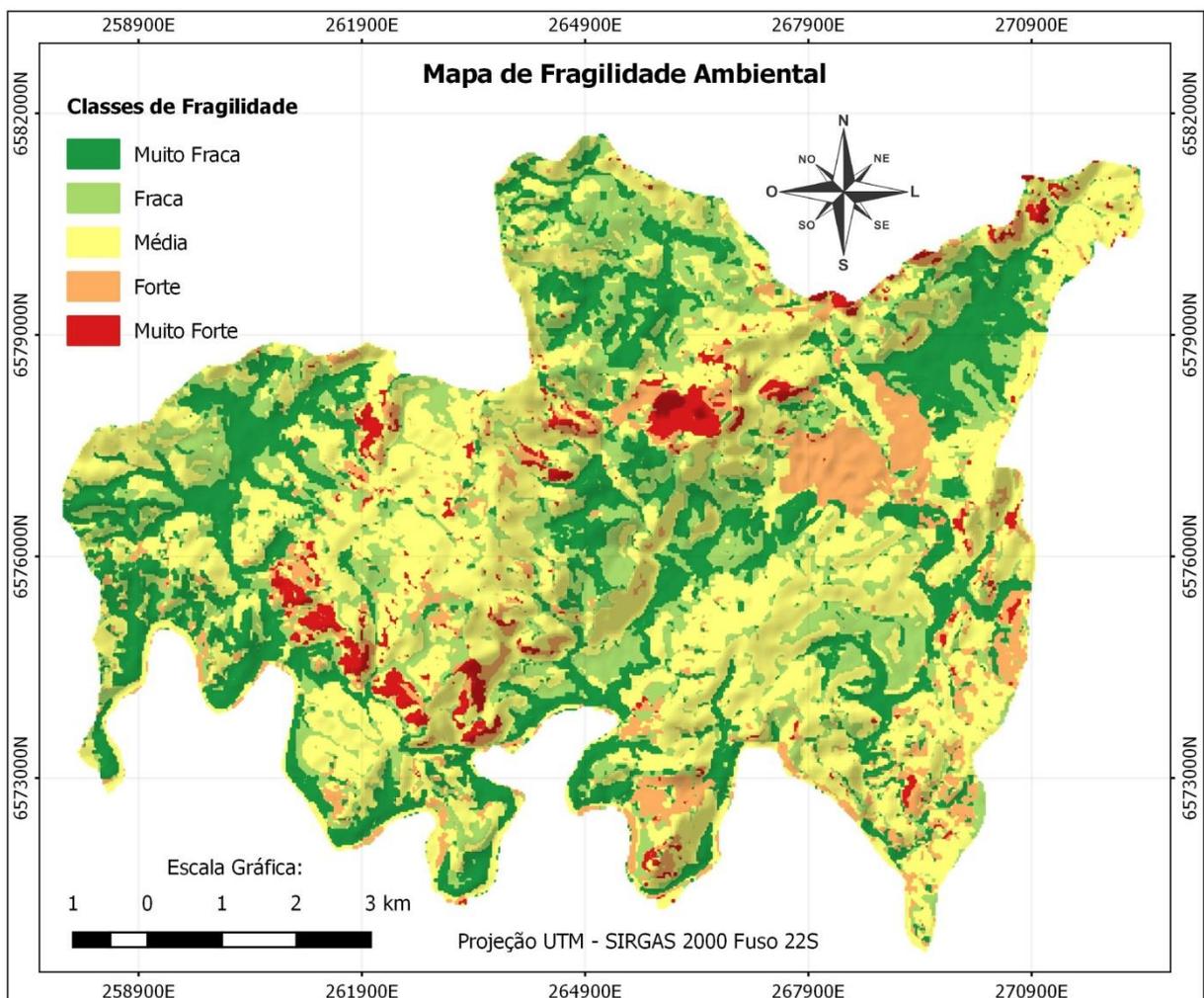
Fonte: O autor.

#### 4.1.6 Fragilidade Ambiental

Determinou-se a fragilidade ambiental (emergente) da área a partir da relação de informações referentes à declividade do terreno, tipos de solos, dados pluviométricos e uso e cobertura do solo.

As classes com maior representatividade são as de fragilidade ambiental média e fraca (FIGURA 18).

Figura 18 - Mapa de Fragilidade Emergente (Ambiental).



Fonte: O autor.

A classe expressa como de fragilidade emergente média é composta por uma área de 3.321,00 ha, representando 37,08 % do total (TABELA 11). Suas declividades variam de 6 % a valores que ultrapassam 30 %, abrangem todos os tipos de solo da área em estudo, porém, predominam os Neossolos. A cobertura e

uso preponderante nessa classe são as pastagens e matas densas. A classe de matas densas ocorre principalmente em zonas de altas declividades como em encostas e grandes vales.

Tabela 11 - Resultados da fragilidade ambiental correspondente a áreas da bacia.

<b>Fragilidade Ambiental</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
Muito Fraca	1.943,00	21,70
Fraca	2.234,00	24,95
Média	3.321,00	37,08
Forte	1.058,00	11,81
Muito Forte	399,00	4,45

Fonte: O autor.

As regiões previstas para as novas atividades de mineração estão situadas, predominantemente, em locais de fragilidade emergente média, merecendo atenção no que se refere à exploração dos recursos naturais. Nesse sentido as novas atividades de mineração demandarão medidas de controle e monitoramento, quanto aos processos erosivos, visto o potencial de degradação desta atividade. Kopezinski (2000) argumenta que empreendimentos organizados e com planejamento, mesmo sendo fonte de impactos, conseguem fazer uso de medidas de controle mesmo durante a operação.

As porções com fragilidade emergente fraca compreendem uma área de 2.234 ha, equivalendo a 24,95 % do total da área em estudo. Predominam três tipos de uso e cobertura do solo, os quais são compostos por campos naturais, pastagens e matas densas. Esta classe apresentou grande relação com baixas declividades e a solos dos tipos Planossolos e Argissolos. As baixas declividades propiciaram o estabelecendo de culturas em algumas porções da área.

A classe de fragilidade ambiental muito fraca representa 21,70 % da área total, com 1.943,00 ha. Esta classe apresentou-se inserida, exclusivamente em áreas de baixa declividade e composta por solos dos tipos Planossolos e Argissolo. A cobertura vegetal é formada predominantemente por campos naturais e matas densas, nesta última, ocorrendo predominantemente próximo a cursos d'água.

Os locais definidos como de fragilidade emergente forte, expressam 11,81% do total da área, perfazendo 1.058 ha. A fragilidade emergente forte está refletida

em todos os tipos de solos, com destaque para os solos dos tipos Neossolo. As declividades apresentaram grandes variações, chegando a valores superiores a 30 %. Essa classe de fragilidade esta diretamente relacionada com áreas de solo exposto, principalmente em locais de afloramentos rochosos.

A fragilidade emergente muito forte apresenta 4,45 % da área total, correspondendo a 399,00 ha. As declividades encontradas nesses locais são superiores a 20 % e os solos são predominantemente do tipo Neossolo Litólicos. É importante frisar que os Neossolos Litólicos, por serem muito rasos, apresentam alto risco de erosão, pois o substrato dificulta ou impede a penetração do sistema radicular, bem como a água de percolação tem seu fluxo interrompido ou diminuído, expondo estes solos aos efeitos do escoamento superficial (OLIVEIRA, 2008).

A fragilidade emergente muito forte nesses locais, pode estar associada a pouca cobertura vegetal, devido à afloramentos rochosos e modificações da paisagem, causadas pelas explorações minerais do passado, onde grandes áreas desativadas encontram-se com solo exposto, como as áreas industriais, cavas de mineração e barragens de rejeitos. Essas áreas de solo exposto, associadas à precipitações, à declividades altas e ao tipo de solo podem favorecer o carreamento de sedimentos e a formação de processos erosivos, podendo resultar em uma instabilidade do ambiente.

## 4.2 Qualidade dos Sedimentos

Os sedimentos coletados do Rio Camaquã e no Arroio João Dias são principalmente arenosos e a fração fina varia de 0,91 a 9,43 % (TABELA 12).

Tabela 12 - Resultados das análises granulométricas.

Pontos de coleta	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	CS6
>63 $\mu\text{m}$ (%)	99,09	96,03	97,75	90,57	98,68	98,51
<63 $\mu\text{m}$ (%)	0,91	3,97	2,25	9,43	1,32	1,49

Fonte: O autor.

Os resultados das análises químicas, para as duas campanhas, estão apresentados na Tabela 13. Foram descritos apenas os elementos com maior relevância para a pesquisa.

De maneira geral, os sedimentos não apresentaram significativas variações de concentrações em relação as amostra coletadas em 2018 e 2019, períodos de cheia e estiagem respectivamente. Pouca variação temporal nas concentrações em sedimentos também foram observadas na Finlândia (VÄÄNÄNEN et al., 2016), em Mangla no Paquistão (SALEEM et al., 2013) e em Montana no Estados Unidos (NAGORSKI et al., 2003).

Tabela 13 - Resultados de concentrações de elementos químicos nos sedimentos.

Pontos de coleta	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
	CS1	CS1	CS2	CS2	CS3	CS3	CS4	CS4	CS5	CS5	CS6	CS6
<b>Elementos</b>												
SiO (%)	46,90	46,60	51,90	55,10	54,40	58,90	48,80	54,80	49,30	59,30	57,30	47,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	18,71	15,62	20,97	19,19	22,87	16,62	18,42	21,04	16,10	16,12	17,75	16,70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,22	1,54	1,75	3,31	2,37	1,01	4,44	1,37	1,16	1,24	1,18	1,26
MgO (%)	2,37	1,52	1,36	1,30	1,42	2,84	1,66	3,64	2,03	2,19	1,90	2,61
K <sub>2</sub> O (%)	2,11	2,24	2,50	2,17	2,83	2,25	2,06	2,69	1,92	1,93	1,58	1,81
CaO (%)	<LD	0,22	0,16	0,92	0,46	<LD	0,12	0,28	0,21	<LD	0,25	0,54
TiO <sub>2</sub> (%)	<LD	0,061	0,29	0,20	0,52	0,012	0,38	0,13	0,10	<LD	0,21	0,18
MnO (%)	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	<LD	<LD	21,00	37	<LD	<LD	19,00	<LD	<LD	<LD	9,00	<LD
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,20	0,60	67,70	71,30	4,70	9,00	40,80	42,10	105,40	104,00	0,30	0,40
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	1020,00	743,00	832,00	1690,00	1150,00	549,00	1990,00	670,00	499,00	594,00	587,00	550,00
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	1120,00	1610,00	1260,00	977,00	1070,00	972,00	971,00	1050,00	1030,00	972,00	1040,00	1260,00
Mo (mg.kg <sup>-1</sup> )	<LD	<LD	71,00	76,00	170,00	<LD	88,00	<LD	<LD	<LD	39,00	57,00
Ce (mg.kg <sup>-1</sup> )	1010,00	552,00	876,00	1200,00	1450,00	<LD	1860,00	1250,00	2600,00	643,00	716,00	1060,00
S (mg.kg <sup>-1</sup> )	1100,00	19,00	37,00	1170,00	<LD	<LD	1980,00	249,00	<LD	229,00	<LD	48,00
Cl (mg.kg <sup>-1</sup> )	619,00	516,00	498,00	578,00	624,00	597,00	621,00	515,00	774,00	594,00	521,00	612,00
Hf (mg.kg <sup>-1</sup> )	<LD	<LD	120,00	<LD	43,00	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	99,00
Rh (mg.kg <sup>-1</sup> )	2910,00	3030,00	2710,00	2180,00	2290,00	2420,00	2550,00	2320,00	3120,00	2470,00	2550,00	3210,00

<LD menor que o limite de detecção do equipamento.

Fonte: O autor.

A análise mostra que o óxido mais abundante nos sedimentos é o SiO, com concentrações entre 46,6 a 59,3 %. O Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foi o segundo maior composto encontrado, com concentrações na faixa de 15,62 % em CS1-2019 e 22,87 % em CS3-2018. Para o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as concentrações ficaram entre 1,01 e 4,44 %, sendo verifica as maiores no Arroio João Dias, na barragem de rejeitos da Companhia

Brasileira de Cobre (BRCBC) no ponto CS2-2019 (33100 mg.Kg<sup>-1</sup>) e a jusante desta, no ponto CS4-2018 (44400 mg.Kg<sup>-1</sup>), podendo ter influencia da BRCBC neste local. As concentrações de MgO variaram de 1,30 a 3,64 %, com maiores concentrações no ponto CS4 (Arroio João Dias) na amostra coletada em 2019. O MnO no sedimento se manteve constante independente do local de amostragem ou período de coleta, variando de 0,01 a 0,03 %. No Rio Changjiang, na China, Wang et al. (2019) verificaram em sedimentos valores de 2,5 - 3,69 %, 1,16 - 1,42 % e 0,06 - 0,07 % para Fe, Mg e Mn, respectivamente.

