

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO MEIO AMBIENTE E RECURSOS MINERAIS  
LINHA DE PESQUISA EM PLANEJAMENTO AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE PARÂMETROS PARA MAPEAMENTO DE VULNERABILIDADE DE  
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO AQUÍFERO GUARANI NOS  
MUNICÍPIOS DE PORTÃO E ESTÂNCIA VELHA/RS**

**KELLEN MURADÁS**

**SÃO LEOPOLDO**

**2011**

Kellen Muradás

ANÁLISE DE PARÂMETROS PARA MAPEAMENTO DE VULNERABILIDADE DE  
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO AQUÍFERO GUARANI NOS  
MUNICÍPIOS DE PORTÃO E ESTÂNCIA VELHA/RS

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Naturais, Linha de Pesquisa em Planejamento Ambiental.

**Orientador: Prof. Dr. Osmar G. Wöhl Coelho**

São Leopoldo, 2011.

## AGRADECIMENTOS

Os resultados obtidos e discutidos nesta dissertação somente foram possíveis com o apoio dos órgãos, laboratórios e profissionais citados. Agradeço:

Ao PRÓ-SINOS e FNMA pelo apoio financeiro ao PLANOSINOS, Plano no qual esta dissertação está inserida.

Ao apoio técnico do Laboratório de Sedimentologia NESE - Núcleo de Estudos Sedimentares e Estratigráficos – UNISINOS, pelas análises granulométricas na fase inicial do mestrado.

Ao apoio técnico de Letícia e Caroline no Laboratório de Mecânica dos Solos – UNISINOS, pelas análises granulométricas e de porosidade de solo.

Ao prof. Dr. André Sampaio Mexias e ao Quím. Renato Figueira da Silva do Laboratório de Difractometria de Raios-X do Instituto de Geociências da UFRGS, pelas análises mineralógicas apresentadas neste trabalho.

À Ms. Geógr. Michele Mongilhott, apoio técnico LAGEO-UFRGS (2008-2009) por todos os ensinamentos em Sistema Geográfico de Informações e utilização de *software*.

Ao Dr. Geól. Carlos A. Heine, Superintendente da CORSAN, pelo acesso aos dados de poços tubulares em Estância Velha e Portão.

Ao apoio técnico do SIAGAS-CPRM, pelos dados de poços tubulares.

### **... agradeço especialmente**

Ao Prof. Dr. Osmar G. Wöhl Coelho, meu orientador, por ter acreditado em mim, pelos sábios conselhos que certamente fizeram parte do meu amadurecimento profissional e pessoal. Construímos uma amizade rica e espero ainda compartilhar muitos momentos da minha trajetória.

Ao companheiro de luta, Geól. Daniel Wohjan, sem ele não teria muitos dos resultados aqui discutidos. Muito obrigada pelo coleguismo, ajuda no campo, nas trocas de informações, discussões, nos trabalhos que fizemos para as disciplinas do mestrado. Aloha!

Ao Prof. Carmo Heinemann, por me acompanhar desde o curso de Licenciatura em Física e ter aberto as portas para o meu estágio docência na disciplina de *Física do Sistema Terra*. Foi uma experiência maravilhosa rever as pessoas queridas e compartilhar esses momentos com os alunos da Graduação, espero que eles tenham admirado ainda mais o nosso querido planeta Terra.

Ao Prof. Dr. Ernesto Lavina, por ter se prontificado a nos acompanhar no trabalho de campo da área de estudo, dando sugestões que com certeza nos acrescentou muito.

Aos professores Dra. Luciana Paulo Gomes e Dr. Ubiratan F. Faccini pelas contribuições valiosas nos seminários I e II, por toda a dedicação dispensada na correção e discussão deste trabalho.

Ao secretário do Programa de Pós-Graduação, Juliano Schmidt, pelo exemplo diário de profissionalismo.

Às gurias, Marcinha (Ms. Biól. Márcia da Silva Gomes), Bina (Ms. Biól. Sabrina Schweig Rodrigues), Jacque (Quím. Jacqueline Duran Miranda), Jú (Eng. Juliana Martins Krieger), Dea (Ms. Biól. Andrea Vargas), pelo coleguismo essencial para esse ambiente maravilhoso de trabalho, pelo excelente profissionalismo de todas.

Ao pessoal do corredor da Paleontologia, pelos cafés, pelas risadas, pelas conversas.

Aos professores do Curso de Graduação em Geologia na UFRGS que me ajudaram, trocaram idéias, acrescentaram de alguma maneira na minha melhor compreensão e, aos colegas de curso que me passaram as matérias das aulas perdidas, que torceram por mim, que me apoiaram com um sorriso, um olhar.

Aos meus amigos que guardo na memória, os com quem ainda falo, os que estão mais presentes... Todos aqueles que acreditaram em mim e que, com uma palavra ou um olhar fizeram a diferença.

Aos meus lugares, desde “nasci chorando Moinhos de Vento” e do frio cinza da querida Porto Alegre, das marcas de carvão de Butiá, às coxilhas de Encruzilhada e Viamão, e de tantos lugares que nesse mundo a fora passei!

A minha Grande Família!

Aos meus pais, pelo amor incondicional.



## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a todos que acreditaram em mim e a Josef, que está comigo em todos os momentos.*

## EPÍGRAFE

*É muito bom vivenciar a alegria de encontrar o  
“tesouro escondido no campo da própria alma”  
(...) que sustenta, resguarda e inspira o ser  
humano a progredir de modo natural e sensato.*

*Hammed*

## RESUMO

O mapeamento de vulnerabilidade e a análise de risco de contaminação das águas subterrâneas são fundamentais para a orientação dos planos municipais de gerenciamento ambiental. Atualmente, novos critérios de enquadramento das águas subterrâneas são exigidos pela Resolução do CONAMA N°396 /2008 e justificam o presente estudo. Os municípios escolhidos para o mapeamento de vulnerabilidade foram Portão e Estância Velha/RS, pois apresentam uma situação potencial de contaminação devido à atividade industrial dos setores coureiro-calçadista, plástico, tintas e solventes, além dos efluentes domésticos. Para a construção do mapa de vulnerabilidade, foi escolhido o método DRASTIC, acrônimo dos parâmetros a serem analisados: *Depth water table*, *Recharge*, *Aquifer media*, *Soil type*, *Topography*, *Impact of vadose zone*, *Hydraulic Conductivity*. Cada parâmetro é construído de forma dinâmica como um plano de informação no ambiente SIG a partir de características do meio que são espacializadas e, na fase final, integradas para gerar o mapa de vulnerabilidade em classes baixa, intermediária, alta e muito alta. A análise preliminar de risco é feita pela sobreposição deste mapa com o mapa de uso do solo. O Sistema Aquífero Guarani (SAG), na área de estudo, é representado pelos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu, sendo parcialmente confinado pelo Aquífero Serra Geral e a recarga é favorecida pelo basalto densamente fraturado. A pouca profundidade dos níveis de água subterrânea e a litologia sedimentar são fatores decisivos para uma vulnerabilidade intermediária a alta e, devido à ação antrópica, os níveis de água subterrâneos sofreram depleção na área urbana. Os solos foram separados em domínios de acordo com a sua textura. O domínio Argissolo 1 apresenta-se espesso e com alto teor de finos no horizonte B, indicando um comportamento impermeabilizante. Os ensaios de infiltração e as camadas espessas de argila confirmam a baixa condutividade hidráulica dessa unidade pedológica, constituindo proteção natural do aquífero. Na área de estudo predomina o Argissolo 2, mais arenoso e, a presença restrita de argilominerais expansivos em superfície é fator atenuador da vulnerabilidade. O estudo de risco está diretamente relacionado à ocupação da área, que foi classificada em urbana, rural, silvicultura ou mata nativa. Estas classes, por ora, ocupam áreas de alta vulnerabilidade de contaminação do aquífero. Quanto à qualidade das águas subterrâneas, estes municípios possuem poucos dados disponíveis, não evidenciando o histórico de degradação ambiental na área, sendo um alerta para a necessidade de instalação de rede de poços de monitoramento. A eficiência do mapa de vulnerabilidade está associada à interdependência dos parâmetros envolvendo aspectos hidrogeológicos e geomorfológicos, tendo-se obtido 25% da área com alto grau de vulnerabilidade; 72,4% com grau intermediário e, apenas 2,6%, com baixo grau de vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas. Dentre as recomendações, inclui-se priorizar o controle quantitativo e qualitativo das águas subterrâneas na área leste por constituir-se de alta vulnerabilidade com sobreposição da mancha urbana e atividades industriais.

**Palavras-chave:** vulnerabilidade de águas subterrâneas, DRASTIC, gestão de recursos hídricos, SIG.

## ABSTRACT

The vulnerability mapping and risk analysis of groundwater contamination are essential to guide municipal plans of environmental management. Nowadays, new criteria to classify the groundwater quality are required by the CONAMA Resolution N° 396/2008 which justify this work. The cities chosen for this study were Portão and Estância Velha/RS due to industrial activities like leather-footwear, plastics, paints and solvents, and domestic effluent in significant volume. The DRASTIC method was chosen to build the vulnerability map, which is a acronym of the parameters to be analyzed: Depth water table, Recharge, Aquifer media, Soil type, Topography, Impact of vadose zone, Hydraulic Conductivity. Each parameter was built dynamically as an information layer in the GIS from characteristics of the environment that were specialized and, in the final stage, integrated to generate vulnerability classes as low, intermediate, high and very high class. A preliminary risk analysis was done by overlapping of this map with the map of landuse. The Guarani Aquifer System (GAS) in the study area is composed by the sandstones from the Pirambóia and Botucatu Formations. The SAG is partially confined by the Serra Geral Aquifer when the recharge is favored by the densely fractured basalt. The shallow groundwater levels and sedimentary lithology are decisive factors for an intermediate to high vulnerability. However, due to human action, groundwater levels are depleted in urban areas. The soils were divided in domains according to their texture. The domain claysoil 1 shows thick layers with high content of clays in the B horizon, indicating an impermeable behavior. The infiltration tests and the thick layers of clay confirm the low hydraulic conductivity of this pedological unit, providing natural protection of the aquifer. However, in the study area dominates the claysoil 2, which is more sandy and whose low levels of expansive clay minerals in the surface decrease the vulnerability. The study of risk is directly related to the occupation of the area, which was classified as urban, rural, forestry or native forest. These classes occupy areas of high vulnerability to contamination of the aquifer. As the quality of groundwater, these cities have limited data available, not showing the history of environmental degradation in the area. This is an alert to the need of installation of properly distributed monitoring wells. The efficiency of the map is linked to the interdependence of parameters involving hydrogeological and geomorphological aspects, having been obtained a high degree of vulnerability to groundwater contamination in 25% of the area. An intermediate vulnerability was found in 72,4% of the area and a low degree in 2,6% of the area. In the recommendations, the qualitative and quantitative control of the groundwater in the east area was included because it constitutes high vulnerability with over urban use and industrial activities.

**Keywords:** groundwater vulnerability, DRASTIC, water resources management, GIS.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
1.2.1 Objetivo Geral .....	18
1.2.2 Objetivos Específicos .....	19
<b>2. VULNERABILIDADE E RISCO DE CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 O AQUÍFERO COMO PARTE INTEGRANTE DO AMBIENTE .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 VULNERABILIDADE E RISCO DE CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3 MÉTODO DRASTIC .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 FLUXOS SUBSUPERFICIAL E SUBTERRÂNEO E RELAÇÃO COM A MOBILIDADE DE CONTAMINANTES.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5 ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS E MINERALÓGICOS ASSOCIADOS A DINÂMICA DE CONTAMINAÇÃO .....</b>	<b>34</b>
<b>3. MÉTODO E TÉCNICAS.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 DESCRIÇÕES DAS ETAPAS A E B: COLETA DE DADOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS E PARAMETRIZAÇÃO .....</b>	<b>39</b>
3.1.1 Geologia .....	40
3.1.2 Hidrogeologia .....	41
3.1.3 Relevo.....	43
3.1.4 Solos .....	44
3.1.4.1 Ensaio de permeabilidade.....	44
3.1.4.2 Análise granulométrica.....	45
3.1.4.3 Difratomia de Raios-X: caracterização mineralógica .....	46
3.1.4.4 Classificação de domínios de solo.....	47
<b>3.2 ETAPA C: MAPA DE VULNERABILIDADE.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3 ETAPA D: ANÁLISE DE OCUPAÇÃO DO SOLO, RISCO E CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....</b>	<b>50</b>
<b>4. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1. ÁREA DE ESTUDO: LOCALIZAÇÃO E OCUPAÇÃO.....</b>	<b>52</b>

<b>4.2 DADOS DA SUB-BACIA DO ARROIO PORTÃO: GEOLOGIA, SISTEMAS AQUÍFERO GUARANI E AQUÍFERO SERRA GERAL</b> .....	59
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>63</b>
<b>5.1 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA</b> .....	63
<b>5.2 HIDROGEOLOGIA</b> .....	73
<b>5.3 SOLOS</b> .....	76
5.3.1 Análise de campo.....	76
5.3.2 Dados granulométricos .....	79
5.3.3 Ensaio de infiltração .....	80
5.3.4 Difratomia de Raios-X .....	82
5.3.5 Classificação dos domínios de solo .....	86
<b>5.4 ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS PELA APLICAÇÃO DO ÍNDICE DRASTIC</b> .....	89
5.4.1 Critérios de pontuação na parametrização.....	89
5.4.2 Mapa de vulnerabilidade .....	92
<b>5.5 USO DE SOLO E ANÁLISE DE RISCO</b> .....	97
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>101</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>105</b>
<b>8. APÊNDICE</b> .....	<b>111</b>

## SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico da declividade (%) em relação a pontuação do parâmetro T. Fonte: Aller <i>et al.</i> 1987. ....	27
Figura 2: Esquema do comportamento de infiltração de água no solo. Fonte: adaptado de Carvalho e Silva 2006. ....	33
Figura 3: Fluxograma da abordagem geral do problema.....	38
Figura 4: Localização dos municípios de Portão e Estância Velha. Fonte: Adaptado de CPRM (2008). ....	52
Figura 5: Identificação da área de estudo, imagem de satélite LANDSAT, bandas 345 de 2002. ....	53
Figura 6: Expansão da área urbana dos municípios de Portão entre 1995 a 2006. Fonte: carta topográfica do exército de 1975, fotografias aéreas da METROPLAN de 1990, imagem de satélite do <i>Google Earth</i> de 2006. ....	55
Figura 7: Expansão da área urbana dos municípios de Estância Velha entre 1995 a 2006. Fonte: carta topográfica do exército de 1975, fotografias aéreas da METROPLAN de 1990, imagem de satélite do <i>Google Earth</i> de 2006.....	55
Figura 8: Crescimento populacional dos municípios de Estância Velha e Portão de 1975 à 2005. Estância Velha apresenta maior taxa de crescimento e maior número de habitantes em uma área aproximadamente 1/3 menor que a do município de Portão. Fonte: FEE 2005. ....	56
Figura 9: Atividades econômicas de Portão. Fonte IBGE (2006). ....	57
Figura 10: Atividades econômicas de Estância Velha. Fonte: IBGE 2006. ....	58
Figura 11: Diferenças litológicas que se destacam na região: os derrames basálticos e as rochas sedimentares associadas. Formação Serra Geral e arenito intertrape. SB: substrato de arenito Botucatu; b1 a b5 constituem níveis de basalto do primeiro fluxo de lava; pd é uma paleoduna; ai, arenito intertrape; 2b é o segundo fluxo de lava. Jazida no limite de Estância Velha e Ivoti. Foto: Prof. Dr. Heinrich Theodor Frank – UFRGS. ....	61
Figura 12: Unidade fotogeológica 1, basaltos e arenitos intertrapes, relevo em mesa, alinhamento de morros testemunhos de basalto; macroformas suavizadas são associadas a arenitos, falhas NW-SE e falhas inferidas. ....	64
Figura 13: Limite das Unidades Fotogeológicas 1, 2 e 3. Unidade 1: constituída por rochas vulcânicas e sedimentares. Morros testemunhos dos derrames basálticos que delimitam a Borda do Planalto com relevo dissecado (1 e linha vermelha pontilhada); Área urbana de Estância Velha (2); Arroio Estância Velha, afluente do Arroio Portão (3); Área urbana de Novo Hamburgo (4); Área urbana de São Leopoldo (Scharlau) (5); Afloramento do Arenito Pirambóia (6); Afloramento do Arenito Botucatu (7); Rio dos Sinos e Planície de Inundação (8). A linha amarela tracejada separa a Unidade fotogeológica 1 das demais. ....	66

Figura 14: Delimitação das unidades 2 e 3. Unidade 2 associada aos arenitos Botucatu e Pirambóia (mais ao sul), relevo suave ondulado. Unidade 3 associada ao ambiente fluvial meandrante, curso e foz do Arroio Portão, planície de inundação, relevo plano. Área urbana de Portão (1); Área urbana de São Leopoldo (Scharlau) (2); Planície de inundação do Rio dos Sinos (3); Planície de inundação e plantação de arroz (4); Rio dos Sinos (5); Arroio Portão (6) a- curso médio, b-foz do arroio; Afloramento do Arenito Pirambóia (7); Afloramento do Arenito Botucatu (8). A linha amarela tracejada separa as Unidades fotogeológicas 2 e 3.....	67
Figura 15: Mapa geológico da área de estudo com indicação dos afloramentos avaliados. Adaptado de CPRM 2008.....	68
Figura 16: Formação Pirambóia, afloramento em torno de 15 m de altura. Ponto 1. P1a Arenito bimodal com estratificação cruzada planar de grande porte, espessuras individuais com média de 5m. A base do perfil, P1b, apresenta camadas tabulares de 3 a 20 cm de espessura com intercalação de silte. Arenito rosa claro a branco, caolinitizado. ....	69
Figura 17: Formação Botucatu. Ponto 2: Arenito rosado com estratificações cruzadas acanaladas de grande porte, de 1 à 5 m e <i>climbing ripples</i> . Constituído de areia muito fina a fina, bimodal e bem selecionada. As medidas de paleocorrente indicam variação significativa de 30° a 180°. ....	70
Figura 18: Formação Botucatu. Ponto 6: Arenito com estratificações cruzadas tangenciais de médio porte, variando de 0,5 a 1 m (Foto: Daniel Wohjan).....	70
Figura 19: Formação Botucatu. Ponto 7: Arenito cor rosa claro com estratificações cruzadas tangenciais de médio porte, variando de 0,5 a 2 m; bastante alterado, granulometria média a fina. Dique de composição básica cortando o afloramento. ....	71
Figura 20: Basalto da Formação Serra Geral, alterado com estruturas de alívio de tensões e esfoliação esferoidal. Localizado a 300 m à sul do P6 (figura 18).....	71
Figura 21: Modelo numérico do terreno gerado pela interpolação das curvas hipsométricas. ....	72
Figura 22: Classificação do parâmetro recarga. ....	74
Figura 23: Superfície potenciométrica. As flechas indicam o sentido do fluxo subterrâneo. ....	75
Figura 24: Domínio do Argissolo 1 em Estância Velha. A e B são respectivamente horizontes A e B.....	77
Figura 25: Voçorocas, indicadas pelas flechas amarelas, com mais de um metro de largura e profundidade. Foto: Daniel Wojahn (2008). ....	78
Figura 26: Solo arenoso localizado no centro-sul de Portão. A, E, B e C são horizontes do solo. ....	78
Figura 27: Análise granulométrica da amostra de Portão indicando a diferença textural entre horizontes do Argissolo ao norte de Portão.....	79
Figura 28: Análise granulométrica da amostra de Portão indicando horizontes arenosos do Argissolo ao sul de Portão. ....	80



Figura 29: Gráfico de dispersão dos valores de k e tipos de solo.....	81
Figura 30: Difratoograma da mineralogia total (método do pó) da amostra do domínio Argissolo 2 de Portão. A mineralogia dos horizontes A e B é constituída de feldspato alcalino e quartzo, sendo que o horizonte B possui contagem representativa da caolinita.....	82
Figura 31: Difratoograma da mineralogia total (método do pó) da amostra do domínio Argissolo 1 de Estância Velha, ponto 1. A mineralogia dos horizontes A, E e B é constituída por feldspato alcalino, quartzo com fases imprecisas de ankerita ou dolomita e óxido de ferro como hematita. A caolinita é somente representativa no horizonte B, o mais argiloso. ....	82
Figura 32: Difratoograma da fração <4µm para análise de argilominerais do horizonte A, domínio de Argissolo 1 em Estância Velha, ponto 1. Os argilominerais indicados são illita com predominância de caolinita. A linha vermelha mostra o comportamento diagnóstico da caolinita (pico ~ 7,1Å), que é destruída na temperatura de calcinação de 550°C, diferente da illita (pico ~10Å) que permanece sem afetar a estrutura. ....	83
Figura 33: Difratoograma da fração <4µm para análise de argilominerais do horizonte E, domínio do Argissolo 2 em Estância Velha, ponto 1. Os argilominerais indicados são illita com predominância de caolinita, mostrando novamente a composição caolinítica dos solos da região. ....	83
Figura 34: Difratoograma da fração <4µm para análise de argilominerais do horizonte B, domínio do Argissolo 1 em Estância Velha, ponto 1. Os argilominerais indicados são illita com predominância de caolinita, mostrando novamente a composição caolinítica dos solos da região. ....	84
Figura 35: Difratoograma da mineralogia total da amostra do ponto 4 dos horizontes de solo A, B e C de Estância Velha. Os minerais identificados nos horizontes A e C são feldspato alcalino, piroxênio e inferência da presença de esmectita; A e B possui plagioclásio e óxido de ferro como hematita; caolinita presente em todos os horizontes.....	84
Figura 36: Difratoograma da fração <4µm para análise de argilominerais do horizonte A, em Estância Velha, ponto 4. Os argilominerais indicados são caolinita e esmectita (contribuição da alteração do basalto) e illita subordinada.....	85
Figura 37: Difratoograma da fração <4µm para análise de argilominerais do horizonte B em Estância Velha, ponto 4. Os argilominerais indicados são illita com predominância de caolinita, mostrando novamente a composição caolinítica dos solos da região.....	85
Figura 38: Difratoograma da fração <4µm para análise de argilominerais do horizonte C, em Estância Velha, ponto 4. Os argilominerais indicados são caolinita e esmectita e illita subordinada.....	85
Figura 39: Classificação dos solos e localização das coletas e ensaio de permeabilidade.....	88
Figura 40: Mapa de declividade confeccionado a partir do modelo numérico do terreno. A técnica do “slicing” no software ILWIS permite a divisão pelas classes de pontuação do método DRASTIC. Nota-se que as áreas mais planas (vermelhas) adquirem maior peso pela capacidade de infiltração. ....	90
Figura 41: Superfície potenciométrica. As setas indicam o sentido do fluxo subterrâneo.....	91

Figura 42: Mapa somatório da pontuação dos sete parâmetros do método DRASTIC resultando no mapa final de vulnerabilidade de contaminação de águas subterrâneas (escala em valor adimensional). .....	93
Figura 43: Mapas paramétricos mostrando os valores máximos e mínimos das pontuações de cada parâmetro e seus pesos. ....	94
Figura 44: Porcentagem de área para cada classe de vulnerabilidade. ....	95
Figura 45: Mapa das classes de vulnerabilidade confeccionado pelo “fatiamento” das classes admitidas pelo método DRASTIC: baixa (<120), intermediária (120-159) e alta (160-199). .	96
Figura 46: Mapa de uso do solo. Compilado de PLANOSINOS. ....	97
Figura 47: Mapa de sobreposição do uso do solo e classes de vulnerabilidade. ....	98

## SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros que constituem o método DRASTIC, peso e pontuação. ....	28
Tabela 2: Valores do DRASTIC aplicados para o conjunto hidrogeológico, exemplo das Ilhas do Hawaii.....	31
Tabela 3: Valores do DRASTIC aplicados para o conjunto hidrogeológico exemplo do platô do Colorado. ....	31
Tabela 4: Capacidade de troca catiônica de minerais e matéria orgânica. ....	37
Tabela 5: Pontuação do impacto da litologia do aquífero no mapeamento de vulnerabilidade de águas subterrâneas. ....	40
Tabela 6: Pontuação do impacto da zona vadosa no mapeamento de vulnerabilidade de águas subterrâneas. ....	41
Tabela 7: Pontuações das profundidades do nível da água (em metros) no mapeamento de vulnerabilidade de águas subterrâneas. ....	42
Tabela 8: Pontuações para os intervalos de condutividade hidráulica. ....	42
Tabela 9: Pontuação para recarga em mm.ano <sup>-1</sup> .....	43
Tabela 10: Pontuação para a variação do declive.....	44
Tabela 11: Exemplo de tabela de dados para obtenção do valor de condutividade hidráulica.	45
Tabela 12: Pontuação do tipo de solo considerando granulometria, mineralogia de argilas e espessura.....	48
Tabela 13: Descrição da etapa A à B. A etapa A é a coleta de dados dos quais são processados e, na etapa B, são adaptados para gerar os planos de informação de cada parâmetros. ....	49
Tabela 14: Dados Estatísticos do território e população. ....	54
Tabela 15: Produtividade de Portão e Estância Velha em 2006.....	58
Tabela 16: Características do efluente no processo de curtimento por tonelada de pele. ....	59
Tabela 17: Caracterização dos arenitos Pirambóia e Botucatu.....	62
Tabela 18: Granulometria da amostra em Portão (POR_13) por horizonte indicando a diferença textural abrupta dos horizontes no Argissolo. ....	79
Tabela 19: Granulometria da amostra em Portão (POR_10) por horizonte indicando a homogeneidade textural dos horizontes no Argissolo.....	80
Tabela 20: Associação pedológica dos domínios de Argissolo quanto a variação de litologia. ....	87

Tabela 21: Critérios de pontuação dos parâmetros R, A, S e I e valores atribuídos. ....	92
Tabela 22: Valores das análises físico-químicas e de metais em águas subterrâneas em mg.L <sup>-1</sup> . .....	99

## LISTA DE ABREVIações

Siglas:

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CNAE-PIA - Classificação Nacional de Atividades Econômicas- Pesquisa de Indústria Anual

COMITESINOS - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CORSAN - Companhia Rio-Grandense de Saneamento

CPRM - Serviço Geológico do Brasil - Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais

CTC - capacidade de troca catiônica

EPA (USEPA) - *Environmental Protection Agency - United States of America*

EV - amostras do município de Estância Velha

FEE - Fundação de Economia e Estatística

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção ao Meio Ambiente Henrique Luis Roessler/RS

FNMA - Fundo Nacional do Meio Ambiente

GIS – Geographic Information System

GOD - *Groundwater Hydraulic Confinement,*

*Overlying strata,*

*Depth to groundwater table (unconfined) or strike (confined)*

DRASTIC **D-** *Depth of Water Table*

**R-** *Net Recharge*

**A-** *Aquifer Media*

**S-** *Soil Type*

**T-** *Topography*

**I-** *Impact of Vadose Zone*

**C-** *Hidraulic Conductivity*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDESE - Índice de Desenvolvimento Socioeconômico

ILWIS - *Integrated Land and Water Information System*

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MD-DL - Ministério da Defesa- Departamento de Levantamento

METROPLAN - Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MME - Ministério de Minas e Energia

MNT - Modelo Numérico do Terreno

ONG - Organização Não Governamental

PLANOSINOS - Plano de Gestão da Bacia do Rio dos Sinos

POR - amostras do município de Portão

PRÓ-SINOS- Consórcio Público de Saneamento da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos

SAG - Sistema Aquífero Guarani

SIAGAS - Sistema de Informações de águas Subterrâneas

SIG- Sistema de Informações Geográficas

Abreviaturas e símbolos:

$\Delta$  (delta) variação

cm centímetro

Fm. Formação

hab. habitantes

k condutividade hidráulica/permeabilidade do solo

km quilômetro

kV kilo Volt

L litro

m metro

mA micro ampère

NA nível piezométrico

NE profundidade do nível estático determinada em poços tubulares

NE nordeste

NW noroeste

P pontuação

pol polegada

PE perda de água específica

Q vazão

rpm rotações por minuto

SE sudeste

SW sudoeste

ton tonelada

Z cota do terreno/boca do poço

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

Os mapas de vulnerabilidade de contaminação de águas subterrâneas vêm sendo cada vez mais utilizados para dar suporte aos planos de gestão ambiental dos municípios. Com base em argumentos multidisciplinares, esses mapas têm como objetivo identificar áreas que possuam características naturais mais ou menos suscetíveis para a contaminação dos aquíferos.

A validação do mapa de vulnerabilidade é um tema amplamente discutido diante da relação dos parâmetros utilizados na sua construção. A eficiência do modelo de mapeamento de vulnerabilidade de águas subterrâneas depende da aplicação de parâmetros que, integrados, atribuem um significado de vulnerabilidade a partir de uma leitura particular do ambiente.

A análise de parâmetros para o mapeamento de vulnerabilidade de águas subterrâneas compreende também a relação das características externas do geossistema o qual o aquífero pertence, como pedogenéticas e geomorfológicas. Essas características externas controlam os fluxos de entrada de água e contaminantes, quando dispostos no ambiente, a exemplo da variação do relevo e do solo como filtro biogeoquímico em processos de reativação e sorção de espécies químicas.

Muitas situações de impacto ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, em parte documentadas pela FEPAM (2007), ONG'S e outras instituições têm induzido a propor projetos sócio-ambientais na área de recursos hídricos. Os municípios de Portão e Estância Velha, localizados na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos e pertencentes à área de ocorrência do Sistema Aquífero Guarani – SAG, possuem alguns indicadores sócio-econômicos como alta taxa de urbanização, indústrias com produção e descarte de resíduos perigosos, além do esgoto doméstico somado ao saneamento insuficiente.

Esses indicadores apontam a necessidade do mapeamento de vulnerabilidade de suas águas subterrâneas com a finalidade de proteção dos aquíferos, principalmente onde existam atividades industriais. Além disso, esses indicadores configuram possivelmente uma situação potencial de contaminação das águas subterrâneas e superficiais.

A Resolução do CONAMA nº 396/2008 (Brasil 2008) vem corroborar a importância deste estudo porque inclui o mapeamento de vulnerabilidade como uma das novas diretrizes para o enquadramento das águas subterrâneas, como também subsídio para a implementação de áreas de proteção de aquíferos e perímetros de proteção de poços de abastecimento. De

acordo com esta Resolução, o enquadramento das águas subterrâneas é realizado por aquífero, conjunto ou porções de aquíferos, na profundidade onde ocorrem as captações para os usos preponderantes.

Para o enquadramento, são considerados no mínimo a caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica, a vulnerabilidade e os riscos de poluição, o cadastramento dos poços existentes e aqueles em operação, o uso e a ocupação do solo e seu histórico, a viabilidade técnica e econômica, a localização das fontes potenciais de poluição, a qualidade natural e a condição atual de qualidade das águas subterrâneas; sendo algumas destas considerações, contempladas no presente estudo.

O método DRASTIC foi escolhido para o mapeamento de vulnerabilidade de águas subterrâneas devido a sua ampla aceitação internacional e por apresentar-se como método multiparamétrico bastante completo, além de abordar aspectos geomorfológicos e hidrogeológicos. Para visualização e integração espacial desses parâmetros, os dados georreferenciados são tratados no Sistema Geográfico de Informações, com técnicas de edição e integração de planos de informação dos parâmetros do DRASTIC, a fim de gerar o mapa final de vulnerabilidade do SAG na área de Estância Velha e Portão.

Sob este enfoque, o presente trabalho está inserido em um projeto abrangente, o PLANOSINOS, contemplando o estudo de vulnerabilidade de contaminação de águas subterrâneas. O PLANOSINOS destina-se a elaborar o Plano de gestão da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, sendo um dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos e de aplicação de políticas públicas nos recursos hídricos desta bacia. Este Plano fornece apoio técnico para os municípios pertencentes à Bacia dos Sinos e COMITESINOS sob contrato firmado entre o Consórcio Público de Saneamento da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos (PRÓ-SINOS) e o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA) do Ministério do Meio Ambiente (MMA). O Plano tem o perfil integrador das classes de usuários das águas da bacia. As metas de gestão da bacia são o desenvolvimento técnico, a mobilização social, o diagnóstico ambiental, o prognóstico ambiental e o plano de ações; sendo que as três últimas metas fazem parte da agenda do PLANOSINOS.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a vulnerabilidade e os riscos de contaminação do SAG nos municípios de Estância Velha e Portão.



### 1.2.2 Objetivos Específicos

1. Identificar características relevantes do meio físico dos municípios de Portão e Estância Velha para o estudo de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Guarani.
2. Construir o mapa de vulnerabilidade do aquífero empregando o método DRASTIC.
3. Relacionar a vulnerabilidade com o uso do solo, identificando áreas que possam oferecer risco para o aquífero.

## 2. VULNERABILIDADE E RISCO DE CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### 2.1 O aquífero como parte integrante do ambiente

Através da Lei 9.433/97, introduziu-se a Política de Recursos Hídricos e a idéia de que a água subterrânea não poderia ser explorada até o esgotamento de suas reservas, inclusive, pela sua conectividade com outros corpos hídricos e nascentes (Alonso 2007).

A Resolução 396/2008 do CONAMA (Brasil 2008) dispõe sobre o enquadramento, prevenção e controle de poluição das águas subterrâneas, sendo a caracterização das mesmas, atribuída pela sua qualidade. O enquadramento é realizado por aquífero, considerando as características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas, a vulnerabilidade e os riscos de poluição, o uso e a ocupação do solo, a viabilidade de uso para cada classe e a localização das fontes potenciais de poluição.

A degradação das águas subterrâneas pode, dependendo do caso, ser lenta e de difícil detecção com recuperação onerosa, por vezes não totalmente recuperável. As principais considerações da resolução citada vinculam a prevenção e o controle da poluição ao uso dos recursos hídricos e vêm ao encontro da necessidade de proteção das águas subterrâneas.

O aquífero sofre influência direta da ocupação do solo e a recarga das águas subterrâneas tem sua qualidade e quantidade alteradas por diversos fatores, como: a impermeabilização urbana, o escoamento facilitado pela canalização, a sua exploração e contaminação. Todos os fatores citados estão relacionados ao crescimento populacional e a produtividade industrial (Rahman 2008).

A **exploração intensa** de água subterrânea é preocupação atual em diversas áreas do mundo (Secunda *et al.* 1998, Alonso 2007, Almasri 2008, Rahman 2008). Segundo Alonso (2007), os processos de desertificação<sup>1</sup> verificados em vários países e estados brasileiros, como o Rio Grande do Sul, podem estar associados à excessiva exploração das águas subterrâneas. Além disso, quando a exploração supera a recarga e a renovação das águas subterrâneas, pode haver o secamento das nascentes e a alteração da descarga dos corpos hídricos superficiais.

Em outra perspectiva, Filizola *et al.* (2008) discorrem sobre o uso agrícola intensivo e pastagens que causa a arenização (também associada a exploração) no estado do Rio Grande do Sul, e que esse tipo de ocupação nas áreas de afloramento do Aquífero Guarani oferece

---

<sup>1</sup> Termo utilizado pelo autor.

fragilidade tanto como erosão do solo, maior exposição do aquífero e possibilidade de infiltração de produtos químicos. Essas considerações levam a concluir que no caso do uso agrícola, o aquífero responde a mais de um tipo de impacto ambiental, além da exploração, a compactação do solo e a troca da vegetação arbórea pela vegetação herbácea<sup>2</sup>, alterando o ciclo de recarga.

A **impermeabilização** ocorre devido ao crescimento urbano (Alonso 2007). O escoamento facilitado está associado à canalização dos cursos de água que cortam as cidades, concentrando a drenagem para não tomar a área já ocupada. O escoamento facilitado impede o escoamento da água na sua forma natural e, juntamente com a impermeabilização, impede ou modifica a recarga, alterando também a quantidade de água destinada às áreas a jusante (Tucci 2006). Essas alterações na superfície prejudicam diretamente a retenção de água no meio subterrâneo, aceleram o escoamento superficial e reduzem a taxa de infiltração.

A **contaminação** das águas subterrâneas se dá fundamentalmente pela infiltração de agroquímicos, de efluentes urbano-industriais e de aterros, vazamento de tubulações e reservatórios. Gomes *et al.* (2008a) apontam que o cultivo de arroz oferece risco potencial de contaminação para as águas subterrâneas nas áreas de recarga do SAG no estado do Rio Grande do Sul.

A precariedade da instalação de poços, como falta de selamento, manuseio inadequado, pode também ser fonte direta de contaminação e oferecer risco aos usuários. Além disso, a **veiculação de contaminantes** pode ocorrer pela água extraída de um poço profundo se alcançar os fluxos subterrâneos de distribuição regional e intermediário contaminados (Rebouças 2006).

A suscetibilidade a contaminação em águas subterrâneas depende da quantidade de resíduo descartado, assim como da capacidade do geossistema amortecer e reter os contaminantes. O amortecimento da veiculação de contaminantes depende de suas características físico-químicas e interação com o material geológico (Rebouças 2006).