De maneira geral os óxidos analisados refletem a composição das rochas da região. A mineralogia dos arenitos do Alogrupo Guaritas mostra-se com media de 40 % de quartzo (SiO<sub>2</sub>), 30 % de feldspato (KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), 25 % de fragmentos de rocha e 5% de minerais acessórios (muscovita (KAl<sub>2</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(F,OH)<sub>2</sub>), zircão (ZrSiO<sub>4</sub>) e epidoto (Ca<sub>2</sub>(Al,Fe)<sub>3</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)), opacos e pesados (DENALLE, 2013). Na região são encontradas rochas com presença de minerais como: calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), calcocita (Cu<sub>2</sub>S), bornita (CuFeS<sub>2</sub>), pirita (FeS<sub>2</sub>), dolomita ((CaMg)CO<sub>3</sub>), ilita ((K,H<sub>3</sub>O)(Al,Mg,Fe)<sub>2</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>[(OH)<sub>2</sub>, (H<sub>2</sub>O)]), calcita (CaCO<sub>3</sub>), clorita ((Fe,Mg,Al)<sub>6</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>), hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), barita (BaSO<sub>4</sub>), entre outros (LINDENBERG, 2014).

O quartzo é um mineral formado por SiO<sub>2</sub>. Já o feldspato potássico têm na sua composição química K, Al e Si. A hematita e a pirita são ricas em Ferro, e a dolomita é um mineral abundante em cálcio e magnésio. A presença destes minerais podem justificar as concentrações obtidas para esses óxidos nas amostras de sedimentos analisadas.

O Zn foi identificado somente nas amostras CS2, CS4 e CS6. Com destaque para o ponto CS2, situado no Arroio João Dias próximo a barragem de rejeitos da antiga mina da CBC, onde as concentrações foram de 21 e 37 mg.Kg<sup>-1</sup> para as coletas nos dois períodos. No mesmo arroio, porém a jusante da BRCBC, a amostra CS4-2018 apresentou 19 mg.Kg<sup>-1</sup> deste elemento. Em análises de sedimentos em área de mineração Brandelero et al. (2016) obtiveram valores semelhantes, com concentração de 40,08 mg.Kg<sup>-1</sup> em local de atividade mineral e 29,31 mg.Kg<sup>-1</sup> a jusante desta.

As maiores concentrações de Cobre foram verificadas no Arroio João Dias (CS2, CS4 e CS5) o qual sofreu influência das atividades minerárias de Cobre. No ponto CS5, a montante da BRCBC, identificou-se as maiores concentrações (105,4 e

105 mg.Kg<sup>-1</sup>), provavelmente impactado por uma área próxima, que foi utilizada para beneficiamento de minérios na época de atividade. Em CS2 (BRCBC) os valores ficaram com 67,7 e 71,3 mg.Kg<sup>-1</sup>, local que sofre impactos até os dias atuais. A jusante da BRCBC, próximo ao encontro com o Rio Camaquã (CS4), as concentrações mostraram leve diminuição apresentando valores de 40,8 e 42,1 mg.Kg<sup>-1</sup>. No ponto de amostragem CS3 localizado no Rio Camaquã, a jusante do encontro do Arroio João Dias, as concentrações de Cobre nos sedimentos indicaram valores superiores (4,7 e 9,0 mg.Kg<sup>-1</sup>) aos encontrados nos pontos CS1 e CS6 a montante, também, no Rio Camaquã, indicando alguma interferência referente a antiga atividade de mineração no local. Corroborando com resultados de Brandelero et al. (2016) que obtiveram concentrações decrescentes de montante para jusante em área de mineração (54,08 mg.Kg<sup>-1</sup>, 25,92 mg.Kg<sup>-1</sup> e 24,97 mg.Kg<sup>-1</sup>). No Oeste da Tasmânia Mehler et al. (2019) identificaram concentrações semelhantes para Cu (17 - 1500 mg.Kg<sup>-1</sup>), Mn (12 - 1400 mg.Kg<sup>-1</sup>) e Fe (2,4 - 41,9 %) em sedimentos fluviais em cursos d'água próximo a minas de Cu, Zn, Au, Sn e Pb. No noroeste da Tunísia Sebei et al. (2018) encontraram valores de Cu na ordem de 8 a 50 mg.Kg<sup>-1</sup>. Väänänen et al. (2016) obtiveram maiores concentrações de Cu (19 - 248 mg.Kg<sup>-1</sup>) em sedimentos próximo a área de mineração de Cu e Zn.

Foram encontradas altas concentrações de Co em todos os pontos amostrais, ficando entre 499 e 1990 mg.Kg<sup>-1</sup>. Em Shenzhen na China Xu et al. (2015) identificaram valores máximos de 502 mg.Kg<sup>-1</sup> para o Cobalto em sedimentos. Em baixas quantidades o Co é essencial para os seres vivos (NADIA et al., 2013), no entanto, em altas concentrações pode ter efeitos prejudiciais (HETE et al., 2012; NADIA et al., 2013).

O cádmio apresentou concentrações extremamente altas, variando de 971 a 1610 mg.Kg<sup>-1</sup>, não podendo ser relacionado a geologia ou as atividades de mineração na área. Este elemento, proveniente de fatores antrópicos, se deposita facilmente em sedimentos (BELLUTA et al., 2008). Lei et al. (2010) argumentam que o Cd é um elemento sem função biológica conhecida e é considerado um dos metais mais perigosos no ambiente, pois pode afetar os seres vivos em concentrações baixas e também possui alta mobilidade no ambiente. O comportamento deste metal deve ser mais bem avaliado no local estudado.

A partir da Tabela 14 pode-se observar a correlação estatística entre os compostos químicos identificados nos sedimentos. Foram interpretados somente

valores com coeficiente de correlação de Pearson positiva classificado como forte com valores superiores a 0,7 (DANCEY; REIDY, 2013).

Tabela 14 - Matriz de correlação estatística de Pearson aplicada entre os elementos encontrados nos sedimentos.

	MgO	Al2O3	SiO	K2O	CaO	TiO2	MnO	Fe2O3	Cu	Co	Zn	Mo	Rh	Cd	Ce	Hf	S	Cl
MgO	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Al2O3	-0,11	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
SiO	0,162	0,1362	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
K2O	0,032	<b>0,7532</b>	0,0748	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
CaO	-0,27	0,1207	-0,34	-0,04	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
TiO2	0,434	0,6529	0,1197	0,596	0,004	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
MnO	-0,49	<b>0,7383</b>	-0,352	0,552	0,307	<b>0,704</b>	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Fe2O3	-0,47	0,3369	-0,247	0,142	-0,09	0,092	0,659	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Cu	-0,13	-0,104	0,2389	-0,06	-0,37	-0,02	-0,18	0,036	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Co	-0,49	0,3656	-0,174	0,178	-0,11	0,096	0,682	<b>0,993</b>	0,034	1	---	---	---	---	---	---	---	---
Zn	-0,56	0,266	0,0856	-0,02	-0,15	-0,02	0,535	0,648	0,298	0,696	1	---	---	---	---	---	---	---
Mo	-0,56	0,6701	0,0049	0,378	0,578	<b>0,943</b>	<b>0,736</b>	0,546	-0,17	0,558	0,382	1	---	---	---	---	---	---
Rh	0,018	-0,549	-0,766	-0,44	0,367	-0,42	-0,23	-0,32	-0,12	-0,4	-0,4	-0,35	1	---	---	---	---	---
Cd	-0,22	-0,191	-0,601	0,095	0,366	-0,14	0,169	-0,23	-0,38	-0,25	-0,2	-0,12	0,592	1	---	---	---	---
Ce	-0,17	0,1672	-0,409	0,002	0,219	0,237	0,286	0,37	0,433	0,313	0,11	0,255	0,202	-0,24	1	---	---	---
Hf	-0,18	0,3167	-0,242	0,183	0,565	0,023	0,333	-0,13	-0,07	-0,15	0,111	0,418	0,294	0,348	-0,05	1	---	---
S	-0,19	0,1008	-0,26	-0,09	-0,36	0,009	0,386	<b>0,897</b>	0,073	<b>0,876</b>	0,538	0,175	-0,22	-0,33	0,298	-0,31	1	---
Cl	-0,11	-0,431	-0,399	-0,23	0,167	-0,39	-0,18	0,026	0,24	-0,02	-0,32	-0,1	0,48	-0,06	0,606	-0,28	0,046	1

Elaborada no BioEstat 5.0 ; Valores com hachura = correlações significativas com  $p < 0,05$ ;  $n = 12$ .

Fonte: O autor.

As significativas correlações entre óxidos de Al com K e Mn sugerem que o Al funciona como suporte geoquímico desses metais no ambiente. A correlação entre o potássio e o alumínio pode ter relação com a disponibilidade de K-feldspato, abundante nas rochas da região e rico em Al, Si e K.

O óxido de ferro apresenta correlações significativas com o enxofre e com o cobalto. A associação do Fe com o S pode ter relação com a presença da pirita ( $\text{FeS}_2$ ), mineral encontrado na região. Já a correlação com o Co pode ser explicada pelo potencial que os óxidos de ferro têm em adsorver o cobalto (TAGHIPOUR et al., 2011).

O cobalto se correlaciona significativamente com o S e o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Este elemento não é encontrado em estado nativo, mas em diversos minerais, razão pela qual é encontrado junto a outros metais.

Observa-se que o TiO teve forte correlação com o MnO e com o Mo. E também o Mn e o Mo comportaram-se da mesma forma.

As correlações observadas indicam coerência com as litologias da área de estudo.

Os valores determinados nas amostras investigadas foram comparados com os limites Nível 1 (limiar abaixo do qual prevê-se baixa probabilidade de efeitos adversos à biota) e Nível 2 (limiar acima do qual prevê-se um provável efeito adverso à biota) estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 454 de 01 de novembro de 2012. Os elementos identificados nos sedimentos que constam nesta resolução foram apenas o Zn, o Cu e o Cd.

Para o zinco nenhum ponto analisado ultrapassou o limite Nível 1 ( $123 \text{ mg.Kg}^{-1}$ ). No entanto para o Cu nos pontos CS2, CS4 e CS5 os valores ultrapassaram o limite Nível 1 ( $35 \text{ mg.Kg}^{-1}$ ) em 103,7%, 20,3%, 201,1%, respectivamente. Já para o Cádmiio as concentrações determinadas nos sedimentos apresentaram-se extremamente altas, para todos os pontos estudados, em comparação aos limites Nível 1 ( $0,6 \text{ mg.Kg}^{-1}$ ) e Nível 2 ( $3,5 \text{ mg.Kg}^{-1}$ ) da Resolução CONAMA nº 454, ultrapassando até 460 vezes (CS1) o valor limite para a Nível 2.

### 4.3 Condutividade hidráulica do solo

A partir dos ensaios de condutividade hidráulica realizados na área de estudo foram obtidos os resultados demonstrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica.

Ensaio	Permeabilidade (cm/s)	Tipos de solo	Profundidade (cm)
EP1	$3,679.10^{-4}$	Planossolo	40,0
EP2	$8,811.10^{-5}$	Neossolo Litólico	40,0
EP3	$2,084.10^{-4}$	Planossolo	40,0
EP4	$1,849.10^{-4}$	Planossolo	40,0
EP5	$1,262.10^{-4}$	Planossolo	40,0
EP6	$8,811.10^{-5}$	Argissolo Vermelho-amarelo	40,0

Fonte: O autor.

Em EP1 foi identificado a maior permeabilidade com valor de  $3,679.10^{-4} \text{ cm/s}$ , o local ensaiado é proveniente de rochas conglomeráticas, apresentando uma fina camada orgânica acima do horizonte A. O mesmo, não apresenta sinais de

compactação e a vegetação é composta por campos nativos. O ensaio EP3 apresentou condutividade hidráulica de  $2,084 \cdot 10^{-4}$  cm/s, a região do ensaio possui vegetação densa e características de solo inalterado.

As maiores permeabilidades, nos pontos EP1 e EP3, podem ser explicadas pela criação de poros nos horizontes pela ação das raízes, visto a presença de cobertura vegetal nativa nestes locais. Ambos os ensaios foram realizados em solos provenientes de rochas conglomeráticas da Formação Rincão dos Mouras, sendo compostos por sedimentos não consolidados de grande variação granulométrica, que podem resultar em maior volume de macroporos, aumentando assim a capacidade de infiltração de água no solo (KLEIN, 2012).

Em EP4 a permeabilidade ficou com  $1,849 \cdot 10^{-4}$  cm/s, o ensaio foi realizado em área utilizada para pecuária, sendo recobertos por pastagens. Para o ponto ensaiado EP5 a condutividade hidráulica apresentou  $1,262 \cdot 10^{-4}$  cm/s, este ponto também encontra-se composto por pastagens, porém, apresentando leves sinais de compactação por pisoteio de gado, conforme Parron et al. (2015), o excesso de carga de animais pode elevar a densidade do solo e implicar na redução da macroporosidade e, conseqüentemente, impactar na condutividade hidráulica de água no solo. Ambos os pontos localizam-se em solos do tipo Planossolo, sendo derivados de rochas areníticas das Formações João Dias e Seival respectivamente.

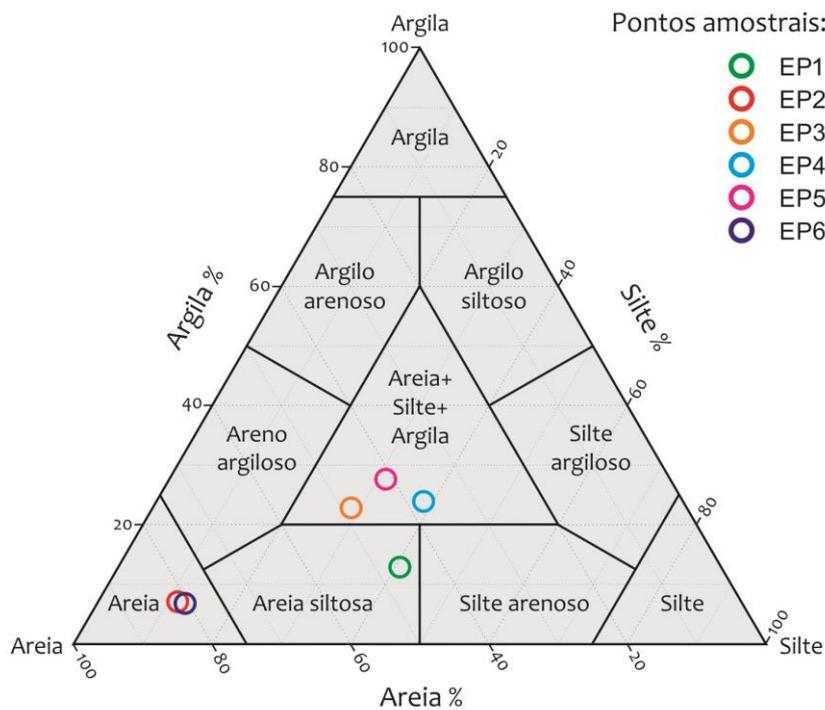
As menores permeabilidades foram encontradas em EP2 e EP6 com  $8,811 \cdot 10^{-5}$  cm/s em ambos os pontos ensaiados. Nos dois casos, o perfil de solo mostrava-se pouco espesso e com pouca ou nenhuma cobertura vegetal, além da presença de afloramentos rochosos próximos. De acordo com Santos et al. (2011), a condição de solo descoberto possui menor rugosidade hidráulica do fluxo superficial, com conseqüente geração de escoamento superficial e menor infiltração de água no solo.

O ensaio EP2 foi realizado sobre solo do tipo Neossolo Litólico (Formação João Dias), onde o horizonte A encontra-se diretamente sobre a rocha parcialmente alterada, característica que dificulta a permeabilidade e armazenamento das águas, podendo resultar em uma predominância da taxa de escoamento superficial em relação à infiltração. Silva et al. (2018), utilizando o mesmo método, encontraram valores de condutividade hidráulica na ordem de  $10^{-6}$  cm/s em solo do mesmo tipo, evidenciando a baixa permeabilidade do mesmo.

No ponto EP6 o ensaio foi executado sobre solo do tipo Argissolo Vermelho - Amarelo, nesta região, o solo apresentava-se com horizonte A pouco espesso com característica arenosa seguida por um horizonte mais consolidado, fato que pode ter influenciado para uma menor permeabilidade neste local.

De maneira geral os locais estudados apresentaram baixo grau de condutividade hidráulica (TARZAGHI; PECK, 1967), indicando características de solos constituídos por areias siltosas e argilosas, conforme classificação de Mello; Teixeira (1967), condizendo com os ensaios granulométricos (FIGURA 19) e com os tipos de solo da região (EMBRAPA, 1999).

Figura 19 - Diagrama triangular de Shepard com os percentuais de Areia, Silte e Argila.



Fonte: O autor.

#### 4.4 Caracterização subsuperficial

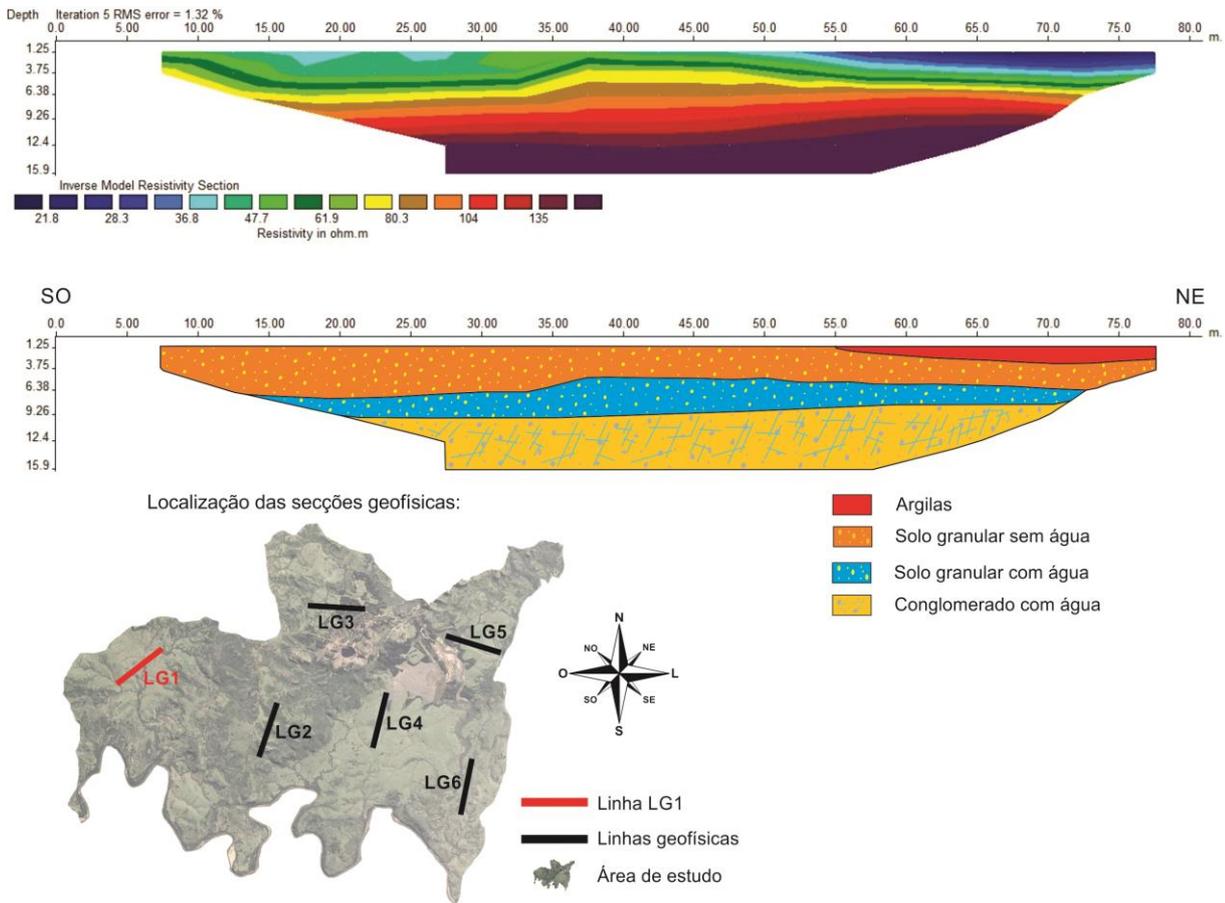
A área de estudo é constituída por rochas dos grupos Santa Bárbara e Guaritas que se manifestam no local por conglomerados imaturos e arenitos imaturos finos a médios muito endurecidos pelos cimentos calcínicos, silicosos e ferruginosos que proporcionam baixa porosidade residual às rochas. Conferindo - lhes características de aquífero fraturado (NASCIMENTO, 2015).

A análise dos modelos levou ao estabelecimento de relações entre zonas caracterizadas por intervalos de resistividade e a sua explicação geológica hipotética ao longo do perfil. Baseadas nas litologias da área e em descrições construtivas de poços próximos ao local de estudo.

Os modelos revelam valores de resistividade aparente variando de 8 Ohm.m a valores superiores a 3600 Ohm.m.

O Levantamento LG1 (FIGURA 20) foi realizado na porção oeste da área de estudo, situado sobre a Formação Rincão dos Mouras, onde se iniciou o caminhamento no sentido Sudoeste para Nordeste. Na superfície, verifica-se a ocorrência de resistividades baixas, que variam entre 18 a 100 Ohm.m. Estes valores podem estar relacionados com solo argiloso presente no horizonte Bt dos Planossolos e sedimentos não consolidados, parcialmente saturados por águas de infiltração superficial. Posteriormente, verifica-se uma camada mais resistiva composta por conglomerados, com valores de resistividade aparente superiores a 100 Ohm.m, esses valores podem indicar a presença de alguma permeabilidade, e portanto, circulação de água por possíveis fraturas. Observa-se que o perfil apresenta camadas bem definidas, em que o aumento da resistividade se dá gradativamente no decorrer da profundidade.

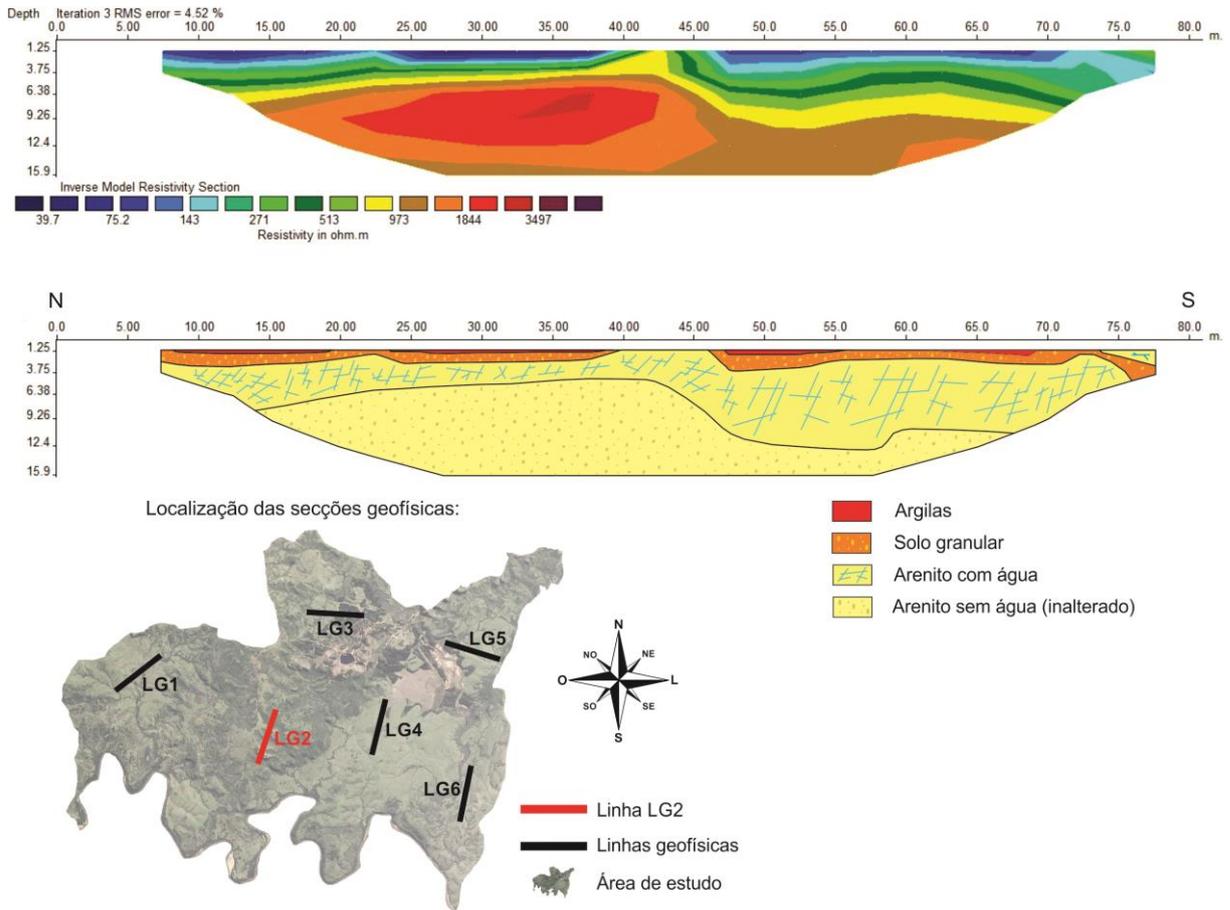
Figura 20 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG1 com sua interpretação geológica.



Fonte: O autor.

O Caminhamento elétrico LG2 (FIGURA 21) foi realizado na região central da área estudada, localizado sobre a Formação João Dias, local onde serão implantadas as novas atividades minerais, onde se iniciou o caminhamento no sentido Norte para Sul. Em superfície, indica materiais granulares e de textura média característicos dos Neossolos, apresentando resistividade aparente entre 22 - 140 Ohm.m. Em seguida, na profundidade de aproximadamente 2,5 m se observa uma camada com resistividade aparente entre 140 - 1000 Ohm.m. Apresentando característica de rocha arenítica saturada. Conforme Nascimento (2015) este local é considerado de natureza fraturada onde tem a capacidade de armazenar e conduzir água por seus interstícios. Também, se verifica afloramentos entre as distâncias de linha 40 a 47 m e 74 a 83 m. A uma profundidade de 5 m, é identificada uma camada mais resistiva (>1000 Ohm.m), provavelmente composta por arenito sem alteração.