As águas subterrâneas em comparação com outras fontes de água, geralmente possuem melhor qualidade físico-química; porém, este quadro vem sendo alterado. Estudos desenvolvidos na Índia por Rahman (2008) relatam que 70% das águas superficiais estão fora do padrão de potabilidade neste país, bem como muitas reservas de águas subterrâneas apresentam a mesma tendência em áreas muito vulneráveis, sendo frequentemente veículo de doenças. Este autor salienta a relação direta da contaminação de recursos hídricos com os seguintes fatores:

---

<sup>2</sup> Apelo e Postma (1993) discutem a infiltração de água em subsuperfície em relação a diferença de vegetação através de isótopos estáveis.

- elevado crescimento da população;
- crescimento não planejado das cidades;
- padrões misturados dos tipos de uso do solo;
- saneamento inadequado ou ausente; e
- disposição inadequada de resíduos domésticos e industriais.

Uma discussão breve, mas intensa sobre os impactos ambientais de resíduos, é feita por Odum (1988) em *Ecologia* em “estresse antropogênico e resíduos tóxicos”. O autor discute a **produção compulsiva** e o descarte de produtos químicos, pesticidas e resíduo radioativo. Neste contexto, a água torna-se um veículo de transporte de substâncias tóxicas, oferecendo risco para a saúde humana. Este autor já mencionava o câncer humano como uma das consequências da presença de poluentes nos alimentos, na água e no ambiente em geral; cita a contaminação das águas subterrâneas como “talvez o maior perigo de desastre potencial”. Outra questão abordada pelo autor é a contenção segura do material poluente que deve substituir a prática ilegal do “despejo secreto”. Além disso, devido à retirada de água subterrânea e mudanças do fluxo subterrâneo, ocorrem migração e expansão da pluma de contaminação.

Filho (2008) define contaminação quando a concentração do elemento afeta o ecossistema e seus componentes abióticos, e que a água contaminada possui organismos patogênicos, substâncias tóxicas e/ou radioativas, em teores que prejudicam a saúde do homem. É válido distinguir que há a contaminação natural e a contaminação antrópica, esta última, sendo sinônimo de poluição<sup>3</sup>. Tanto a poluição, como a contaminação ocorrem quando a concentração de um elemento está acima do valor de *background* da área; porém, a contaminação natural constitui de condições físico-químicas originados pela influência de elementos bióticos e/ou abióticos do próprio *background* que impossibilitam a utilização do recurso natural.

O ambiente possui características próprias de autodepuração e, neste sentido, Rebouças (2006) alerta para a necessidade de se conhecer os processos biogeoquímicos e a

---

<sup>3</sup> Segundo o Código Estadual do Meio Ambiente (SEMA 2000), o termo poluição inclui "toda e qualquer alteração dos padrões de qualidade e da disponibilidade dos recursos ambientais e naturais que afetem desfavoravelmente a biota, comprometam as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, prejudique a saúde, a segurança e o bem-estar das populações ou que possam vir a comprometer seus valores culturais". O SEMA (2000) coloca como fonte poluidora "toda e qualquer atividade, instalação, processo, operação ou dispositivo, móvel ou não, que independentemente de seu campo de aplicação induzam, produzam e gerem ou possam produzir e gerar a poluição do meio ambiente" e cria "condições inadequadas de uso do meio ambiente para fins públicos, domésticos, agropecuários, industriais, comerciais, recreativos e outros".

identificação de fontes pontuais e difusas de poluentes, que são indicadores para a gestão ambiental. Através do estudo biogeoquímico, compreende-se a biodisponibilidade e as trocas entre componentes vivos e não-vivos (Odum 1988, Baird 2002), identificando compostos que qualitativa e quantitativamente agridem o ambiente.

## **2.2 Vulnerabilidade e risco de contaminação de águas subterrâneas**

O estudo da vulnerabilidade das águas subterrâneas surgiu da necessidade de monitorar e preservar aquíferos, a fim de delimitar zonas de proteção e utilizá-los de forma sustentável (Oliveira & Lobo Ferreira 2004). Este tema é de interesse mundial, pois a contaminação de águas subterrâneas é uma realidade cada vez mais presente (Bekesi & McConchie 1999, Almasri 2007, Rahman 2008), principalmente quando se trata de fonte de abastecimento. Existem vários estudos relacionados à vulnerabilidade e avaliação de risco de contaminação por pesticidas (Aller *et al.* 1987, Secunda *et al.* 1998, Almasri 2007, Leone *et al.* 2009), contaminantes característicos da produção industrial local e características específicas da interação com o meio.

Existem vários métodos para avaliar a vulnerabilidade de um aquífero (Oliveira & Lobo Ferreira 2004, Tucci & Cabral 2003). No Brasil, o método GOD de Foster-Hirata (1987) é muito difundido. Outro método aplicado no estudo de vulnerabilidade do aquífero é o DRASTIC, desenvolvido por Aller *et al.* (1987).

Em 1987, a *Environmental Protection Agency* (EPA), Estados Unidos da América, criou um método multiparamétrico, o DRASTIC, que reúne vários fatores para o estudo de vulnerabilidade de águas subterrâneas em atividades agrícolas. Posteriormente, esse método foi generalizado e atualmente adaptado ao tipo de atividades e características locais (Nobre *et al.* 2007).

Lobo Ferreira (1997) descreve sobre a uniformização do mapeamento de vulnerabilidade de aquífero, tanto de uma metodologia quanto de uma linguagem comum, que foi necessária porque o trabalho envolvia o mapeamento hídrico regional e transfronteiriço, além da comunicação de trabalhos de profissionais de diferentes países. Este autor relata sobre a reunião da Comissão das Comunidades Européias, em 1991, para estabelecer uma metodologia comum para a elaboração de mapas do sistema hídrico dos Estados-membros, já que cada país adotava sua própria metodologia. Para essa uniformização foi solicitado a cada país um relato sobre a sua metodologia para gerar mapas de vulnerabilidade. No caso da França, utilizaram-se classes, sendo que a classe que indicava maior vulnerabilidade enquadrava, além das características de percolação e persistência dos poluentes, a presença de

atividade industrial e a exploração pela população. Com relação ao método francês, Lobo Ferreira (1997) salienta que a “persistência do poluente no aquífero” não seria adequada, pois neste caso, trata-se de *resiliência*, que indica a resistência que o meio oferece ao poluente, o quanto consegue atenuar essa carga poluidora exposta e voltar a um estado aceitável.

No Reino Unido, a vulnerabilidade foi associada ao tempo de percolação do poluente; quanto mais rápida a percolação, mais alta a vulnerabilidade. O próprio país identificou erros neste sistema pelo fato das áreas de descargas praticamente não assumirem alta vulnerabilidade. Outro fator está relacionado à espessura das camadas subjacentes ao aquífero, sendo altamente vulneráveis camadas pouco espessas. Este conceito foi questionado, uma vez que camadas finas, porém impermeáveis, teriam vulnerabilidade reduzida.

Até as décadas de 70 e 80 os mapeamentos de vulnerabilidade eram feitos a partir de considerações diversas. Além de ter definido a metodologia DRASTIC para o mapeamento da vulnerabilidade, a Comissão das Comunidades Europeias, em 1991, tomou como base as colocações feitas na conferência internacional sobre "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants" realizada nos Países Baixos, em 1987, entre as quais: **“a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente é função apenas das características intrínsecas do aquífero”**.

Por sua vez, Foster e Hirata (Hirata & Fernandes 2008) desenvolveram o método de análise de vulnerabilidade GOD: *Groundwater Hydraulic Confinement, Overlying strata, Depth to groundwater table (unconfined) or strike (confined)* e consideram um conjunto de características que conduzem uma tendência de resposta do meio à uma determinada carga poluente. Segundo Lobo Ferreira (1997), o método GOD propõe que a vulnerabilidade seja definida como **“a capacidade do meio atenuar a ação de cargas contaminantes”**. O conceito de vulnerabilidade foi desenvolvido no sentido de “adequar a atividade humana em função da capacidade de suporte do meio, ou seja, quanto ele pode atenuar cargas contaminantes; é fazer uma parceria com as características naturais do terreno para uma ocupação ambientalmente responsável”. Para Foster e Hirata (Hirata & Fernandes, 2008) o risco de poluição à água subterrânea depende da vulnerabilidade do aquífero e também da exposição ao contaminante.

Worrall & Kolpin (2004) descrevem o risco de poluição das águas subterrâneas como depende não somente da vulnerabilidade, mas também da existência de uma carga poluente significativa e, para isso, sugerem a avaliação do pesticida e da sua interação com o meio.

A partir das idéias expostas, verifica-se que há uma distinção clara entre conceitos de vulnerabilidade e risco a serem utilizados neste trabalho, portanto:

*Vulnerabilidade* é a suscetibilidade do meio às cargas poluentes, controlada por características intrínsecas do aquífero. Entre os fatores controladores da vulnerabilidade estão o relevo, a profundidade do aquífero, o tempo de residência, os tipos de rocha e de solo, a disponibilidade de água para recarga.

A diferença entre vulnerabilidade intrínseca e específica é que a primeira aborda a possibilidade de ocorrer contaminação sem considerar o contaminante, enquanto a específica se refere à vulnerabilidade a um contaminante de interesse, ou representativo na região, e sua dispersão no meio (Oliveira & Lobo Ferreira 2004, Almasri 2007).

Para Nobre *et al.* (2007), não raro, os modelos de vulnerabilidade e risco falham por desconsiderar alguns fatores importantes, destacando entre eles a caracterização geológica e a interação do contaminante com o meio. A questão é que esse tipo de informação se torna dispendiosa para a gestão ambiental do município (ou outro órgão responsável), além de limitar a um específico contaminante, sendo que não expressa a variedade de composição dos resíduos urbanos e industriais. Portanto, a vulnerabilidade é normalmente mapeada a partir do conceito de vulnerabilidade intrínseca.

O *Risco* considera a vulnerabilidade associada a exposição do ambiente à contaminantes e quaisquer fatores que possam levar o ambiente ao desequilíbrio e à insustentabilidade, como os diversos usos da terra. O risco está ligado à presença concreta de um fator externo que possa causar desequilíbrio no meio ambiente (Oliveira & Lobo Ferreira 2004, Nobre *et al.* 2007).

Para Rahman (2008), o mapeamento da vulnerabilidade é definido como uma técnica que quantifica a sensibilidade do meio e contribui por ser uma ferramenta de visualização das áreas vulneráveis, onde se objetiva o planejamento ambiental. A utilização de *softwares* para modelagem tem mostrado uma eficiente ferramenta para avaliação e gerenciamento ambiental.

### **2.3 Método DRASTIC**

Escolhido para avaliar a vulnerabilidade de águas subterrâneas dos municípios citados, o método DRASTIC (Aller *et al.* 1987) resultou de um complexo estudo feito pela EPA – Agência de Proteção Ambiental dos EUA. A metodologia aplicada pela EPA para caracterizar o potencial de poluição das águas subterrâneas pode ser dividida em duas grandes partes: a identificação de conjuntos hidrogeológicos e a aplicação do índice DRASTIC.



A identificação de conjuntos hidrogeológicos ocorre principalmente pelo tipo de rocha, quando maciça ou porosa, constituindo de comportamento hidrogeológico específico; além do clima e precipitação, que possibilitam a recarga. Em suma, para a delimitação dos conjuntos hidrogeológicos são observados os seguintes constituintes do ambiente: litologia, relevo, condições climáticas e capacidade de armazenamento de água.

O DRASTIC é um método multiparamétrico que se apresenta de forma bastante completa por envolver mais variáveis, as quais formam o acrônimo: profundidade do nível da água (D), recarga (R), material do aquífero (A), tipo de solo (S), topografia (T), influência das características da zona vadosa (I) e condutividade hidráulica (C).

Parâmetro D (*Depth of Water Table*) é a profundidade do nível da água subterrânea, onde todos os poros estão preenchidos com água, podendo apresentar forte influência sazonal. Essa profundidade trata da espessura do material que a água meteórica ou contaminante atravessa para chegar ao nível da água ou nível freático a qual está diretamente ligada à proteção natural do aquífero (Rahman 2008). O DRASTIC considera profundidades as quais apresentam mudanças quanto ao potencial à poluição das águas subterrâneas (Aller *et al.* 1987).

Parâmetro R (*Net Recharge*) é a quantidade de água por unidade de área que infiltra na superfície e chega ao nível freático, sendo esta água disponível por precipitação ou fontes artificiais como irrigação (Aller *et al.* 1987, Rahman 2008). A quantidade de água é um fator importante para a diluição e dispersão de contaminantes; portanto, o aumento da recarga implica em aumentar a vulnerabilidade de contaminação pelas águas subterrâneas no aquífero.

Parâmetro A (*Aquifer Media*) se refere ao mapeamento geológico da área distinguindo as rochas com potencial para armazenar e transmitir água subterrânea. O material geológico condiciona o fluxo de água e o tempo de atenuação devido às características físicas e mineralógicas, tais como: porosidade, permeabilidade, tamanho de grão, composição de argilominerais e óxidos. O aquífero confinado tem maior proteção natural quanto à infiltração de contaminantes; portanto, são menos vulneráveis.

Parâmetro S (*Soil Type*) se refere ao solo como atenuador da carga poluente. Características do solo como espessura, textura, expansibilidade e contratibilidade, teor em matéria orgânica têm influência direta sobre a vulnerabilidade. O método DRASTIC atribui valores altos na escala da vulnerabilidade para os solos rasos em contraponto aos solos espessos. A granulometria também é incluída na escala, assim como a mineralogia das argilas. Os



argilominerais não expansivos ganham valores menores de vulnerabilidade relativa por apresentarem maior estabilidade geoquímica, enquanto os argilominerais expansivos são mais reativos.

Parâmetro T (*Topography*) se refere ao declive que condiciona o escoamento e/ou infiltração do poluente. Ao considerar o mesmo material geológico, locais com baixo declive são mais vulneráveis devido ao maior potencial de infiltração. Já locais com elevado declive mostram maior potencial de escoamento associados a valores baixos de vulnerabilidade.

A declividade é também um fator pedogenético porque controla a formação e espessura dos solos. Quando pouco íngreme, favorece a produção do manto de alteração da rocha, estágio inicial da formação do solo. Intervalos foram limitados pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos e indicam que solos em locais de 0 a 2% de declividade está relacionado a maior oportunidade para o poluente infiltrar porque nessas áreas o escoamento é baixo ou nulo. Na figura 1, os intervalos de pontuação são apresentados de acordo com a declividade. Assim, consideraram que declividades com mais de 18% são menos sujeitos a infiltração porque justamente designam locais suscetíveis a erosão e baixa infiltração.

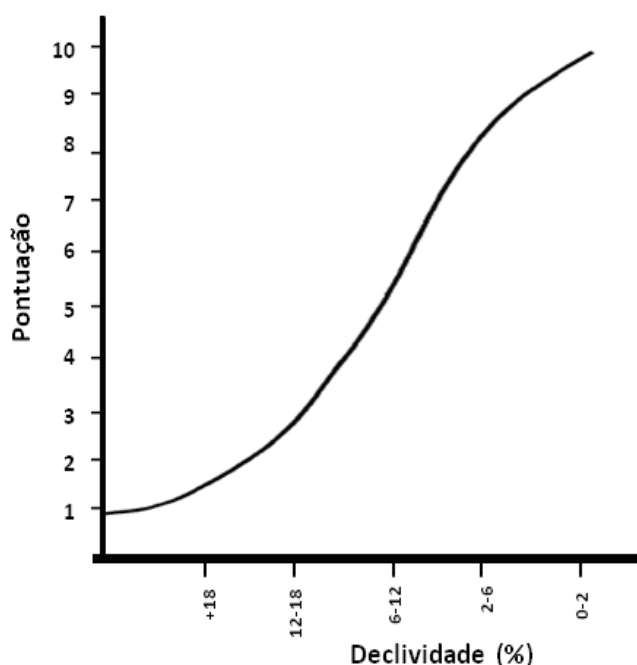


Figura 1: Gráfico da declividade (%) em relação a pontuação do parâmetro T. Fonte: Aller *et al.* 1987.

Parâmetro I (*Impact of Vadose Zone*) se refere ao material que constitui a zona vadosa, ou seja, acima do nível freático. O material da zona vadosa, junto com a profundidade do nível de água subterrânea (parâmetro D) são os parâmetros de maior peso. Isso se deve ao tipo de material no qual se dá a percolação de água e/ou contaminante e sua capacidade de atenuação do contaminante. Aller *et al.* (1987) consideram este parâmetro importante devido aos processos que ocorrem como biodegradação, neutralização, volatilização, dispersão e depuração, os quais diminuem com a profundidade.

Para o aquífero semiconfinado a não confinado, a zona vadosa deve ser avaliada diante da classificação como o material predominante e mais atuante como *pathway*. Para o aquífero confinado, o material a ser considerado é aquele que está sobre o topo do aquífero sendo a camada confinante e/ou zona vadosa.

Parâmetro C (*Hydraulic Conductivity*), que culmina o acrônimo DRASTIC, refere-se à capacidade do material em transmitir água e fluir pelo gradiente hidráulico. Assim como a condutividade hidráulica do aquífero oferece dados da taxa de transmissão da água, essa propriedade também pode se referir ao contaminante exposto no meio ambiente que infiltra no aquífero. A condutividade hidráulica é controlada pela conectividade de poros e juntas.

Cada parâmetro do DRASTIC tem um mapa associado com um peso ( $W_p$ ) de 1 a 5, como mostra a tabela 1, refletindo o grau de importância do parâmetro, como também uma pontuação (P) de 1 à 10 em função das características locais. Quanto maior o valor de P, mais vulnerável o ambiente se apresenta em relação ao parâmetro analisado.

Tabela 1: Parâmetros que constituem o método DRASTIC, peso e pontuação.

	Parâmetros	Peso	Pontuação (P)	Valor Máximo
D	Nível da água	5	1-10	50
R	Recarga	4	1-10	40
A	Material do aquífero	3	1-10	30
S	Solo	2	1-10	20
T	Declividade	1	1-10	10
I	Zona Vadosa	5	1-10	50
C	Condutividade Hidráulica	3	1-10	30
<b>Somatório: Vulnerabilidade</b>				<b>230</b>

Fonte: Aller *et al.*(1987).

O peso do parâmetro ( $W_p$ ) é multiplicado por sua pontuação ( $P_p$ ). A relação matemática dos pesos e pontuações dos parâmetros se resume a equação (1) e o somatório final representa a vulnerabilidade (V):

$$V = W_D.P_D + W_R.P_R + W_A.P_A + W_S.P_S + W_T.P_T + W_I.P_I + W_C.P_C \quad (1).$$

Substituindo o peso dos parâmetros da tabela 1, obtém-se a equação (2):

$$V = 5.P_D + 4.P_R + 3.P_A + 2.P_S + 1.P_T + 5.P_I + 3.P_C \quad (2).$$

Os intervalos das classes de vulnerabilidade são:

- muito alta >199
- alta 160 - 199
- intermediária 120-159
- baixa <120.

A USEPA ressalta que as pontuações para os parâmetros D, A e I são passíveis de modificação de valores pelo usuário para melhor ajuste de acordo com o conjunto hidrogeológico e características específicas da sua área de estudo e, portanto, o índice DRASTIC é uma ferramenta de avaliação relativa e não um resultado absoluto.

Este método é utilizado em escala mundial, porém, tem-se acompanhado pela literatura, a utilização de lógica *fuzzy*<sup>4</sup> e de modificações dos parâmetros na adequação frente às características peculiares da área de estudo (Dixon 2005, Nobre *et al.* 2007). Modificações nos modelos criados através do método DRASTIC também podem ser observadas quanto a análise integrada do uso do solo (Secunda *et al.* 1998, Dixon 2005, Nobre *et al.* 2007, Almasri 2007, Rahman 2008, Leone *et al.* 2009).

---

<sup>4</sup> A teoria da Lógica Fuzzy envolve um conjunto (de elementos, objetos, características) em que não há descontinuidades (variáveis imprecisas), nem distinção abrupta entre os elementos pertencentes e não pertencentes ao conjunto, mas sim, graus de pertinência para a valoração de um determinado parâmetro, formando “conjuntos nebulosos” (*Fuzzy Sets*). A teoria Fuzzy estabelece que dois eventos opostos possam coexistir e não somente a premissa da propriedade “verdadeira ou falsa”. Um determinado elemento pode existir em categorias diferentes, mas com graus de pertinência diferentes. O processo de agregar um valor a um determinado parâmetro de acordo com o grau de pertinência do elemento no conjunto é chamado de *fuzzy*ificação, onde o intervalo de valores é especificado (exemplo da pontuação, no caso do método DRASTIC). As leis que coordenam a Lógica Fuzzy permitem integrar dados de caráter contínuo, onde características qualitativas adquirem valor quantitativo e apontam classes como baixa, média e alta vulnerabilidade. Atribui-se pesos para intervalos de valores. A interação entre *layers* com pesos podem gerar classes à exemplo de classes de vulnerabilidade de águas subterrâneas, classes de atuação de um contaminante etc. (Dixon 2005, Nobre *et al.* 2007).

Segundo Oliveira e Lobo Ferreira (1997), o método DRASTIC produz bons resultados no estudo de vulnerabilidade de águas subterrâneas porque envolve mais variáveis do que a maioria dos métodos similares. Porém, algumas limitações são verificadas, até porque este método foi criado para análise de águas subterrâneas associadas a atividades agrícolas e pode-se necessitar incluir outros tipos de uso do solo. A EPA desenvolveu o DRASTIC em uma abordagem geral e outra para áreas com aplicação de pesticidas.

Muitos autores defendem a inserção do estudo da interação do meio com um contaminante específico (Antonakos & Lambrakis 2007, Nobre *et al.* 2007, Rahman 2008, Leone *et al.* 2009). Secunda *et al.* (1998) avaliam a vulnerabilidade de águas subterrâneas com o uso do método DRASTIC aliado a um índice de uso do solo. Nobre *et al.* (2007) sugeriram a adição de outros índices juntos ao método DRASTIC para análise de vulnerabilidade e risco, o LULC (*Landuse and Landcover*), além do modelamento 3D com auxílio do MODFLOW<sup>5</sup> a partir de dados de poços e localização de fontes difusas e pontuais de contaminação. O mapa de vulnerabilidade do DRASTIC, neste caso, foi associado ao índice de qualidade de água por nitratos e cloretos, já Rahman (2008) relaciona com espécies de metais potencialmente tóxicos.

Pode-se ampliar consideravelmente os estudos de vulnerabilidade e de risco de contaminação de acordo com as ferramentas SIG (Sistema de Informações Geográficas) disponíveis. A eficiência desta metodologia também está associada à escolha de parâmetros que serão investigados e, também, a interdependência de parâmetros, o que é questionado por alguns autores. A possível supervalorização de algum parâmetro pode ocorrer de acordo com as características intrínsecas do local, com a possibilidade deste ser suprimido ou aprimorado.

Além disso, enfatiza-se que os mapas gerados pelo método multiparamétrico devem ser criticamente analisados para se constatar a relação convergente com a realidade.

O método DRASTIC discorre sobre vários conjuntos hidrogeológicos nos Estados Unidos. Para exemplificar, a tabela 2 mostra os pesos e pontuações pelo método DRASTIC para o *Hawaiin Islands hydrogeologic setting*, formado por terrenos elevados de rochas vulcânicas (Aller *et al.* 1987).

---

<sup>5</sup> Esse tipo de modelagem é utilizado para estudo de vulnerabilidade de águas subterrâneas na integração de dados de evapotranspiração, infiltração, fluxo de aquíferos livres, confinados ou semiconfinados, condutividades hidráulicas, coeficientes de armazenamento e transmissividades. O MODFLOW é um dos modelos numéricos utilizados de águas subterrâneas tridimensional.

Tabela 2: Valores do DRASTIC aplicados para o conjunto hidrogeológico, exemplo das Ilhas do Hawaii.

Parâmetro	Característica da área	Peso	Pontuação	Valor final
Nível da água	75-100	5	2	10
Recarga	10+	4	9	36
Material do aquífero	basalto	3	9	27
Solo	Silte-lama	2	6	12
Declividade	12-18	1	5	5
Zona Vadosa	basalto	5	9	45
Condutividade Hidráulica	1000-2000	3	10	30
<b>Somatório para valor da Vulnerabilidade</b>				<b>165</b>

Fonte: Aller *et al.* 1987.

Outro exemplo é o conjunto hidrogeológico *Colorado Plateau and Wyoming Basin*, formado por rochas sedimentares consolidadas, baixa recarga, com peso e pontuações referidas na tabela 3.

Tabela 3: Valores do DRASTIC aplicados para o conjunto hidrogeológico exemplo do platô do Colorado.

Parâmetro	Característica da área	Peso	Pontuação	Valor final
Nível da água	75-100	5	2	10
Recarga	0-2	4	1	4
Material do aquífero	Sequências sedimentares	3	6	18
Solo	Fino ou ausente	2	10	20
Declividade	12-18	1	2	2
Zona Vadosa	Sequências sedimentares	5	6	30
Condutividade Hidráulica	1-100	3	1	3
<b>Somatório para valor da Vulnerabilidade</b>			<b>97</b>	

Fonte: Aller *et al.* 1987.

## 2.4 Fluxos subsuperficial e subterrâneo e relação com a mobilidade de contaminantes

A circulação das águas em meio subterrâneo é controlada por características intrínsecas do aquífero citadas por Hausman (1966): variação litológica, espessamento dos pacotes e padrões estruturais. Este mesmo autor descreve o Aquífero Serra Geral cuja circulação das águas é controlada pela disjunção do basalto e “pode percorrer grandes distâncias e a recarga devido a isto [circulação das águas] se processar a partir de zonas muito

afastadas, principalmente quando estão interconectadas por juntas de origem tectônica”. O artesianismo em meio ao basalto é explicado pela infiltração da água em pontos altos, favorecidas pelas juntas verticais que permitem uma circulação mais acessível devido a ação da gravidade.

No aquífero sedimentar, o fluxo também pode ser retardado pela variação granulométrica, com presença de finos, constituindo assim, uma barreira física da mobilidade tanto das águas como de contaminantes, considerando sempre a sua solubilidade.

O processo de atenuação de contaminantes foi discutido por Aller *et al.* (1987), os quais citam variáveis envolvidas na atenuação dos contaminantes. Os fatores que interferem no grau de atenuação são: 1) tempo que o contaminante está em contato com o material; 2) tamanho de grão e características físico-químicas do material pelo qual passa o contaminante; e 3) distância percorrida pelo contaminante. Os processos de atenuação envolvem as características da área, do contaminante e sua carga do contaminante descartado.

A mobilidade de agrotóxicos e outros diversos contaminantes, tanto no solo como na rocha constituinte do aquífero, é controlada por uma complexidade de fatores que dificultam a exatidão de diagnóstico e prognóstico de plumas de contaminação. Gomes *et al.* (2008b) relaciona o movimento de agroquímicos com a condutividade do solo, declividade do terreno, profundidade do nível da água no estudo de vulnerabilidade natural de solos. Para o mapa de vulnerabilidade de águas subterrâneas, estes fatores são desenvolvidos no método multiparamétrico.

A condutividade hidráulica da rocha é expressa pela lei de Darcy a fim de se obter a taxa de fluxo de água para corpos homogêneos saturados (Press *et al.*, 2007), sintetizada nas equações (3) e (4):

$$Q = \kappa \cdot A \cdot I \quad (3)$$

e o gradiente hidráulico I, é definido por

$$I = \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad (4).$$

Onde:

Q é a vazão (volume/tempo);

K, condutividade hidráulica;

A é a seção transversal do material; e

I, o gradiente hidráulico;

$\Delta L$ : distância percorrida pelo fluido; e

$\Delta H$ : carga hidráulica.

O gradiente hidráulico ( $I$ ) é a razão entre a distância percorrida pelo fluido ( $\Delta L$ ) e a carga hidráulica ( $\Delta H$ ).

Através da lei de Darcy, algumas observações são feitas:

- Quanto maior o desnível entre os pontos da superfície freática, maior é o gradiente hidráulico e o avanço do fluxo subterrâneo.
- A constante  $k$  de condutividade hidráulica é característica intrínseca do meio geológico.

Para solos não-saturados a lei de Darcy (equação 3) deve ser adaptada. O fluxo em subsuperfície pode ocorrer quando o material está saturado e não-saturado. Neste caso, a frente de umedecimento é inicialmente lenta, tornando-se mais rápida à medida que avança para a condição de saturação. A figura 2 mostra a velocidade de infiltração básica (VIB), representada pela linha pontilhada vertical, que mostra a condição de saturação do solo e limita a área de validade da lei de Darcy.

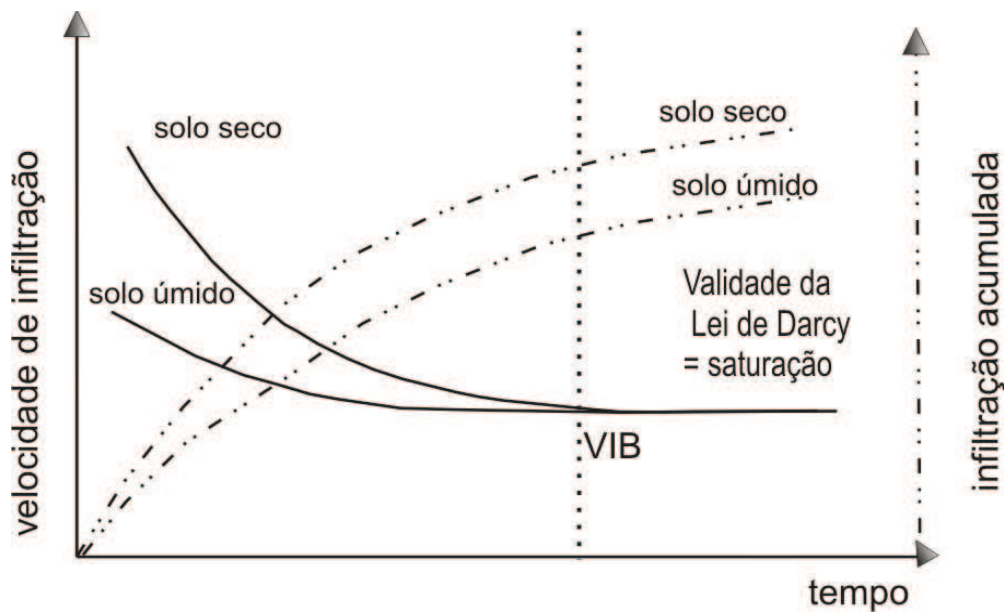


Figura 2: Esquema do comportamento de infiltração de água no solo. Fonte: adaptado de Carvalho e Silva 2006.

Esta mesma figura mostra que o solo não-saturado (seco) consegue absorver mais água (infiltração acumulada) em menos tempo, tendo comportamento assintótico constante na estabilização quando ocorre a saturação. Para o solo úmido, o comportamento é idêntico, porém as taxas são mais lentas. A condutividade passa a depender da umidade, deslocamento da carga hidráulica e da pressão matricial do solo, cuja relação é expressa pela equação (5):

$$Q = \kappa(\theta).A.\frac{\Delta(\psi + h)}{h} \quad (5).$$

Onde:

$Q$ : vazão (volume/tempo);

$k$ : condutividade hidráulica;

$\theta$ : umidade;

$A$ : seção transversal;

$\psi$ : pressão matricial do solo;

$h$ : deslocamento da carga hidráulica.

O fluxo hidráulico para solos saturados e para o aquífero segue a Lei de Darcy. Além das características expressas por essa lei, as características físico-químicas da substância são importantes tanto na mobilidade quanto na reatividade com o meio. O comportamento do contaminante se diferencia da água pela capacidade de adsorção/absorção, solubilidade e reatividade. A reatividade contribui no controle dos pulsos da frente de avanço do fluxo, pois o solo e a rocha possuem cargas críticas de absorção e adsorção, liberando a substância e fazendo com que a frente de contaminação avance.

Para a área de abrangência do Aquífero Serra Geral, Hausman (1966) conclui que nas áreas em que o solo é pouco espesso e havendo um período prolongado sem chuvas, pode ocorrer o déficit de recarga, o qual é tanto mais acentuado quanto maior for os dias sem chuva ou maior a estiagem.

A diversidade da intensidade de precipitação, em várias estações do ano, favorecem o déficit no verão uma vez que nessa época as precipitações são de grande intensidade e pouca duração, não dando tempo para a infiltração das águas no solo, na grande maioria, pouco permeáveis (devido a alteração do basalto e formação de solos argilosos). Em virtude do desmatamento a retenção das águas vadasas tornou-se menor, e como consequência maior o fluxo superficial (escoamento facilitado).

## **2.5 Aspectos físico-químicos e mineralógicos associados a dinâmica de contaminação**

O estudo da mobilidade de contaminantes compreende os fluxos subsuperficial e subterrâneo, a geodisponibilidade e a reatividade das espécies químicas. Banat *et al.* (2005) associam a vulnerabilidade e o risco de contaminação das águas subterrâneas às características físico-químicas de transporte dos solos e rochas e, entrada de contaminantes no subsolo pela ação antrópica.

Baird (2002) cita três fatores para a retenção de metais pesados:

I) adsorção sobre as superfícies dos minerais como óxidos, hidróxidos e argilominerais;



II) complexação por substâncias húmicas que são quelantes na formação de anéis quelatos de íons metálicos. A complexação ocorre nos íons metálicos e grupos  $-\text{COOH}$  de ácidos húmicos e fúlvicos e substituição do metal  $\text{M}^{+2}$  em íons  $\text{H}^+$  na estrutura de anel benzênico; e  
III) reações de precipitação ocorrem quando o ambiente é ácido para haver mobilidade suficiente para precipitar, a exemplo do ácido monossilícico  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ .

Muitos estudos são feitos para compreender como os metais estão disponíveis no ambiente. Substâncias extratoras são utilizadas para o estudo da mobilidade de elementos químicos por complexação, adsorção e precipitação. São reagentes que atuam de forma fracionada na amostra porque possuem graus diferentes de extração de íons devido a formas químicas, agindo primeiro o reagente sobre as ligações mais fracas e assim, sucessivamente.

Banat *et al.* (2005) indicam a correspondência da fração argila-silte na retenção de metais. Se o solo for ácido, há maior liberação do lixiviado devido à repulsão de cargas positivas, então a dispersão e transporte do elemento será mais intensa (Amaral Sobrinho *et al.* 1999, Banat *et al.* 2005). Portanto, o potencial hidrogeniônico interfere na retenção de metais. Estudos desses autores demonstram a correlação positiva entre pH e a distribuição de metais.

A capilaridade do solo é outra característica importante na filtragem de substâncias devido ao tamanho dos poros. Os microporos ocorrem geralmente em solos argilosos. A água retida nesses poros é submetida à forças de adsorção e afetam o comportamento hidráulico (Langmuir 1997). Os argilominerais têm propriedades peculiares em sua superfície, o desequilíbrio de cargas, que as faz sorvente potencial para espécies que são expulsas pela tensão superficial dos micro e mesoporos.

Os argilominerais são filossilicatos de tamanho argila e possuem propriedades físico-químicas diferenciadas de acordo com a sua estrutura química. Incluem reações significativas como a tendência de alcançar o equilíbrio em sistemas água-sedimento na adsorção de cátions, por se comportarem como colóides iônicos, onde a superfície apresenta desequilíbrio de cargas (Langmuir 1997).

A carga de superfície dos argilominerais pode ser permanente e independente da composição da solução, ou variável, trocando com a solução do solo/rocha. A capacidade de troca catiônica<sup>6</sup> (CTC) da esmectita e vermiculita é permanente e independente da solução do

---

<sup>6</sup> A capacidade de troca catiônica é a medida da quantidade de cátions (número de mols) por massa de material seco que são adsorvidos de forma reversível (Baird, 2002). Portanto, é indicador de retenção de elementos químicos disponíveis no meio através da troca iônica. Pode ser definida também como todos os cátions trocáveis. Quanto maior for a CTC, maior é a atividade do material.

solo/rocha. De forma diferente, os oxihidróxidos metálicos e caolinitas tem superfície com cargas fortemente dependentes do pH.

Em geral, os argilominerais podem ter íons fixados na superfície, entre camadas e ainda nos interstícios da estrutura cristalina. A CTC do argilomineral também está associada ao desequilíbrio de cargas devido às quebras de ligações nas arestas das partículas ou ligações não completas, é o que ocorre no caso das caolinitas, e substituições de hidrogênio e hidroxilas. A capacidade de troca catiônica aumenta quanto mais imperfeições tiver a rede cristalina (Souza Santos 1989). A superfície específica depende do tamanho e forma das partículas. As partículas placóides mais largas apresentam maior superfície por volume ou área (Hillel 1980).