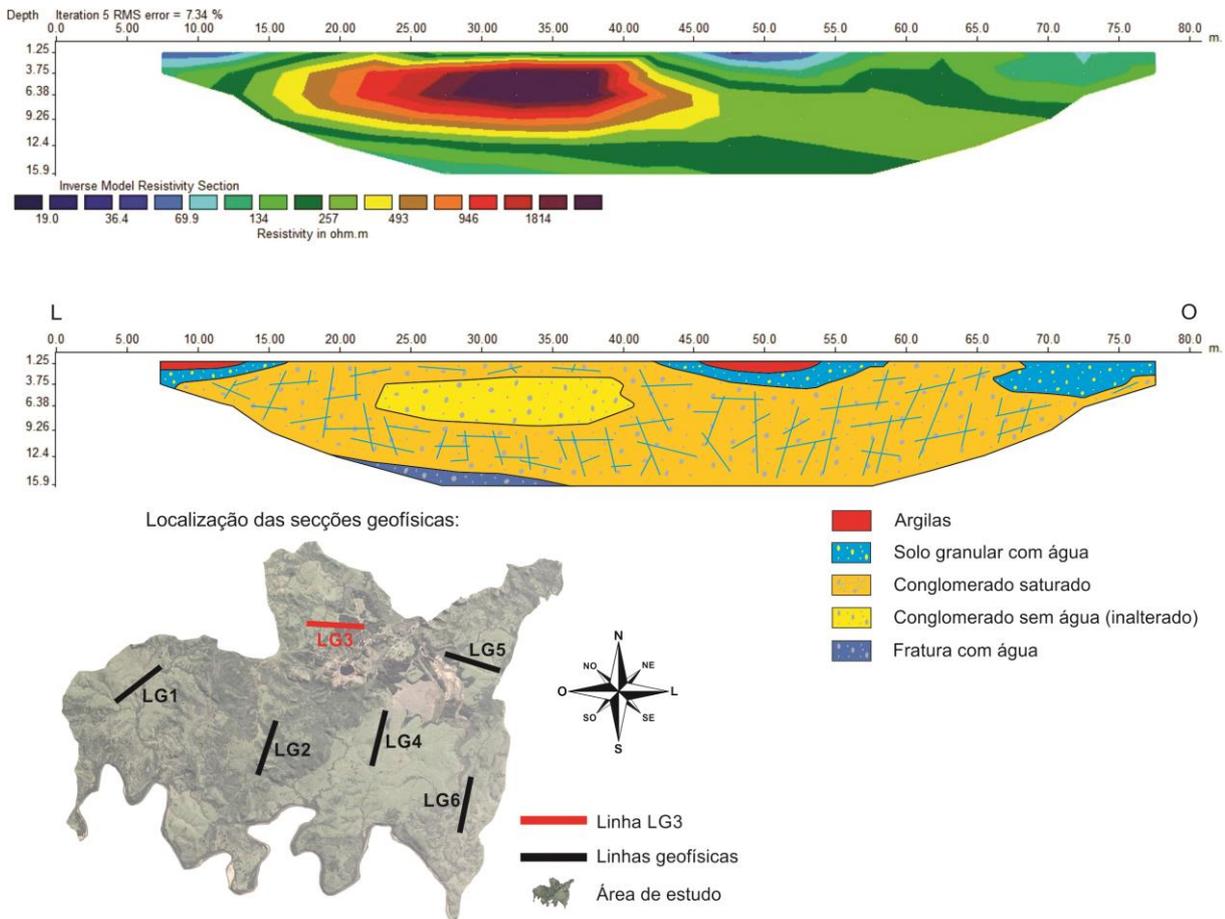
Figura 21 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG2 com sua interpretação geoeletrica.



Fonte: O autor.

O Perfil LG3 (FIGURA 22) foi executado próximo a área urbanizada do distrito de Minas do Camaquã a Norte do local em estudo, posicionado sobre a Formação Rincão dos Mouras, na orientação Leste para Oeste. O resultado é muito semelhante ao obtido no LG1. Apontando, para as camadas superiores, valores de resistividade entre 19 - 100 Ohm.m associados a solo argiloso e porções saturadas por infiltração de águas superficiais. Também, indicando que as rochas conglomeráticas da Formação Rincão dos Mouras possuem resistividade aparente superiores a 100 Ohm.m sendo interpretadas como rocha intemperizada ou como sendo zonas de fraturas, onde as maiores resistividades refletem rochas menos alteradas ou inalteradas. Na profundidade de 14 m, entre as distâncias de linha 20 e 35 m, ocorre uma zona menos resistiva (<100 Ohm.m) indicando a presença de uma fratura com saturação em água.

Figura 22 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG3 com sua interpretação geológica.

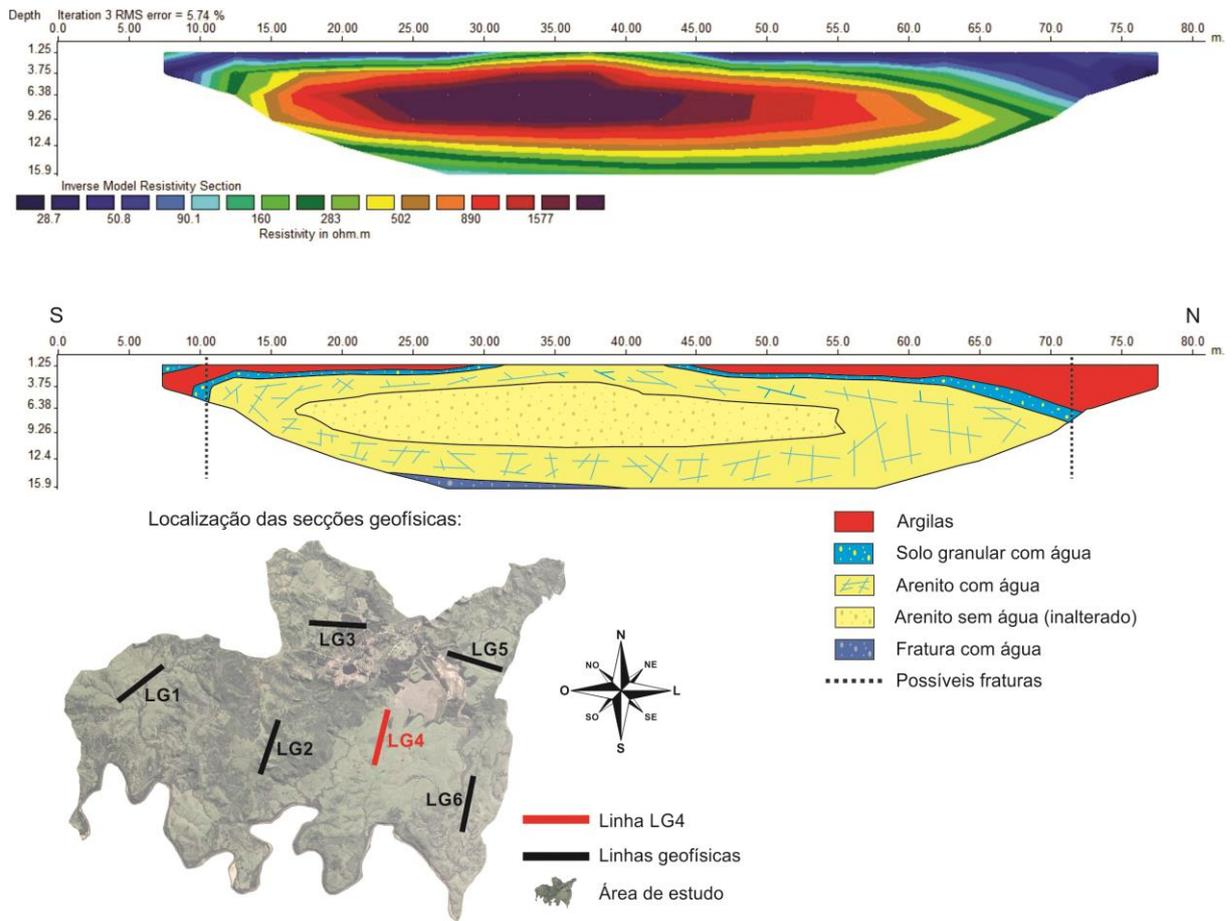


Fonte: O autor.

A secção LG4 (FIGURA 23) foi efetuada no sentido Sul para Norte, próxima à barragem de rejeitos da antiga mineração de Cobre na porção central do local de estudo, sobre as rochas da Formação João Dias. Nas camadas superficiais, profundidades até 2,5 m, os valores de resistividade observados no modelo (17 a 140 Ohm.m) estão relacionados com variações no teor de argila e oscilações no nível de saturação em água. Em seguida, se percebe locais com resistividade aparente >140 Ohm.m, apresentando característica de rocha arenítica da Formação João Dias, onde valores >1000 Ohm.m indicam rochas mais endurecidas e consequentemente menos permeáveis.

Entre as distâncias horizontais 10 a 12 m e 70 a 73 m se observa possíveis fraturas na rocha, onde indicam a presença de saturação em água. Também, se percebe uma zona menos resistiva (90 Ohm.m) a 14 m de profundidade, entre as posições 25 a 42 m, indicando um meio saturado em água.

Figura 23 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG4 com sua interpretação geológica.



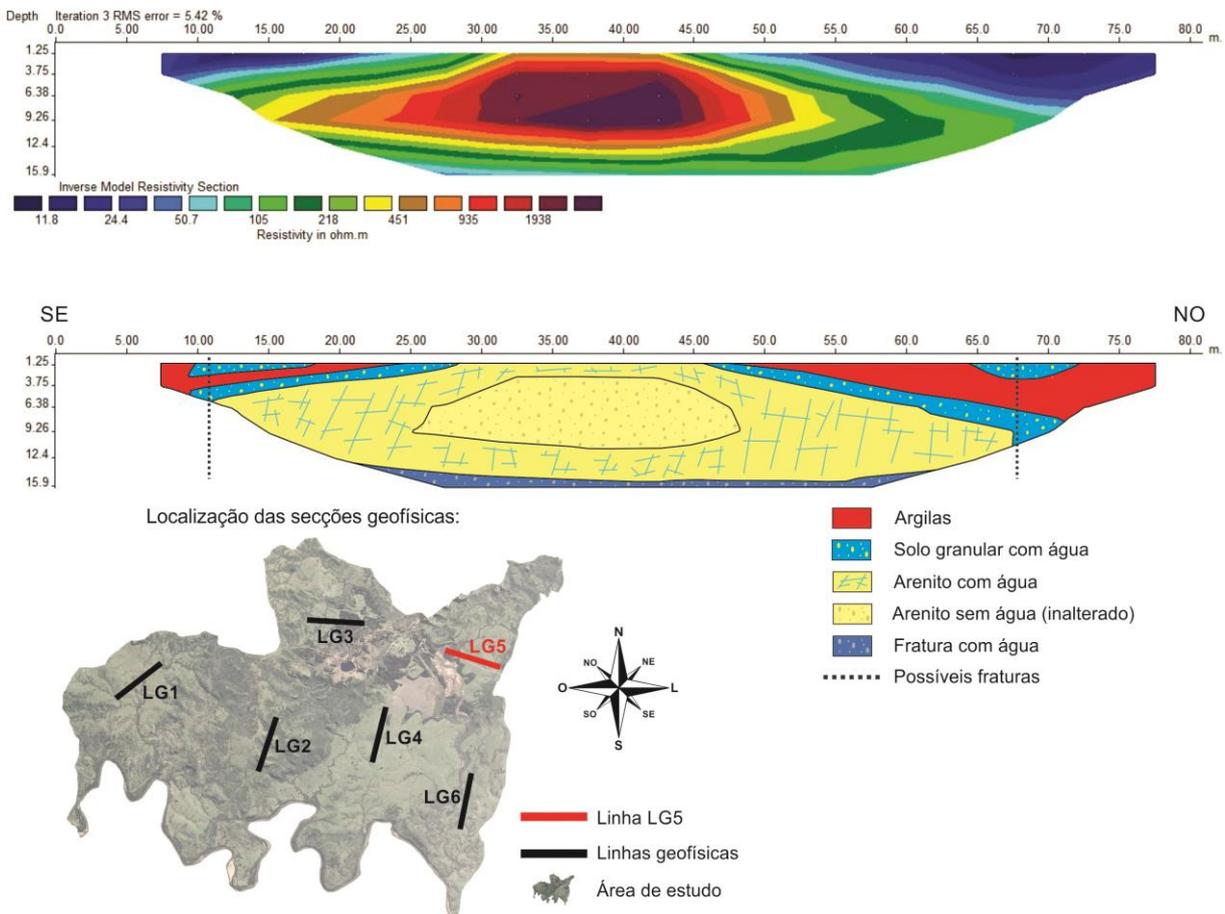
Fonte: O autor.

A linha de caminhamento elétrico LG5 (FIGURAS 24) foi realizada as margens do Arroio João Dias, na parte Leste da área, no sentido Sudeste para Noroeste, localizado na Formação Seival. O modelo apresentou muita semelhança com o LG4, apresentando uma zona mais resistiva na porção central do perfil, com resistividades chegando a 3600 Ohm.m, podendo ser arenitos finos cimentados característicos da Formação Seival. Igualmente a LG4, o modelo LG5 apresenta fraturas em suas extremidades, dispostas horizontalmente entre 10 e 12 m e 65 e 70 m. Também, verifica-se uma região com baixa resistividade (50 – 100 Ohm.m) a uma profundidade de 13 m, possivelmente rocha saturada alimentada por águas de infiltração superficial que permeiam dentre as fraturas.

Nas primeiras camadas verificam-se estratos superficiais correspondentes a solos de alteração das formações sedimentares, tendo caráter de solo granular e argiloso, possuindo resistividade aparente entre 8 - 60 Ohm.m, em que as menores resistividades podem indicar solos com teor elevado de matéria orgânica e bastante

saturados e as maiores, níveis mais elevados de argila, caracterizando um perfil típico dos Planossolos.

Figura 24 - Modelo 2D da secção de caminhamento elétrico LG5 com sua interpretação geológica.

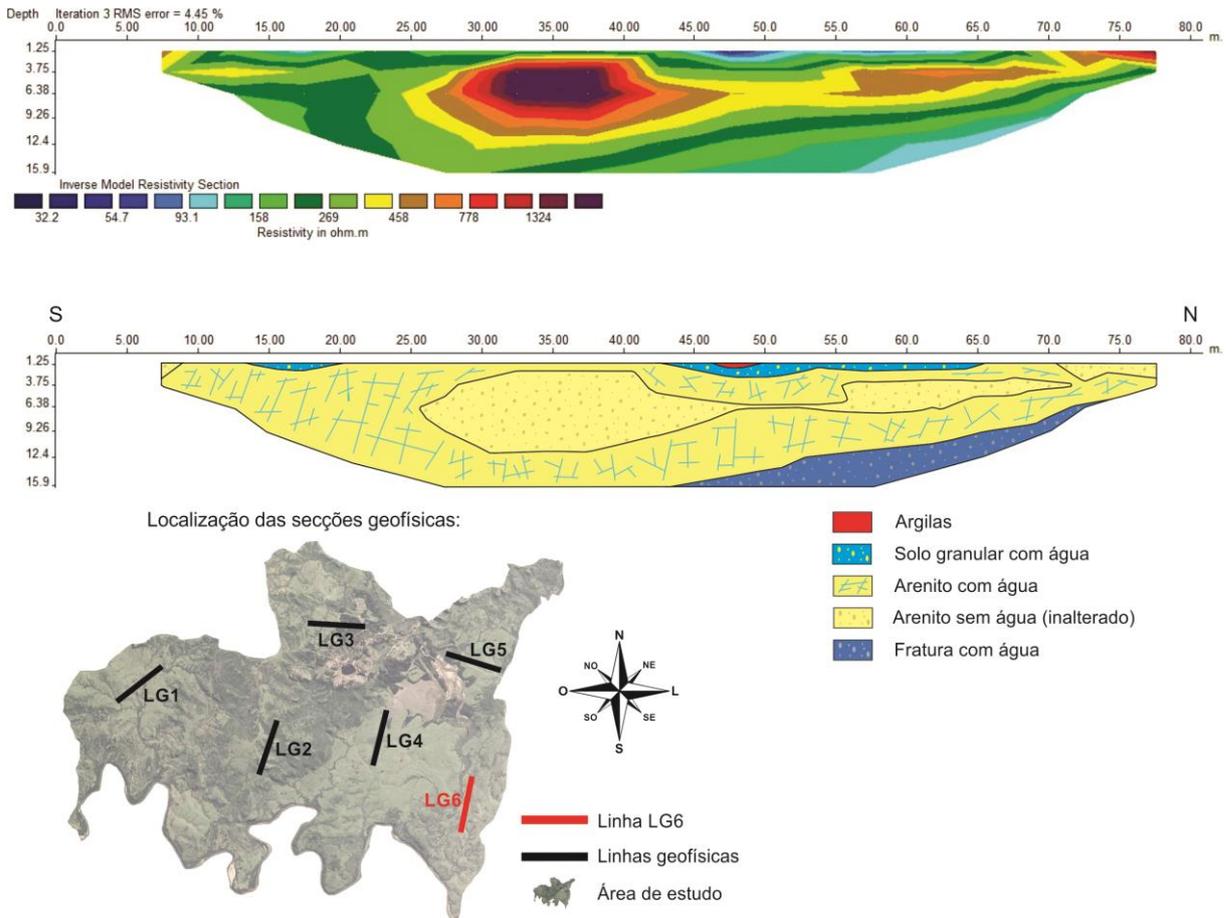


Fonte: O autor.

O levantamento LG6 (FIGURAS 25) foi realizado também as margens do Arroio João Dias, na porção Sudeste da área, na orientação Sul para Norte, localizado no Grupo Guaritas – Formação Varzinha. Nas camadas superficiais, apresenta resistividade aparente entre 21 - 160 Ohm.m, indicando solos argilosos e material não consolidado. Posteriormente, é visualizada uma zona mais resistente com valores acima de 160 Ohm.m, chegando até 400 Ohm.m, característico dos arenitos laminados presentes na Formação Varzinha, onde valores mais resistentes se referem a arenitos menos porosos, o que coincide com resultados de Almeida (2005) que encontrou valores de resistividade elétrica aparente entre 50 – 400 Ohm.m na mesma formação geológica. Resistividades superiores a 400 Ohm.m estão associados à rocha sã, por sua vez pouco permeável.

Na distância de linha 70 a 80 m ocorre afloramento rochoso em superfície e entre as distâncias 45 a 75 m, a uma profundidade de aproximadamente 6 m, percebe-se um local menos resistivo (90 - 100 Ohm.m) indicando saturação da rocha arenítica com água.

Figura 25 - Modelo 2D da secção de caminamento elétrico LG6 com sua interpretação geoeletrica.



Fonte: O autor.

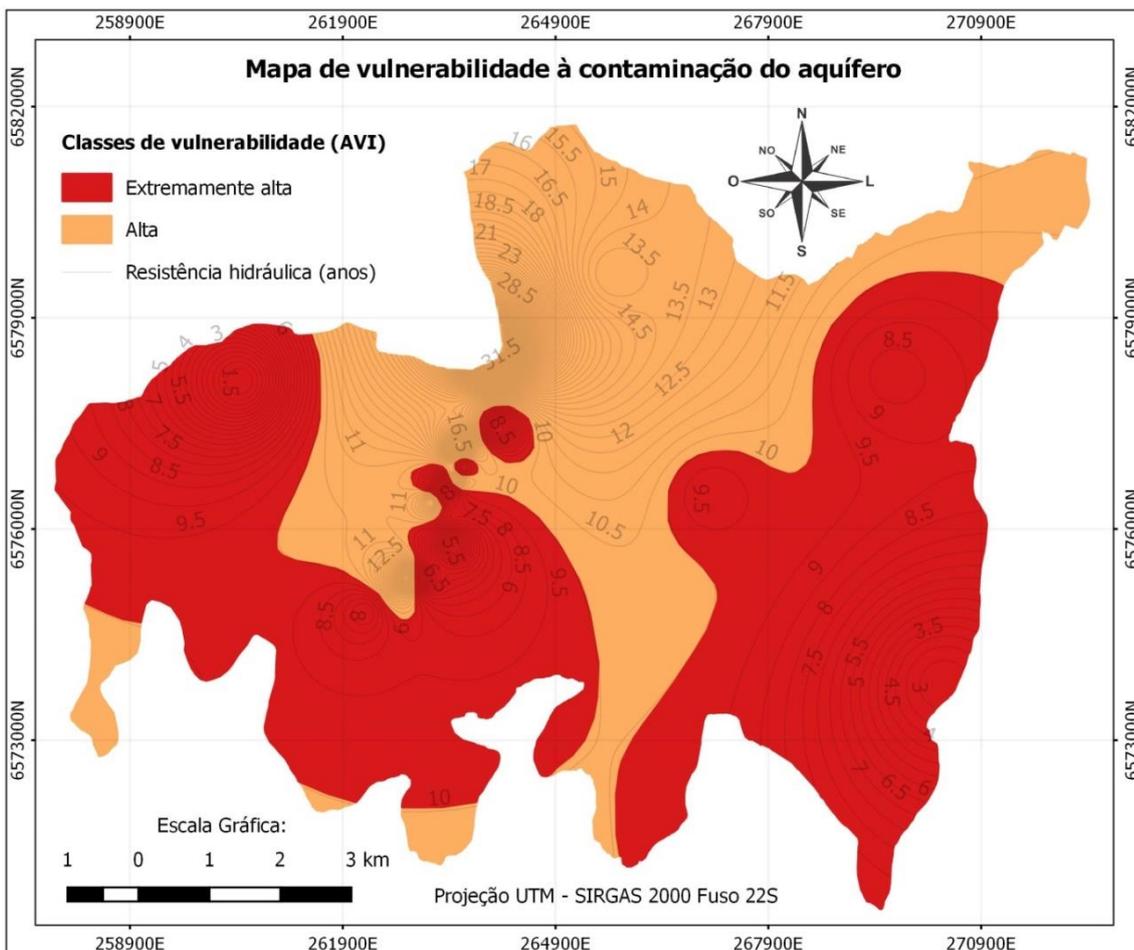
#### 4.5 Índice de vulnerabilidade à contaminação do aquífero

Conforme mencionado anteriormente, as características hidrogeológicas da área são de aquífero livre, onde a água subterrânea encontra-se em fraturas interconectadas (NASCIMENTO, 2015). Os estratos de cobertura são constituídos por rochas conglomeráticas e areníticas dos grupos Santa Bárbara e Guaritas, sobrepostos por uma fina camada de solo residual não consolidado. Estas camadas acima da zona saturada possuem pequena expressão e o nível da água se localiza,

em grande parte, próximo à superfície acompanhando o relevo (GERMANO; SOTÉRIO, 2011).

Os resultados de resistência hidráulica do método AVI apresentaram-se em duas classes de vulnerabilidade para a área de estudo. Assim, de acordo com a Tabela 16, obteve-se o mapa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero formado pelas classes alta e extremamente alta (FIGURA 26).

Figura 26 - Mapa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero (AVI).



Fonte: O autor.

A classe de vulnerabilidade extremamente alta representa 58,66 % (5242,90 ha) da área em estudo e domina as porções leste, oeste e centro sul. Abrangendo, em parte, o local previsto para a implantação das atividades minerais de exploração polimetálica (Zn, Pb e Cu), a barragem de rejeitos da mineração de cobre desativada e grande parcela de áreas planas e drenagens.

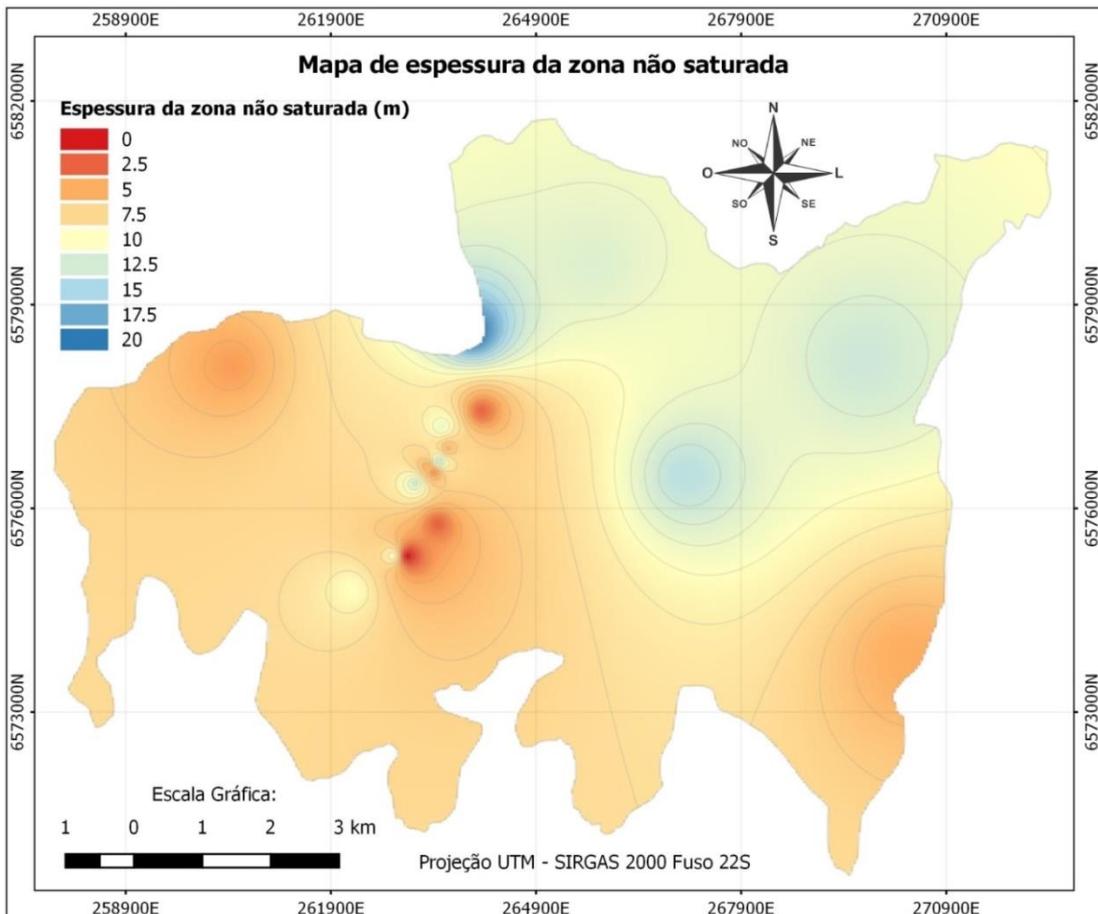
A condutividade hidráulica na classe de vulnerabilidade extremamente alta apresentou valores na ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  m/s para camadas superficiais,

predominando solos do tipo Neossolo. Já para as camadas mais profundas (rochas conglomeráticas e areníticas) os valores se encontraram na ordem de  $10^{-8}$  m/s. A resistência hidráulica variou de poucos dias a 10 anos e as espessuras das camadas não saturadas variaram de alguns centímetros até 14 m (FIGURA 27).