Este mesmo argilomineral tem a estrutura 1:1, mais organizada (*well-packed*), ou seja, é a sobreposição de uma camada de tetraedros de sílica e outra de octaedros de alumina cujas camadas são dificilmente separados. Como sua estrutura não permite a entrada de cátions entre as camadas, não apresenta a característica de expansibilidade, somente ligações devido a sua área superficial específica e ligações de borda. Como a adsorção de cátions pode ser feita com facilidade somente na superfície ou nas bordas das camadas, a caolinita é considerada um argilomineral mais estável que as esmectitas. Essas características proporcionam à caolinita uma baixa capacidade de troca catiônica e alta estabilidade molecular (Miranda-Trevino & Coles 2003) porque as substituições isomórficas são muito difíceis de ocorrer.

A esmectita tem estrutura 2:1, ou seja, composta pela intercalação de duas camadas de tetraedros de sílica para uma camada de octaedros de alumina. Uma importante propriedade físico-química é a capacidade de sorção<sup>7</sup> de moléculas entre as camadas dos planos 2:1 para a compensação de carga elétrica. A capacidade de englobar moléculas, relacionada com a expansibilidade, faz com que a esmectita seja instável de acordo com as características do meio, como pH e temperatura, além da disponibilidade de cátions. Esse comportamento interfere diretamente na retenção, e também na mobilidade de contaminantes e metais pesados. Seguem abaixo valores de CTC citados por Apelo e Postma (1993) na tabela 4.

---

<sup>7</sup> Sorção é um termo genericamente utilizado porque muitas vezes se torna difícil distinguir a adsorção de absorção. Segundo Hillel (1980) a adsorção é um fenômeno que resulta de forças que ocorrem através de moléculas e íons na superfície exposta das diferentes fases da estrutura cristalina. Já a absorção ocorre quando essas fases se penetram, ocorrendo a troca de íons dentro da estrutura. As moléculas polares de água são aderidas nas faces pela diferenças de cargas elétricas. Para este mesmo autor, solos argilosos apresentam um forte mecanismo de adsorção de água.

Tabela 4: Capacidade de troca catiônica de minerais e matéria orgânica.

	CTC meq.100 <sup>-1</sup> g
Caolinita	3-15
Haloisita	5-10
Montmorilonita (esmectitas)	80-120
Vermiculita	100-200
Glauconita	5-40
Ilita	20-50
Clorita	10-40
Alofano	Acima de 100
Goethita e hematita	Acima de 100
Matéria orgânica (pH=8)	150-400

Fonte: Apelo e Postma, 1993.

A presença de argilominerais expansivos é associada a um ambiente de alta vulnerabilidade e esse fato pode ser imediatamente relacionado às variações climáticas (precipitação, temperatura) que provocam a expansão por adsorção, mas também a contração devido ao calor e períodos mais secos.

A argila que contém esmectita pura e/ou misturada com areia apresenta baixa permeabilidade para água (Langmuir 1997). A presença de esmectita pode diminuir ainda mais a permeabilidade quando expandida. Porém, em períodos de estiagem, a retração das esmectitas pode fissurar o solo (típico de solos vérticos), permitindo a livre entrada dos poluentes. Como este argilomineral absorve, mas também libera íons, o método DRASTIC, por exemplo, coloca-o como fator que contribui para a alta vulnerabilidade do meio.

Outros fatores que interferem na infiltração e percolação de água e/ou contaminante em subsuperfície são cobertura vegetal e estrutura do solo. O tipo de cobertura vegetal implica na retenção de água pelas raízes, como plantas aciculares e, distribuição de água horizontalizada nos caso das plantas de raízes radiais.

A estrutura do solo também é considerada na infiltração (Dixon 2005), sendo que solos de estrutura granular favorecem a infiltração, ao contrário de solos de estrutura em blocos ou planar. Isso ocorre pelo arranjo dos grãos e teor de matéria orgânica, onde o material coloidal expande e preenche microfaturas, diminuindo a infiltração. Todos os fatores citados devem ser integrados na caracterização do material superficial de proteção do aquífero.

### 3. MÉTODO E TÉCNICAS

O método aplicado para o estudo de vulnerabilidade e risco de contaminação de águas subterrâneas é dividida em quatro etapas. A etapa A trata-se da obtenção de dados primários e secundários de geologia, hidrogeologia, recarga, relevo e solos. A etapa B é o enquadramento dos dados nos parâmetros propostos no método DRASTIC, bem como a atribuição da pontuação. A etapa C é a confecção do mapa final de vulnerabilidade e a divisão em classes de alta, média e baixa vulnerabilidade de contaminação de águas subterrâneas. Alguns indicadores para a análise de risco são apontados através do cruzamento do mapa de classes de vulnerabilidade e mapa de uso da terra, na etapa D, assim como análises químicas de água subterrânea disponibilizadas pela CORSAN e CPRM-SIAGAS. As etapas são indicadas pelo fluxograma (figura 3).

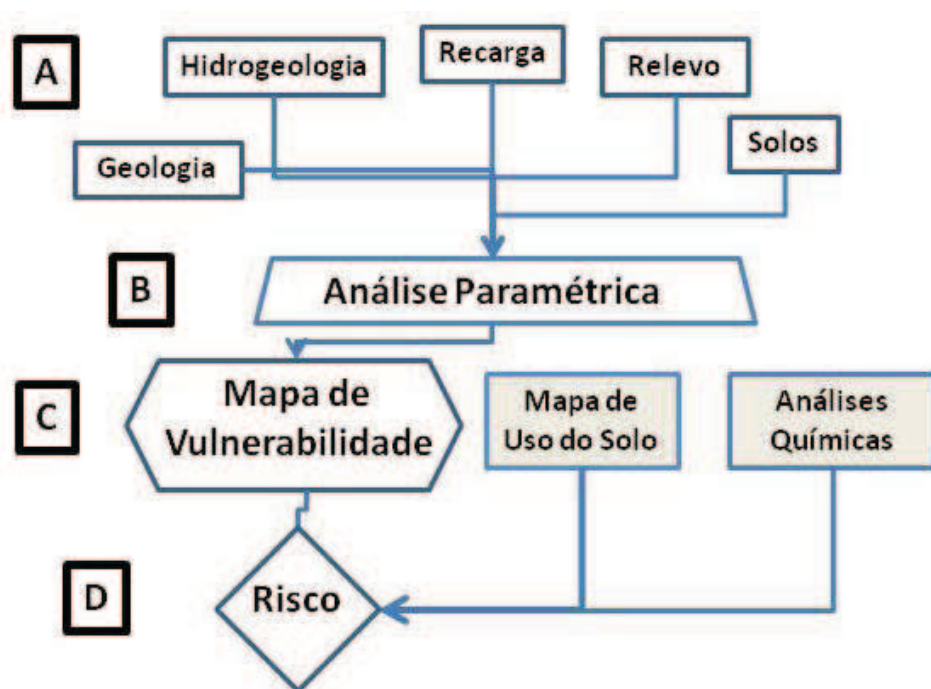


Figura 3: Fluxograma da abordagem geral do problema.

Como foi apresentado no capítulo 2, item 2.3 (p. 25), os parâmetros que compõe o método DRASTIC são: Nível da água, Recarga, Material do aquífero, Solo, Declividade, Zona vadosa e Condutividade hidráulica. A seguir são apresentadas as técnicas de sensoriamento remoto e o geoprocessamento na aquisição de dados para a construção de planos de informação para cada parâmetro.

Cada parâmetro do índice DRASTIC refere-se a um mapa que, no ambiente SIG trata-se de um plano de informação, o qual é constituído de polígonos com pesos e pontuações. A criação dos planos de informação, tipo *shapefile* no ambiente SIG, foi realizada através dos softwares ILWIS 3.3 (*Integrated Land and Water Information System*) e ArcView 9.3.1 GIS. Esta é a etapa de classificação por pesos pelo método DRASTIC. Após esta etapa, os planos de informações são somados a fim de gerar o mapa de vulnerabilidade.

### **3.1 Descrições das etapas A e B: coleta de dados primários e secundários e parametrização**

A primeira etapa de trabalho iniciou com a fotointerpretação com os pares de fotografias aéreas (METROPLAN 1990) da área da Sub-bacia do Arroio Portão na escala de 1:60.000 com objetivo de identificação preliminar das unidades fotogeológicas. A segunda etapa teve como objetivo observar a realidade de campo como as variações litológicas associadas a aspectos geomorfológicos, as macroformas identificadas na fotoleitura, que constaram como subsídio primário para a logística de amostragem da topossequência.

A área foi delimitada pela sub-bacia do Arroio Portão, incluindo outros arroios a leste e sudoeste, utilizando a Carta topográfica do Exército 1:50.000, das Folhas São Leopoldo, Novo Hamburgo, Montenegro e Morretes (MD-DL 1975). Essas cartas foram georreferenciadas e transferidas do Datum Córrego Alegre para o Datum WGS-84 no software ArcGIS 9.3.1, uniformizando todos os dados georreferenciados para essa base cartográfica, assim como os dados obtidos de campo.

As propriedades de alguns planos de informações exigiram operações matemáticas executadas no software ILWIS 3.3 (versão *software* livre), como cálculo da declividade, atribuição de valores por pixel dos polígonos e ajustes de borda de polígono na edição, fatiamento (*slicing*) por classes de pontuação para cada parâmetro, soma dos planos finais de informação de cada parâmetro, fatiamento em classes de vulnerabilidade do mapa final de vulnerabilidade.

A seguir, serão tecidas considerações acerca de cada um desses parâmetros, com vistas a detalhar o procedimento realizado para o tratamento de dados. Também são mostradas as tabelas de pontuação do índice DRASTIC para cada parâmetro. Neste caso, não houve a preocupação de desenvolver os parâmetros na ordem do acrônimo, mas sim, em grandes áreas: geologia, hidrogeologia, recarga, relevo e solos.

### 3.1.1 Geologia

No estudo geológico, as unidades litológicas e lineamentos tectônicos foram identificados pelo trabalho de campo, correlação com os mapas geológico e estrutural da CPRM (2008), interpretação de imagens de satélite LANDSAT sensor TM5 pela banda 4 e pela composição de bandas 345, além dos fotogramas aéreos 1:60.000 (METROPLAN 1990).

O mapa geológico foi finalizado no ambiente SIG também com dados de poços da CPRM-SIAGAS e CORSAN. Assim, os domínios hidrogeológicos puderam ser individualizados, incluindo as áreas de afloramento e confinamento do SAG. Esses dados foram integrados por digitalização, poligonização e produção de planos de informação utilizando o *software* ArcGIS 9.3.1.

A pontuação usada pela USEPA para o parâmetro do nível de água do aquífero segue na tabela 5. Valores de maior profundidade conferem ao aquífero menor vulnerabilidade devido ao maior caminho de percolação.

Tabela 5: Pontuação do impacto da litologia do aquífero no mapeamento de vulnerabilidade de águas subterrâneas.

<b>Material Geológico</b>	<b>Pontuação</b>
Folhelho maciço	1-3
Metamórficas e ígneas	2-5
Rochas Metamórfica ou ígnea intemperisadas	3-5
Arenito acamadado fino, calcário, Sequência de xisto	5-9
Arenito maciço	4-9
Calcário maciço	4-9
Areia e cascalho	6-9
Basalto	2-10
Calcário cárstico	9-10

Fonte: Aller *et al.* 1987.

O parâmetro de impacto da zona vadosa trata do tipo de material acima do aquífero que está associado ao manto de alteração da própria rocha que o constitui, sendo que a espessura foi considerada no parâmetro do nível da água. A tabela 6 atribui pontuação desde camadas confinantes sobre o aquífero, a saprolitos e outros tipos de depósitos.

Tabela 6: Pontuação do impacto da zona vadosa no mapeamento de vulnerabilidade de águas subterrâneas.

<b>Materiais constituintes da Zona Vadosa</b>	<b>Pontuação</b>
Camada confinante	1
Silte/argila	2-6
Folhelho	2-5
Calcário	2-7
Arenito	4-8
Calcário/arenito/folhelho acamadado	4-8
Areia e cascalho com significativa argila e silte	4-8
Metamórficas/ígneas	2-8
Areias e seixos	6-9
Basalto	2-10
Calcário cárstico	8-10

Fonte: Aller *et al.* 1987.

### 3.1.2 Hidrogeologia

Os dados hidrogeológicos envolveram dados do aquífero, como condutividade hidráulica e nível piezométrico para construir a superfície potenciométrica.

A superfície potenciométrica foi desenvolvida pela aquisição de dados de 16 poços pela CORSAN e CPRM-SIAGAS. Os valores de nível da água (NA) foram plotados e, através da interpolação de pontos, chegou-se a superfície potenciométrica, a ser classificada pelo referido parâmetro.

Com o objetivo de melhorar o modelo potenciométrico, além dos níveis de água dos poços (NA), pontos de drenagem e nascentes foram adicionados ao plano de informação para gerar a superfície potenciométrica devido à má distribuição dos poços na área de estudo. Nesta etapa foi possível separar em domínios referentes à profundidade do nível freático, de acordo com a classificação DRASTIC/USEPA utilizando a idéia de conjuntos hidrogeológicos proposta por este método.

No aquífero não confinado, pertencente ao SAG, os valores plotados do nível da água são dados pela expressão (6):

$$NA = Z - NE \quad (6)$$

Onde:

NA= nível piezométrico

Z= cota do terreno/boca do poço

NE= profundidade do nível estático determinada em poços tubulares.

Quando o poço estava localizado no aquífero confinado, pertencente ao Sistema Aquífero Serra Geral, a profundidade foi redefinida ao topo do aquífero, que é base da camada confinante. Neste caso, optou-se pelos valores expressos das cotas das nascentes.

Considera-se a aplicação do parâmetro D para diferentes conjuntos hidrogeológicos separadamente. A tabela 7 mostra as variações da profundidade do nível da água e as respectivas pontuações.

Tabela 7: Pontuações das profundidades do nível da água (em metros) no mapeamento de vulnerabilidade de águas subterrâneas.

Classes de profundidade (m)	Pontuação
0-1,5	10
1,6-4,5	9
4,6-9,0	7
9,1-15,0	5
15,1-23	3
23,1-30	2
30+	1

Fonte: Aller *et al.* 1987.

Wojahn (no prelo) obteve os dados de condutividade hidráulica dos arenitos da área de estudo. Essa propriedade foi calculada pelas normas da ABNT-NBR 7181(1984). A tabela 8 define pontuação para intervalos de condutividade hidráulica.

Tabela 8: Pontuações para os intervalos de condutividade hidráulica.

Classes de condutividade hidráulica L/m <sup>2</sup>	Pontuação
$4,72 \cdot 10^{-7}$ - $4,72 \cdot 10^{-5}$	1
$4,71 \cdot 10^{-5}$ - $1,41 \cdot 10^{-4}$	2
$1,40 \cdot 10^{-4}$ - $3,30 \cdot 10^{-4}$	4
$3,29 \cdot 10^{-4}$ - $4,72 \cdot 10^{-4}$	6
$4,71 \cdot 10^{-4}$ - $9,43 \cdot 10^{-4}$	8
$>9,43 \cdot 10^{-4}$	10

Fonte: Aller *et al.* 1987.

O estudo de recarga considera as taxas de escoamento e evapotranspiração. Esses dados são praticamente indisponíveis, portanto, alguns dados bibliográficos foram utilizados a Programa de Pós-Graduação em Geologia – Planejamento Ambiental \_\_\_\_\_ 42



fim de inferir domínios de recarga, além das curvas de isoietas, que foram disponibilizadas pela CPRM-FEPAM (2007).

As isoietas mostram o comportamento pluviométrico geral por precipitação. Através dos dados bibliográficos, procurou-se delimitar os domínios fundamentalmente pela variação litológica que armazena água de forma diferenciada, no caso, os basaltos fraturados, as rochas sedimentares e os depósitos quaternários. A recarga para as condições de não confinamento do aquífero ocorre mais facilmente, sendo áreas mais vulneráveis.

A tabela 9 mostra os intervalos das classes de recarga (mm/ano) e as respectivas pontuações.

Tabela 9: Pontuação para recarga em  $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ .

Classes de recarga (mm/ano)	Pontuação
<50,8	1
50,9- 101,6	3
101,7- 177,8	6
177,9-254	8
>254	9

Fonte: Aller *et al.* 1987.

### 3.1.3 Relevô

O parâmetro relevô, aplicado pelo método DRASTIC, utiliza o mapa de declividade, que é construído a partir do modelo numérico do terreno (MNT). Para isso, as curvas topográficas digitalizadas foram adquiridas de Heine (2008). A interpolação das curvas topográficas foi feita no *software* ILWIS 3.3 pela função “mnt=mapinterpolcontour (mapa de curvas)”. A partir deste mapa *raster* (MNT), obtém-se o mapa de declividade.

A função declividade foi calculada no *software* ILWIS 3.3, como segue:

- 1) Filtragem a partir do MNT onde o *software* linearizou a curva do modelo em duas dimensões, Dx e Dy.
- 2) A declividade em percentagem foi calculada no *software* pela seguinte função:  
“slope= ((HYP(Dx,Dy))/ pixsize(mnt))\*100”.
- 3) Classificação dos intervalos de declive foi feita pela função *slicing* utilizando os intervalos dados pelo índice DRASTIC.

A tabela 10 refere-se a pontuação de acordo com os intervalos de declividade em percentagem estabelecidos pelo método DRASTIC.

Tabela 10: Pontuação para a variação do declive.

Classes de declive em %	Pontuação
<2	10
2-6	9
6,1-12,9	5
13-18	3
>18	1

Fonte: Aller *et al.* 1987.

### 3.1.4 Solos

O estudo do parâmetro solo envolveu duas etapas. A primeira etapa constou em levantamento de dados, como:

- i) análise de campo: características físicas e geomorfológicas;
- ii) ensaio de permeabilidade;
- iii) análise granulométrica; e
- iv) difratometria de raios-X.

Os pontos de coleta de solo acompanharam a variação de declividade (plano, suave ondulado, ondulado), contribuição do substrato rochoso assim como rastejo e variação de características estruturais e texturais de acordo com a localização no perfil topográfico.

#### 3.1.4.1 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi executado em 24 pontos com base nas normas técnicas da ABGE (1996), para ensaio de permeabilidade para trecho situado acima do nível da água. Foram escolhidos pontos dispersos na área de estudo representando a variedade de solos da área. Com o trado manual foi feito perfurações no solo com média de 50 cm de profundidade. A cavidade foi saturada com água e o volume preenchido até a superfície do furo foi controlado por minuto durante 20 minutos.

A vazão foi calculada a partir da quantidade de água colocada na cavidade perfurada até a superfície em 20 minutos. A absorção é a razão da vazão pela profundidade da perfuração do solo. Depois a perda de água específica (PE) foi calculada, tratando-se da razão do volume absorvido no ensaio pela carga em  $L.(min.m)^{-1}$ .

A carga é a razão da espessura do solo perfurado (cm) pelo diâmetro do trado (cm). O Fator de Correção é retirado do gráfico da norma da ABGE para trado de diâmetro 2 ½ pol e multiplicado pelo PE para obter a condutividade hidráulica do solo. A tabela 11 mostra uma tabela modelo com os dados para obter a permeabilidade do solo (k).

PE=perda de água específica

k=permeabilidade do solo

Tabela 11: Exemplo de tabela de dados para obtenção do valor de condutividade hidráulica.

Coluna d'água		Vazão	Absorção	PE	Fator de correção	k
Profundidade m	Carga kg.cm <sup>-2</sup>	L.min <sup>-1</sup>	(L.min <sup>-1</sup> ).m <sup>-1</sup>	(L.m <sup>-1</sup> .min) x(kg.cm <sup>-2</sup> )	-	cm.s <sup>-1</sup>
<b>0,50</b>	0,050	1,033	2,07	4,130	0,49x10 <sup>-4</sup>	2,02x10 <sup>-3</sup>

#### 3.1.4.2 Análise granulométrica

As amostras de solo foram coletadas para análise granulométrica (apêndice) por horizonte de cada perfil em um total de doze perfis selecionados. A escolha desses perfis foi fundamentada na variação do substrato rochoso e a topossequência de solos<sup>8</sup> na Sub-bacia do Arroio Portão.

As análises foram realizadas no Laboratório de Sedimentologia da Unisinos, NESE - Núcleo de Estudos Sedimentares e Estratigráficos e Laboratório de Mecânica dos Solos – Unisinos. A distribuição granulométrica é obtida pela combinação de sedimentação e peneiramento<sup>9</sup> da fração silte/argila de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT 1984).

A seguir são descritos os procedimentos para análise granulométrica:

a) O peneiramento foi iniciado ao desagregar os torrões em almofariz, quarteamento e peneiramento em conjunto de peneiras de tamanhos de grãos argila a cascalho. O material retido foi pesado em cada peneira de números 16, 30, 40, 50, 100 e 200 (equivalentes à 1,2; 0,6; 0,42; 0,3; 0,15 e 0,075 mm respectivamente). O material passante na peneira é calculado pela seguinte equação (7):

<sup>8</sup> Também chamado de perfil topográfico ou catena.

<sup>9</sup> Em apêndice, tabelas e cálculos de cada amostra.

$$Mp = \frac{Mpr.100}{Ws} \quad (7).$$

Onde:

Mp: material da amostra seca passante na peneira (%);

Ws: massa do solo seco da amostra parcial seca → 70 g;

Mpr: material passante subtraído do material retido na peneira.

b) A sedimentação foi feita para obter a distribuição de frequência acumulada granulométrica mais detalhada da porcentagem de grãos para solo argiloso, sendo que o peneiramento se destina para materiais que possuam intervalos granulométricos maiores. Por isso, optou-se no processo combinado de peneiramento e sedimentação.

O ensaio de sedimentação é baseado na Lei de Stokes que relaciona o tempo de decantação com o peso do grão, sendo um processo de separação granulométrica do sedimento. O dispersor foi utilizado para homogeneização e desagregação mecânica, além de química com o defloculante hexametáfosfato de sódio numa concentração de  $45,7\text{g.L}^{-1}$  com repouso de 12 horas.

Na solução (água + amostra), a leitura é feita com o densímetro e controle de temperatura durante as medições. A partir das medidas de temperatura, tempo de decantação, leitura do densímetro, e dados de densidade da água para a temperatura local, densidade de grão e massa da amostra seca, calcula-se a percentagem em peso de cada fração em relação ao peso total da amostra.

#### 3.1.4.3 Difratomia de Raios-X: caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica dos argilominerais auxilia no enquadramento dos tipos de solo na classificação do DRASTIC porque os argilominerais expansivos estão associados a retenção e liberação de íons de acordo com fatores climáticos e o volume do contaminante dispersivo no ambiente. Este processo depende de propriedades físico-químicas da interação dos argilominerais e do contaminante/água e está associado a graus de vulnerabilidade relativa. As amostras destinadas para análise por difratometria de raios-X foram as que representaram os tipos diferentes de solo identificados em trabalho de campo e os horizontes que os constituem. As amostras foram preparadas para análise de mineralogia total e argilominerais.

Para estas análises, contou-se com a colaboração do Laboratório de Difractometria de Raios-X, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul na permissão do uso do difratômetro de raios-X com o equipamento Bruker –SIEMENS AXS Modelo D5000. As condições analíticas para o método do pó, mineralogia total, foram a utilização da amostra moída com variação de ângulo de varredura de 2° a 70°; para argilominerais, o tempo de incidência dos raios-X foi de 3s com variação do ângulo de 2° a 35° em condições analíticas de 40 kV e 25 mA.

As amostras para análise de argilominerais foram separadas (em torno de 50 g) com água bidesionizada, colocadas no agitador orbital por aproximadamente 4 horas até apresentarem aparência homogênea e desagregação mecânica do material. O defloculante, solução de hexametáfosfato de sódio e carbonato de sódio, foi adicionado nas amostras na proporção de 20 ml para 500 ml de solução (água desionizada e amostra) em um béquer e levadas ao ultrassom para desagregação mecânica. Esse último procedimento foi repetido duas vezes.

O próximo passo foi separar a fração menor que 4 µm utilizando a Lei de Stokes para obter essa fração no sobrenadante da solução. Com o auxílio do sifão, a fração menor que 4µm foi separada e esse procedimento ajudou a isolar significativamente a matéria orgânica da parte sobrenadante, de onde se tira o material para fazer a lâmina.

A separação dessa fração foi feita novamente para ambas as amostras, a partir da fração separada, porém, na segunda vez, retirou-se o sobrenadante sem sifão, com a pipeta da fração retirada anteriormente. Esse último material foi levado a centrífuga com a velocidade de 5000 rpm por 10 minutos. O material decantado foi coletado para fazer a lâmina, separação da fração menor que 4 µm.

A difratometria de raios-X para análise dos argilominerais é feita em três lâminas: fração fina seca ao ar (*air dried*), fração fina com etilenoglicol (expansivo) e amostra calcinada por 2h em uma mufla à 550°C.

#### 3.1.4.4 Classificação de domínios de solo

A classificação dos solos em domínios foi feita pela integração dos resultados obtidos de todas as análises, tanto de campo, quanto laboratoriais e enquadrada na tabela 12, proposta pelo método DRASTIC. Observa-se que esta tabela inclui espessura, granulometria e mineralogia de argilas numa ordem de graus de persistência quanto a vulnerabilidade relativa aos solos quanto a entrada de águas e compostos químicos.

No ambiente SIG, essas propriedades foram georreferenciadas e verificadas as suas respectivas distribuições espaciais, associações com o mapa geológico e modelo numérico do terreno (MNT)<sup>10</sup>.

Tabela 12: Pontuação do tipo de solo considerando granulometria, mineralogia de argilas e espessura.

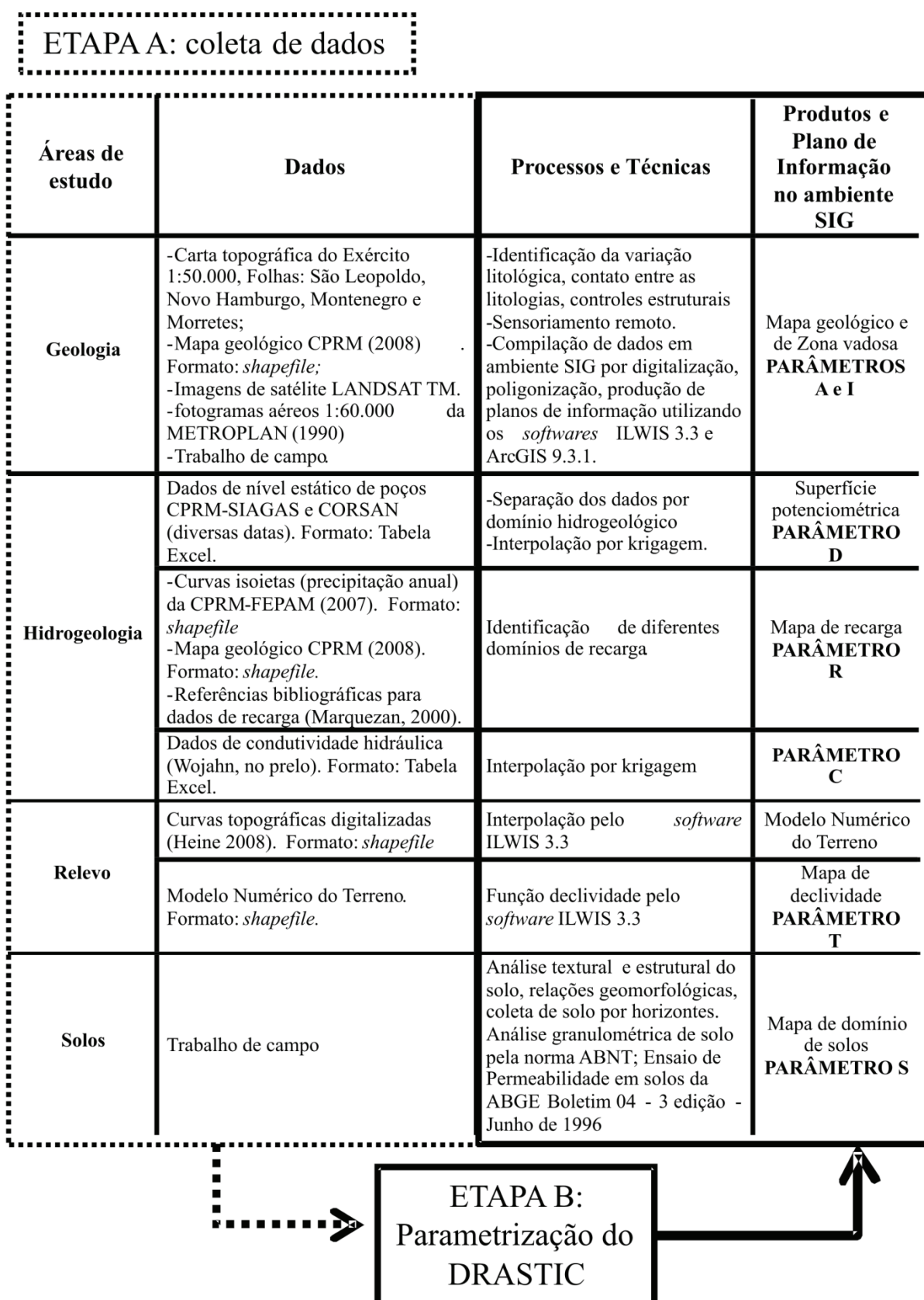
Tipos de Solo	Pontuação
Raso ou ausente	10
Seixo	10
Areia	9
Argila expansiva e/ou agregado de argila	7
Marga areia-argila	6
Marga	5
Marga siltosa	4
Marga argilosa	3
Argila não expansiva e/ou desagregada	1

Fonte: Aller *et al.* 1987.

Um resumo das etapas A e B é apresentado na tabela 13. A etapa A é dividida em quatro grandes áreas: geologia, hidrogeologia, relevo e solos, das quais terão seus dados processados a fim de construir os parâmetros do método DRASTIC na etapa B.

<sup>10</sup> Também referido como MDT (Modelo Digital do Terreno).

Tabela 13: Descrição da etapa A à B. A etapa A é a coleta de dados dos quais são processados e, na etapa B, são adaptados para gerar os planos de informação de cada parâmetros.



### 3.2 Etapa C: Mapa de vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade de contaminação do aquífero é construído através da integração de dados pelo cruzamento de planos de informação dos parâmetros no ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os parâmetros representados por dados pontuais são interpolados e seguido por edição de polígonos de acordo com os intervalos de valores estipulados pelo método DRASTIC. Um exemplo é o parâmetro D, valores de nível estático dos poços que são plotados como valores pontuais e, por interpolação pela técnica da krigagem<sup>11</sup>, é gerada a superfície potenciométrica. Assim, a krigagem é utilizada para todos os parâmetros cuja entrada de dados é em formato de pontos ou curvas (no caso de curvas topográficas para gerar o MNT) e a saída no *layer* de informação em formato de superfície (polígonos). O mapa de vulnerabilidade é o somatório dos mapas paramétricos, e sua confecção é possível porque as informações são espacializadas em polígonos com as pontuações (P)<sup>12</sup>.

### 3.3 Etapa D: Análise de ocupação do solo, risco e contaminação de águas subterrâneas

Gomes *et al.* (2008a) descrevem que o risco ambiental depende da exposição e do perigo, sendo este último, o potencial de dano ao meio e/ou organismo. Neste trabalho foi definido que o risco está ligado à presença de um fator externo com potencial poluidor. Portanto, a análise de risco se deteve em identificar classes de uso e sobreposição do mapa de uso do solo ao mapa de classes de vulnerabilidade.

A primeira etapa da análise de risco foi a obtenção e adaptação do mapa de uso do solo, compilado a partir do projeto PLANOSINOS. Este mapa foi comparado com imagens do *Google Earth* 2010 e imagens de satélite LANDSAT composição 345. Foram utilizadas imagens de satélite LANDSAT cena 221/81, sensor TM5 (jun/2000, dez/2006) e sensor TM7 (out/2001, abril/2002), cedidas gratuitamente pelo INPE. As bandas espectrais predominantes

---

<sup>11</sup> A Krigagem é um método de interpolação de dados, também conhecido como “Processo Gaussiano de Regressão”. A interpolação considera que o espaço que existe entre pontos com valores definidos deve assumir pontos com valores proporcionais e intermediários aos pontos definidos. Portanto, existe uma correlação espacial, ou seja, pontos perto de um ponto “x” assumirão valores mais próximos de “x”, quanto mais espacialmente distantes de “x”, assumirão valores divergentes. Por isso, técnicas de krigagem são tão utilizada na modelagem de distribuição de propriedades e fenômenos de transporte.

<sup>12</sup> Ver equação 2, pág. 29.



foram 3, 4 e 5. As imagens foram manipuladas no *software* ArcGIS 9.3 para separar as classes de uso do solo. A adaptação e compilação foram feitas pela digitalização de *shapefiles* no ambiente SIG, neste mesmo *software*.

Nesta fase foi feita a identificação de classes de uso como aterros, indústrias, depósitos de resíduos, plantações com uso de agrotóxico e até mesmo, silvicultura que possam ameaçar o rebaixamento do aquífero.

A segunda fase é a integração do mapa de uso do solo com o mapa de classes de vulnerabilidade. O potencial de risco é analisado pelo cruzamento da distribuição espacial de classes de uso com o mapa de vulnerabilidade. O estudo de risco está diretamente relacionado ao mapa de uso da terra, partindo do conceito de risco proposto neste estudo.

A presença de fontes reais de contaminação foi investigada pelos dados de análises químicas disponibilizados pela CORSAN e CPRM-SIAGAS e comparados em relação à Resolução CONAMA 396/2008 para qualidade da água, distribuição espacial dos dados e histórico de contaminação.

## 4. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 4.1. Área de estudo: localização e ocupação

A área de estudo inclui os municípios de Portão e Estância Velha (figura 4), que fazem parte da região metropolitana de Porto Alegre e da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos. Em coordenadas geográficas, a área está localizada no intervalo de latitude  $-29^{\circ}38'00''$  a  $-29^{\circ}45'00''$ S e longitude  $51^{\circ}01'10''$  e  $51^{\circ}03'30''$ W (Carta do Exército-MD-DL 1975).

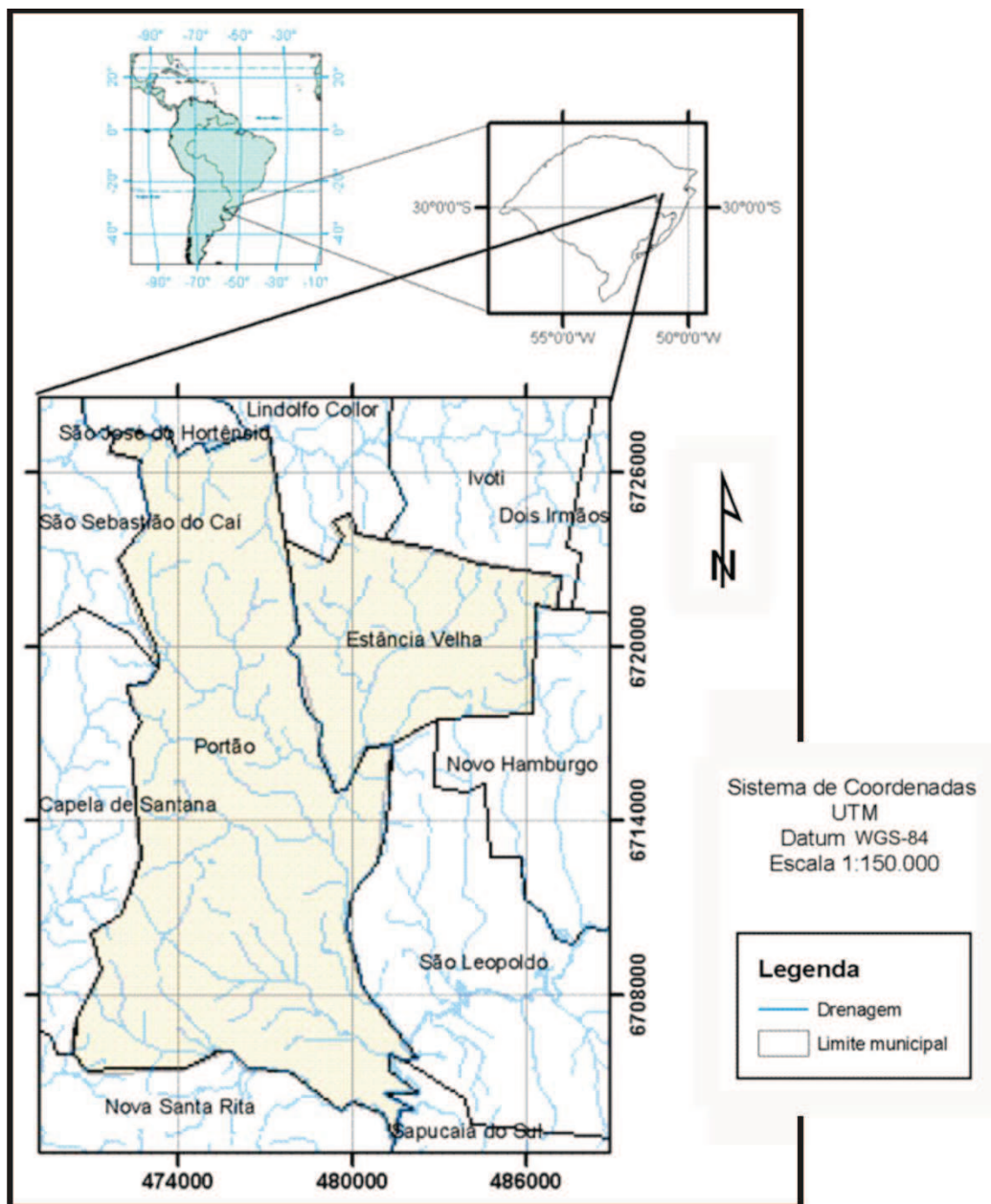


Figura 4: Localização dos municípios de Portão e Estância Velha. Fonte: Adaptado de CPRM (2008).