A classe de vulnerabilidade alta expressa 41,34% (3702,10 ha) da área total, abrangendo predominantemente a porção norte do local, com destaque para a antiga mina de cobre e a Vila das Minas do Camaquã, além de parte do local previsto para as novas atividades de mineração.

A condutividade hidráulica na classe de vulnerabilidade alta apresentou valores na ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  m/s para camadas superficiais, englobando todos os tipos de solos da área. Para as camadas mais profundas obtiveram-se valores variando de  $10^{-7}$  a  $10^{-8}$  m/s. A resistência hidráulica variou de 10 a 51 anos e as espessuras das camadas que recobrem o aquífero variaram de 9 a 21 m.

Figura 27 - Mapa de espessura da zona não saturada acima do aquífero.



Fonte: O autor.

Apesar dos materiais constituintes do subsolo apontarem baixas permeabilidades, o índice de vulnerabilidade à contaminação do aquífero se apresentou bastante elevado, demonstrando que as áreas mais vulneráveis estão, em grande parte, sobre locais com menores espessuras da camada não saturada. O que evidencia a importância que esta variável apresenta com relação à vulnerabilidade do aquífero na área estudada. Foster et al. (2006) cita que estão mais expostos aos contaminantes os aquíferos livres, onde a zona vadosa é pouco espessa. Cabe salientar que o aquífero da região é do tipo não confinado, podendo ocorrer, em determinados locais, altas permeabilidades devido a fraturas e descontinuidades das rochas.

Na Itália, Busico et al. (2017) aplicaram o AVI encontrando vulnerabilidade extremamente alta para toda a área estudada, os mesmos explicam que este resultado se deu devido a pequena espessura da zona vadosa e elevados valores de condutividade hidráulica atribuídos aos materiais constituinte do solo.

Ducci; Sellerino (2013) encontraram classes de vulnerabilidade variando de média a extremamente alta com o índice AVI, apresentando maior vulnerabilidade em relação aos métodos DRASTIC (ALLER et al., 1987) e SINTACS (CIVITA, 1994), testados no mesmo local.

Kazakis; Voudouris (2011) compararam os métodos AVI, GOD e DRASTIC verificando que o método GOD apresenta forte correlação com os outros dois.

Arruda Junior (2017) aplicou a metodologia GOD (FOSTER, 1987) para a caracterização da vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero no local previsto para a implantação da nova mina polimetálica, a qual integra a área de estudo do presente projeto. Os resultados apresentaram classes de vulnerabilidade variando de média a extremamente alta.

O método GOD é destinado para áreas com poucos dados e, por sua vez, considera pesos subjetivos para diferentes litologias (FOSTER; HIRATA, 1988). A diferença de resultados entre os métodos pode ser explicada pelo fato da metodologia AVI utilizar a condutividade hidráulica com uma das variáveis, podendo ser responsável pela elevação do grau de vulnerabilidade. Conforme Ducci; Sellerino (2013) os valores de permeabilidade para cada camada da zona vadosa são essenciais para o método AVI.

O *Aquifer Vulnerability Index* (AVI), que é um método qualitativo de índice de sobreposição, integrou etapas quantitativas, que de certa forma serviram para

validar o modelo. Deste modo, o método se mostra menos subjetivo, pois a resistência hidráulica é função de variáveis quantitativas, determinadas por ensaios e medições em campo. Porém, independentemente do método utilizado, o local de estudo mostra uma grande sensibilidade à contaminação das águas subterrâneas.

Tabela 16 - Resultados do método AVI.

Pontos	Longitude	Latitude	Cota do terreno (m)	Tipo de Solo	Litologia	Zona não saturada d (m)	Prof. do solo d <sub>1</sub> (m)	Prof. da rocha d <sub>2</sub> (m)	K <sub>1</sub> (m/s)	K <sub>2</sub> (m/s)	C (anos)
INA-01	264098	6577425	285	Neossolo	Conglomerado	2,64	1,5	1,14	8,81E-07	1,19E-08	3,09
INA-02*	263520	6577198	312	Neossolo	Arenito	10,95	1,5	9,45	8,81E-07	1,19E-08	25,20
INA-03	263611	6576881	308	Neossolo	Conglomerado	5,88	1,5	4,38	8,81E-07	1,96E-08	7,14
INA-04	263484	6576688	295	Neossolo	Conglomerado	12,8	1,5	11,3	8,81E-07	1,96E-08	18,30
INA-05*	263307	6576624	280	Neossolo	Conglomerado	5,38	1,5	3,88	8,81E-07	4,31E-07	0,34
INA-06*	263409	6576531	284	Neossolo	Conglomerado	4,06	1,5	2,56	8,81E-07	1,96E-08	4,20
INA-07*	263134	6576371	250	Neossolo	Conglomerado	12,25	1,5	10,75	8,81E-07	2,19E-08	15,60
INA-09*	263017	6575300	264	Neossolo	Arenito	0,183	0,183	-	8,81E-07	1,05E-07	0,01
INA-10*	262806	6575304	263	Neossolo	Arenito	9,6	1,5	8,1	8,81E-07	1,12E-08	23,00
INA-11*	262204	6574813	173	Neossolo	Arenito	10	1,5	8,5	8,81E-07	3,86E-08	7,04
INA-13	263965	6578597	306	Neossolo	Arenito	20,59	1,5	19,09	8,81E-07	1,19E-08	50,9
P-1**	260447	6578094	144	Planossolo	Conglomerado	4,5	4,5	-	3,68E-06	1,96E-08	0,04
P-2**	263455	6575774	295	Neossolo	Arenito	2,5	1,5	1	8,81E-07	3,86E-08	0,88
P-3**	265742	6579614	162	Planossolo	Conglomerado	12	4	8	2,08E-06	1,96E-08	13,00
P-4**	267104	6576484	146	Planossolo	Arenito	14	3	11	1,85E-06	3,86E-08	9,09
P-5**	269688	6578180	139	Planossolo	Arenito	13	3	10	1,26E-06	3,86E-08	8,29
P-6**	270374	6573795	190	Argissolo	Arenito	5	2,5	2,5	8,81E-07	3,86E-08	2,14

INA – Poços de monitoramento de nível da água (ARRUDA JUNIOR, 2017);

\* Poços onde foram realizados os ensaios de *Slug Test* (NASCIMENTO, 2015);

\*\* Pontos de ensaios de condutividade hidráulica com Guelph e perfis geofísicos.

Fonte: O autor

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de estudo vem sofrendo, há muitas décadas, as consequências da exploração mineral e da falta de planejamento. Apresentando-se como local, predominantemente composto por classe de fragilidade ambiental média, em função de características naturais do ambiente como declividade do terreno, características dos solos, vegetação e pluviosidade, além de intervenções antrópicas.

A região prevista para as novas atividades de mineração estão situadas, predominantemente, em locais de fragilidade ambiental média. Esta área é recoberta por gramíneas e matas, na fase de instalação do empreendimento a vegetação e camadas superficiais do solo terão que ser removidas, para serem feitas as obras de infraestrutura como, estradas, áreas industriais, refeitórios, etc. Estas intervenções irão fragilizar ainda mais o local, no entanto, para minimizar os impactos, será necessária a implantação de medidas de controle e monitoramentos, visando assegurar a estabilidade do ambiente.

A exploração mineral de cobre trouxe significativas alterações no quadro natural desta sub-bacia, indicando que as áreas utilizadas para as atividades, sejam locais de extração de minério ou de beneficiamento, foram extremamente impactadas, refletindo-se como áreas de fragilidade ambiental forte e muito forte.

A partir dos resultados obtidos, considera-se que a metodologia empregada apresentou-se satisfatória, pois foi possível avaliar os graus de fragilidade ambiental da área e, desta forma, contribuir para uma ocupação racional do espaço, respeitando as limitações impostas pelo ambiente.

A análise física indicou que os sedimentos são constituídos, principalmente, por partículas maiores que 63 µm, caracterizadas como areias (ABNT NBR 6502 de 1995). Nas análises químicas, os óxidos identificados refletiram a litologia da região, Formação Guaritas e Santa Bárbara. Para o zinco, cobre e óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ) as maiores concentrações foram verificadas às margens do Arroio João Dias, no ponto próximo a barragem de rejeitos da CBC e a jusante desta, indicando possível impacto proveniente da antiga mineração de cobre. O cádmio apresentou concentrações extremamente altas em todos os pontos estudados. Dentre os elementos avaliados e comparados com a Resolução CONAMA nº 454 de 01 de novembro de 2012 somente o Cádmio ultrapassou o limite Nível 2 (limiar acima do qual prevê-se um provável efeito adverso à biota). Visto as elevadas concentrações

deste metal, recomenda-se uma nova avaliação, utilizando métodos de análise com maior precisão e sensibilidade para este elemento.

Desta forma, com a instalação das novas atividades minerais na região, deve-se atentar para medidas de controle e monitoramentos objetivando evitar carreamento de sedimentos para os cursos d'gua.

Os resultados dos ensaios com o permeâmetro de Guelph se mostraram confiáveis e de fácil e rápida aplicação, mostrando valores de condutividade hidráulica compatíveis com a litologia da área e com os ensaios de textura, que se apresentaram como areias, areias siltsosas e areia silte argilosa. Os valores de condutividade hidráulica do solo mostraram-se entre  $1,262 \cdot 10^{-4}$  e  $8,811 \cdot 10^{-5}$  cm/s. Estes resultados podem auxiliar na tomada de decisões quanto a proteção dos aquíferos e solos, além de servir como base para projetos de compactação e impermeabilização do solo e dimensionamento de sistemas de tratamento de efluentes.

Os levantamentos geoeletricos foram bastante relevantes para o desenvolvimento da pesquisa, uma vez que possibilitou uma maior compreensão sobre a hidrogeologia e forneceu informações sobre as zonas saturadas e não saturadas dos pontos estudados. Os modelos geofísicos revelam valores de resistividade aparente variando de 8 Ohm.m a valores superiores a 3600 Ohm.m. A zona saturada apresentou resistividades, em geral, inferiores a 800 Ohm.m para os arenitos e inferiores 600 Ohm.m para os conglomerados.

As características de subsolo, como tipo de solo, rochas, a determinação do nível estático e a profundidade ao topo do embasamento são de grande importância para a continuidade do monitoramento, como parte de um programa para preservação e melhor uso da área. Esta técnica é uma forma otimizada de efetuar o monitoramento e proteger a qualidade dos recursos hídricos, em áreas de elevados riscos de poluição subterrânea. Além, dos resultados auxiliarem no planejamento e dimensionamento de outros meios de investigação, como a instalação de piezômetros.

Os resultados indicaram duas classes de vulnerabilidade à contaminação do aquífero, a classe de vulnerabilidade extremamente alta representando 58,66% e a classe de vulnerabilidade alta expressando 41,34 % do total da área estudada. O método de vulnerabilidade adotado apresentou-se adequado para a região, uma vez que esta possuía dados de nível da água e dados de permeabilidade das camadas

mais profundas. Os produtos cartográficos produzidos expressam o cenário da situação ambiental da região, com ênfase nos recursos hídricos subterrâneos, fornecendo subsídios para a elaboração de medidas de controle e políticas para a preservação, proteção e uso racional das águas subterrâneas.

O método AVI (VAN STEMPVOORT et al., 1993) ao levar em consideração variáveis mensuráveis tornou-se mais preciso, frente a demais metodologias que levam em sua apreciação medidas indiretas e subjetivas. Por sua vez, indicando que o local apresenta uma grande sensibilidade à contaminação das águas subterrâneas. Diante deste resultado, recomenda-se a implantação de técnicas de monitoramento que minimizem o potencial de contaminação do aquífero.

Em linhas gerais, o estudo contribuiu para a identificação da realidade ambiental da região historicamente impactada pela mineração, onde essas informações poderão servir de base para questões de planejamento ambiental e territorial, visando à conservação dos recursos naturais em consonância com o tipo de atividade econômica da área.