A figura 5 mostra a identificação dos limites da área. Estes municípios fazem parte da sub-bacia do Arroio Portão, porém os limites laterais da área foram ampliados, incluindo as nascentes dos arroios Boa Vista e Cerquinha, a fim de melhorar o modelo hidrogeológico devido a ausência de dados de poços.

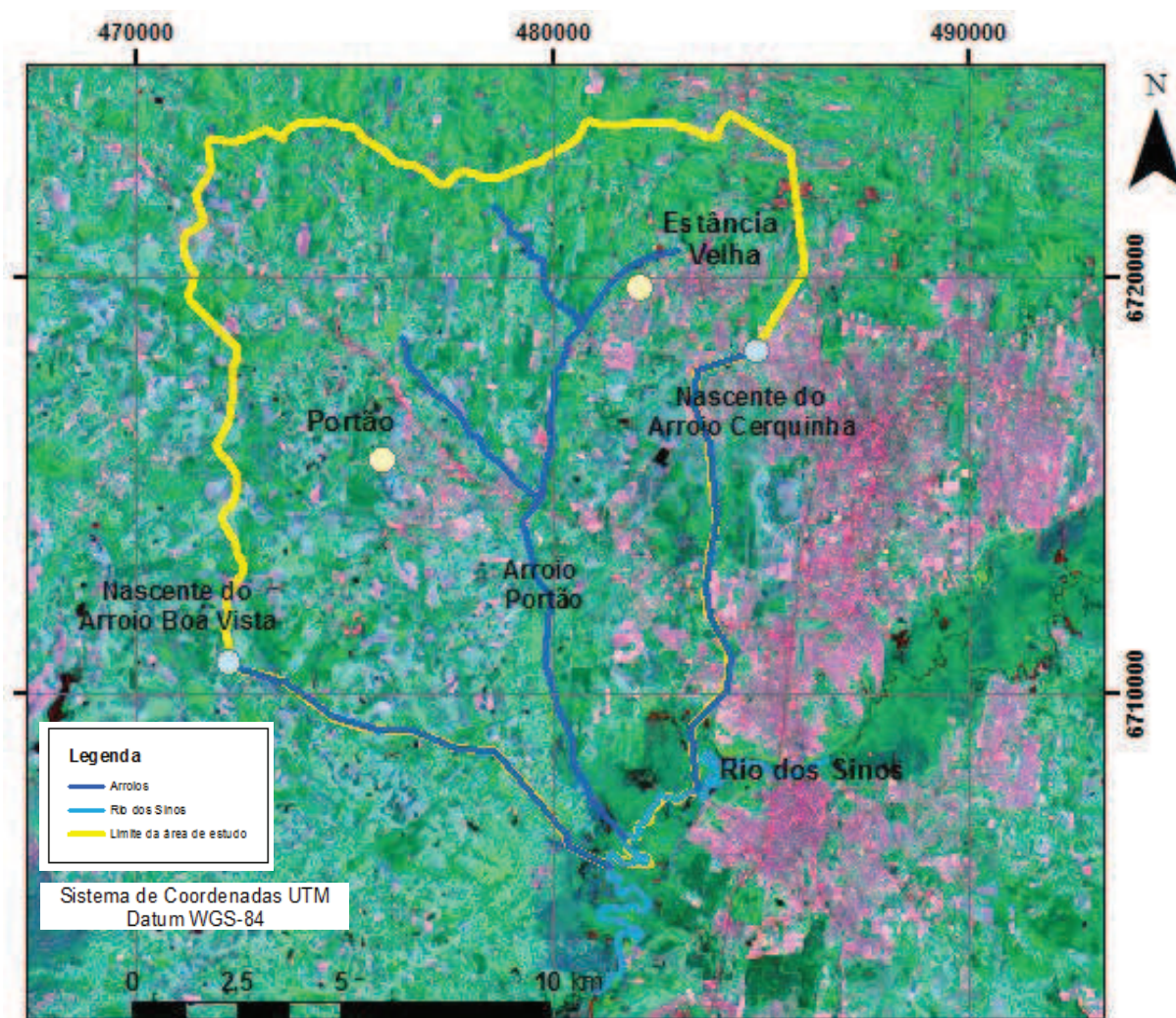


Figura 5: Identificação da área de estudo, imagem de satélite LANDSAT, bandas 345 de 2002.

O município de Portão tem em torno de 28,5 mil habitantes ocupando área urbana e rural de 160 km<sup>2</sup>. Este município tem área rural predominante destinada às atividades agrícolas e silvicultura, pastagens naturais e matas. A ocupação que ocorre devido à expansão da área urbana pode ser visualizada nas diversas margens dos arroios da sub-bacia, e que não diferente, passam pelo processo de degradação causada pelo lançamento de resíduos, pela ocupação de forma irregular e falta de saneamento. Esse tipo de ocupação é localizado geralmente na periferia do núcleo urbano e em áreas de várzea que passam por um processo ativo dos cursos de água e desencadeia, além da contaminação das águas superficiais, o processo de desmatamento de mata ciliar e assoreamento.

Em relação a Portão, Estância Velha tem número superior de habitantes, em torno de 41 mil para uma área de 52,4 km<sup>2</sup>. A área, que corresponde em tamanho a aproximadamente 1/3 da área de Portão, apresenta predomínio de área urbana.

A tabela 14 mostra dados dos municípios de Portão e Estância Velha. Considerando o Índice de Desenvolvimento Socioeconômico<sup>13</sup> (IDESE), Portão e Estância Velha possuem alto índice de desenvolvimento em educação, porém em saneamento, o índice é baixo (Fundação de Economia e Estatística-FEE 2005), sendo um indicador de que ambos os municípios necessitam de investimentos nessa área.

Tabela 14: Dados Estatísticos do território e população.

	Dados Estatísticos	
	Portão	Estância Velha
Área territorial (km <sup>2</sup> )	159,9	52,4
População urbana 2006 (hab.)	22.817	38.946
População rural 2006 (hab.)	5.194	1.003
População total 2006 (hab.)	28.011	39.949
Taxa de urbanização 2006 (%)	81,5	97,5
IDESE educação 2005	0,826	0,857
<b>IDESE Saneamento 2005</b>	<b>0,199</b>	<b>0,415</b>

Fonte: FEE-FEEDADOS, 2008.

A evolução da mancha urbana dos municípios de Portão (figura 6) e Estância Velha (figura 7) mostra um significativo aumento da área urbana, relacionada ao aumento da taxa de urbanização (FEE, 2008), do crescimento da população (figura 8).

<sup>13</sup> Níveis de desenvolvimento do IDESE variam como baixo (índices até 0,499), médio (entre 0,500 e 0,799) ou alto (maiores ou iguais que 0,800). Fonte: site da FEE, FEEDADOS; consulta em dezembro de 2008.



### Área Urbana do Município de Portão

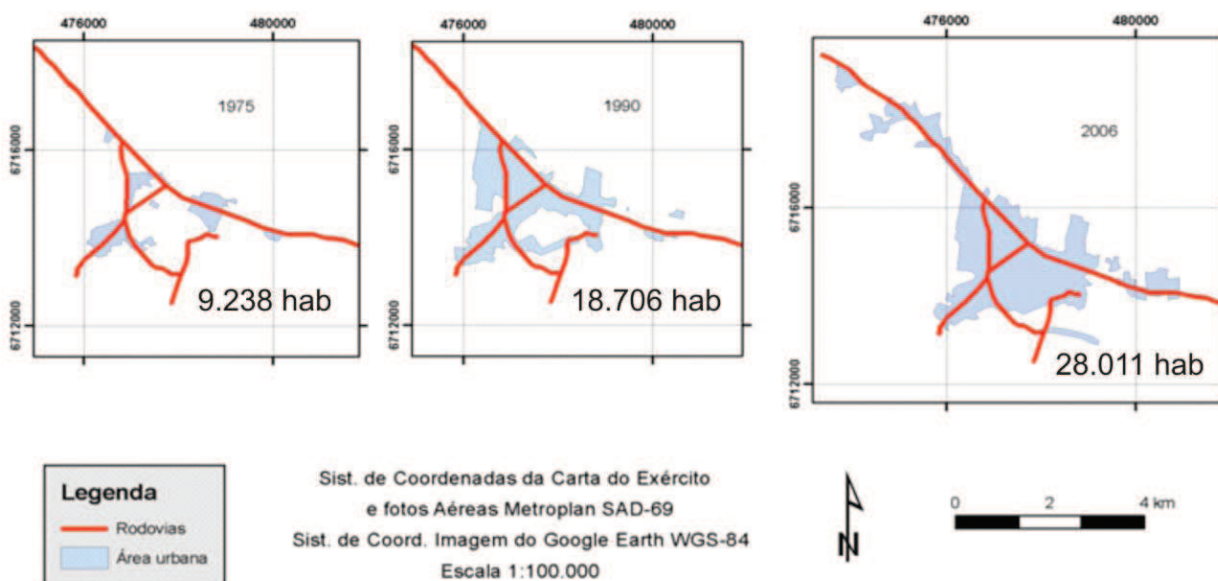


Figura 6: Expansão da área urbana dos municípios de Portão entre 1995 a 2006. Fonte: carta topográfica do exército de 1975, fotografias aéreas da METROPLAN de 1990, imagem de satélite do *Google Earth* de 2006

### Área Urbana do Município de Estância Velha

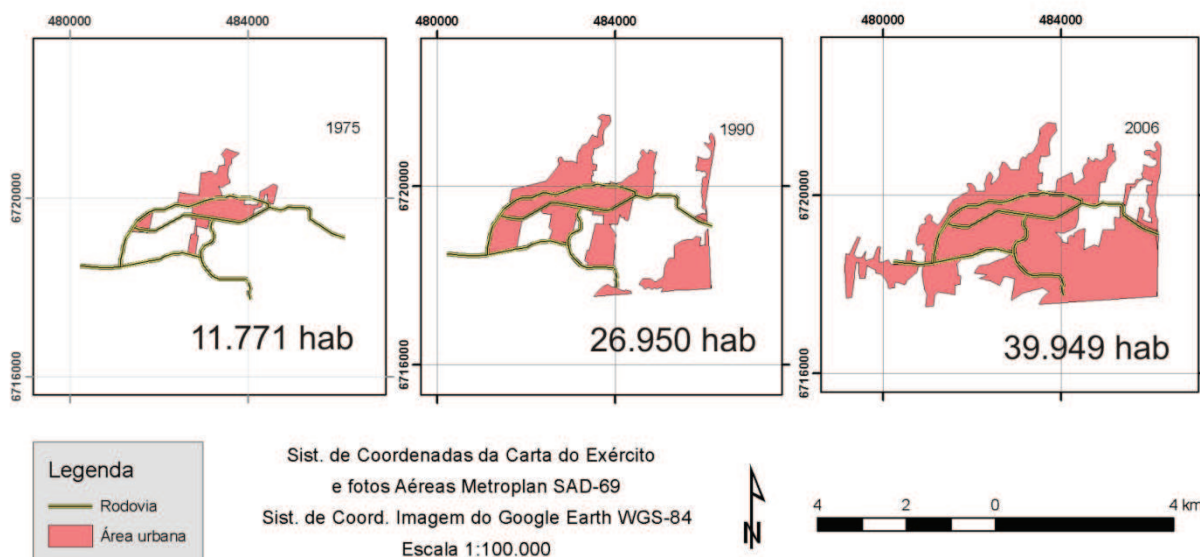


Figura 7: Expansão da área urbana dos municípios de Estância Velha entre 1995 a 2006. Fonte: carta topográfica do exército de 1975, fotografias aéreas da METROPLAN de 1990, imagem de satélite do *Google Earth* de 2006.

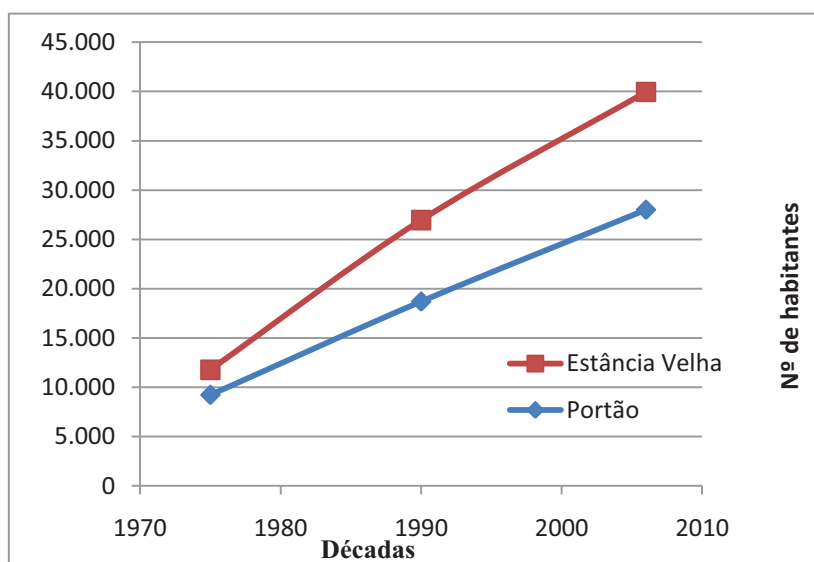


Figura 8: Crescimento populacional dos municípios de Estância Velha e Portão de 1975 à 2005. Estância Velha apresenta maior taxa de crescimento e maior número de habitantes em uma área aproximadamente 1/3 menor que a do município de Portão. Fonte: FEE 2005.

De acordo com os fatores descritos por Rahman (2008), pág. 22 e 23, que interferem diretamente na contaminação de recursos hídricos, os municípios de Estância Velha e Portão se apresentam da seguinte forma:

- **Crescimento populacional e crescimento urbano não planejado** → Estância Velha apresenta a densidade populacional de aproximadamente 762 hab/km<sup>2</sup> com taxa de crescimento (análise gráfica) de mais de 900 hab/ano (fig. 08). A mancha urbana de Estância Velha e Portão caracteriza-se pelo aumento da taxa de urbanização crescimento da periferia, das indústrias e comércio (Fontes: análise de imagens de satélite, dados CNAE-PIA). Porém, há áreas rurais extensas e estabilizadas, destinadas à produção agrícola e sítios de lazer, principalmente em Portão.
- **Tipos misturados de uso do solo** → Estância Velha e Portão apresentam áreas rurais agricultáveis e de lazer, áreas urbanas com intensa atividade industrial.
- **Saneamento inadequado ou ausente** → Estância Velha e Portão. Os municípios apresentam baixo IDESE de saneamento.
- **Disposição inadequada de resíduos domésticos e industriais** → Estância Velha e Portão. Os municípios apresentam histórico de contaminação de águas, desvio de resíduos para corpos hídricos (relatórios PROTEGER-CPRM, Projeto Marca d'água-FEPAM, COMITESINOS).

O descarte de resíduos dos processos industriais coloca as indústrias também como fator de risco potencial de degradação de recursos hídricos e meio ambiente em geral.

Segundo dados do IBGE (2006), o comércio seguido de indústria de transformação destaca-se nas atividades destes municípios.

Portão possui 287 estabelecimentos da indústria de transformação e Estância Velha 553 (figuras 9 e 10), constando, respectivamente, 20% e 23% da atividade econômica dos municípios. No total dos estabelecimentos da indústria de transformação, 47% da produtividade da atividade industrial registrada no CNAE-PIA<sup>14</sup> (IBGE 2006) está relacionada ao processamento do couro em Portão e 76% em Estância Velha. A atividade inclui processo pré e pós-curtimento, confecção de acessórios, calçados, couros metalizados, envernizados, revestidos e outros. Em seguida, os produtos químicos se destacam com 23% da produtividade industrial neste município.

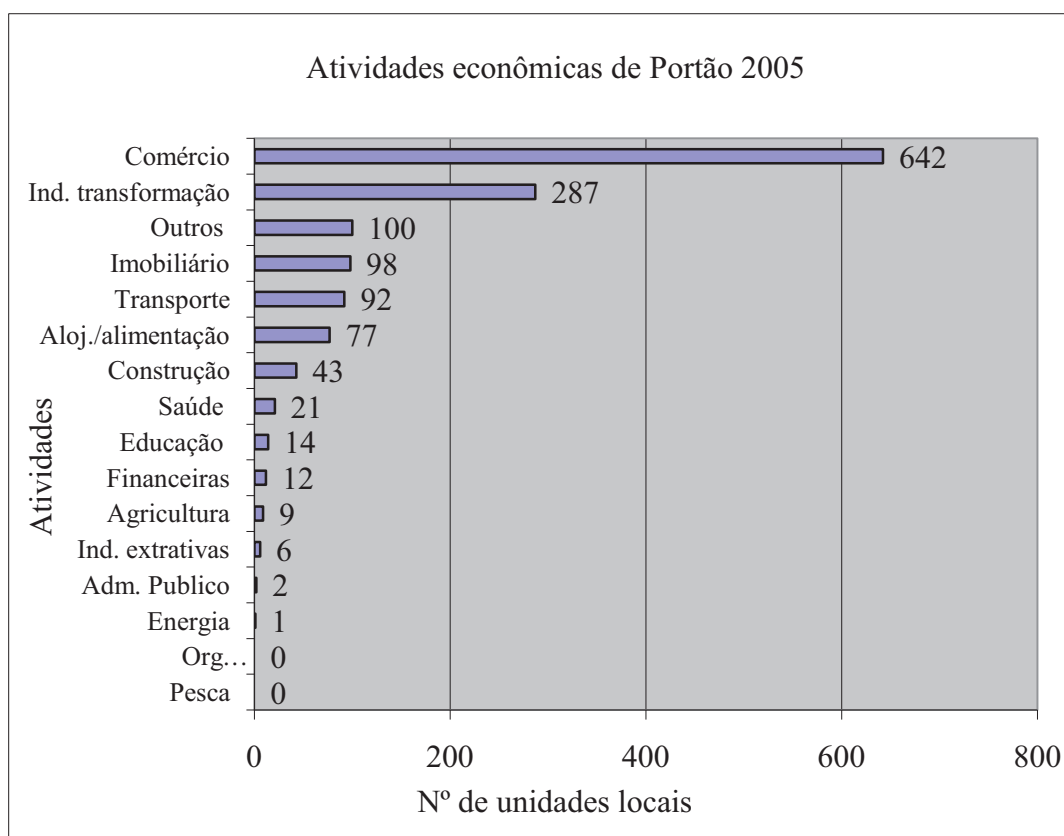


Figura 9: Atividades econômicas de Portão. Fonte IBGE (2006).

<sup>14</sup> Classificação Nacional de Atividade Econômica-Pesquisa Industrial Anual.  
Programa de Pós-Graduação em Geologia – Planejamento Ambiental

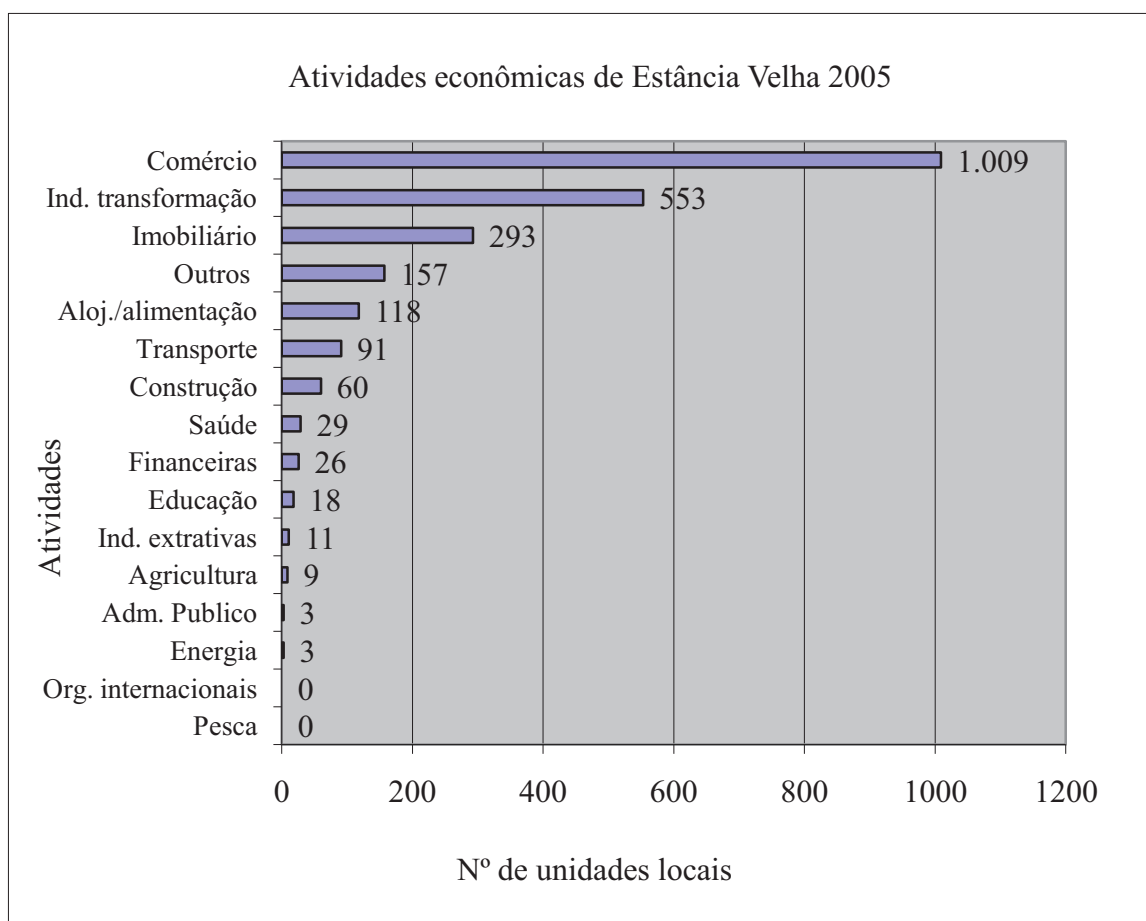


Figura 10: Atividades econômicas de Estância Velha. Fonte: IBGE 2006.

Uma vez que o saneamento de ambos os municípios merece maior atenção, estima-se que a expansão da produção industrial, normalmente associada ao crescimento populacional, resulta em uma significativa geração de resíduos. Os dados da indústria de transformação das figuras 09 e 10 foram detalhados na tabela 15, que mostra os tipos de produtos que predominam na região, como a indústria de transformação de couro, plástico, produtos químicos e metais.

Tabela 15: Produtividade de Portão e Estância Velha em 2006.

	Produtividade da Indústria de transformação (%)	
	Portão	Estância Velha
Couro	47	76
Plásticos, produtos químicos, metais	23	17
Pneus e borracha	15	-
Outros	15	7

Fonte: IBGE (2006).



Estância Velha e Portão concentram as atividades industriais mais poluidoras do Vale do Rio dos Sinos, além de Novo Hamburgo, São Leopoldo e Sapucaia do Sul (Haase 2001). No caso do resíduo de curtimento, são produzidos 15 kg de resíduos sólidos por pele, sendo 7,5 kg reaproveitados em outros processos da própria indústria (Ferreira 1998). O resíduo tem como composição sulfetos e cromo trivalente.

Segundo Castilhos (1998), a produção anual de pele no Rio Grande do Sul é em torno de 150.000 ton.ano<sup>-1</sup> com uma produção de efluente de 40 a 120 m<sup>3</sup>.ton<sup>-1</sup> de pele. A tabela 16 descreve essas características.

Tabela 16: Características do efluente no processo de curtimento por tonelada de pele.

Constituinte (kg)	Remolho	Depilação química Caleiro	Lavagem	Decalagem purga lavagem	píquel	Curtimento	Total em kg
<b>DBO5</b>	8-10	15-80	8-10	-	-	-	<b>75-95</b>
<b>DQO</b>	30	100-110	10-11	-	-	-	<b>200-250</b>
<b>Material em suspensão</b>	7	60-70	-	-	-	-	<b>140</b>
<b>Salinidade</b>	140-160	-	-	25-30	60-85	-	<b>250-350</b>
<b>Sulfetos</b>	-	8-9	-	-	-	-	<b>8-9</b>
<b>Cromo III</b>	-	-	-	-	-	4,5-6	<b>4,5-6</b>

Fonte: Follachier, 1976 *apud* Tedesco *et al.*, 2008

#### 4.2 Dados da Sub-bacia do Arroio Portão: Geologia, Sistemas Aquífero Guarani e Aquífero Serra Geral

Os municípios de Portão e Estância Velha estão situados no contexto geológico onde aflora o SAG, um sistema hidroestratigráfico constituído por rochas sedimentares que abrange a ocorrência da Bacia do Paraná, a exemplo da Formação Botucatu (Faccini, Giardin e Machado 2003).

As formações sedimentares registram ambientes flúvio-lacustres a eólicos, desde o final do paleozóico ao mesozóico, onde culmina com a sequência magmática da Serra Geral. Rene *et al.* (1996) faz referência ao episódio de vulcanismo como o encerramento da evolução do continente Gonduânico.

Faccini *et al.*(2003) descreveram a Formação Pirambóia na localidade de São Vicente do Sul. Esta Formação apresenta duas fácies: as dunas eólicas e as interdunas. As interdunas, que expressam elementos diagnósticos para a distinção de fácies, caracterizam-se por: I)

arenitos tabulares amalgamados, compostos por arenitos com laminação plana; II) maciços ou bioturbados e III) fácies de pelitos lenticulares laminados ou maciços. Os fácies indicam ambiente de sedimentação continental eólico, fluvial e lagos rasos. Esta Formação apresenta maior quantidade de material de granulometria fina que influencia no comportamento hidráulico, de forma a diminuir a permeabilidade em relação a outros arenitos formadores do Sistema Aquífero Guarani-SAG.

A Formação Botucatu caracteriza ambiente desértico, sendo constituída por três associações faciológicas no Rio Grande do Sul, descritas por Scherer *et al.* (2000). Os depósitos da base da Formação são interpretados como lençóis de areia e fluxos torrenciais e são sobrepostos por depósitos referentes a migração de dunas com estratificação cruzada e ainda dunas lineares. Faccini, Giardin e Machado (2003) descrevem a Formação Botucatu em dois conjuntos de fácies: dunas e interdunas. As dunas se caracterizam por: I) arenitos finos a grossos, bimodais (duas classes são mais frequentes) com estratificações cruzadas acanaladas e tangenciais dominantes e planares mais raras II) as estratificações acanaladas evidenciam dunas de cristas sinuosas. As interdunas se caracterizam por arenitos médios a finos tabulares horizontalizados com estratificações cruzadas de baixo ângulo ou laminações paralelas ocorrendo ondulações transladantes, raros intraclastos pelíticos na matriz arenosa.

A datação por Ar-Ar (Renne *et al.*, 1996) dos derrames vulcânicos, evento posterior, contribuiu para a inferência de término da sedimentação do Botucatu, tendo sido depositado entre o Jurássico Superior e Neocomiano. O contato basal com a Formação Botucatu é de forma discordante devido a descontinuidade inerente ao processo deposicional. Os depósitos sedimentares concomitantes e posteriores aos eventos vulcânicos foram designados como Formação Serra Geral, mas pertencentes ao mesmo Grupo São Bento.

Wildner *et al.*(2003) descrevem o Fácies Gramado, que correspondem a um conjunto de derrames que afloram de Novo Hamburgo a Gramado, constituindo também a Geologia do norte de Estância Velha e Portão, borda sul do Planalto Basáltico. Segundo estes autores, esse fácies trata-se de uma sequência de derrames básicos com espessura de 12 a 40 m. A cor predominante é cinza melanocrático (presença de minerais máficos de 65 a 90%) e tamanho de grão fino a médio. Também é diferenciada por baixa relação Ti/Y e baixa sílica, sendo composição de basaltos e basaltos andesito. Estes derrames estão em contato com a Formação Botucatu apresentando lavas com fluxo *pahoehoe*, contendo estrutura vesicular e amigdalóide preenchidos por zeólitas e carbonatos.

Associado ao SAG, os derrames vulcânicos da Formação Serra Geral caracterizam as camadas confinantes e constituem o Aquífero Serra Geral (Rebouças 2006). Características hidráulicas e hidroquímicas levam a individualização de unidades hidroestratigráficas, sendo

essas unidades apresentadas por Lisboa (1996) para o Sistema Aquífero Serra Geral e Machado (2005) para o Sistema Aquífero Guarani.

As características dos depósitos sedimentares apresentam permeabilidades diferenciadas, muitas vezes apresentando caráter de confinamento devido à quantidade de sedimentos finos (Machado, 2005). O arenito da Formação Pirambóia, por exemplo, apresenta maior quantidade de sedimentos finos, caracterizando um comportamento hidráulico diferenciado, de forma a diminuir a permeabilidade em relação a outros arenitos formadores do aquífero ( fácies de pelitos). Este mesmo autor considera a Formação Rio do Rasto a base do SAG e não como constituinte do mesmo, representando na maioria das vezes um aquífero.

Tucci & Cabral (2003) citam o arenito da Formação Botucatu como arenito bimodal de alta porosidade, quase que exclusivamente areia (aquífero granular), geralmente apresenta permeabilidade que lhe confere características favoráveis ao aquífero como reservatório potencial. Segundo levantamento de Machado (2005), a condutividade hidráulica varia entre  $8,0 \text{ m.dia}^{-1}$  para arenitos da Formação Botucatu e  $0,8 \text{ m.dia}^{-1}$  para a Formação Pirambóia. No aquífero livre que constitui o SAG, a porosidade efetiva varia entre 10 e 20% e o coeficiente de armazenamento aumenta de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  com o aumento do confinamento. Os valores de transmissividade variam 350 e  $550 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$ . Na área de estudo, as formações Serra Geral e Botucatu são observadas em intercalações dos arenitos com os derrames vulcânicos em pedreiras e testemunhos da região (figura 11).

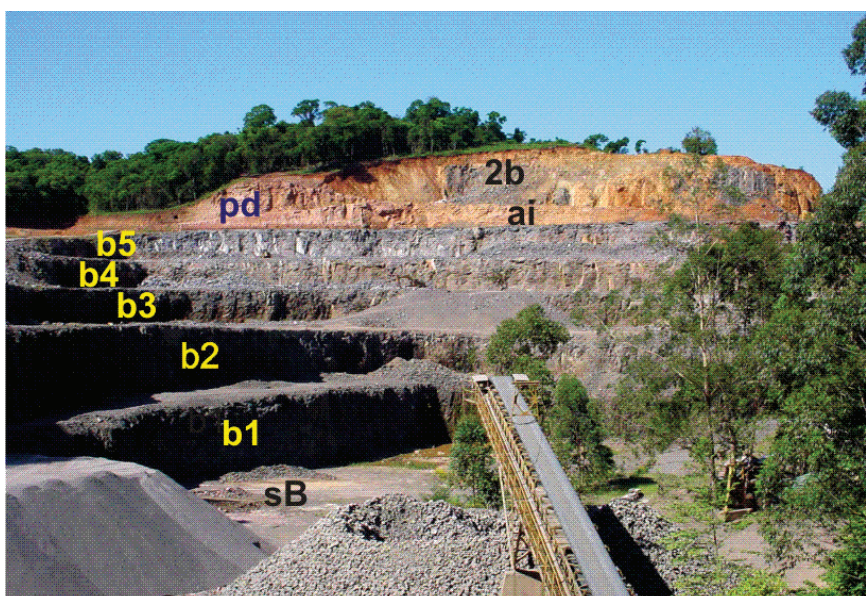


Figura 11: Diferenças litológicas que se destacam na região: os derrames basálticos e as rochas sedimentares associadas. Formação Serra Geral e arenito intertrape. SB: substrato de arenito Botucatu; b1 a b5 constituem níveis de basalto do primeiro fluxo de lava; pd é uma paleoduna; ai, arenito intertrape; 2b é o segundo fluxo de lava. Jazida no limite de Estância Velha e Ivoti. Foto: Prof. Dr. Heinrich Theodor Frank – UFRGS.

Segundo Heine (2008), pode-se verificar também que esses pacotes rochosos desempenham a função de armazenar água como aquífero fissural de grande importância na região, no caso de Ivoti, norte de Estância Velha.

A compilação de dados dos arenitos das duas associações de fácies das formações Pirambóia e Botucatu na região oeste da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos é descrita por Heine (2008) e sintetizada na tabela 17. Os arenitos apresentam comportamentos hidráulicos diferentes de acordo com a presença de sedimentos finos. O arenito Botucatu caracteriza o aquífero granular, geralmente apresenta maior permeabilidade, tanto pela forma dos grãos, quanto pela granulometria, quase que exclusivamente areia. e esses dados podem, em primeira análise, ser estendidos a área adjacente de Estância Velha e Portão.

Tabela 17: Caracterização dos arenitos Pirambóia e Botucatu.

Itens	Arenito Pirambóia	Arenito Botucatu
Origem	Flúvio-lacustre/eólico	Eólico desértico
Cor	Avermelhado a esbranquiçado	Avermelhado
Granulometria	Média a muito fina 0,12 mm	Fina a média 0,18 mm
Teor de argila	>20%	<10%
Condutividade hidráulica	Inferior a 0,01 até 4,6 m.dia <sup>-1</sup>	0,2 a 4,6 m.dia <sup>-1</sup>

Fonte: Heine 2008.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A estimativa de vulnerabilidade pelo DRASTIC considerou a parametrização associada aos critérios de pontuação, descritos nos capítulos anteriores. A seguir são apresentados e avaliados os resultados obtidos, iniciando-se pela análise do condicionamento geológico de proteção/vulnerabilidade do SAG na área de estudo, seguindo-se pela análise da hidrogeologia, solos e a integração de todos os parâmetros para a finalização do mapa de vulnerabilidade do SAG na Sub-bacia do Arroio Portão. Por último, são feitos alguns apontamentos sobre a exposição das áreas vulneráveis em relação a ocupação do território como primeiros indicativos para uma conseguinte avaliação de risco ambiental.

### **5.1 Geologia e Geomorfologia**

Através da fotoleitura foram identificadas três unidades fotogeológicas delimitadas por ruptura de relevo e suas macroformas e microformas associadas, tonalidade de cinza e textura, padrões de drenagem e vegetação. As unidades são:

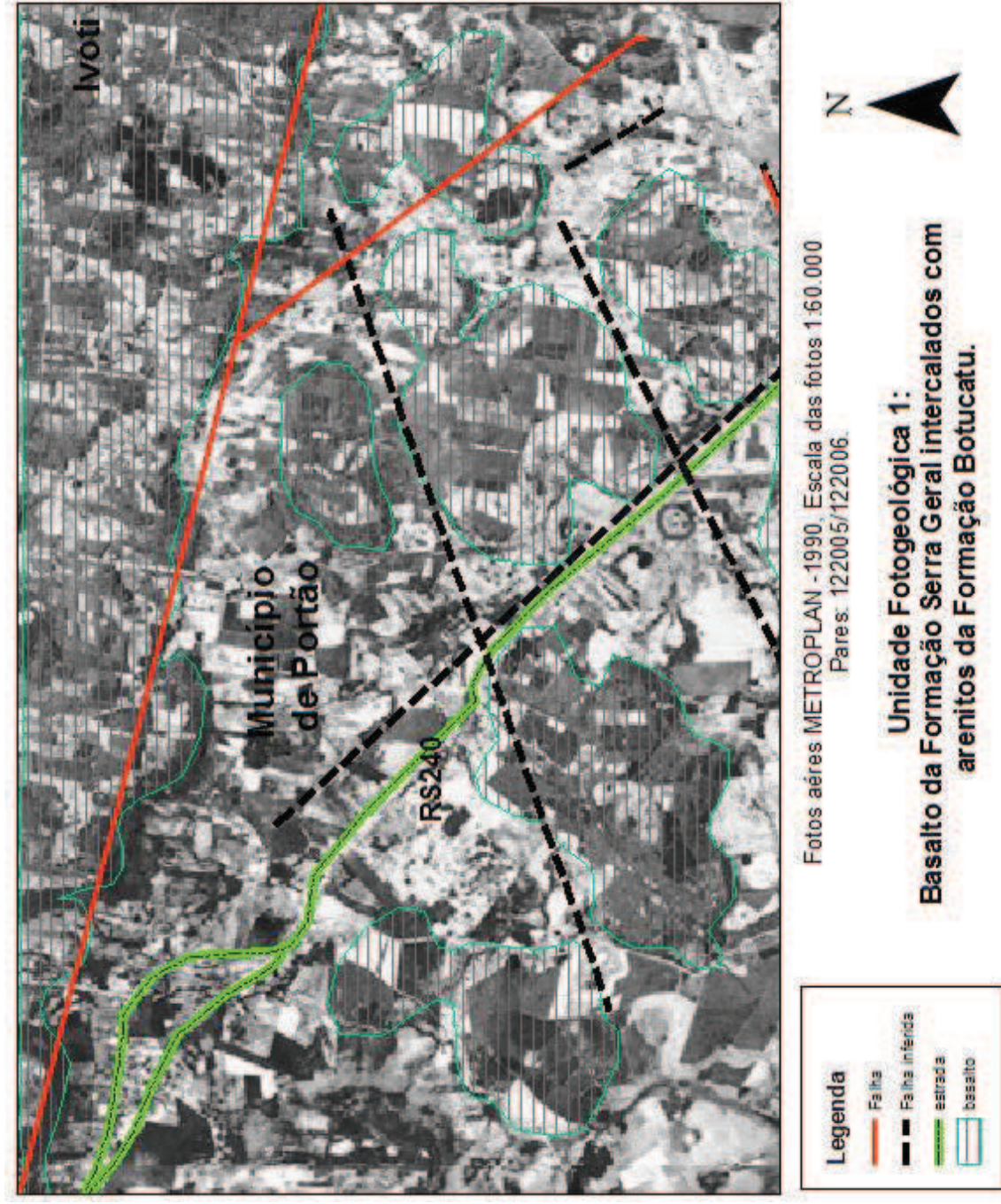
Unidade 1 (figura 12): Parte norte da Sub-bacia do Arroio Portão.

É a parte que caracteriza a área de estudo como pertencente à borda do Planalto (segmento central) pelos resquícios de derrames basálticos. Possui relevo acidentado, dissecado, onde a drenagem superficial surge em cotas superiores em meio ao basalto de 150 a 250 m. Os derrames basálticos possuem macroformas associadas a platôs com alinhamentos dos morros testemunhos. No limite norte dos municípios de Portão e Estância Velha com o município de Ivoti, apresenta-se ruptura do relevo por grande falha. A vegetação mais intensa, associada aos derrames basálticos junto com as macroformas, são artifícios para delimitar a variação litológica e contato com o arenito da Formação Botucatu.

Nesta região é possível identificar muito lineamentos estruturais em duas direções NW-SE e NE-SW. O padrão de drenagem é subangular e textura média a fina, já a tonalidade de cinza é interferida pelo intenso uso do solo na agricultura.



Figura 12: Unidade fotogeológica 1, basaltos e arenitos intertrapes, relevo em mesa, alinhamento de morros testemunhos de basalto; macroformas suavizadas são associadas a arenitos, falhas NW-SE e falhas inféridas.



## Unidade 2 (figuras 13 e 14): Parte central da Sub-bacia do Arroio Portão

Esta unidade apresenta relevo rebaixado e os lineamentos já não aparecem com clareza nos fotogramas aéreos, tratando-se de um material menos coeso, no caso, sedimentar. As macroformas são suavizadas, homogêneas, com uso do solo em plantações, padrão de drenagem com textura fina e subdentrítica; nestas áreas predominam a vegetação de campo e plantações.

## Unidade 3 (figuras 13 e 14): Parte sul da Sub-bacia do Arroio Portão.

Esta unidade se trata da área rebaixada, apresenta semelhanças com a unidade 2 por se tratar de litologia sedimentar, porém, o relevo é plano, textura fina, é formado pela planície de inundação e comunica-se diretamente com a foz do Arroio Portão no Rio dos Sinos, em um ambiente fluvial meandrante. O município de Portão é delimitado na porção sul a sudeste marcado pelos meandros do Rio dos Sinos. As sinuosidades desta etapa do curso do rio está associada a perda de competência pela posição jusante na bacia hidrográfica, baixas altitudes e as rochas sedimentares friáveis que compõem a região. A distribuição da drenagem predominante dos arroios apresenta tendência entre retilínea e dendrítica em rochas de textura média.

O mapa geológico compilado de CPRM (2008) (figura 15) mostra a variação litológica, as quais são associadas a conjuntos hidrogeológicos pela área de afloramento e confinamento do SAG. O fato do SAG, na área de estudo, ser constituído por arenitos Pirambóia (Permotriássico) e Botucatu (Cretáceo), torna-o mais vulnerável devido à porosidade dessas Formações.

Os arenitos da Formação Pirambóia têm cor rosa claro a rosa avermelhado, por vezes esbranquiçado devido ao processo de caolinitização, e cor avermelhada pela presença de óxido de ferro. Os arenitos são bimodais, friáveis e com maior teor de argila que a Formação Botucatu (Heine 2008).



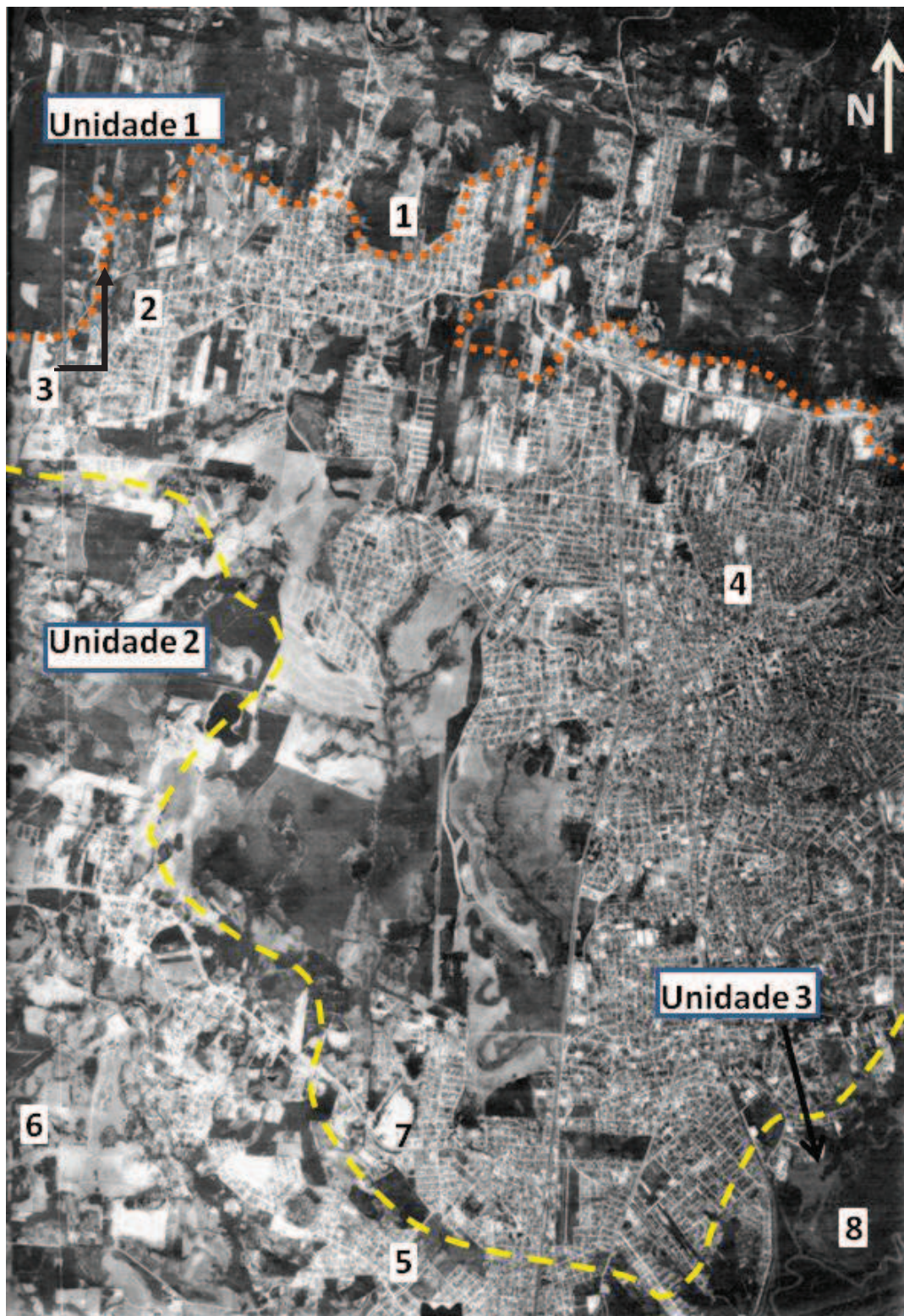


Figura 13: Limite das Unidades Fotogeológicas 1, 2 e 3. Unidade 1: constituída por rochas vulcânicas e sedimentares. Morros testemunhos dos derrames basálticos que delimitam a Borda do Planalto com relevo dissecado (1 e linha vermelha pontilhada); Área urbana de Estância Velha (2); Arroio Estância Velha, afluente do Arroio Portão (3); Área urbana de Novo Hamburgo (4); Área urbana de São Leopoldo (Scharlau) (5); Afloramento do Arenito Pirambóia (6); Afloramento do Arenito Botucatu (7); Rio dos Sinos e Planície de Inundação (8). A linha amarela tracejada separa a Unidade fotogeológica 1 das demais.



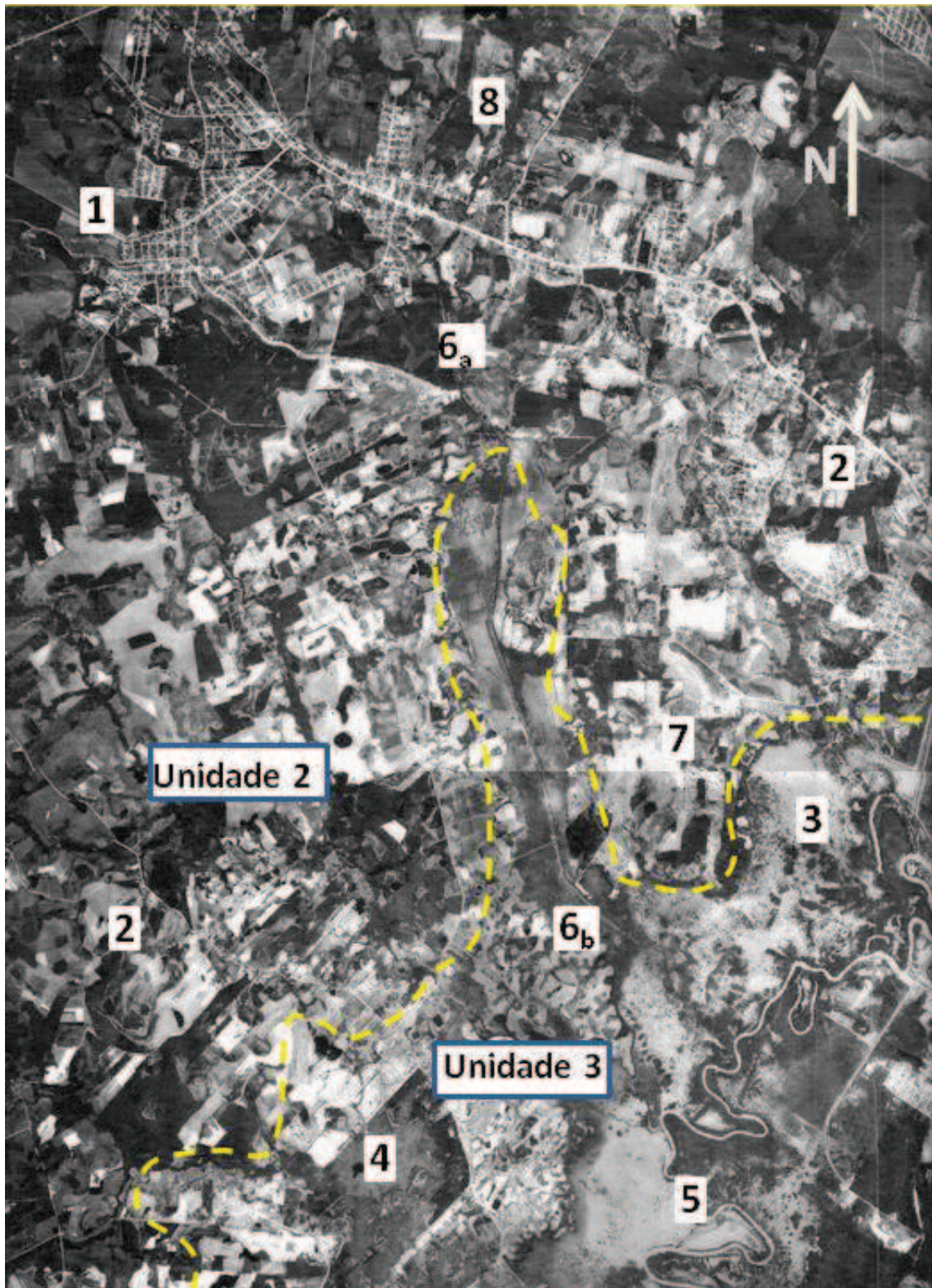


Figura 14: Delimitação das unidades 2 e 3. Unidade 2 associada aos arenitos Botucatu e Pirambóia (mais ao sul), relevo suave ondulado. Unidade 3 associada ao ambiente fluvial meandrante, curso e foz do Arroio Portão, planície de inundação, relevo plano. Área urbana de Portão (1); Área urbana de São Leopoldo (Scharlau) (2); Planície de inundação do Rio dos Sinos (3); Planície de inundação e plantação de arroz (4); Rio dos Sinos (5); Arroio Portão (6) a- curso médio, b-foz do arroio; Afloramento do Arenito Pirambóia (7); Afloramento do Arenito Botucatu (8). A linha amarela tracejada separa as Unidades fotogeológicas 2 e 3.

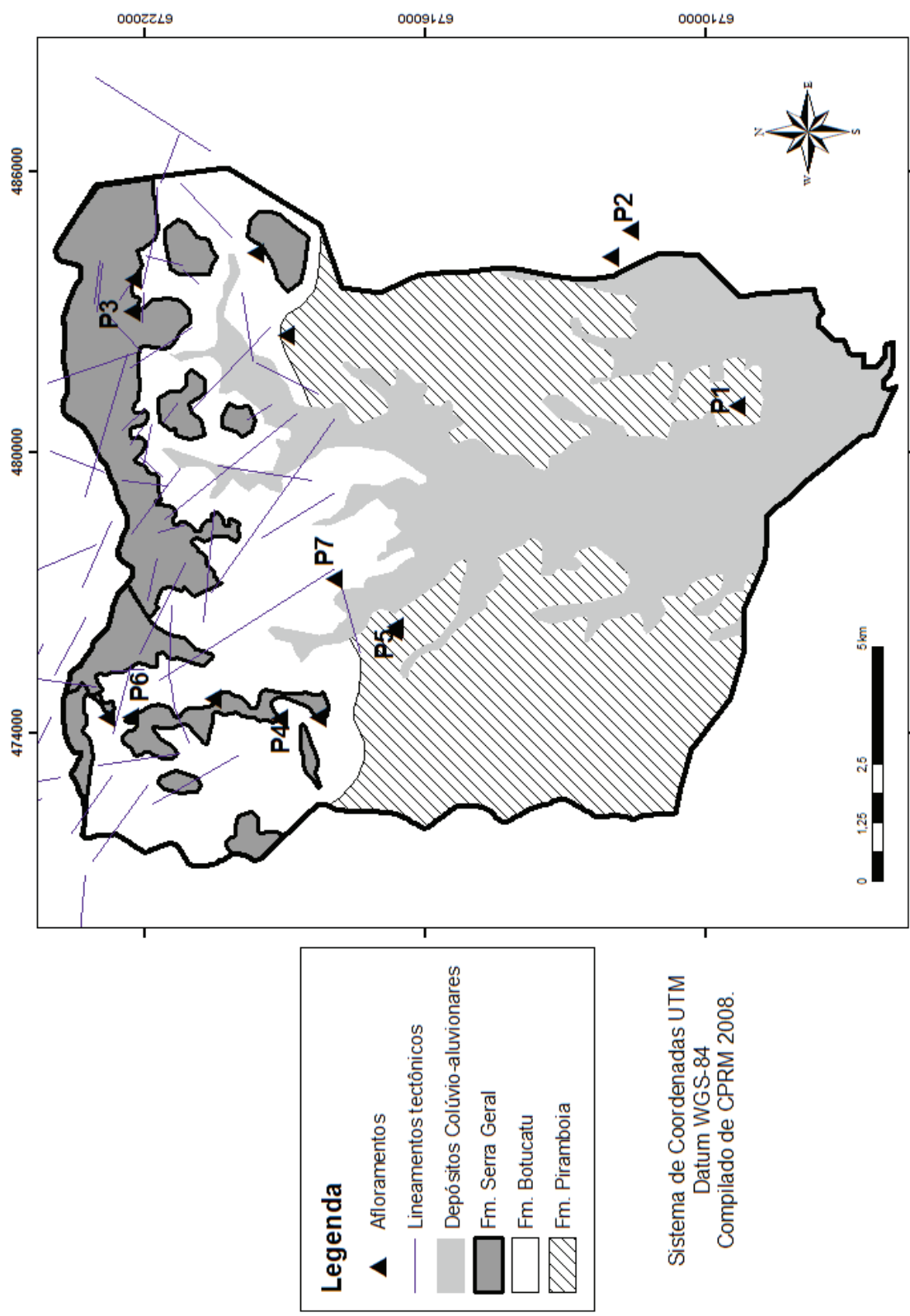


Figura 15: Mapa geológico da área de estudo com indicação dos afloramentos avaliados. Adaptado de CPRM 2008.



Na maioria dos afloramentos, observam-se espessas camadas com estratificações cruzadas acanaladas e tangenciais de médio a grande porte (fig. 16 P1a), tratando-se de grandes paleodunas eólicas de cristas sinuosas com espessuras individuais de mais de 5 m de espessura. As paleocorrentes indicam os sentidos NW e NE.

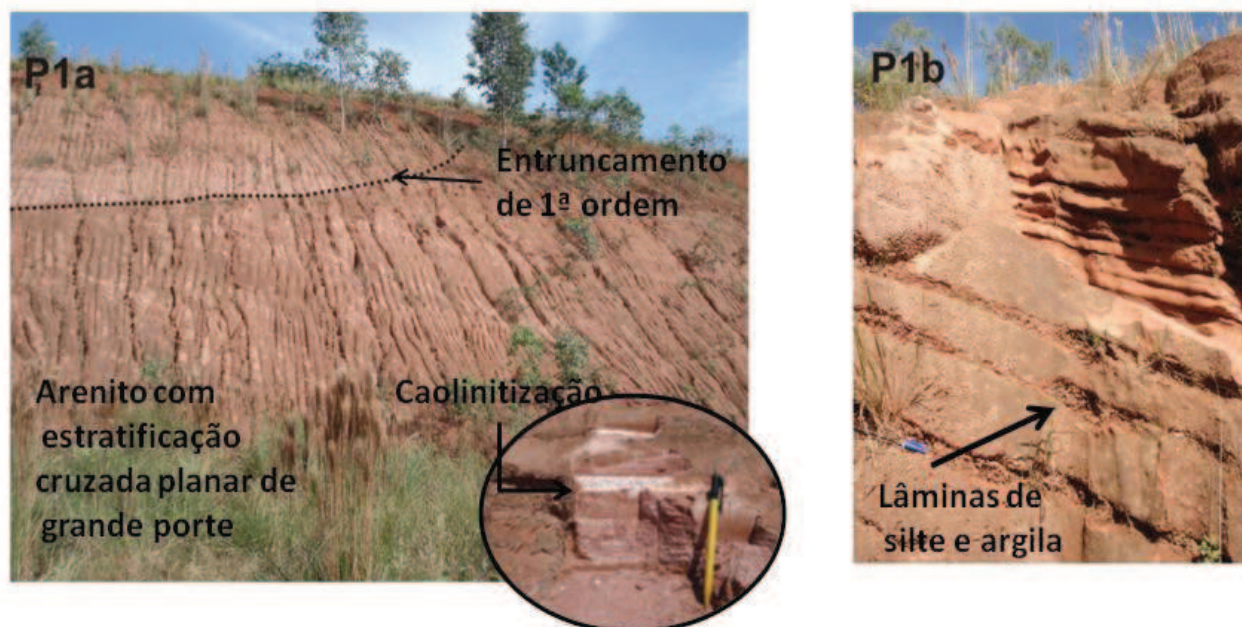


Figura 16: Formação Pirambóia, afloramento em torno de 15 m de altura. Ponto1. P1a Arenito bimodal com estratificação cruzada planar de grande porte, espessuras individuais com média de 5m. A base do perfil, P1b, apresenta camadas tabulares de 3 a 20 cm de espessura com intercalação de silte. Arenito rosa claro a branco, caolinitizado.

Associadas a estas camadas, ocorrem também camadas com estratificação cruzada planar de grande porte, intercaladas com pacotes métricos de camadas de 3 a 20 cm de areia fina com camadas de silte, tratando-se de fácies interdunas (fig. 16 P1b). A sequência é granodecrescente, sendo que no topo, a geometria tende a tabular, sub-horizontal. Após essa sequência, o regime de fluxo modifica-se, passando as paleodunas a apresentar estratificação cruzada planar a acanalada de grande porte. Portanto, a Formação Pirambóia é caracterizada na área pelas fácies:

- I) arenitos de estratificação cruzada planar a acanalada de grande porte;
- II) interdunas representadas por camadas sub-horizontais de arenito fino intercaladas com camadas de 3 a 5 cm de silte.

Os arenitos da Formação Botucatu ocorrem ao centro-norte da área de estudo apresentam cor rosa avermelhado, são bimodais com granulometria areia grossa e fina. As fácies que o caracterizam são:

- I) Arenitos com estratificações cruzadas acanaladas e tangenciais de médio a grande porte (figuras 17, 18 e 19) tratando-se de grandes paleodunas eólicas de cristas sinuosas com

espessura com mais de 5 m de espessura. As paleocorrentes indicam o sentido predominante NE.

- II) Arenito *intertrape* com estratificações cruzadas planares com *pine stripe lamination* síltico.



Figura 17: Formação Botucatu. Ponto 2: Arenito rosado com estratificações cruzadas acanaladas de grande porte, de 1 à 5 m e *climbing ripples*. Constituído de areia muito fina a fina, bimodal e bem selecionada. As medidas de paleocorrente indicam variação significativa de 30° a 180°.



Figura 18: Formação Botucatu. Ponto 6: Arenito com estratificações cruzadas tangenciais de médio porte, variando de 0,5 a 1 m (Foto: Daniel Wohjan).





Figura 19: Formação Botucatu. Ponto 7: Arenito cor rosa claro com estratificações cruzadas tangenciais de médio porte, variando de 0,5 a 2 m; bastante alterado, granulometria média a fina. Dique de composição básica cortando o afloramento.

Ao norte da Sub-bacia do Arroio Portão ocorre a Fácies Gramado da Formação Serra Geral. O basalto apresenta-se densamente fraturado e alterado, amigdaloidal (carbonatos e/ou zeolitas) e estruturas de alívio de tensões (figura 20).



Figura 20: Basalto da Formação Serra Geral, alterado com estruturas de alívio de tensões e esfoliação esferoidal. Localizado a 300 m à sul do P6 (figura 18).

Na parte sul, os depósitos quaternários predominam associados ao retrabalhamento da água nas margens dos corpos d'água como arroios e de erosão hídrica dos solos. Os depósitos de movimento de massa, oriundos da erosão dos derrames de basalto, são controlados pela variação de gradiente no relevo ondulado e de encosta formando uma franja coluvial. Esses tipos de depósitos são predominantes na porção norte da sub-bacia do Arroio Portão, mais espessos em Estância Velha e norte-noroeste de Portão. O modelo numérico do terreno (figura 21) mostra a configuração topográfica da área, onde os tons azuis indicam altitude variando, na média, de 100 a 280 m, correspondendo as áreas de maior declive e instabilidade deposicional.

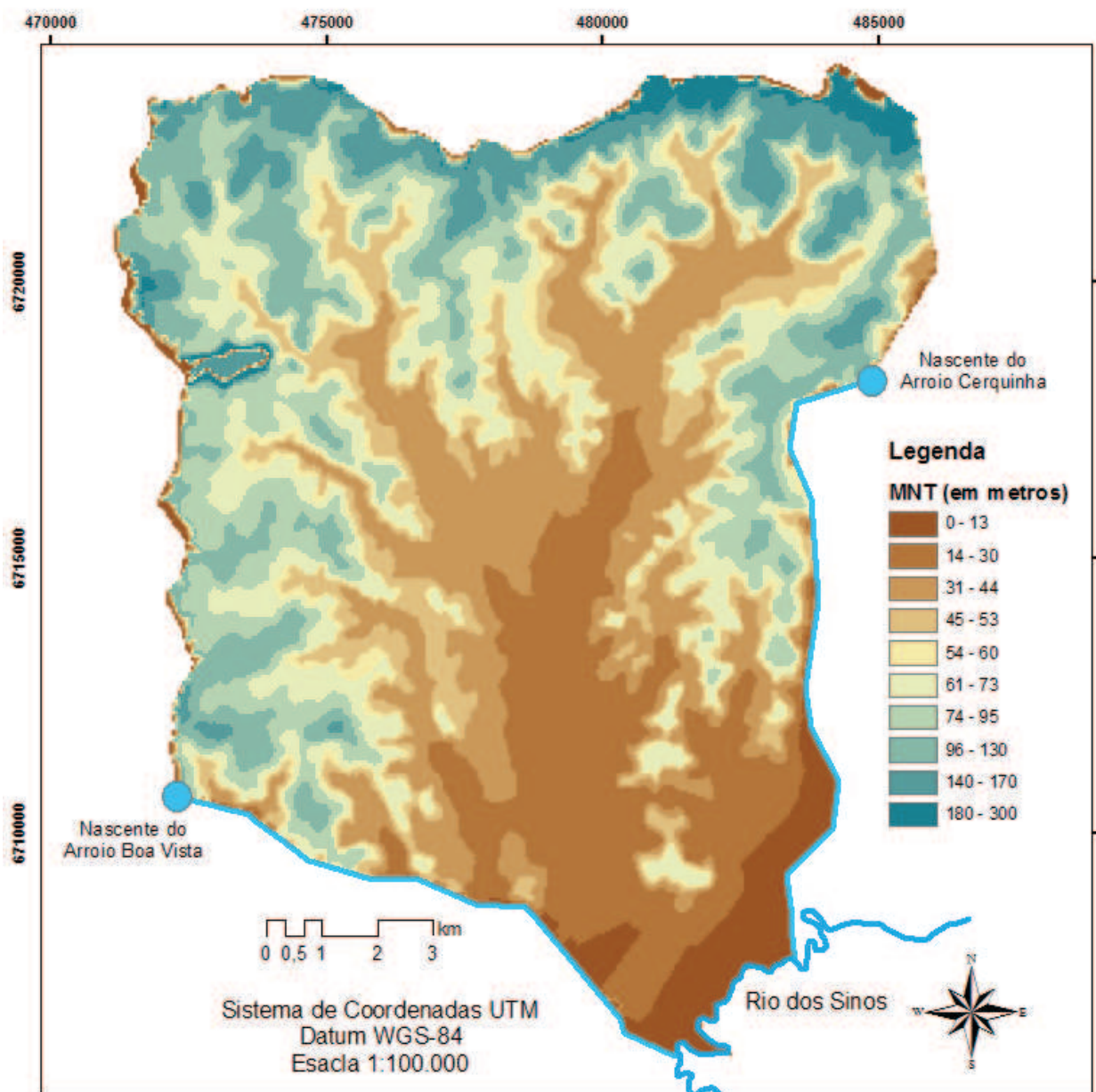


Figura 21: Modelo numérico do terreno gerado pela interpolação das curvas hipsométricas.



## 5.2 Hidrogeologia

Segundo Machado (2005), o domínio hidrogeológico é uma área dentro de um grande domínio hidrogeológico ou do sistema aquífero distinguida das adjacentes por pelo menos um dos critérios seguintes: litologia, estrutura, estratigrafia, potenciométrica, geoquímica e hidráulica. De acordo com este conceito, a área apresentada foi delimitada em três domínios hidrogeológicos correspondentes aos: i) arenitos das formações Pirambóia e Botucatu; ii) basaltos da Formação Serra Geral; e iii) depósitos aluvionares, os quais apresentam diferentes potenciais de recarga:

I) As formações Pirambóia e Botucatu constituem o Sistema Aquífero Guarani na área de estudo. O fluxo subterrâneo é condicionado principalmente pela porosidade, com condutividade hidráulica predominante entre  $k = 1 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$  a  $1 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$  (Wojahn, no prelo). As zonas de falha atuam provavelmente como estruturas de maior permeabilidade, inclusive recebendo alimentação das unidades hidroestratigráficas sobrepostas.

As curvas de isoietas foram disponibilizadas pela CPRM-FEPAM (2007). Os valores de precipitação anual na área variam de 1500 a 1600  $\text{mm.ano}^{-1}$ . Hausman (1995) e Marquezan (2000) indicam condições de recarga para o arenito Botucatu e o valor para a recarga de 8% da precipitação anual em formações sedimentares, com 128  $\text{mm.ano}^{-1}$  para a região metropolitana de Porto Alegre, respectivamente. Esse valor foi atribuído para as formações sedimentares, designadas como áreas de alta recarga na figura 22, como modelo simplificado de recarga.

II) As áreas de ocorrência das rochas vulcânicas consideradas confinadas (nordeste da área, município de Estância Velha) e não verdadeiramente confinadas (norte-noroeste; município de Portão), são morros testemunhos de basalto escassos, alterados e com alta densidade de fraturas. Para obter a pontuação da recarga desse domínio litológico, foi inferido o valor entre os depósitos aluvionares e arenitos devido a ausência de dados bibliográficos. A área ao norte apresenta semi-confinamento devido a alta densidade de fraturamento das rochas vulcânicas, tendo sido identificados lineamentos tectônicos dominantes na porção norte inseridas no contexto de forças extensionais com predominância NW-SE, ao passo que na Bacia dos Sinos os lineamentos menores (até 10 km) se orientam predominantemente NE-SW. Os derrames basálticos possuem disjunções colunar ou tabular, as quais atuam como uma rede hidráulica interconectada, conferindo aos derrames um fluxo subterrâneo fissural. A intercalação de derrames pode gerar a estratificação de aquíferos, sendo que as zonas de falha atuam possivelmente como conexões hidráulicas interderrame. Devido a falta de dados da

recarga no conjunto hidrogeológico das rochas vulcânicas, a estimativa de recarga foi feita por inferência. Partiu-se da idéia de que o domínio hidrogeológico composto por rochas vulcânicas possuem recarga maior que os depósitos colúvio-aluvionares, caracterizados fundamentalmente por áreas de descarga e, recarga menor que as formações sedimentares. Foi admitido que o aquífero fissural formado por rochas vulcânicas possui valor intermediário entre os arenitos e áreas de descarga.

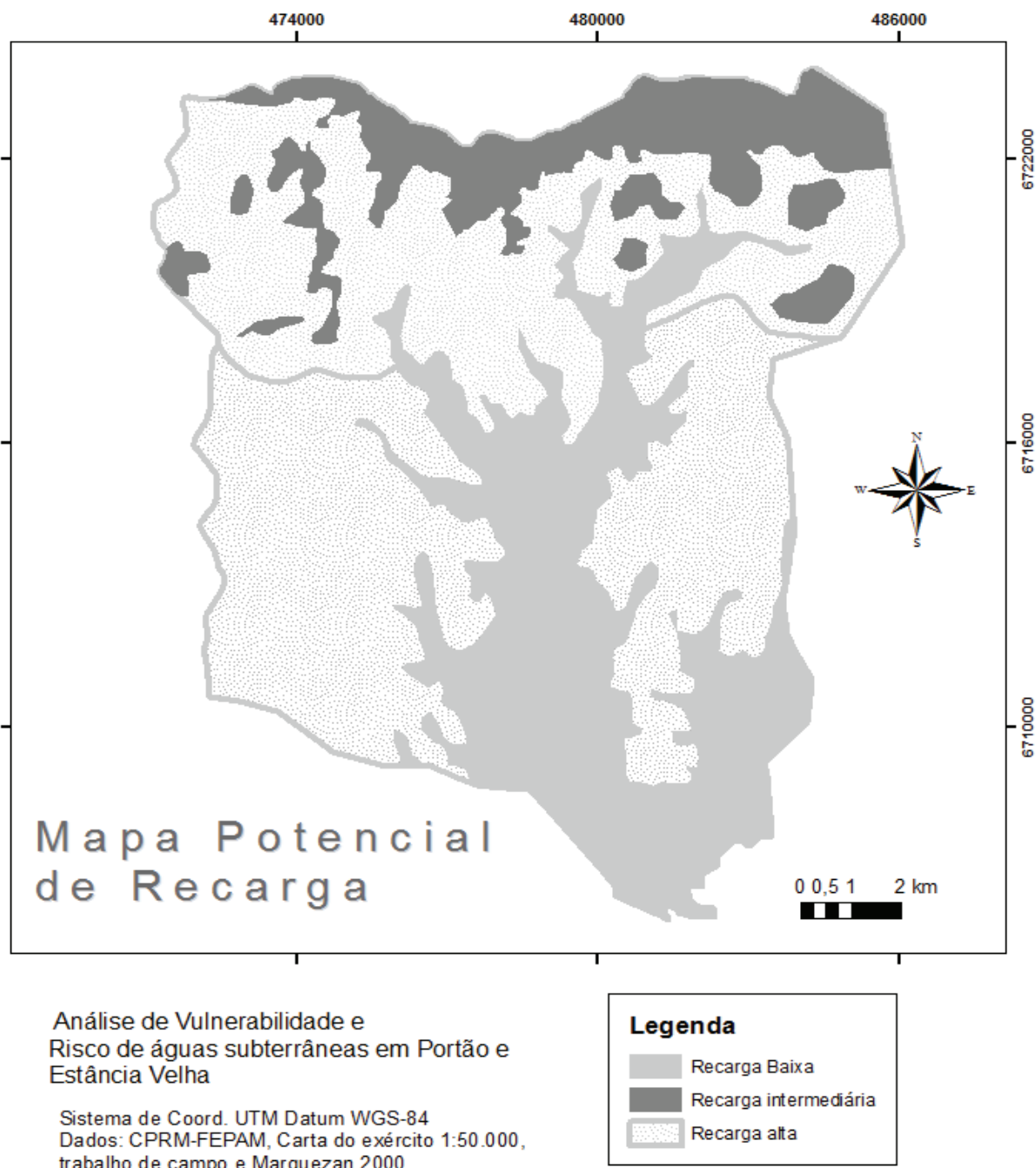


Figura 22: Classificação do parâmetro recarga.



III) Depósitos aluvionares, planícies de inundação, banhados e áreas adjacentes aos canais fluviais com declividade baixa possuem recarga baixa. As áreas de descarga possuem menor pontuação no parâmetro a ser atribuído devido ao equilíbrio de armazenamento subsuperficial de água em áreas úmidas como banhados na conjuntura meandrante do Rio dos Sinos, das áreas adjacentes ao Rio e dos diversos arroios na área de estudo. Nos estudos de Marquezan (2000), para as áreas com as mesmas características que seguem nas proximidades do Rio dos Sinos, ao sul de Portão, a recarga ficou próxima de 11 mm/ano, designadas na figura 22 como áreas de baixa recarga.

O aquífero quaternário, constituído pelos depósitos colúvio-aluvionares ao longo da várzea dos rios, tem seus níveis piezométricos condicionados pela dinâmica fluvial. Este aquífero recebe recarga superficial direta em toda a sua extensão, por ocasião das precipitações pluviométricas, sendo bastante provável o aporte hídrico subterrâneo do Aquífero Guarani. A figura 23 é a superfície potenciométrica com valores de até 70m de profundidade, com o fluxo hidráulico convergindo para os arroios e Rio dos Sinos.