## 6 REFERÊNCIAS

ARRUDA JUNIOR, Ladislau Aparecido da Costa. **Análise de parâmetros físico-químicos e ambientais na caracterização das águas superficiais e subterrâneas na região das Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul.** 2017. 152 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2017.

ALLER, L. T. et al. **DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic settings,** Environmental Protection Agency Report, NWWA/EPA Series EPA-600/2-87-035 1987.

ALMEIDA, R. P. **Tectônica e Sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: Exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai Oriental).** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar. Universidade de São Paulo, 2005.

ARMSTRONG, Margaret; PETTER, Renato; PETTER, Carlos. Why have so many tailings dams failed in recent years?. *Resources Policy*, v. 63, p. 101412, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR. 6502: Rochas e solos Terminologia.** ABNT, 1995.

BARBOSA, G. M. C; TAVARES FILHO, J; FONSECA, I. C. B. Condutividade hidráulica saturada e não saturada de Latossolo Vermelho eutrófico tratado com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 2, p. 403-407, 2004.

BACCI, Denise de La Corte; LANDIM, Paulo Milton Barbosa; ESTON, Sérgio Médici. **Aspectos e impactos ambientais de pedreira em área urbana.** *Rev. Esc. Mina. Ouro Preto*, v. 59, n. 1, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 26 fev. de 2013.

BELLUTA, Ivalde, Luciana et al. **Impactos provocados por metais potencialmente tóxicos dissolvidos em água e em sedimentos no Córrego do Cintra – Botucatu-SP.** *Salusvita*, 27(2): 239-258, 2008.

BERTONI, J; LOMBARDE NETO, F. **Conservação do Solo.** Editora Ícone, São Paulo, 1999.

BESSER, John M; BRUMBAUGH, William G; INGERSOLL, Christopher G. **Caracterização da toxicidade de sedimentos contaminados com metais provenientes de áreas de mineração**. Geoquímica Aplicada , v. 57, p. 73-84, 2015.  
BETIM, Luiza Silva et al. **Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do Córrego Palmital**, Viçosa, MG. 2013.

BETTENCOURT, J. S. 1992. **A mina de cobre do Camaquã, RS**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

BISQUERT, David Sánchez; CASTEJÓN, José Matías Peñas; FERNÁNDEZ, Gregorio García. **The impact of atmospheric dust deposition and trace elements levels on the villages surrounding the former mining areas in a semi-arid environment (SE Spain)**. Atmospheric Environment, v. 152, p. 256-269, 2017

BOTELHO, Rosangela Garrido Machado; SILVA, AS da. **Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 153-192, 2004.

BORTOLIN, José Ricardo Melges. **Métodos geoeletricos empregados na caracterização e monitoramento de anomalias inerentes à infiltração controlada de vinhaça**. 2014.

BRAGA, A. C. O. **Módulo: Métodos geoeletricos aplicados nos estudos de captação e contaminação das águas subterrâneas**. UNESP/ IGCE/DGA, Rio Claro.v. 1, p 12-74, 2007.

BRANDÃO, V. S; PRUSKI, F. P; SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa, Minas Gerais, Ed. UFV, 2009. 120 p.

BRANDELERO, Suzi Mari et al. **Monitoramento de água e sedimento no Rio Palmeiras, Bacia Hidrográfica do Tubarão (SC), Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, p. 1-10, 2016.

BRUCH, Alexandre Felipe. **A mineração e a paisagem geoquímica na sub-bacia hidrográfica do Arroio João Dias, Minas do Camaquã, Caçapava do Sul, RS**. 2014.

BURROUGH, P.; McDONNELL, R. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998.

BUSICO, Gianluigi et al. **A modified SINTACS method for groundwater vulnerability and pollution risk assessment in highly anthropized regions based on NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentrations.** Science of the total environment, v. 609, p. 1512-1523, 2017.

CAPUCCI, Egmont, et al. **Poços tubulares e outras captações de água subterrânea: orientação aos usuários.** Rio de Janeiro: SEMADS, 2001.

CARTER, M. R. **Soil sampling and methods of analysis.** Canadian Society Soil Science, 1993. p. 823.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo.** Piracicaba, 2002. 86p. Dissertação (Mestrado em agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2002.

CASTRO, D.L. **Caracterização geofísica e hidrogeológica do cemitério Bom Jardim, Fortaleza - CE.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 26, p. 251-271, 2008.

CAVALCANTI, Susana S.; SATO, Hédison Kiuity; LIMA, Olivar Antônio Lima de. **Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia.** 2001.

CELLIGOI, André et al. **Utilização do Permeômetro Guelph na determinação da Condutividade Hidráulica da Zona não Saturada do Aquífero Freático nas Imedições do Lixão de Londrina-PR.** Águas Subterrâneas, 2006.

CIVITA, M. **Vulnerability Maps of Aquifers Subjected to Pollution: Theory and Practice** Pitagora Editrice, Bologna, 1994.

CIVITA, M. De Regibus. **Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione vulnerabilità degli acquifer (In Italian) Quaderni Digelologia Applicate**, vol. 3, Pitagora Ed, Bologn, pp. 63-67, 1995.

CHEN, M. S. et al. **Mechanisms driving phosphorus release during algal blooms based on hourly changes in iron and phosphorus concentrations in sediments Water.** pp. 153-164, 2018.

CPRM. Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul. 2005. Projeto Mapa

Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, Convênio **SOPS-SEMA-DRH/RS-CPRM** N029/98.

COMOTÊ CAMAQUÃ. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã. **Caracterização Geral**. Instalado em 13 de Abril de 2000. Disponível em: < <http://www.comitecamaqua.com/> > Acesso em: 29 de Março de 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - **CONAMA nº 454** de 01 de Novembro de 2012. Disponível em: < <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=693> > Acesso em: 25 de Fevereiro de 2019.

CREPANI, Edison et al. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: Inpe, 2001.

DANCEY, C. P.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia**. 5ª ed. Porto Alegre: Penso, 2013. 608p.

DAS, B. M. **Advanced soil mechanics**. 3 ed. London and New York: Taylor & Francis, 2008. 567p.

DELLEUR, J. W. **The Handbook of Groundwater Engineering**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. 969 p.

DENALLE, Heloisa Pasetto. **Geoquímica do alogrupo Guaritas** (Ordoviciano da Bacia do Camaquã, RS). 2013.

DOERFLIGER, N. F. Zwahlen. **EPIK**: a new method for outlining of protection areas in karstic environment G. Gü-nay, Al. Jonshon (Eds.), International Symposium and Field Seminar on "Karst Waters and Environmental Impacts". Antalya, Turkey. Balkema, Rotterdam, pp. 117-123, 1997.

DRUMOND, Renata Costalonga; GADIOLI, Mônica Castoldi Borlini; CAMARGO, Jefferson Luiz. **Avaliação da concentração de material particulado próximo aos processos de extração e beneficiamento de calcário**. 2017.

DUCCI, D; Sellerino M. **Vulnerability mapping of groundwater contamination based on 3D lithostratigraphical models of porous aquifers** *Sci. Total Environ.*, 447, pp. 315-322. 2013.

EASTMAN, J., R. **Idrisi for windows version 2.0** – user's guide. Worcester: Clark University Graduate School of Geography, January, 1995.

EDELSTEIN, M. M. **Ben-Hur Heavy metals and metalloids**: sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops Sci. Hortic-Amsterdam., 234, pp. 431-444, 2018.

ELTZ, F. L. F., PEIXOTO, R. T. G., JASTER, F. **Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruna Álico**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.13, p.249-167, 1989.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. **Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses**. Groundwater Monitoring & Remediation, v. 9, n. 3, p. 184-193, 1989.

ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL E RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL – PROJETO CAÇAPAVA DO SUL. Lavra de minério metálico a céu aberto com recuperação de área degradada: **Contextualização do empreendimento**. Caçapava do Sul, RS. V1, 2016. Mineração Santa Maria Ltda.

FAMBRINI, G. L. et al. **O Grupo Santa Bárbara (Neoproterozóico III) na sub-bacia Camaquã Central, RS**: sistemas deposicionais, paleogeografia e implicações tectônicas. Revista Brasileira de Geociências, v. 35, p. 227-238, 2005.

FAMBRINI, G. L. **O grupo Santa Bárbara (neoproterozóico III) da bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2003.

FERNANDES, F. R. C. et al. **Recursos minerais e comunidade**: impactos humanos, socioambientais e econômicos, 2014.

FERNANDES, Geraldo Wilson et al. **Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil**. Natureza & Conservação, v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016.

FITZ, P. R., **Geografia tecnológica**. Geoprocessamento sem complicação, Ed. Oficina de Textos. São Paulo, p. 19-29, 2008.

FITZ, P. R., **Cartografia Básica**. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

FOSTER S.D.D. **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants** W. Van Duijvenbooden, H.D. Waegeningh (Eds.), **Proceedings of TNO Committee on Hydrogeological Research**, pp. 69-86, 1987.

FOSTER, S. S. D.; Hirata, R. C. A. 1988. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data**. Lima: WHO/PAHO/HPE/CEPIS. 1988.

FOSTER, S. R. Hirata, B. Andreo. **The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection** *Hydrogeol. J.*, 21 (7), pp. 1389-1392, 2013.

FRAGOSO-CESAR, A. R. S. et al. **The Camaquã extensional basin: Neoproterozoic to early Cambrian sequences in southernmost Brazil**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 3, p. 442-445, 2017.

FREITAS, Carlos Machado de et al. **Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva**. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 35, p. e00052519, 2019.

FUSHITA, A. T. et al. **Desempenho da classificação supervisionada em diferentes programas: comparação por meio do uso da terra e do índice de naturalidade da paisagem**. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. 2013, Foz do Iguaçu, PR. Anais... São José dos Campos: INPE, p. 6465, 2013.

GOERING, C. E. **Reciclar um conceito**. *Engenharia Agrícola*, v. 74, n. 6, p. 25-25, 1993.

GERMANO, A.O., Sotério, P.W. 2011. **Disponibilidade hídrica das bacias da lagoa Mirim e rio Camaquã com base na regionalização da vazão a 95% de permanência**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011.

GHEZZI, Alessandra Oliveira. **Avaliação e mapeamento da fragilidade ambiental da Bacia do Rio Xaxim, Baía de Antonina-PR**, com o auxílio de geoprocessamento. 2003.

GUERRA, A. T. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos Temas e Aplicações**. 1ª ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. 2007. 215f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2007.

HANSEN, M. A. F. & FENSTERSEIFER, H. C., 2000, **Caracterização edafopedológica da sub-bacia do arroio João Dias como ferramenta de planejamento ambiental, Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã, RS, Brasil**. In: L. H. Ronchi & A. O. C. Lobato. Minas do Camaquã, um estudo multidisciplinar. UNISINOS, pp. 211-240.

HETE, Y.V.S.B. Gholse, R.U. **Khops Adsorption of cobalt on granular activated carbon by complexation with surface functional group** Chem. Sin., 3 (2012), pp. 787-793, 2012.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. Academic Press, Orlando, 1980, 385p.

HIRATA, R.; FERNANDES, A. J. **Vulnerabilidade à contaminação de aquíferos**. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C. DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM/LABHIDRO, 2008. 812p.

IBGE. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em Diretório: mapas/tematicos/mapas\_murais/vegetacao.pdf Acesso em: 14 Fev. 2018.

IBRAM. 2013. "Instituto Brasileiro de Mineração". Disponível em: < <http://www.ibram.org.br/> >. Acesso em: 26 fev. de 2018.

JOST, H. & HARTMANN, L. A. **Província Mantiqueira – Sector Meridional**. In: Almeida, F.F.M. & Hasui, Y. (Ed.). O Pré-Cambriano do Brasil. São Paulo, Edgard Blücher, p. 345-368, 1984.

KAZAKIS, N., VOUDOURIS, K. **Comparison of three applied methods of groundwater vulnerability mapping: A case study from the Florina basin, Northern Greece**. In: Nicolaos Lambrakis, N., Stournaras, G., Katsanou, K. (Eds.). Advances in the Research of Aquatic Environment, pp. 359–367, 2011.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. 3 ed., Victoria, Australia, 2002. p. 262.

KLEIN, V. A. **Infiltração da água no solo**. Física do solo. 2. ed. Passo Fundo: Ed da UPF, 2012. p. 200-201.

KOPEZINSKI, I. **Mineração x Meio Ambiente**: Considerações legais, principais impactos e seus processos modificadores. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

KÖPPEN, William. 1931. Climatologia. México, **Fundo de Cultura Econômica**.

KUSIN, F.M. N.N.M. Azani, S.N.M.S. Hasan, N.A. **Sulong Distribution of heavy metals and metalloid in surface sediments of heavily-mined area for bauxite ore in Pengerang, Malaysia and associated risk assessment** *Catena*, 165, pp. 454-464, 2018.

LANA, De Oliveira, Zilda Maria. **A Atividade Mineradora em Minas Gerais e em Ouro Preto**: Impactos Socioambientais e Intervenções para a Sustentabilidade. 2015.

LISBOA, N.A.; Dani, N.; Remus, M.V.D.; Castro, J. 2004. **Síntese da Ocorrência Geológica das Águas Subterrâneas do Rio Grande do Sul**. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2004. Cuiabá. Anais do XIII ABAS (2004).