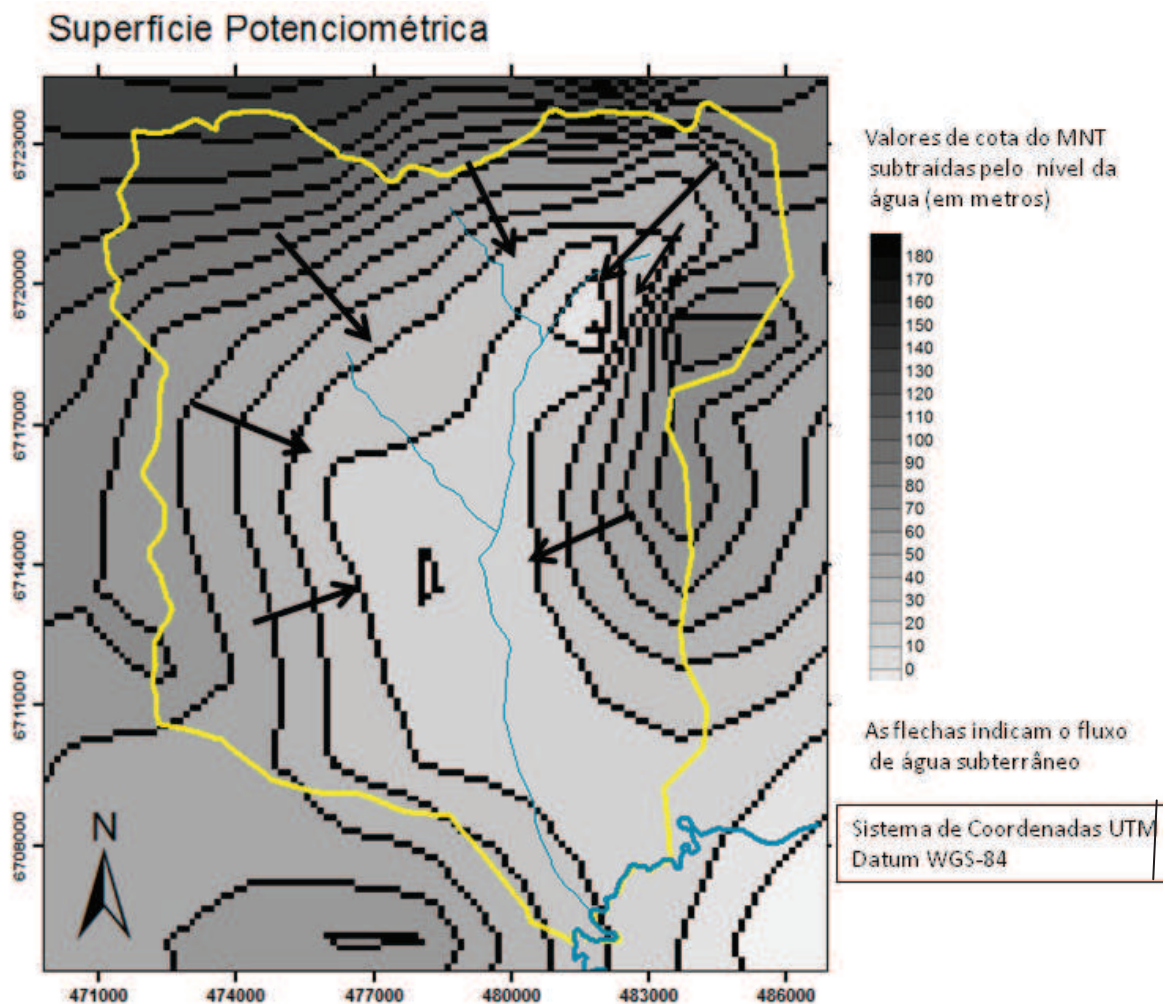


Figura 23: Superfície potenciométrica. As flechas indicam o sentido do fluxo subterrâneo.

## 5.3 Solos

A separação de domínios de solo foi fundamentada no ensaio de permeabilidade, análise granulométrica para separação em domínios texturais, nas características geomorfológicas como controle pedogenético, além da caracterização mineralógica incluindo argilominerais.

### 5.3.1 Análise de campo

A análise de campo permitiu separar, em um primeiro momento, três tipos de solo: ao norte, Neossolo, um solo prematuro, raso associado ao basalto; o Argissolo ocupando as áreas de média a alta declividade associado principalmente aos arenitos Pirambóia e Botucatu e, o Planossolo, associado às áreas drenadas, de várzea.

Observações de campo permitiram identificar somente um perfil de solo com estrutura em bloco, enquanto o restante dos solos tem estrutura granular. Portanto, esta característica defendida como relevante nos estudos de Dixon (2005), não está sendo considerada na parametrização, uma vez que o mapa de vulnerabilidade não apresentaria variações relativas a estrutura.

Predominam na região os Argissolos provenientes de arenitos com influência do rastejo (*creeping*) dos solos originados em cotas mais elevadas na Formação Serra Geral. Os depósitos coluvionares originados dos basaltos conferem aos Argissolos tons marrom e vermelho, assim como um horizonte B bem delimitado, muito argiloso com espessuras decimétricas a métricas (figura 24), esse domínio se trata do **Argissolo 1**.

A ocorrência das voçorocas (figura 25) é determinada pela diferença textural abrupta, com horizontes superficiais arenosos e subsuperficiais argilosos (Streck *et al.* 2008). A taxa de escoamento superficial aumenta pela diferença textural entre as camadas arenosas e argilosas, contribuindo para originar essas feições de erosão hídrica. Essa camada argilosa subsuperficial atuam como um selante importante na presença de contaminantes.

As voçorocas contribuem para a exposição de áreas de recarga direta do aquífero e, se associada a atividades agrícolas com utilização de produtos químicos, o risco de contaminação é potencializado (Filizola *et al.* 2008).

Os controladores pedogenéticos modificam-se no terreno na porção centro-sul da área de estudo, designando outro domínio, o **Argissolo 2**, O substrato rochoso é o arenito Pirambóia, o relevo é suave ondulado a plano, já não possui a contribuição do basalto de

forma significativa, por vezes ausente, tornando os solos mais arenosos que o domínio do Argissolo 1.

É caracterizado por solos que apresentam predominantemente transição difusa entre os horizontes (figura 26). O Argissolo pode ser espesso, com presença do horizonte E (eluvial) que caracteriza a perda de material fino para o horizonte B.

Os solos das áreas mais elevadas, divisor de águas da bacia hidrográfica, apresentam-se em formação, pela alteração do basalto, caracterizam-se como Neossolos pouco espessos.

Nas áreas de baixa declividade, basicamente no fundo dos vales, predominam os Planossolos, caracterizados pelo acúmulo de matéria orgânica e de sedimentos trazidos pelas cheias dos canais fluviais.

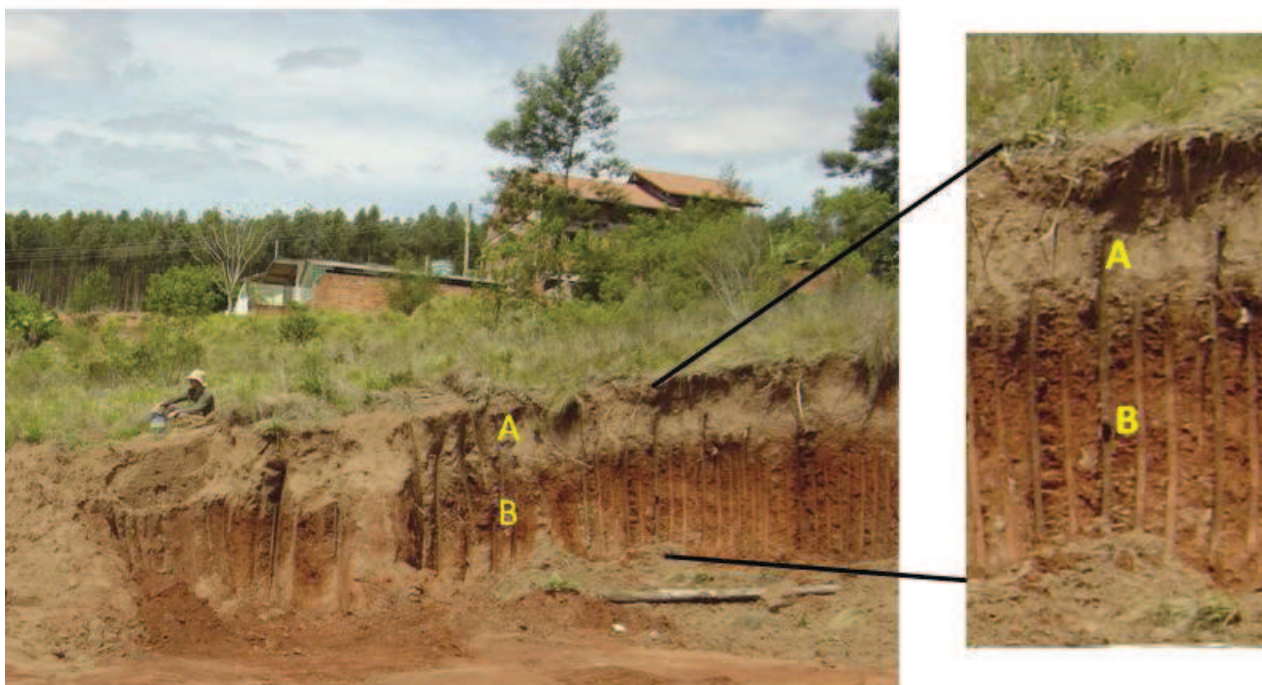


Figura 24: Domínio do Argissolo 1 em Estância Velha. A e B são respectivamente horizontes A e B.





Figura 25: Voçorocas, indicadas pelas flechas amarelas, com mais de um metro de largura e profundidade. Foto: Daniel Wojahn (2008).

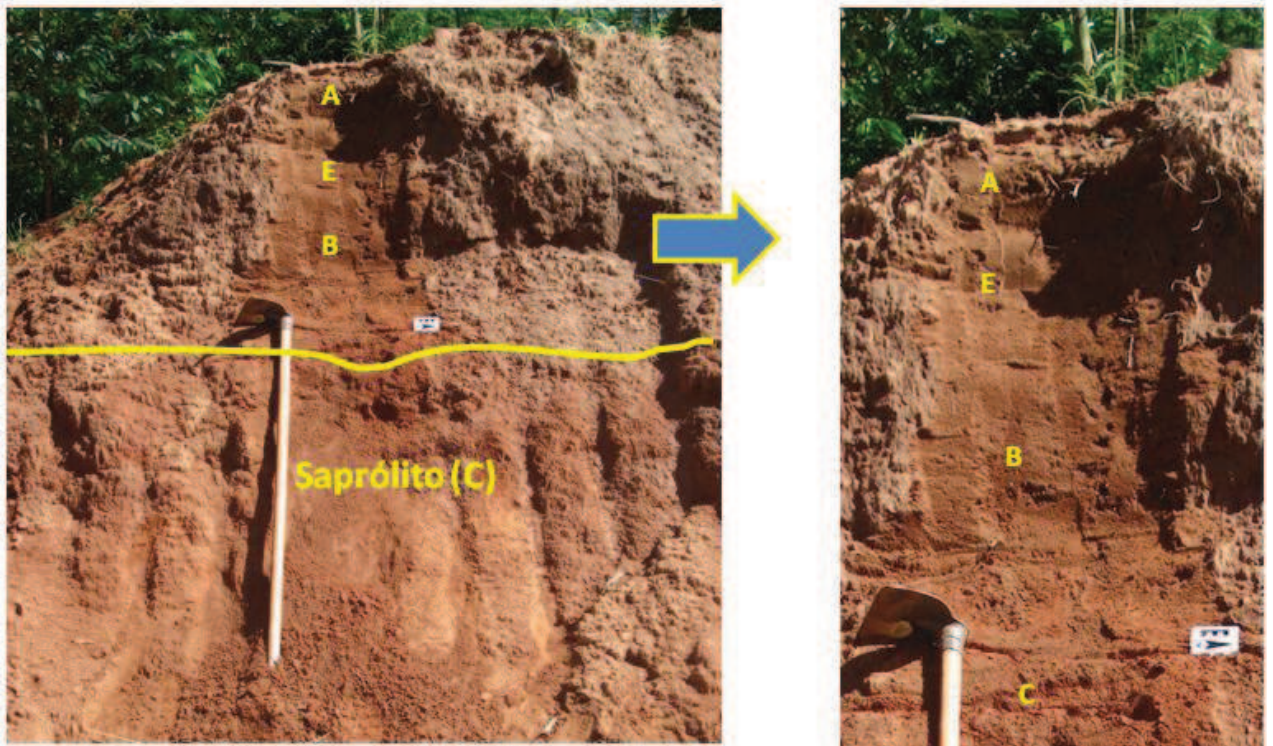


Figura 26: Solo arenoso localizado no centro-sul de Portão. A, E, B e C são horizontes do solo.

### 5.3.2 Dados granulométricos

Os dados granulométricos obtidos por horizontes dos perfis (em anexo) reafirmam as características visualizadas em campo. A amostra POR\_P13, na tabela 18 e figura 27, representa o Argissolo do tipo 1, o qual chega a apresentar 62,11% de argila no horizonte Bt, enquanto o horizonte A, superficial, é mais arenoso.

Tabela 18: Granulometria da amostra em Portão (POR\_13) por horizonte indicando a diferença textural abrupta dos horizontes no Argissolo.

	Granulometria	POR_P13_HA	POR_P13_HB	POR_P13_HE
Seixo Fino	4,00	0,00	0,00	0,00
Seixo MF	2,00	0,00	0,00	0,10
Areia MG	1,00	0,00	0,00	0,06
Areia G	0,50	5,49	2,69	5,21
Areia M	0,250	23,50	10,73	26,05
Areia F	0,125	31,12	16,48	35,17
Areia MF	0,062	12,79	7,99	14,86
Silte/Argila	< 0,062	27,10	<b>62,11</b>	18,55

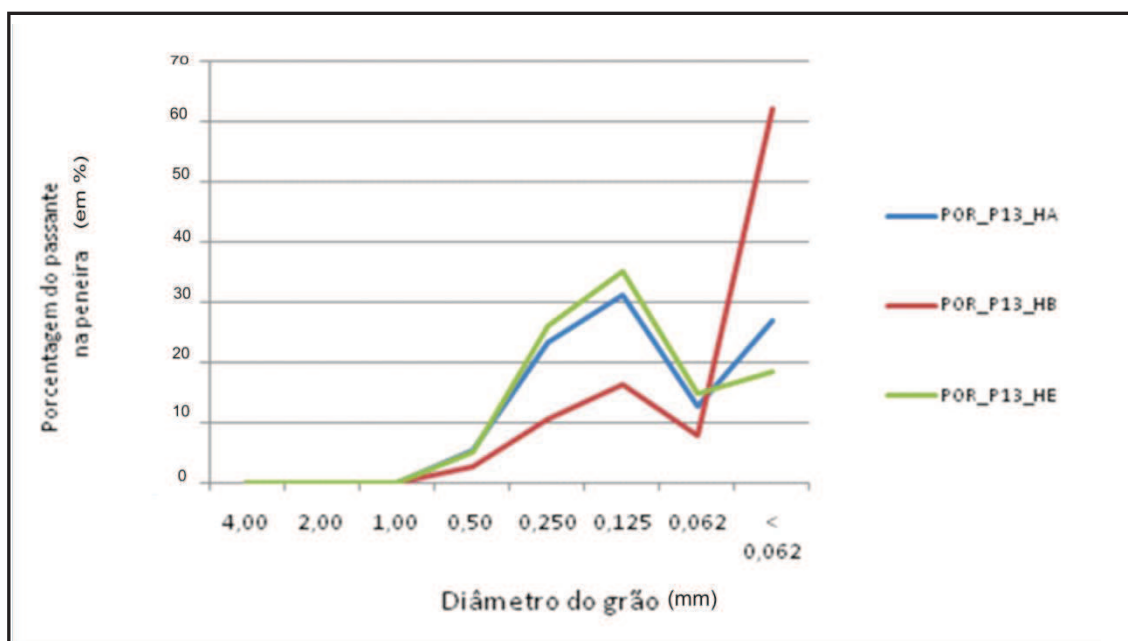


Figura 27: Análise granulométrica da amostra de Portão indicando a diferença textural entre horizontes do Argissolo ao norte de Portão.

Tabela 19: Granulometria da amostra em Portão (POR\_10) por horizonte indicando a homogeneidade textural dos horizontes no Argissolo.

	Granulometria	POR_P10_HA	POR_P10_HB	POR_P10_HE
<b>Seixo Fino</b>	4,00	0,00	0,00	0,00
<b>Seixo Muito Fino</b>	2,00	0,07	0,00	0,00
<b>Areia Muito Grossa</b>	1,00	0,30	0,24	0,11
<b>Areia Grossa</b>	0,50	13,30	10,34	8,56
<b>Areia Média</b>	0,250	25,17	23,81	22,81
<b>Areia fina</b>	0,125	27,63	31,67	32,50
<b>Areia Muito Fina</b>	0,062	13,89	17,02	16,69
<b>Silte/Argila</b>	< 0,062	19,63	16,92	19,34

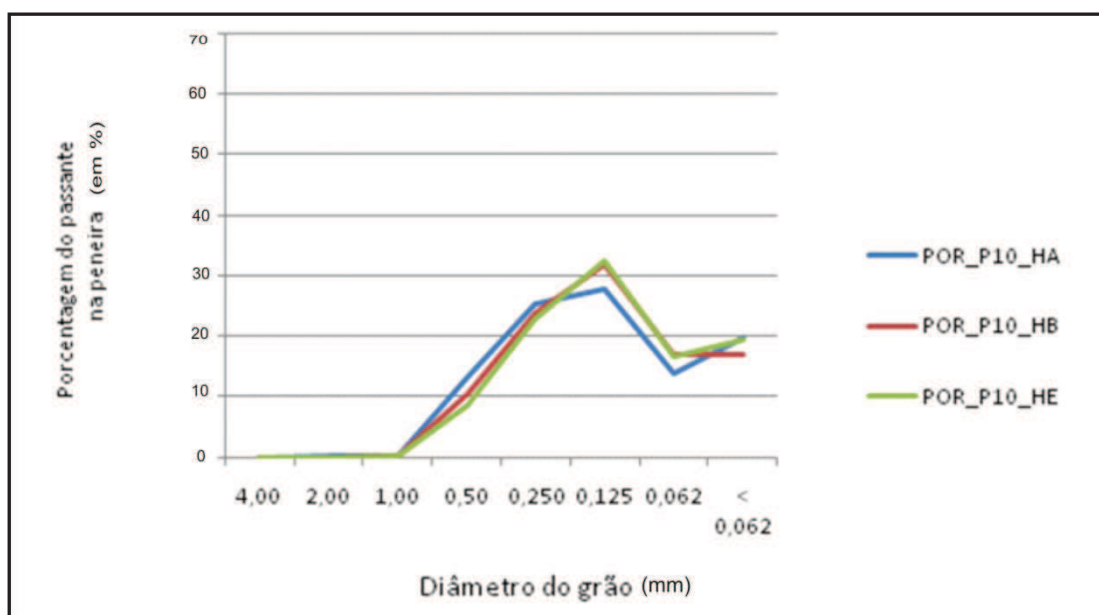


Figura 28: Análise granulométrica da amostra de Portão indicando horizontes arenosos do Argissolo ao sul de Portão.

As análises granulométricas mostram que na porção centro-sul da área no município de Portão predominam solos arenosos e franco arenosos, enquanto na porção norte de Portão e Estância Velha, os solos são mais argilosos, caracterizando dois domínios diferentes de Argissolo, atribuídos a erosão do basalto e variação do declive do centro-sul ao norte da área.

### 5.3.3 Ensaio de infiltração

Os domínios de Argissolo foram classificados também com base nos valores de permeabilidade  $k$ . Para o domínio de Argissolo 1, ocorre horizonte A espessarenico com



permeabilidade superior ao horizonte B textural, o qual predomina argila, com valores de permeabilidade até  $5 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  com valores mais baixos de permeabilidade em relação ao segundo grupo de amostragem de Argissolos.

O segundo domínio, Argissolo 2, localizados na parte centro-sul da área de estudo, possui constante de permeabilidade até 10 vezes maior que o primeiro domínio, da porção norte. Este ensaio de permeabilidade permite separar as amostragens em dois domínios de Argissolo, como circulado na figura 29.

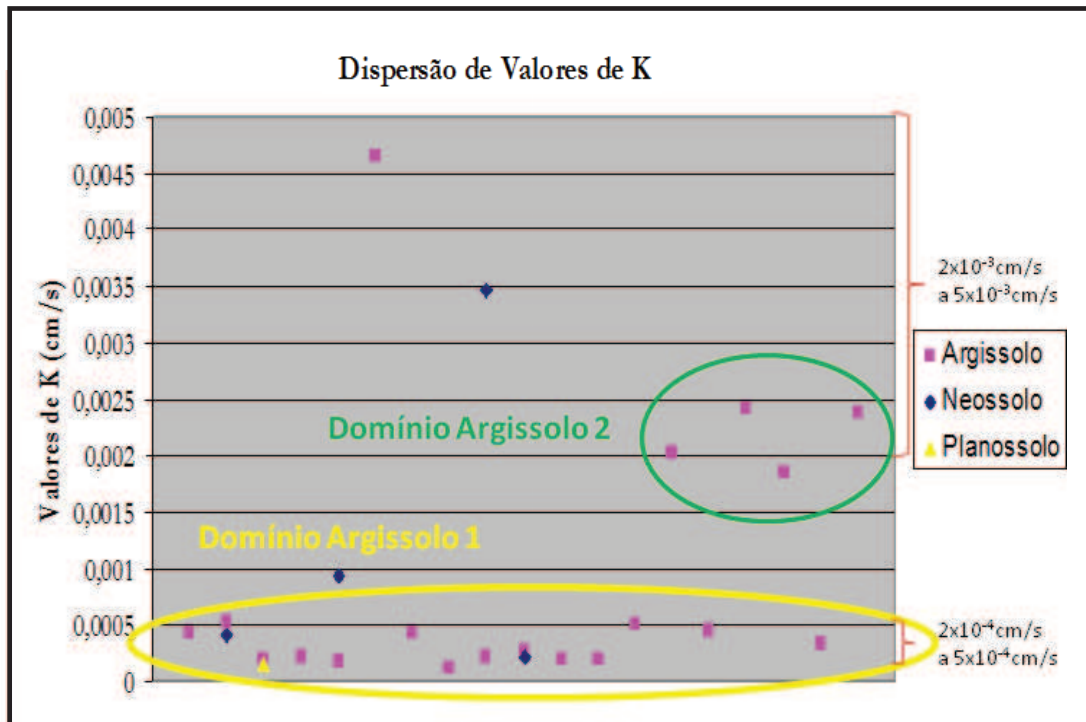


Figura 29: Gráfico de dispersão dos valores de k e tipos de solo.

O valor de permeabilidade relativamente alto para a camada argilosa pode ter ocorrido pelo fato de horizontes arenosos serem muito espessos (até 60 cm) e ocorrer deslocamento horizontalizado durante os ensaios de permeabilidade.

Não foi verificada correlação entre a permeabilidade e as estruturas do solo (granular e bloco), pois as constantes tiveram valores muito similares, isso pode ocorrer provavelmente pela matéria orgânica ter ação eficaz na retenção de água na amostra de solo em blocos e equilibrar o comportamento hidráulico.

### 5.3.4 Difractometria de Raios-X

A difratometria de raios-X mostrou que as fases minerais comuns das amostras de solo são quartzo, feldspato e óxido de ferro. Na fração menor que 4  $\mu\text{m}$ , o argilomineral comum é a caolinita; ocorrendo fases de ilita e esmectita em menor quantidade.

Nas figuras 30 e 31 são apresentados os difratogramas pelo método do pó (mineralogia total) por horizonte dos perfis de solo, característicos aos domínios arenoso e argiloso respectivamente e, ambos os horizontes apresentam caolinita, com maior contagem no horizonte B, por ser mais argiloso.

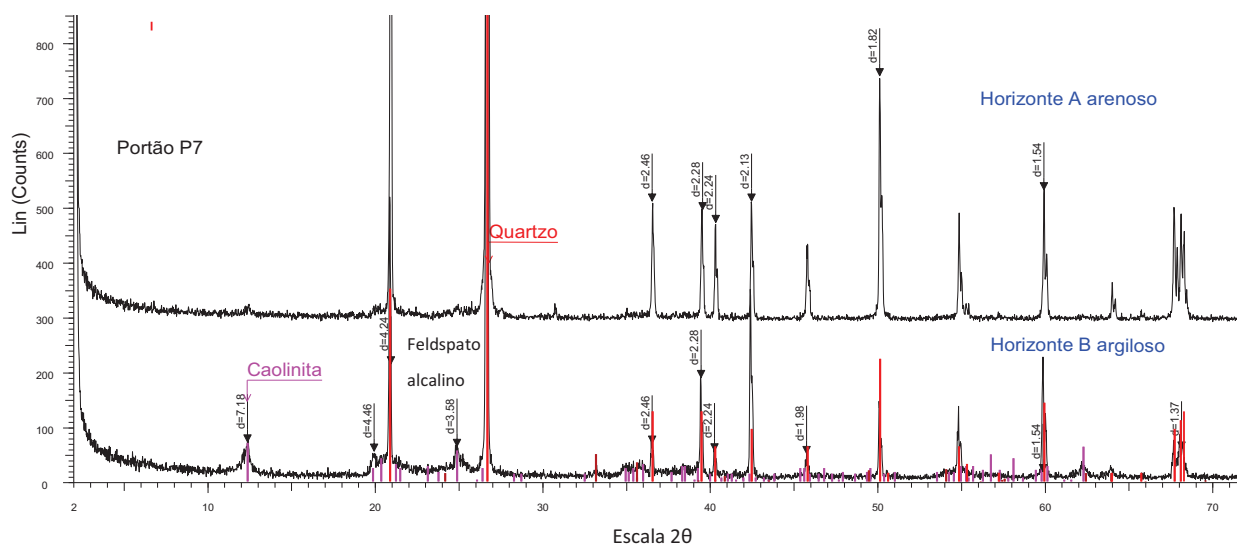


Figura 30: Difratograma da mineralogia total (método do pó) da amostra do domínio Argissolo 2 de Portão. A mineralogia dos horizontes A e B é constituída de feldspato alcalino e quartzo, sendo que o horizonte B possui contagem representativa da caolinita.

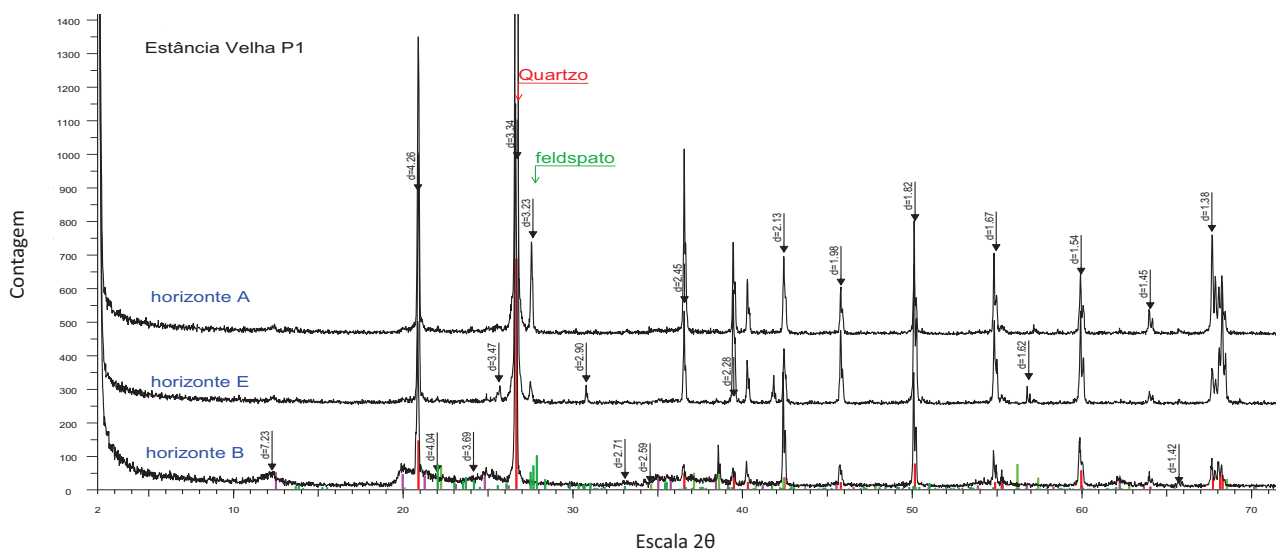


Figura 31: Difratograma da mineralogia total (método do pó) da amostra do domínio Argissolo 1 de Estância Velha, ponto 1. A mineralogia dos horizontes A, E e B é constituída por feldspato alcalino, quartzo com fases imprecisas de ankerita ou dolomita e óxido de ferro como hematita. A caolinita é somente representativa no horizonte B, o mais argiloso.



Os difratogramas representados nas figuras 32 a 34 referem-se às mesmas amostras dos domínios de Argissolo 1 e 2, com a amostra orientada para análise de argilominerais por horizonte. A linha em cor preta indica a análise da amostra ao natural; a linha de cor azul indica a aplicação de etilenoglicol como expansivo e, a linha vermelha designa a amostra calcinada à 550°C por 2h. Os minerais indicados são caolinita e ilita, com maior contagem no horizonte B e homogeneidade de fases minerais.

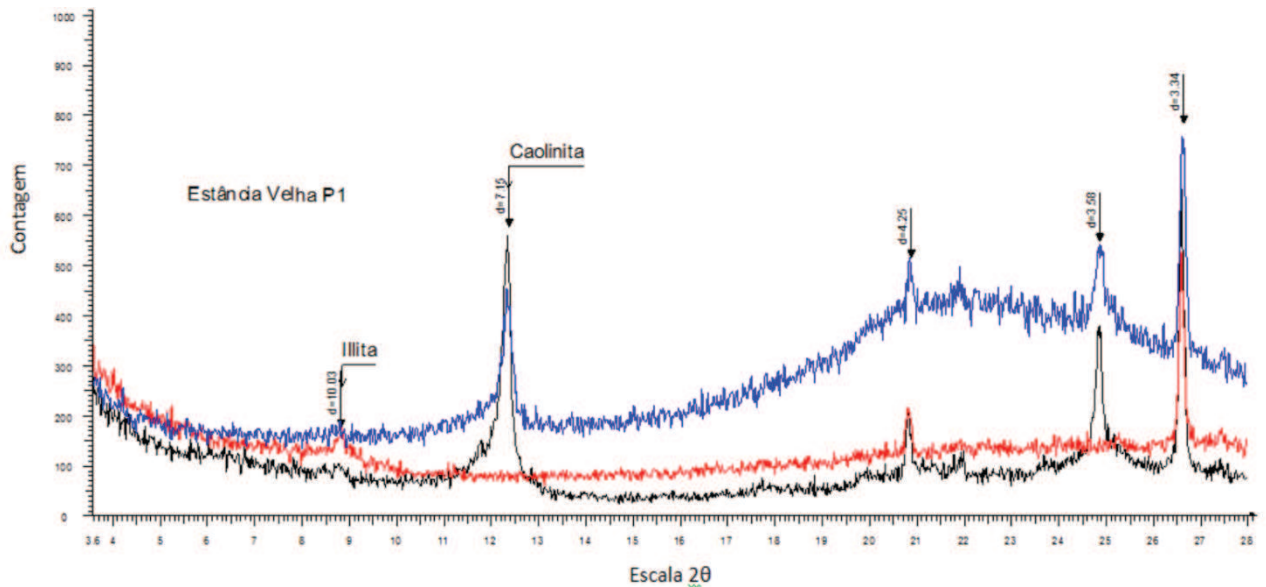


Figura 32: Difratograma da fração <4μm para análise de argilominerais do horizonte A, domínio de Argissolo 1 em Estância Velha, ponto 1. Os argilominerais indicados são ilita com predominância de caolinita. A linha vermelha mostra o comportamento diagnóstico da caolinita (pico ~ 7,1Å), que é destruída na temperatura de calcinação de 550°C, diferente da ilita (pico ~10Å) que permanece sem afetar a estrutura.

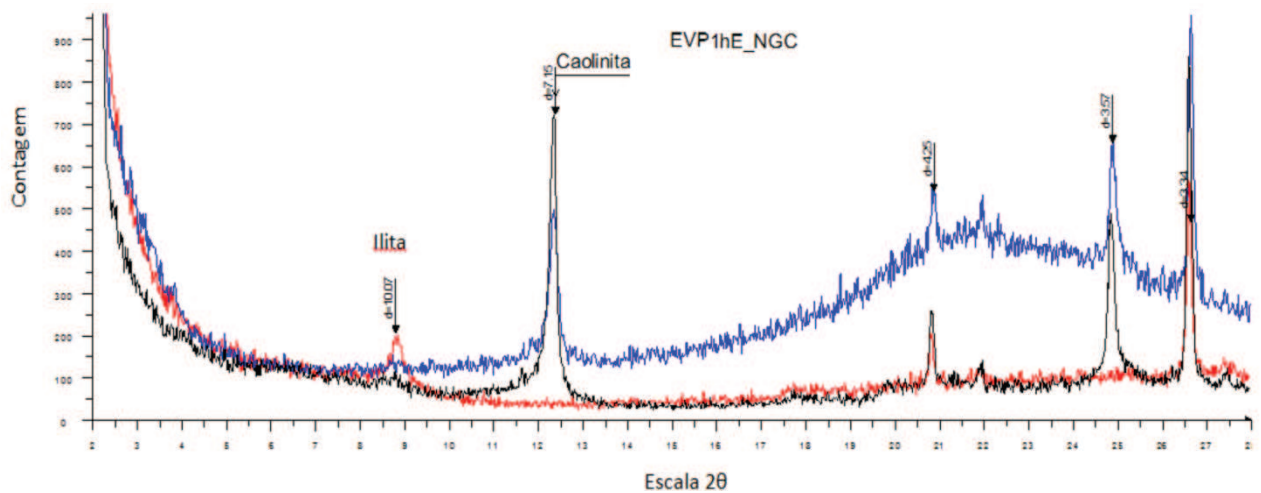


Figura 33: Difratograma da fração <4μm para análise de argilominerais do horizonte E, domínio do Argissolo 2 em Estância Velha, ponto 1. Os argilominerais indicados são ilita com predominância de caolinita, mostrando novamente a composição caolinitica dos solos da região.

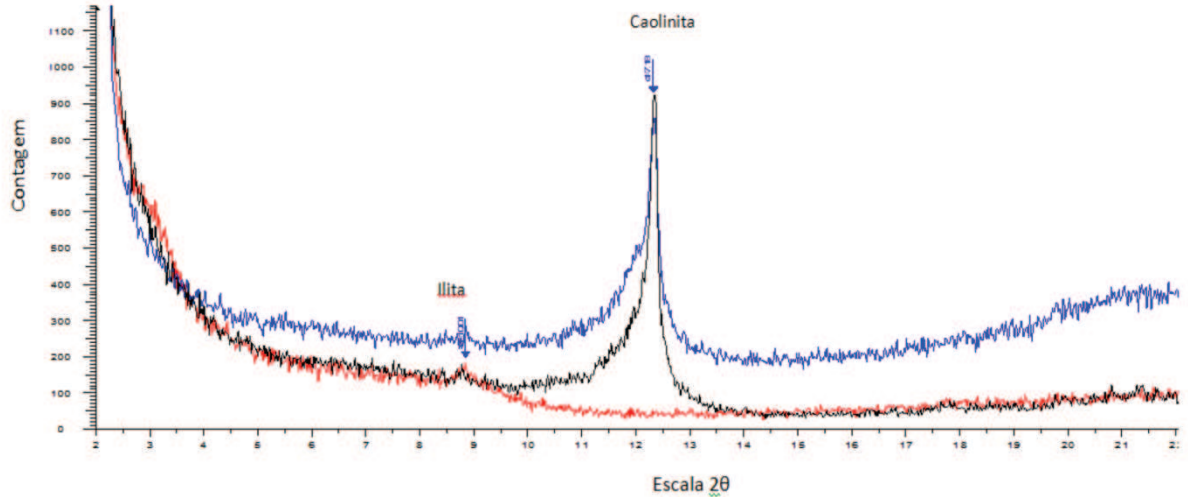


Figura 34: Difratograma da fração <4µm para análise de argilominerais do horizonte B, domínio do Argissolo 1 em Estância Velha, ponto 1. Os argilominerais indicados são ilita com predominância de caolinita, mostrando novamente a composição caolinitica dos solos da região.

A amostra EP4 se refere ao Neossolo, domínio argiloso, cujo difratograma é representado na figura 35 e apresenta minerais como o quartzo e feldspato. O horizonte C é o saprólito do basalto. Esse tipo de solo ocorre somente no norte da área de estudo.

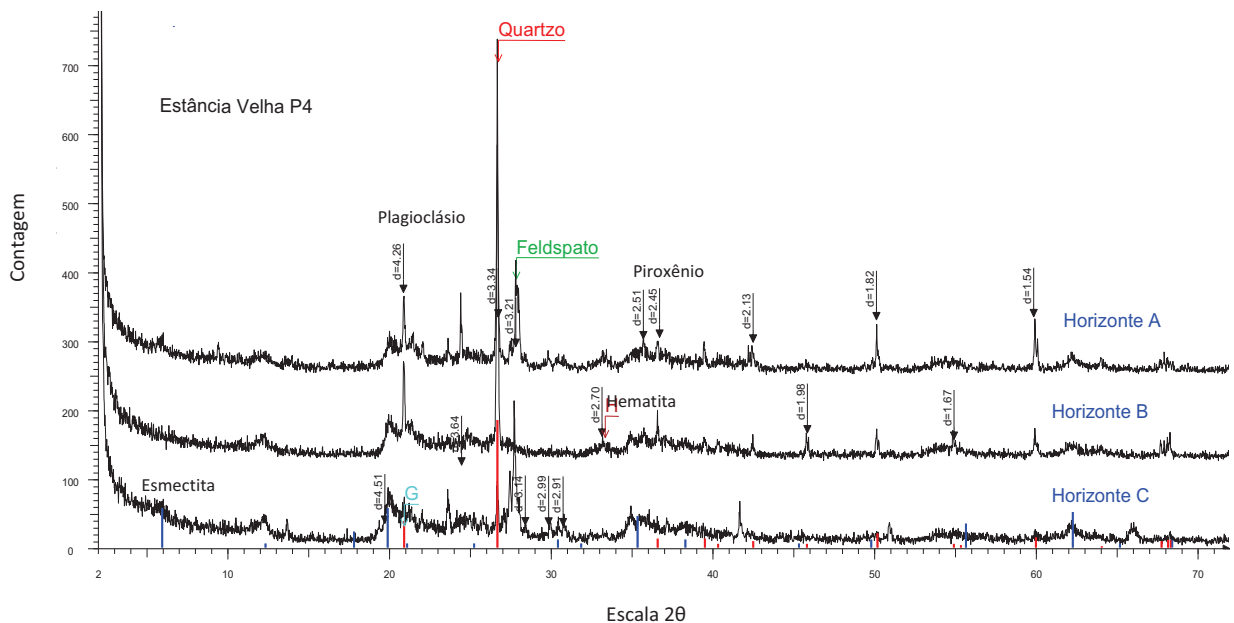


Figura 35: Difratograma da mineralogia total da amostra do ponto 4 dos horizontes de solo A, B e C de Estância Velha. Os minerais identificados nos horizontes A e C são feldspato alcalino, piroxênio e inferência da presença de esmeclita; A e B possui plagioclásio e óxido de ferro como hematita; caolinita presente em todos os horizontes.

Na amostra orientada constatou-se a presença de esmeclita a esse tipo de solo no horizonte A (figura 36).

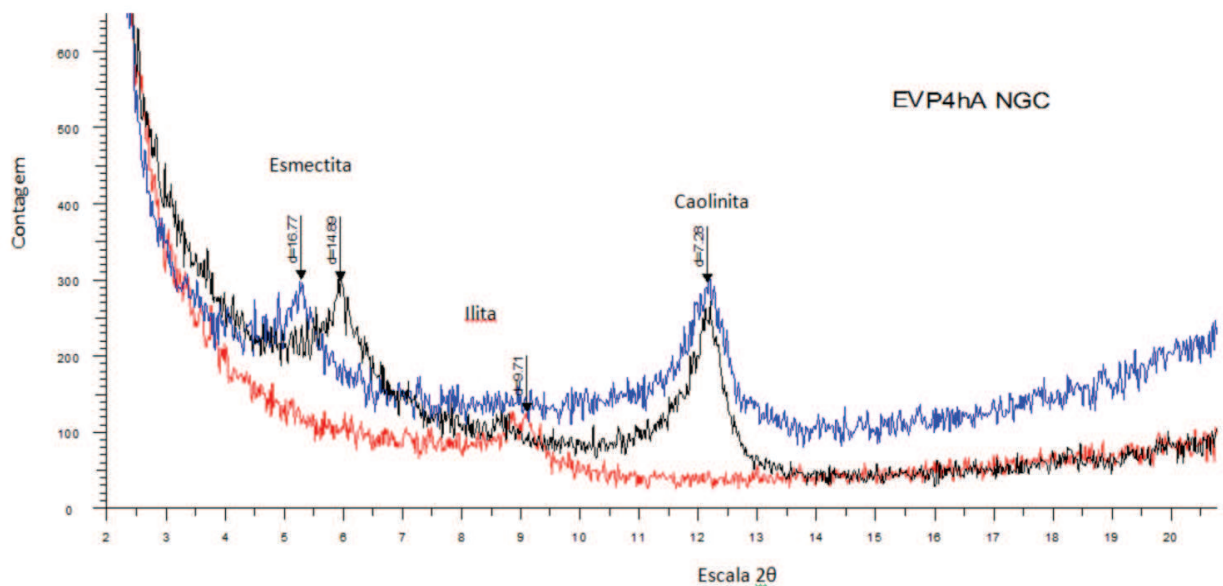


Figura 36: Difratoograma da fração <math><4\mu\text{m}</math> para análise de argilominerais do horizonte A, em Estância Velha, ponto 4. Os argilominerais indicados são caolinita e esmectita (contribuição da alteração do basalto) e ilita subordinada.

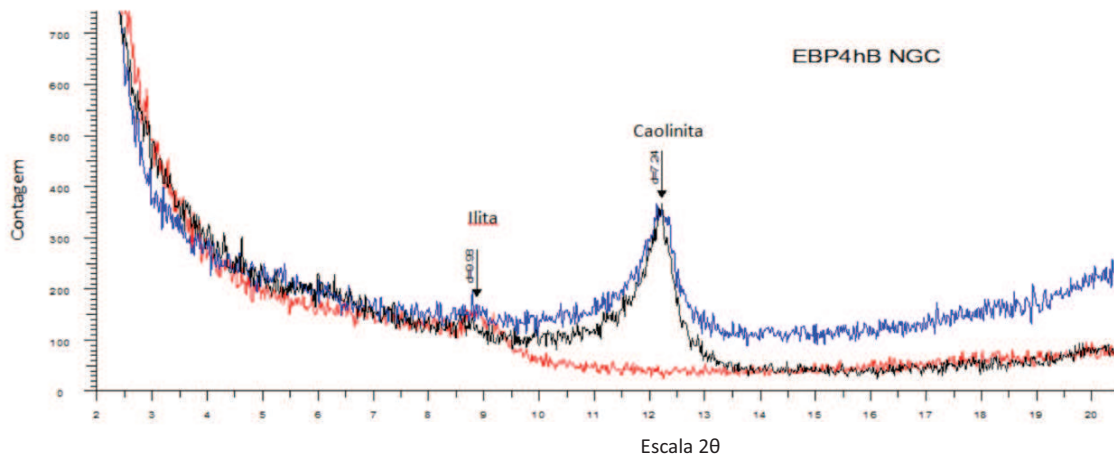


Figura 37: Difratoograma da fração <math><4\mu\text{m}</math> para análise de argilominerais do horizonte B em Estância Velha, ponto 4. Os argilominerais indicados são ilita com predominância de caolinita, mostrando novamente a composição caolínica dos solos da região.

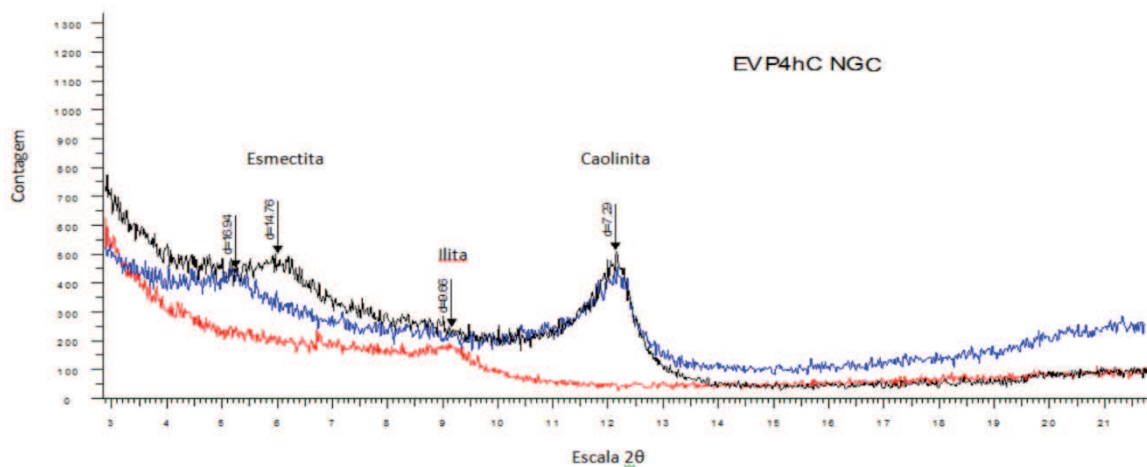


Figura 38: Difratoograma da fração <math><4\mu\text{m}</math> para análise de argilominerais do horizonte C, em Estância Velha, ponto 4. Os argilominerais indicados são caolinita e esmectita e ilita subordinada.

### 5.3.5 Classificação dos domínios de solo

Os solos da área de estudo foram classificados em quatro domínios de acordo com suas características físicas e mineralógicas, contemplando todo o levantamento de dados. O Argissolo foi separado em dois domínios devido à diferença textural, com variação de espessura proeminente, controlada pela declividade do terreno. Os dados mostram que na porção norte de Portão e Estância Velha, os solos são mais argilosos, enquanto na porção centro-sul da área no município de Portão, predominam solos arenosos e franco arenosos, resultando em dois domínios diferentes de Argissolo, tipo 1 e 2, respectivamente.

O primeiro domínio é o **Argissolo 1**. O solo se apresenta espesso com grande quantidade de sedimentos finos, principalmente no horizonte B, indicando camada com comportamento impermeabilizante. O horizonte B textural é caracterizado pelo horizonte que concentra o ganho de argila e matéria orgânica dos horizontes A ou A+E.

O Argissolo é composto pelos horizontes A-E-B<sub>t</sub>-(C) ou A-B<sub>t</sub>-(C) (figura 24, pág. 77), sendo bem marcados e as constantes de permeabilidade são diferentes, devido a diferença textural. Por ser mais arenoso, o horizonte A (+E) tem taxa de infiltração muito maior que B<sub>t</sub> (horizonte muito argiloso), respectivamente  $k_{hA (+E)} = 9,25 \cdot 10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$  e  $k_{hB} = 1,73 \cdot 10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$ . Gomes *et al.* (2008b), apresentam a relação matricial entre classes de condutividade hidráulica e declividade para potencial de infiltração. Os solos em relevos ondulado a suave ondulado e com condutividade hidráulica baixa, semelhantes aos solos do domínio Argissolo 1, possuem baixo potencial de infiltração, favorecendo o escoamento superficial. .

O **Argissolo 2** apresenta o Argissolo com os mesmos horizontes, porém, os horizontes são difusos, o perfil é mais arenoso, onde o B<sub>t</sub> não é tão saliente, facilitando a condutividade hidráulica. Esse domínio aparece nas áreas de declividade mais baixa. A análise granulométrica indica duas assinaturas diferentes, a presença da fração menor que 0,062mm é maior no Argissolo 1, fazendo com que esse tipo de solo apresente menor potencial de permeabilidade em comparação com o Argissolo 2.

O terceiro domínio é o Planossolo. Ele está presente nas áreas planas, declividade de 0 a 3° onde predominam áreas de várzea e remobilização hídrica pela dinâmica dos corpos hídricos superficiais. São solos mal drenados por dois motivos: está em ambiente saturado devido a cota topográfica (disposição no relevo em áreas de baixa declividade), e possui composição textural arenosa, mas com acúmulo de matéria orgânica.

O Neossolo é o quarto domínio de solo da área de estudo. Geralmente são solos pouco espessos, imaturos, provenientes diretamente da área fonte por depósito coluvionar. Predomina a alteração proveniente do basalto na área norte de Portão e Estância Velha onde o

controle do relevo acentuado, fator condicionante para a formação de solos rasos e argilosos, individualizando este domínio.

A análise mineralógica mostrou que a diferença dos tipos de Argissolo está na quantidade de material fino e suas espessuras. Isto justifica a classificação desses domínios e está de acordo com a lógica utilizada no método DRASTIC/USEPA, sendo que a classificação em Argissolos 1 e 2 está diretamente associada a distribuição granulométrica (textura) e ao relevo, como fator pedogenético. O solo que apresenta predominantemente argilominerais não expansivos, representados pela caolinita e ilita, faz com que a pontuação baixe, atenuando a vulnerabilidade desse geossistema, caracterizando como uma proteção natural para o aquífero.

As características do solo agregam algumas vantagens à impermeabilização, sendo um importante filtro geoquímico, além da constante de permeabilidade baixa a moderada e teor elevado de argila. A tabela 20 mostra a distribuição dos domínios de solo associados ao substrato rochoso. O domínio de solo mais arenoso do Argissolo está sobreposto as formações Pirambóia e Botucatu. O Planossolo está associado à remobilização hídrica dos sedimentos provenientes das duas formações, já que acompanha as áreas adjacentes as drenagens e áreas de inundação.

O domínio mais argiloso do Argissolo está sobreposto as formações Botucatu e Serra Geral, sendo que os fatores pedogenéticos de maior influência são a composição da rocha fonte, particularmente o basalto, e sua posição no perfil estratigráfico e topográfico.

Tabela 20: Associação pedológica dos domínios de Argissolo quanto a variação de litologia.

Domínio	Tipo de Solo	Fm. Botucatu	Fm. Pirambóia	Fm. Serra Geral
Arenoso (centro-sul Portão)	Argissolo	P7	P1, P2 e P5	-
	Planossolo	-	-	-
Argiloso (norte de Portão e Estância Velha)	Argissolo	P4, P6, P10, P11	-	-
	Neossolo	-	-	P3

A figura 39 é o mapa de classificação dos domínios de solo contemplando todas as características levantadas.



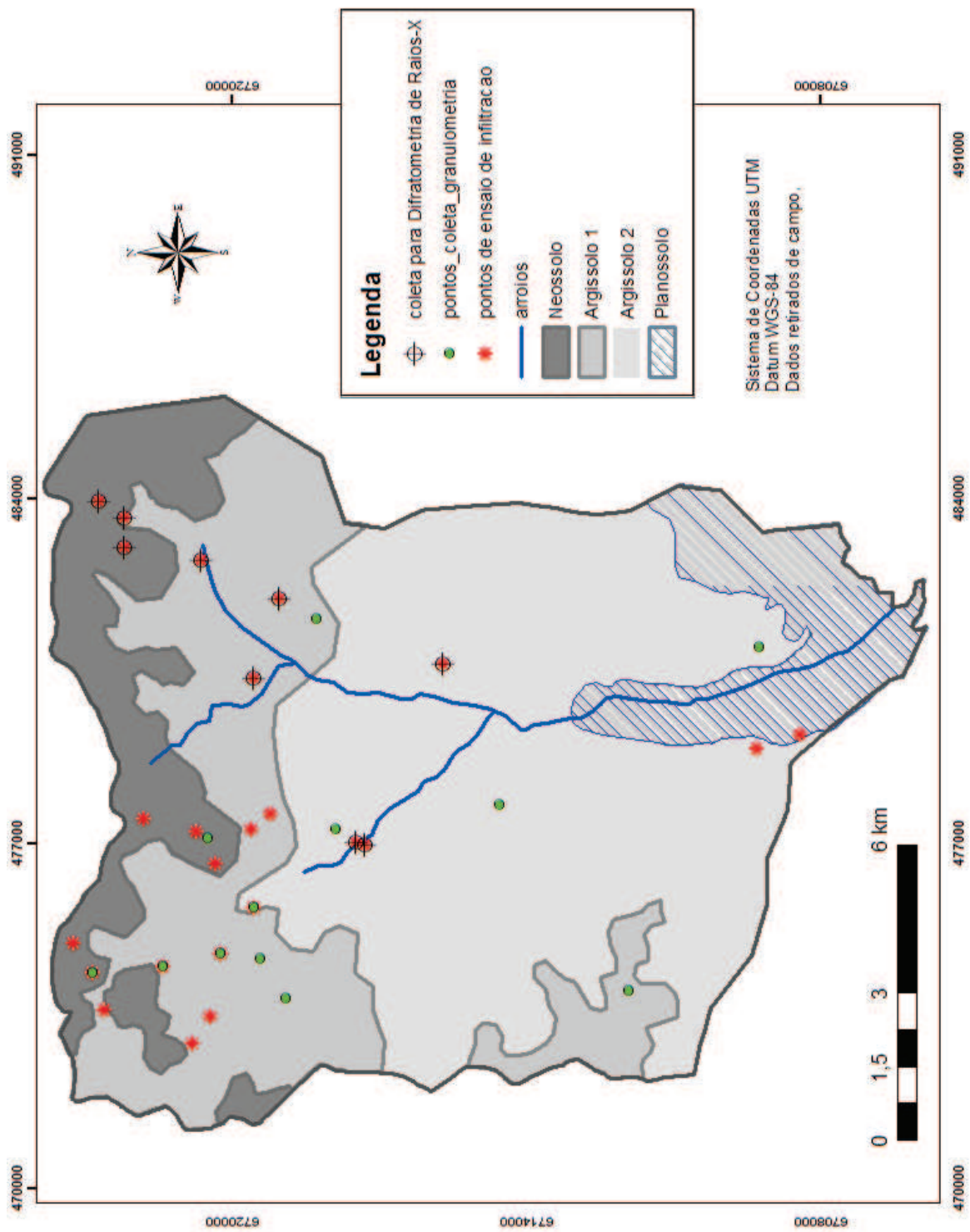


Figura 39: Classificação dos solos e localização das coletas e ensaio de permeabilidade.

## 5.4 Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos pela aplicação do índice DRASTIC

### 5.4.1 Critérios de pontuação na parametrização

O fato do SAG ser constituído fundamentalmente por arenito das formações Botucatu e Pirambóia, torna-o mais vulnerável por ser do tipo granular. Mesmo a Fm. Pirambóia possuindo maior porcentagem de argila (Heine 2008, Wojahn no prelo) o arenito é propício para a difusão de contaminantes em geral, sem considerar a vulnerabilidade específica. O primeiro conjunto hidrogeológico é ajustado para a porção predominante da área de estudo, constituída desses arenitos. Toda área do SAG aflorante recebeu pontuação 9 por se tratar de litologia arenosa, que favorecem a infiltração e circulação de água e, conseqüentemente, contaminantes dispostos no ambiente. A porção norte da área, onde ocorrem rochas vulcânicas, delimita o segundo conjunto hidrogeológico o qual exige um tratamento na análise dos parâmetros diferente da porção sul, de litologia sedimentar.

O forte controle estrutural faz com que as rochas vulcânicas apresentem confinamento não tão eficiente ao ponto de aumentar o valor na classificação do DRASTIC. A tabela 05 (pág. 40) indica pontuação de 2 a 10 para basalto e 3 a 5 para ígneas intemperizadas. O valor 6 foi atribuído pelo grau intenso de fraturamento.

O terceiro conjunto hidrogeológico é referente às áreas úmidas como os banhados e planícies de inundação, onde o freático entra em equilíbrio com as áreas de descarga através dos afluentes. Refere-se ao conjunto hidrogeológico caracterizado por baixo relevo e alto nível da água sujeito a variações sazonais, com alto teor de matéria orgânica, silte e areia. A recarga é dependente principalmente da precipitação. Estas áreas podem estar sob controle de rochas impermeáveis. A pontuação 7 foi atribuída aos depósitos aluvionares pois apresentam maior vulnerabilidade que as outras unidades litológicas da área.

Para a zona vadosa o peso do parâmetro a ser multiplicado pela pontuação é 5. O capeamento de basaltos e rochas intemperizadas recebeu pontuação 6, o manto de alteração dos arenitos recebeu pontuação 7 e, os depósitos aluvionares receberam 8, por apresentarem maior quantidade de silte e argila.

A figura 40 mostra o mapa de declividade com variação de pontuação de 1 a 10, de acordo com os intervalos de pontuação para a declividade na tabela 10, p.44. Maiores declividades recebem pontuação baixa (em azul), pois facilitam o escoamento superficial, assim como áreas mais planas a suave onduladas (tons avermelhados) favorecem a infiltração.

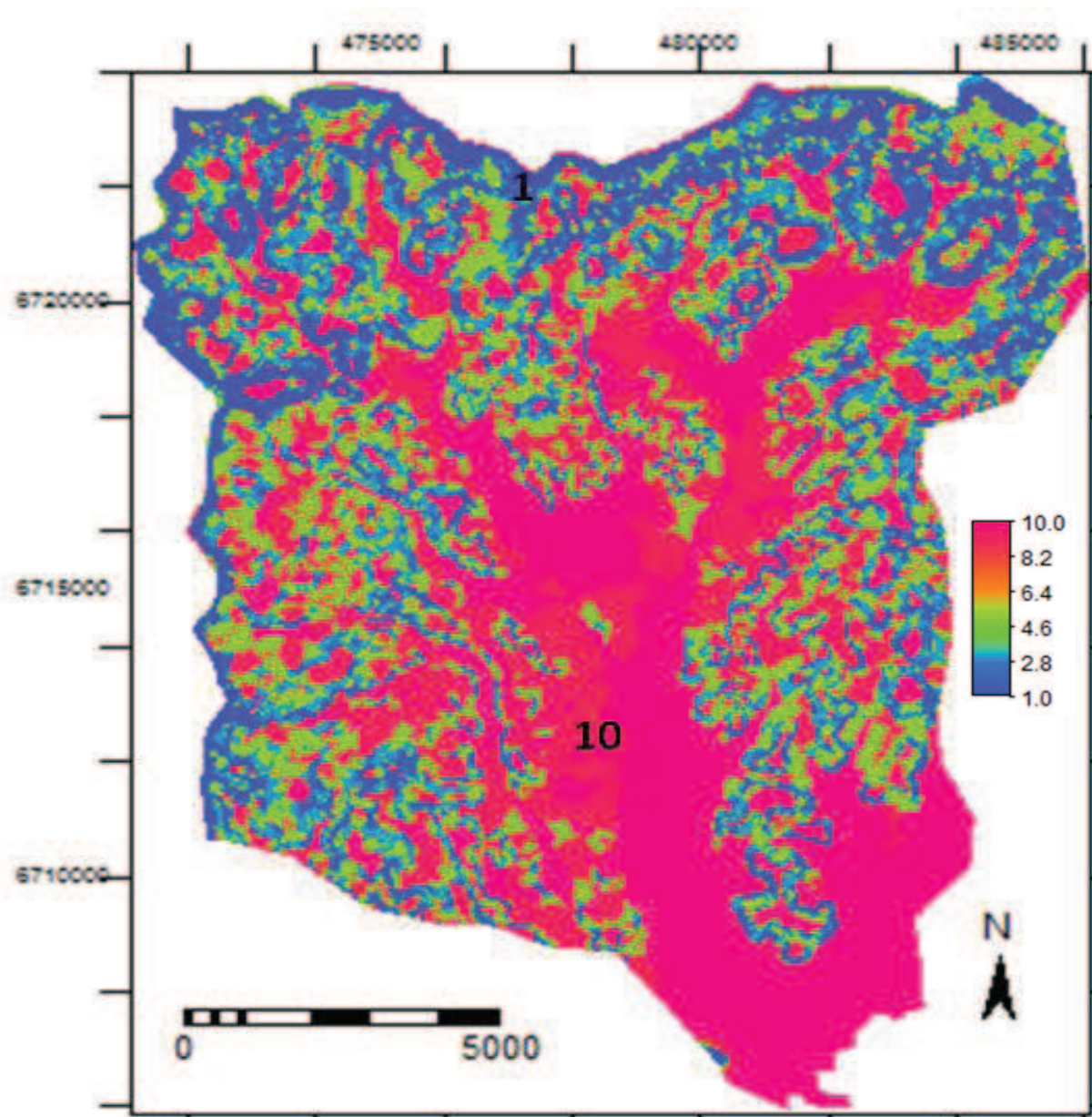


Figura 40: Mapa de declividade confeccionado a partir do modelo numérico do terreno. A técnica do “slicing” no *software* ILWIS permite a divisão pelas classes de pontuação do método DRASTIC. Nota-se que as áreas mais planas (vermelhas) adquirem maior peso pela capacidade de infiltração.

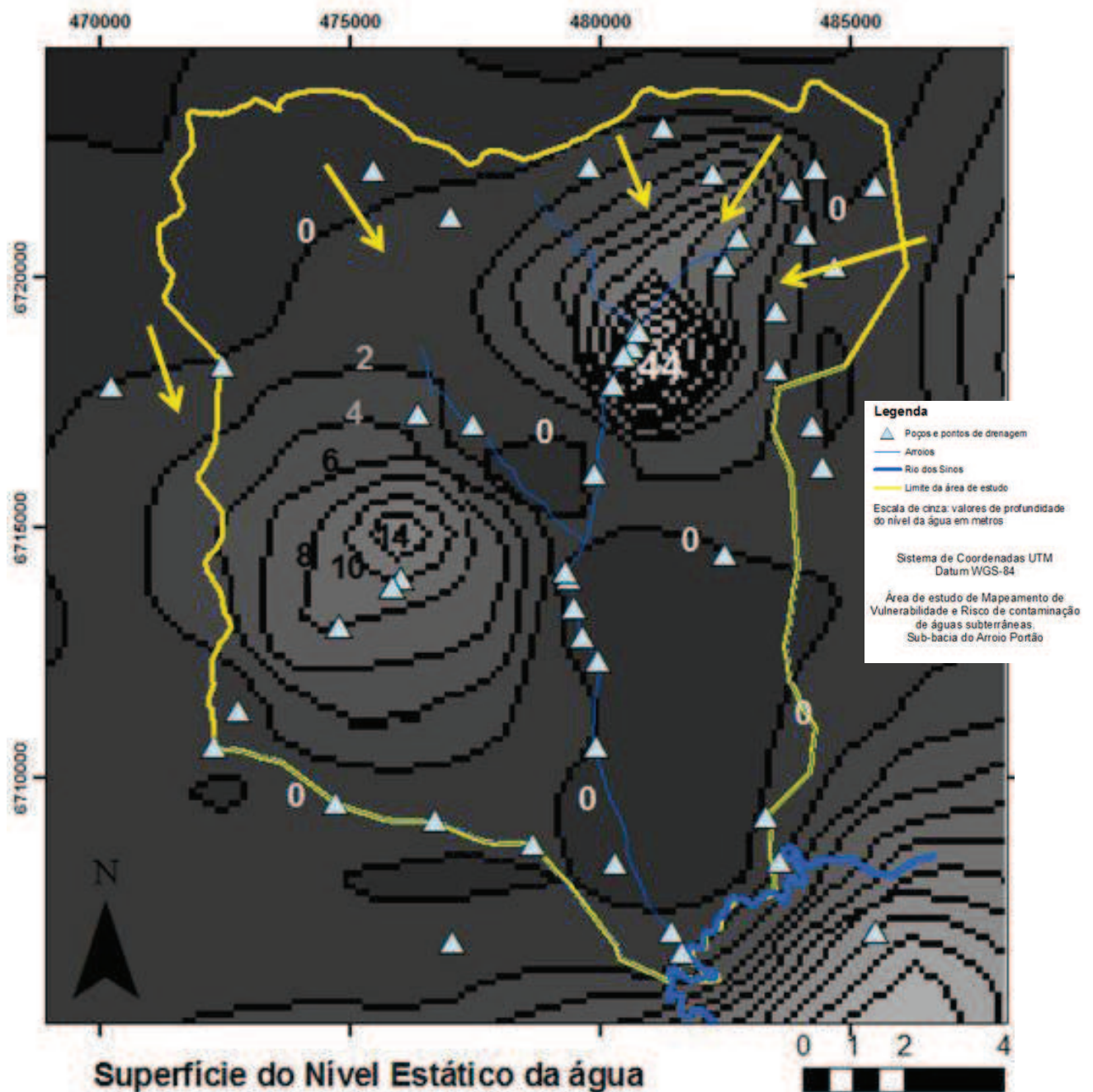
No parâmetro Recarga, os arenitos receberam pontuação 6, conforme tabela 09, página 43, pois segundo dados bibliográficos, o valor de recarga na litologia sedimentar é 8% da precipitação anual. Aos depósitos aluvionares a pontuação conferida foi 1 por serem áreas de descarga. Um valor maior que o indicado pelo DRASTIC é atribuído ao basalto densamente fraturado, portanto, recebeu pontuação 3, menor em relação às formações sedimentares e maior que a área de descarga.

A condutividade hidráulica (parâmetro C) aparece constante para os intervalos especificados do índice DRASTIC por causa do intervalo de condutividade obtido.



O parâmetro solo foi desenvolvido na classificação de domínios. O domínio Argissolo 1, Argissolo 2, Neossolo, Planossolo receberam respectivamente os valores 6, 9, 10 e 8 como pontuação de acordo com pontuação da tabela 12 (pág. 48).

O mapa do parâmetro D (nível da água do aquífero) apresenta maior influência no mapa resultante de vulnerabilidade entre os demais parâmetros estudados e está relacionado com as pontuações respectivas a profundidade do nível da água do aquífero. Os valores estão distribuídos de tal forma que, na figura 41, os tons de cinza escuro caracterizam a área de descarga e um núcleo na porção norte por interferência antrópica de bombeamento na região.



Superfície do Nível Estático da água

Figura 41: Superfície potenciométrica. As setas indicam o sentido do fluxo subterrâneo.

A pontuação dos parâmetros D, T e C foram aplicados de acordo com intervalos determinados pelo DRASTIC sem critérios adicionais ou subjetivos. A tabela 21 resume a pontuação aplicada aos demais parâmetros.

Tabela 21: Critérios de pontuação dos parâmetros R, A, S e I e valores atribuídos.

Parâmetro	Critérios de Pontuação	Pontuação DRASTIC	Pontuação aplicada
<b>R</b>	Diferença litológica considerando porosidade e fraturas, potencial de infiltração e escoamento superficial.	6	<b>6</b>
	Formações sedimentares: 8% da precipitação anual.	1	<b>1</b>
	Valor aproximado de 124mm/ano	3	<b>3</b>
	Depósitos aluvionares: dados bibliográfico <11mm/ano		
<b>A</b>	Rochas vulcânicas: inferência por peso relativo		
	Delimitação por conjunto hidrogeológico.	2-10	<b>6</b>
	Basalto com forte controle estrutural		
<b>S</b>	Arenito	4-9	<b>9</b>
	Depósitos Colúvio-aluvionares	6-9	<b>7</b>
	Delimitação por domínio textural, composição de argilominerais, espessura, declividade.	10	<b>10</b>
	Neossolo: Solos rasos	6	<b>6</b>
	Argissolo 1: Mistura de areia-argila	9	<b>9</b>
<b>I</b>	Argissolo 2: Predomina areia	8	<b>8</b>
	Planossolo: Areia, argila, matéria orgânica		
	Manto de alteração do arenito	2-7	<b>7</b>
	Argissolo espesso	2-6	<b>4</b>
	Basalto	2-10	<b>5</b>
	Planossolo e Depósitos colúvio-aluvionares	4-8	<b>8</b>

#### 5.4.2 Mapa de vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade obtido (figura 42) apresenta um grande intervalo de valores sendo que os parâmetros de maior peso, nível da água e material da zona vadosa, foram decisivos pela presença de áreas com alta vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas.

Os valores de cada domínio dos parâmetros são mostrados nos mapas paramétricos na figura 43, já sendo o peso do parâmetro multiplicado pela pontuação (tabelas de cada parâmetro e equação 2, pág. 29). Os parâmetros R, A e I seguem zoneamento de domínios por critérios essencialmente litológicos e respectivo manto de alteração. Observa-se que o domínio de rochas basálticas possui valores diferentes de acordo o parâmetro não somente

devido ao valor do peso do parâmetro, mas devido ao fato de apresentar interpretações diferentes de acordo com o objeto de estudo que é a vulnerabilidade do aquífero.

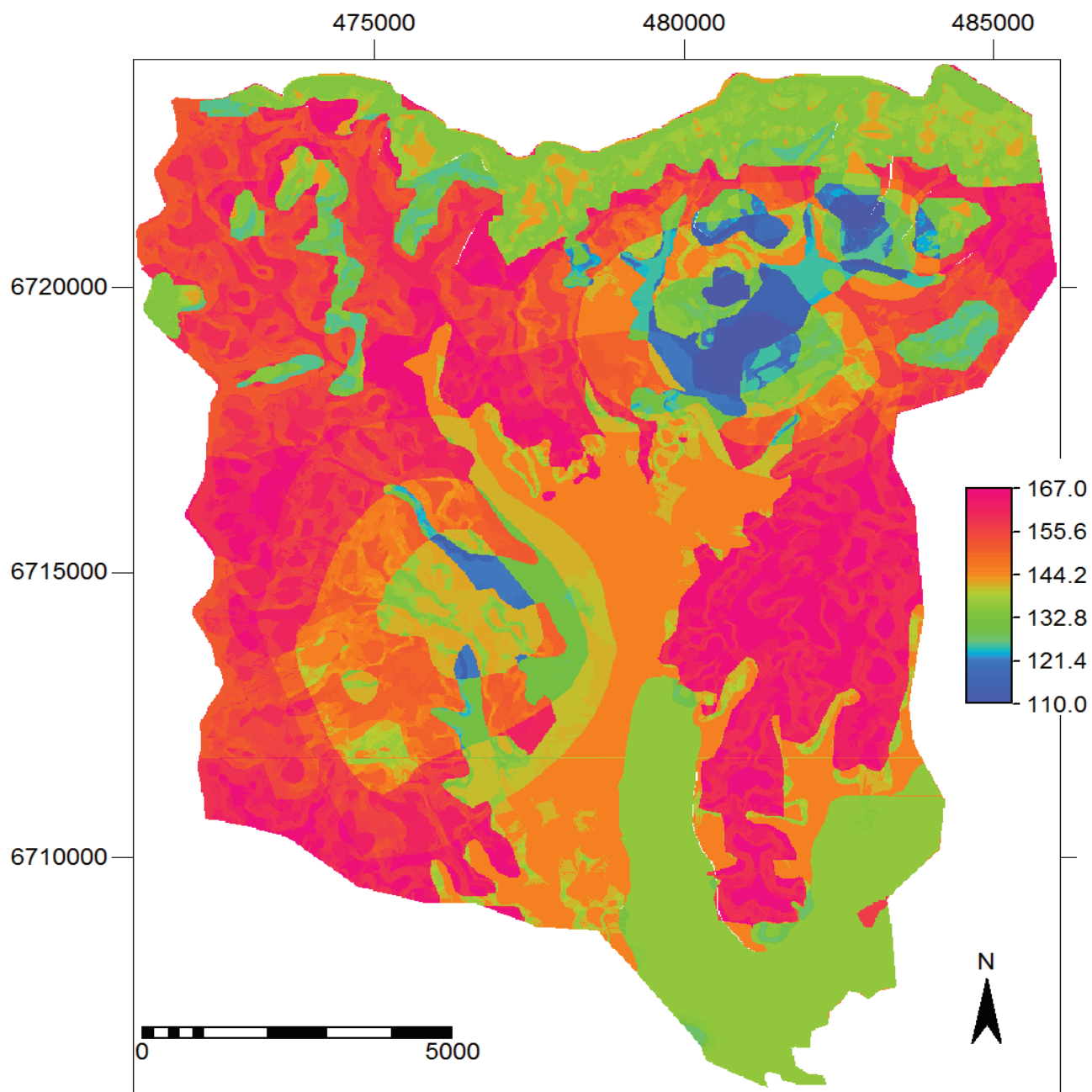


Figura 42: Mapa somatório da pontuação dos sete parâmetros do método DRASTIC resultando no mapa final de vulnerabilidade de contaminação de águas subterrâneas (escala em valor adimensional).