LAGO, Alexandre Lisboa; ELIS, Vagner Roberto; GIACHETI, Heraldo Luiz. **Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, n. 3, p. 357-374, 2006.

LIMA, Olivar A. L. de. **Propriedades Físicas das Rochas. Bases da Geofísica Aplicada – Rio de Janeiro**: Sociedade Brasileira de Geofísica. v. 1, p.120 e 121, 2014.

LINDENBERG, Marcelo Tatsch. **Caracterização das zonas de alteração hidrotermal e do minério de Cu-Pb-Zn na área 3 (Jazida Santa Maria) e Mina Uruguai**, Minas do Camaquã/RS. 2014.

MACEDO, Ana Macedo de. **Baby Pignatari**: o centauro de bronze. Porto Alegre, ed. Metrópole, 2006.

MACHADO J. L. F. and Freitas M. a 2005. **Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul**. 71. 2005.

MACHIWAL, Deepesh et al. **Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges**. Earth-Science Reviews, 2018.

MANOEL FILHO, João. **Ocorrência das águas subterrâneas**. In: FEITOSA, Fernando A. C., et al (Org.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p.53-75.

MESQUITA, Maria da Glória Bastos de et al. **More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity**. Scientia Agrícola, v. 59, n. 4, p. 789-793, 2002.

MECHI, Andréa; SANCHES, Djalma Luiz. **Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo**. Estudos avançados, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.

MOREIRA, I. V. D. **A experiência brasileira em avaliação de impacto ambiental. Avaliação de impacto ambiental: situação atual e perspectivas**. São Paulo: Epusp, p. 39-48, 1993.

MEHLER, W. Tyler et al. **Evaluating freshwater mining sediment toxicity in Tasmania: Achieving strong multiple lines of evidence**. Science of The Total Environment, v. 651, p. 1243-1252, 2019.

MEIRELLES, Margareth Simões Penello. **Análise integrada do ambiente através de geoprocessamento: uma proposta metodológica para elaboração de zoneamentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

MILNES, E. **Process-based groundwater salinisation risk assessment methodology: application to the Akrotiri aquifer (Southern Cyprus)** J. Hydrol., 399 (1), pp. 29-47, 2011.

MIRANDA, J.; I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

NADIA, G. A.M. et al. **Tynybekov Thermodynamics of cobalt exchange in soil using kinetic approach** World Appl. Sci. J., 25, pp. 637-643, 2013.

NAGORSKI SA, Moore JN, McKinnon TE, Smith DB. 2003. **Scale-dependent temporal variations in stream water geochemistry**. Environ Sci Technol 37: 859–864, 2003.

NAKASHIMA, M.S.R. 2001. **Carta de fragilidade ambiental da bacia do rio Keller, Estado do Paraná**: subsídio ao estudo dos processos erosivos. Acta Scientiarum, 23, (6): 1547-1560.

NASCIMENTO, G. C. S. **Modelo conceitual e numérico do aquífero hospedeiro de depósito polimetálico-Caçapava do Sul**: relações entre lavra e recursos hídricos subterrâneos. 2015.

NAVES, B. T. O; FERNANDES, F. R. **Mineração e saúde socioambiental: o desafio ético contemporâneo entre o risco e a sustentabilidade**. Revista Direito Ambiental e sociedade, v. 5,n. 1, p. 106-128, 2015.

NAVLUR, K.C.S. Engel, B. **Predicting spatial distribution of vulnerability of Indiana state aquifer system to nitrate leaching using GIS**. 1997.

NETO, Melo et al. **Diagnóstico ambiental sobre o material particulado em suspensão no entorno de pedreira**: um estudo de caso em Jaboatão dos Guararapes/PE. 2012.

NESHAT, A. Pradhan, B. Dadras, M. **Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS Resour. Conserv. Recycl.**, 86, pp. 74-86, 2014.

NOGUEIRA, Jader Escobar et al. **Mineiros e engenheiros**: memória, identidade e trabalho nas Minas do Camaquã entre 1970 e 1996. 2012.

NOVO, E. M. L. M., **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 1998.

OLIVEIRA A. I. de. **Histórico da mineração de cobre no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 1944.

OLIVA, A. **Estudo hidrofaciológico do aquífero Rio Claro no município de Rio Claro – SP**. 196 f. (Dissertação de Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas /Unesp- Rio Claro, 196f. 2006.

ORELLANA, Ernesto. **Prospección geoelectrica en corriente continua**. 1972.

OLIVEIRA, J.; C. et al. **Modelagem de Dados Geográficos**: Aplicação na Gestão de Áreas de Preservação Permanente. Revista Geográfica Acadêmica, v. 7, n. 2, p. 22-30, 2013.

OLIVEIRA, J.B. **Pedologia Aplicada**. 3. ed. Piracicaba-SP: FEALQ, 2008. 592 p.

PADILHA, D., G. et al. **Geoprocessamento aplicado na caracterização da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Arroio Grande, RS**. 2008.

PAIM P. S. G. Chemale Jr F. and Lopes R. da C. 2000. **A Bacia do Camaquã**. Geologia do Rio Grande do Sul, 231–274. 2000.

PAIVA, C. T. **Proposta de metodologia para análise de passivos ambientais da atividade minerária**. Ministério de Minas e Energia - MME. 2006.

PAOLIELLO, Monica MB; CHASIN, Alice AM. **Ecotoxicologia do chumbo e seus compostos**. 2001.

PARRON, L. M. et al. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Embrapa Florestas-Livro científico. 2015.

PAYTAN, A. K. Roberts, S. Watson, S. Peek, P.C. Chuang, D. Defforey, C. Kendall **Internal loading of phosphate in lake erie central basin Sci**. Total Environ., 579, pp. 1356-1365. 2017.

PEREIRA, Luís Flávio; et., al. **Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil**: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. Journal of Environmental Analysis and Progress, v. 4, n. 2, p. 122-129, 2019.

PRUSKI, F. F. et al. **Infiltração de água no solo**, 1997. 26p. (Caderno Didático, 25).

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. 2 ed. São Paulo: Escrituras, 2002. 704 p.

RIBEIRO, José Cláudio Junqueira. **A participação no fechamento de mina no Direito Comparado**. Veredas do Direito, Belo Horizonte, v. 10, n. 20, p. 23-54, jul./dez. 2013.

RIBEIRO, L. IS: **um novo índice de suscetibilidade de 716 aquíferos a contaminação agrícola SI: um novo índice de suscetibilidade de aquíferos à poluição agrícola**. Relatório interno, ER-SHA / CVRM, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 12 pp. 2000.

RODRIGUES, G. L. **Poeira e ruído na produção de brita a partir de basalto e gmaisse nas regiões de Londrina e Curitiba, Paraná**: Incidência sobre trabalhadores e meio ambiente. Dissertação de mestrado. Paraná. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geologia, 2004.

ROCHA, César Henrique Barra. **Geoprocessamento**: tecnologia interdisciplinar. Juiz de Fora: Ed. do autor, 2000.

RONCHI, Luiz Henrique; LOBATO, Anderson Orestes Cavalcante. **Minas do Camaquã**: um estudo multidisciplinar. São Leopoldo, ed. Unisinos, 2000.

ROSS, J.L.S. **Revista do Departamento de Geografia**; 8, São Paulo, USP, 1994.

TAMANINI MAS. **Diagnóstico físico-ambiental para a determinação da fragilidade potencial e emergente da Bacia do Baixo curso do Rio Passaúna em Araucária** [dissertation] Curitiba: Universidade federal do Paraná/UFPR;2008.118p.

SALEEM M, Iqbal J, Shah MH. 2013. **Study of seasonal variations and risk assessment of selected metals in sediments from Mangla Lake, Pakistan**. J Geochem Explor 125:144–152.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental**: conceitos e métodos. Oficina de Textos, São Paulo, 2008. p. 495.

SANTILLO, TECNOLÓGICAS–HENRIQUE. **Velocidade de Infiltração da água no solo Irrigado por pivô central no município de Silvânia-GO**. Universidade Estadual de Goiás – CCET, Engenharia Agrícola, 2015.

SANTOS, Edelson dos. **Mapeamento da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Jirau município de Dois Vizinhos-Paraná**. 2005. 132 f. 2005., Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SANTOS, T. E. M. dos; Montenegro, A. A. A.; Silva, D. D. **Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo**

**(TDR)**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.7, p.670-679, 2011.

SANTOS, Jean Cheyson Barros dos et al. **Caracterização de neossolos regolíticos da região semi-árida do Estado de Pernambuco**. 2011.

SANTOS, Maurício Moreira dos. **Avaliação hidrogeológica para determinação da vulnerabilidade natural do aquífero freático em área selecionada na cidade de Londrina (PR)**. 2005.

SANTOS, RF dos. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. 184p. Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil. ISBN, v. 355771044, 2004.

SEBEL, Abdelaziz et al. **Bioavailability of Pb, Zn, Cu, Cd, Ni and Cr in the sediments of the Tessa River: A mining area in the North-West Tunisia**. Journal of African Earth Sciences, v. 137, p. 1-8, 2018.

SILVA, F, P.M. Geraldo Jorge Barbosa; DOS SANTOS, Carlos Alberto Batista. **Representações dos moradores do entorno das áreas de exploração sobre a importância e impactos da mineração**. Geosul, v. 33, n. 66, p. 128-146, 2018.

SILVA, João Paulo Souza. **Impactos ambientais causados por mineração**. Revista espaço da Sophia, v. 8, n. 1, 2007.

SILVA, L, R. **Índices físicos do solo e alterações químicas decorrentes da ocupação por necrópole em Caçapava do Sul-RS**. Universidade Federal do Pampa, Engenharia Ambiental e Sanitária. 2016.

SILVA, Robson Willians da Costa; MALAGUTTI FILHO, Walter. **O emprego de métodos geofísicos na fase de investigação confirmatória em cemitérios contaminados**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, p. 327-336, 2009.

SILVA, V. C.; MAIA, G. F. **Normas para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas**. In: IV Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto. 2006.

SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORPORATION. Guelph permeameter model 2800 (User manual). Santa Barbara: **Soil Moisture Equipment Corporation**, 1991. 27p.

SORICHETTA, A. et al. **Reliability of groundwater vulnerability maps obtained through statistical methods**. Environ. Manage., 92 (4), pp. 1215-1224, 2011.

SPRÖL, Christiane; ROSS, Jurandy Luciano Sanches. **Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos**. GEOUSP: Espaço e Tempo (Online), n. 15, p. 39-49, 2004.

STRECK, E.; V.; et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2008.

TAGHIPOUR, M. S. Ayoubi, H. **Khadmei Contribution of lithologic and anthropogenic factors to surface soil heavy metals in western Iran using multivariate geostatistical analyses** Soil Sediment Contam. 28 (2011), pp. 921-937.

TANGERINO, D. F.; LOURENÇO, R. T. **Comparação da exatidão de métodos de classificação supervisionada e não supervisionada a partir do índice kappa na microbacia do Ribeirão Duas Águas em Botucatu/SP**. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. 2013, Foz do Iguaçu, PR. São José dos Campos: INPE, p. 4093, 2013.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 744p.

TRENTIN, Romario; DE SOUZA ROBAINA, Luís Eduardo. **Unidades Geoambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Itu-Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil**. Revista do Departamento de Geografia, v. 23, p. 267-287, 2012.

TRINDADE, Samuel Guizeline. **Subsídios para implantação de trincheiras de infiltração na área urbana de Rio Claro, SP**. 2009.

TUCCI, Carlos EM et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. São Paulo: Editora da, 2012.

VÄÄNÄNEN, Kristiina et al. **Avaliação do risco ecológico de sedimentos boreais afetados pela mineração de metais: geoquímica de metais, sazonalidade e comparação de vários métodos de avaliação de risco**. Avaliação e gestão ambiental integrada , v. 12, n. 4, p. 759-771, 2016.

VAN STEMPOORT, D. Evert, L. L. Wassenaar. **Aquifer vulnerability index: a GIS compactable method for groundwater vulnerability mapping** Can. Water Res. J., 18, pp. 25-37, 1993.

VIEIRA, M. A. et al. **Determinação de Cd, Hg, Pb e Se em lamas de sedimentos por calibração de diluição isotópica ICP-MS [...]**. Spectrochimica Acta Parte B: Espectroscopia Atômica , v. 60, n. 5, p. 643-652, 2005.

XIANG-BIN, S. L. et al. **Bo Heavy metal contents and accumulation characteristic of dominant plants in tin mining wasteland of gejiu city**. Yunnan, China Paper Presented at 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, Atlantis Press, China, pp. 801-808, 2015.

XU, Songjun et al. **Tungsten-and cobalt-dominated heavy metal contamination of mangrove sediments in Shenzhen, China**. Marine pollution bulletin, v. 100, n. 1, p. 562-566, 2015.

ZANATO, Taís Renata. **Contribuição do método da eletrorresistividade na investigação da possível contaminação por necrochorume em aquíferos fraturados no cemitério Santo Antônio**. 2016.

ZOLIN, Ivan. **Materiais de Construção Mecânica**. 2016.