## Pesos relativos do Método DRASTIC e Mapa Somatório de Vulnerabilidade

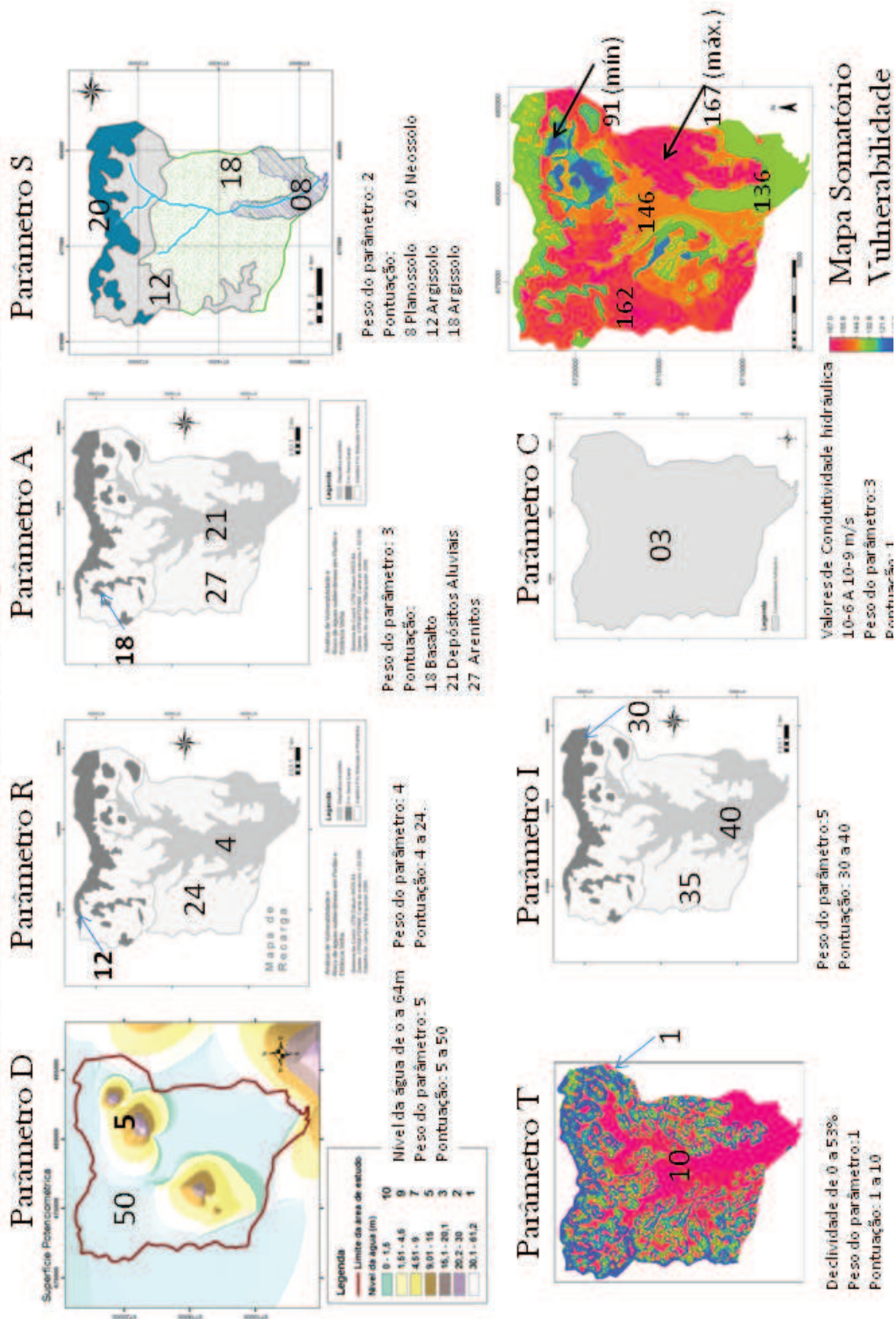


Figura 43: Mapas paramétricos mostrando os valores máximos e mínimos das pontuações de cada parâmetro e seus pesos.

A área de estudo é plana na parte sul com convergência dos afluentes do Rio dos Sinos (arroyos Portão, Boa Vista e Cerquinha), sendo identificadas as áreas úmidas e onde predomina a descarga do SAG. Devido a declividade alta no relevo dissecado que acompanha o limite geográfico da sub-bacia, a área norte possui baixa vulnerabilidade relativa ao parâmetro da recarga.

De acordo com os limites de classes de vulnerabilidade propostos pelo método DRASTIC, consta que a área de estudo possui 2,62% de áreas com baixa vulnerabilidade, 72,37% de áreas intermediárias e, 25,01% com alta vulnerabilidade (fig.44).

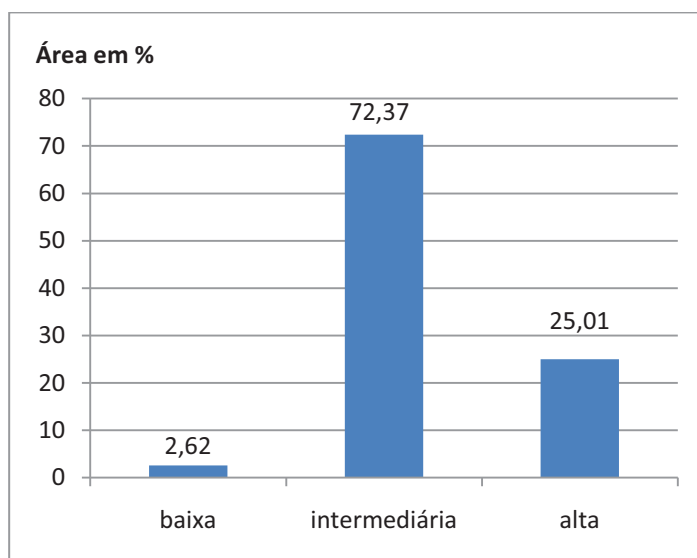
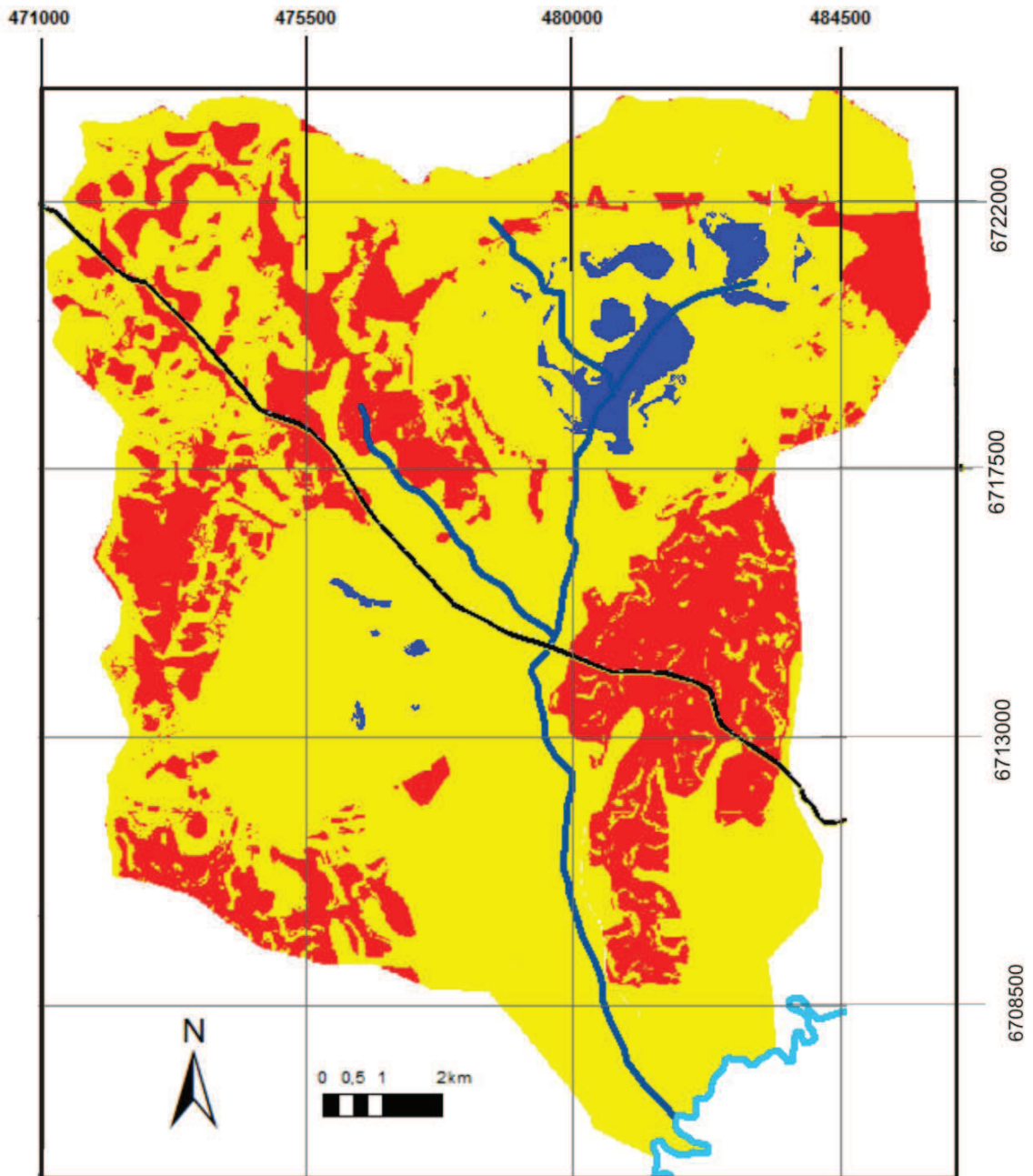


Figura 44: Porcentagem de área para cada classe de vulnerabilidade.

A figura 45 é o mapa de vulnerabilidade (figura 42) classificado de acordo com os limites de vulnerabilidade baixa (<120), intermediária (120-159) e alta (160-199).

### Mapa de Classes de Vulnerabilidade de Águas Subterrâneas



Sistema de Projeção UTM  
Datum WGS-84  
Fonte: Adaptado de PLANOSINOS,  
LANDSAT221/80 bandas321,  
imagem Google Earth 2010 e  
dados de trabalho de campo.

**Legenda**

- Estrada
- Rio dos Sinos
- arrosios

**Classes de Vulnerabilidade**

- alta
- intermediária
- baixa

Figura 45: Mapa das classes de vulnerabilidade confeccionado pelo “fatiamento” das classes admitidas pelo método DRASTIC: baixa (<120), intermediária (120-159) e alta (160-199).



## 5.5 Uso de solo e análise de risco

O mapa de uso da terra foi retirado do PLANOSINOS e alguns ajustes através da observação das imagens de satélite *Google Earth*. Este mapa é classificado em áreas de uso antrópico rural, silvicultura, área urbana impermeabilizada, mata nativa, áreas úmidas e plantação de arroz, pedreiras, aterros sanitário e industrial e indústrias químicas. Alteração na impermeabilização e escoamento de água na superfície é considerada na identificação da área urbana e se tratam de um impacto ambiental constando potencial de rebaixamento nas áreas de recarga.

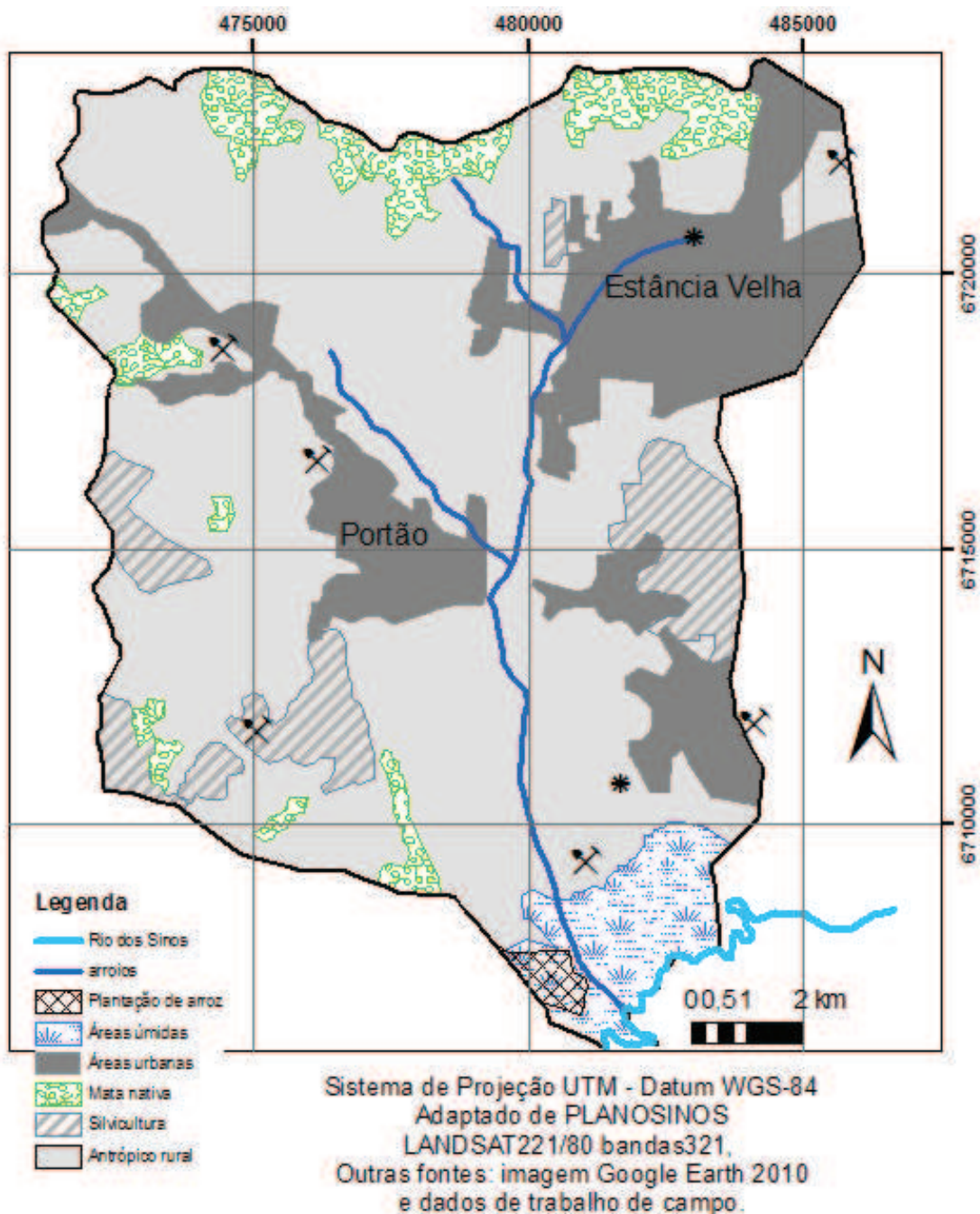


Figura 46: Mapa de uso do solo. Compilado de PLANOSINOS.



Uma análise preliminar do risco à qualidade e quantidade das águas subterrâneas pode ser feita pela sobreposição das classes de vulnerabilidade com o mapa de uso do solo (figura 46). A figura 47 é o cruzamento deste mapa com o de classes de vulnerabilidade, na qual mostra que a área com alta vulnerabilidade na zona leste é ocupada por área urbana e industrial e, na zona oeste, por áreas de silvicultura.

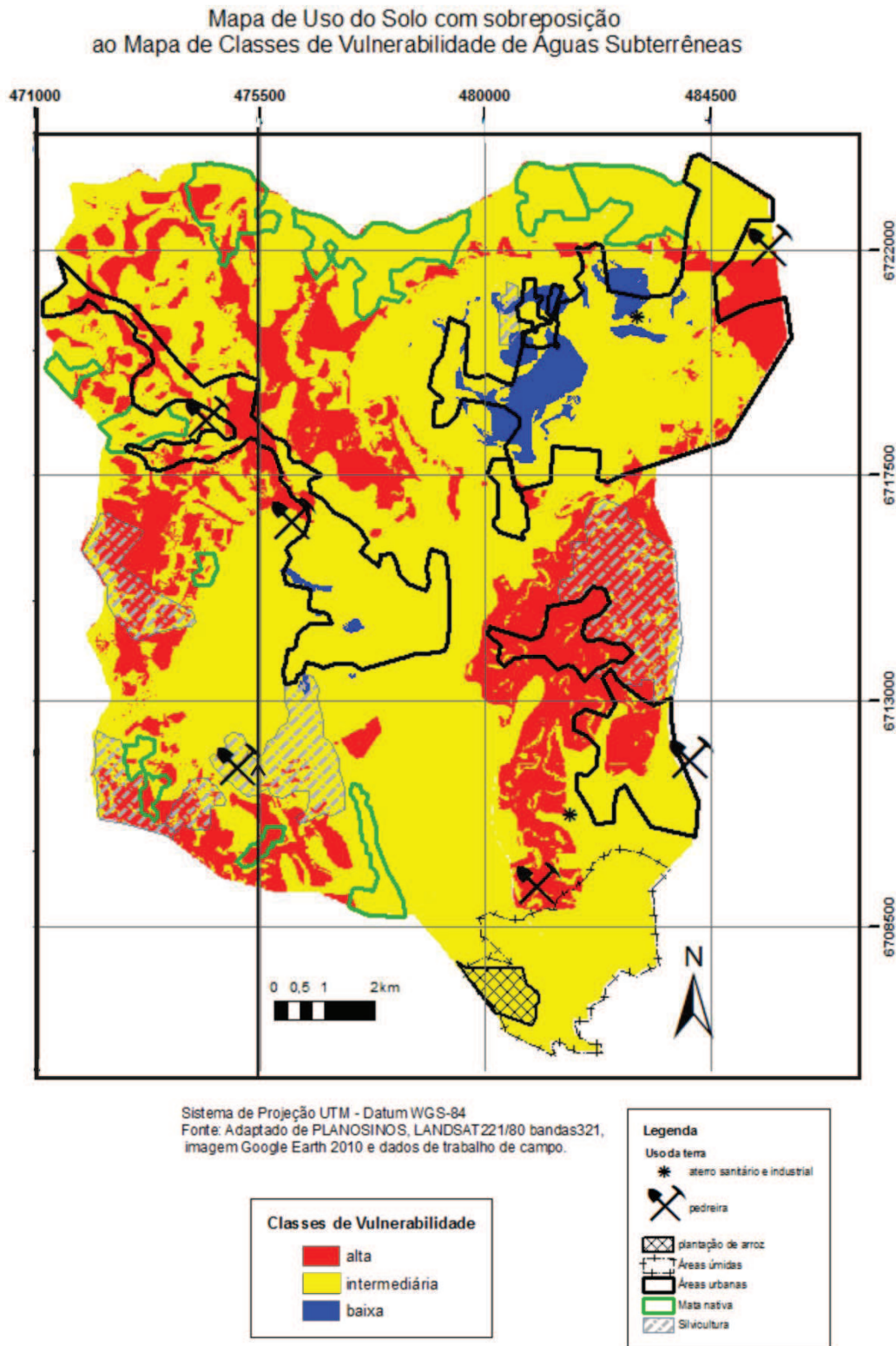


Figura 47: Mapa de sobreposição do uso do solo e classes de vulnerabilidade.  
Programa de Pós-Graduação em Geologia – Planejamento Ambiental \_\_\_\_\_ 98

A distribuição da alta vulnerabilidade ocorre com muita influência do nível freático alto, referente também a área de recarga do aquífero. Observa-se que a faixa estreita no extremo norte de alta vulnerabilidade está relacionada às nascentes no contato do basalto sobre o arenito.

A área de baixa vulnerabilidade está predominantemente sob a área urbana de Estância Velha, podendo estar relacionada ao confinamento do basalto da Fm. Serra Geral e da exploração para consumo, já que, como visto nos levantamentos de dados, é uma área com crescimento populacional e industrial ascendente para somente 52 km<sup>2</sup>.

O refinamento da análise de risco de contaminação aquífero é feita com a locação das amostras de análises físico-químicas no mapa de vulnerabilidade produzida pelos parâmetros do DRASTIC. Essas análises foram disponibilizadas pela CORSAN e CPRM, sendo que os poços da CORSAN atualmente não operam na área. As análises físico-químicas e de metais (em anexo) obtidas são datadas a partir de 1980 até 2000 com três análises em 2009 para outorga, totalizando 21 análises físico-químicas, as quais foram comparadas aos valores máximos permitidos de cada elemento e propriedade físico-química dos parâmetros de consumo humano<sup>15</sup> da Resolução CONAMA 396/2008 e sintetizadas na tabela 22.

Tabela 22: Valores das análises físico-químicas e de metais em águas subterrâneas em mg.L<sup>-1</sup>.

Espécie química	Variação das Amostras	Valores Max. pelo Resol. 396/08	Espécie química	Variação das Amostras	Valores Max. pelo Resol. 396/08
Alumínio (Al)	0 a 0,27	0,2	Alcalinidade total	22 a 211	-
Cádmio (Cd)	0 a 0,01	5	Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	12 a 257	-
Chumbo (Pb)	0	0,01	Cálcio	3,28 a 63,4	-
Cromo (Cr)	0	50	Dureza total	10 a 250,1	-
Cobre (Cu)	0	2	Sólidos dissolvidos totais	35 a 356	1.000
Ferro total (Fe)	0 a 1,59	0,3	Cloreto (Cl)	2,1 a 53,27	250
Potássio (K)	0,22 a 4,8		Fluoretos (F)	0 a 0,5	1,5
Sódio (Na)	3,2 a 66		Sulfato (SO <sub>4</sub> )	0 a 18,6	250
Manganês (Mn)	0,03 a 1,1	0,1	Nitratos (NO <sub>3</sub> )	0,1 a 3,8	10
Zinco (Zn)	0 a 6,5	5	Magnésio (Mg)	2 a 47	-
Condutividade	136,4-372		Sílica (SiO <sub>2</sub> )	5,9-52,9	

Fontes: coletânea de dados da CORSAN de 1980 à 2009 e Projeto SIAGAS-CPRM. Fonte da referência: Resolução CONAMA 396/08. ND= não detectado

Elementos não detectados, a exemplo do Cd, Pb, e outros metais, como também complexos orgânicos, podem ter apenas ficado abaixo do limite de detecção dos métodos

<sup>15</sup> A resolução do CONAMA classifica os valores máximos por classe: consumo humano, desedentação de animais, irrigação e recreação. Os dados obtidos da CORSAN e SIAGAS foram comparados com a classe de consumo humano

analíticos utilizados. Como não há histórico de análises do mesmo poço, mas dados de poços diferentes, as alterações de Al, Mn e Zn podem ter sido eventuais.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A área é constituída por três sistemas aquíferos com interações hídricas variáveis entre si, quais sejam: Sistema Aquífero Serra Geral, Sistema Aquífero Guarani e Aquífero Quaternário. A recarga direta do SAG ocorre em toda a sua extensão aflorante e as rochas vulcânicas sobrejacente ao SAG, pertencentes ao Sistema Aquífero Serra Geral, devem contribuir para a recarga do SAG através de zonas de falhas e fraturas.

As áreas de descarga, assim como as planícies de inundação, têm vulnerabilidade intermediária. Isso ocorre principalmente pela baixa profundidade da água subterrânea, a qual conecta-se aos corpos hídricos superficiais. Nestas áreas, os contaminantes podem ser transferidos para as águas superficiais, ou dependendo de suas características físico-químicas, como os compostos mais densos, podem se infiltrar e permanecer tanto na zona vadosa quanto na própria água subterrânea.

De uma forma geral, detectou-se a ausência de argilominerais esmectíticos, sendo que estes naturalmente aumentam a suscetibilidade dos solos ao fendilhamento por ressecamento em épocas de estiagem, bem como a vulnerabilidade do meio físico. Os Neossolos, diretamente associados ao basalto, são solos rasos, com altos teores de matéria orgânica e presença subordinada de argilominerais esmectíticos, atribuindo-se aos mesmos uma alta infiltração e, portanto, elevando a vulnerabilidade. Os solos encontrados mostram variação no comportamento hidráulico, sendo que o Argissolo tipo 2 e Neossolo oferecem maior grau de vulnerabilidade ao aquífero, devido a maior porosidade e pequena espessura, respectivamente.

Os Planossolos apresentam maior quantidade de sedimentos finos e estão associados às áreas de descarga, com o fluxo de saída do sistema hídrico, reduz-se, portanto, a vulnerabilidade do meio físico.

O baixo nível da água subterrânea e o raso material da zona vadosa (manto de alteração do aquífero) foram determinantes para a detecção de alta vulnerabilidade do aquífero. O fluxo subterrâneo mostra áreas de descarga cuja profundidade baixa do nível estático aumenta diretamente o grau de vulnerabilidade do SAG.

O parâmetro de condutividade hidráulica apresentou uma pontuação menor do que sua importância deveria constar, portanto, recomenda-se o estudo mais detalhado deste parâmetro. Os valores do DRASTIC foram seguidos; porém, esse aspecto hidrogeológico deve ser

melhor considerado enquanto gestão de recursos hídricos subterrâneos e ampliar a espacialização da informação, além dos estudos para atribuição da pontuação.

O mapa de vulnerabilidade mostra-se coerente diante dos argumentos paramétricos levantados em campo e em laboratório, com exceção do parâmetro de condutividade hidráulica, por falta de dados. O mapa de vulnerabilidade obtido mostra áreas de alta vulnerabilidade sobre as formações sedimentares ocupadas por áreas urbano-industriais. O mapa de classes de vulnerabilidade permite visualizar que a área de estudo possui 2,61% de áreas com baixa vulnerabilidade, 72,37% de áreas intermediárias e, 25,01% com alta vulnerabilidade.

Houve significativa expansão urbano-industrial no período de 1975 a 2008, sendo que a mancha urbano-industrial encontra-se em área de alta vulnerabilidade na parte leste da área de estudo. Com vistas a detecção de contaminação foram avaliadas 41 análises químicas da água subterrânea cedidas pela CPRM e CORSAN, estas datadas predominantemente de 1980 a 2000. Não foi verificada a contaminação do aquífero. Entretanto, a não detecção de contaminação pode estar associada a resolução analítica das análises químicas, bem como a análise incompleta de espécies metálicas e demais componentes tóxicos. É importante ressaltar que as análises disponíveis são poucas e, no caso, insuficientes para se chegar ao mapa efetivo de risco de águas subterrâneas. No entanto, a área é reconhecida por vários exemplos de degradação ambiental, como indica o relatório FEPAM e projeto PROTEGER-CPRM.

O único caso de alto teor de manganês localizado na área urbana de Portão é provavelmente de origem intempérica e não antrópica, por não saber de fontes que pudessem alterar a concentração desta espécie química. A interpretação dos dados é prejudicada por não haver um histórico de análises físico-químicas. Eventualmente, pode ser necessário o estudo de vulnerabilidade específica, para casos industriais específicos ou pólos industriais, com liberação elevada de elementos químicos específicos.

Na área urbana de Estância Velha ocorre um cone de depleção associado a baixos valores de vulnerabilidade à contaminação. Porém, deve-se considerar o rebaixamento do nível estático como impacto negativo no aquífero sob o aspecto de preservação quantitativa da água.

O ambiente SIG permitiu a manipulação e atualização de dados de forma dinâmica e constante. Os fotogramas aéreos e imagens de satélite permitiram identificar e delimitar a homogeneidade de domínios de diversos parâmetros como solos, litologias e nível estático.

O mapa de vulnerabilidade obtido ofereceu resultados qualitativos geolocalizáveis, orientando o planejamento da ocupação e monitoramento das áreas de maior vulnerabilidade. Com base no mapa de vulnerabilidade obtido, a porção de alta vulnerabilidade no leste da área, atualmente com uso urbano-industrial e silvicultura, deve ser priorizada para o estudo de contaminação.

Recomenda-se integrar no plano de proteção das águas subterrâneas:

- ❖ a preservação e ampliação da área de mata nativa a fim de equilibrar a recarga do aquífero e evitar o escoamento facilitado (*runoff*) e erosão hídrica, assim como a exposição direta do aquífero;
- ❖ a investigação quanto a vulnerabilidade específica em relação aos resíduos dispostos da atividade coureiro-calçadista, sendo esta a principal atividade econômica da região;
- ❖ o controle da qualidade das águas subterrâneas nas áreas adjacentes aos aterros sanitários e demais locais de deposição de resíduos;
- ❖ o controle da disposição de resíduos com ênfase nas áreas de maior vulnerabilidade, inclusive nas áreas de domínio do Argissolo tipo 2 e solos rasos no norte da sub-bacia;
- ❖ o controle do tipo e quantidade de agroquímicos dispensados nos diversos tipos de plantações, incluindo as plantações de arroz nas áreas de várzea dos arroios e rios por se tratar da recarga do aquífero quaternário e interação direta com as águas superficiais;
- ❖ a inclusão do mapa de uso dos solos e classes de vulnerabilidade (figura 45) no planejamento de expansão da mancha urbana e atividades que ofereçam risco aos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral;
- ❖ um maior controle da qualidade das águas subterrâneas por instalação de poços de monitoramento em áreas de maior vulnerabilidade;
- ❖ o fornecimento de dados atualizados da demanda de águas subterrâneas no abastecimento a fim de se verificar o grau de exploração, o impacto de depleção do nível da água, assim como é mostrado na figura 39 um comportamento indicador de rebaixamento do aquífero;
- ❖ a seleção do tipo de silvicultura plantada com menor impacto na retenção de água, considerando os valores de nível freático principalmente na parte sudoeste;
- ❖ o controle dos impactos ambientais da mancha urbana leste por estar concentrada em uma área de alta vulnerabilidade e concentração urbana e industrial; e
- ❖ a criação de cenários quanto a variação do uso dos solos e da água subterrânea a partir dos parâmetros levantados e do mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas.



As águas subterrâneas devem ser incluídas no plano de gestão ambiental municipal porque exibem conexão com os corpos hídricos superficiais através da descarga, auxiliam no fluxo superficial em período de estiagem e, demandam importância como alternativa de abastecimento rural e urbano-industrial, o qual requer controle quantitativo e qualitativo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. Ensaio de permeabilidade em solos. **Boletim**, v. 3, n. 04/jun. de 1996.
- ABNT– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro: dez. 1984.
- Aller L., Bennett T., Lehr J. H., Petty R. J. 1987. **DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. Ada: EPA. 641 pp. EPA/600/2-85/0108.
- Almasri M. N. 2008. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. **Journal of Environmental Management**, v. **88**, n. 4, p. 577-593.
- Alonso U. R. 2007. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. São Paulo: Ed. Oficina de textos. 152 pp.
- Amaral Sobrinho N. M. B., Velloso A. C.X., Costa L. M. 1999. Lixiviação de Pb, Zn, Cd e Ni em solo Podzólico Vermelho-Amarelo tratado com resíduos siderúrgicos. **Rev. Floresta e Ambiente** v. **6**, n. 1, p. 65-75.
- Antonakos A. K., Lambrakis N. J. 2007. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. **Journal of Hydrology**, v. **33**, n. 2/4, p. 288– 304.
- Apelo C.A.J & Postma D. 1993. **Geochemistry, groundwater and pollution**. Rotterdam: Ed. A.A.Balkeman. 536pp.
- Baird C. 2002. **Química Ambiental**. -2ª ed. Porto Alegre: Bookman. 622pp.
- Banat K. M., Howari F. M., Al-Hamad A. A. 2005. **Heavy metals in urban soils of central Jordan: Should we worry about their environmental risks?** Environmental Research 97: p. 258-273.
- Bekesi G. & McConchie, J. 1999. **Groundwater recharge modelling using the Monte Carlo technique, Manawatu region, New Zealand**. Journal of Hydrology, v. 224, n. 3/4, p.137-148.
- BRASIL 2008. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n. 396/2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Disponível em: Programa de Pós-Graduação em Geologia – Planejamento Ambiental

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano.cfm?codlegitipo=3>>. Acesso: maio 2008.

BRASIL 1997. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Lei 9.433/1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em:

<[http://www.mma.gov.br/estruturas/srh/\\_arquivos/lei9433.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/srh/_arquivos/lei9433.pdf)>. Acesso: maio 2008.

Carvalho D.F., Silva L.D.B.2006. **Infiltração**. Acesso pelo *site*:

<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-NF.pdf>

Castilhos D. D. 1998. **Alterações químicas e biológicas devida à adição de resíduos de curtume e de cromo hexavalente ao solo**. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.196.

CPRM-FEPAM 2007. Banco de dados *site*: [www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br). Acesso em 2009.

CPRM- MME. 2008. **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Sul**. In: Programa geologia do Brasil. Mapas estaduais 1:750.000-SIG. Formato em DVD.

Dixon B. 2005. **Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool**. Applied Geography 25, p.327-347.

Faccini U. F, Giardin A., Machado J. L. F. 2003. **Heterogeneidade litofaciológicas e hidroestratigrafia do Sistema Aquífero Guarani na região central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil**. In: Paim, P. S. G., Faccini, U. F., Netto R. G., (Orgs.) Geometria, arquitetura e heterogeneidade de corpos sedimentares: Estudos de caso. São Leopoldo: Ed. UNISINOS. p. 147-173.

FEE - FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA. 2005. Pesquisa realizada no banco de dados em FEE DADOS do *site*: [www.fee.tche.br/](http://www.fee.tche.br/), Acesso em dezembro de 2008.

FEPAM- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AO MEIO AMBIENTE HENRIQUE LUIS ROESSLER/RS – **Qualidade ambiental**: região hidrográfica do Guaíba. 2007. Disponível em: <[http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade\\_sinos/sinos.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_sinos/sinos.asp)>. Acesso: set. 2007.

Ferreira A. S. 1998. **Efeitos da adição de resíduos de curtume e carbonífero nas plantas e no solo**. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.96.

- Filho J. M. 2008. **Contaminação das Águas Subterrâneas**. In: Feitosa F. A. C., Filho J. M., Feitosa E. C., Demetrio, J. G. A. (orgs.) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3.ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: CPRM. p.405-424.
- Filizola H. F., Almeida Filho G. S., Canil K., Gomes M. A. F. 2008. **Processos erosivos em área de afloramento do sistema Aquífero Guarani no Brasil**. In: Gomes M. A. F. (Ed.). Uso agrícola das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil. Brasília - DF: EMBRAPA Informação Tecnológica. p.: 283-299.
- Gomes M. A. F., Filizola H. F., Spadotto C. A., Pereira A. S. 2008a. **Caracterização pedomorfoagroclicmática das áreas de afloramento do Aquifero Guarani no Brasil – Base para uma proposta de gestão sustentável**. In.: Gomes M. A. F. (Ed.). Uso agrícola das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil. Brasília -DF: EMBRAPA Informação Tecnológica. p.47-64.
- Gomes M.A.F., Spadotto C.A., Pessoa M.C.P.Y. 2008b. **Vulnerabilidade natural do solo em áreas agrícolas – Subsídio a avaliação do risco de contaminação do lençol freático por agroquímicos**. In.: Gomes, M. A. F. (Ed.). Uso agrícola das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil. Brasília -DF: EMBRAPA Informação Tecnológica. p.87-96.
- Haase Janine. 2001. **Relatórios Preliminares: A Bacia do Rio dos Sinos, Rio Grande do Sul**. Projeto Marca d'água. 28 pp.
- Hausman Abrao. 1966. Comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul. In: Boletim Paranaense de Geografia. Curitiba n. 18/20, p. 177-213 : il.
- Hausman Abrao. 1995. **Províncias hidrogeológicas do estado do Rio Grande do Sul-RS**: Escala 1: 50.000. In.: Acta geológica leopoldensia. Série mapas, São Leopoldo: Universidade Vale do Rio dos Sinos n. 2, p. 1-27
- Heine C. A. 2008. **Análise de sustentabilidade de uso do Sistema Aquífero Guarani - SAG em Ivoti-RS**. Tese de Doutorado em Geologia Sedimentar - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 173 p.
- Hillel D. 1980. **Environmental Soil Physics**. San Diego. Ed. Academic Press. 771pp.
- Hirata R., Fernandes A.J. 2008. **Vulnerabilidade à Poluição de Aquíferos**. In.: Feitosa F. A. C.; Filho J. M.; Feitosa E. C.; Demetrio, J. G. A. (orgs.) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3.ed. rev. ampl. Rio de Janeiro : CPRM, p.: 405-424.

- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2006. **Dados CNAE**. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa realizada no banco de dados IBGECidades2008. <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/>. Acesso em maio de 2008.
- INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Imagem de satélite LANDSAT-TM5 221/81 bandas 1 a 7**. 2008. Disponível em: <<http://www.inpe.gov.br>>. Acesso: set. de 2008.
- Langmuir D. 1997. **Aqueous Environmental Geochemistry**. New Jersey: Ed. Prentice Hall. 600pp.
- Leone A., Ripa M. N., Uricchio V., Deák J., Vargay Z. 2009. **Vulnerability and risk evaluation of agricultural nitrogen pollution for Hungary's main aquifer using DRASTIC and GLEAMS models**. Journal of Environmental Management, v. 90, n. 10, p. 2969-2978.
- Lisboa N. A. 1996. **Fácies, estratificações hidrogeoquímicas e seus controladores geológicos, em unidades hidrogeológicas do Sistema Aquífero Serra Geral, na Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de do Rio Grande do Sul, 135p.
- Lobo Ferreira J. P. C. 1997. **Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal**. Disponível em: <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com;023.pdf>. Acesso: abr. 2008.
- Machado José Luiz Flores. 2005. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 237 p.
- Marquezan R. G. 2000. **Avaliação do potencial de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na área do sistema de dutos REFAP-Triunfo/ RS**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 174 p.
- MINISTÉRIO DA DEFESA- Departamento de Levantamento 1975. Cartas do Exército 1:50.000. Folhas de Montenegro, São Leopoldo, Novo Hamburgo e Morretes.
- Programa de Pós-Graduação em Geologia – Planejamento Ambiental

- METROPLAN. 1990. Fotogramas aéreos 1:60.000 para estereoscopia: 120008, 120007, 120005, 120004, 111009, 111008, 111007, 111006, 111005, 122007, 122006, 122005.
- Miranda-Trevino J.C. & Coles C.A. 2003. **Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH.** Applied Clay Science 23, p: 133-139.
- Nobre R. C. M., Rottuno Filho O. C.; Mansur W. J., Nobre M. M. M., Cosenza C. A. N. 2007. **Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool.** Journal of Contaminant Hydrology, v. 94, n. 3/4, p.: 277-292.
- Odum E.P. 1988. **Ecologia.** Rio de Janeiro. Ed. Guanabara Koogan, 434 pp.
- Oliveira M. M., Lobo-Ferreira J. P. C. 2004. Cartografia da vulnerabilidade à poluição das águas do Conselho de Montemor-O-Novo utilizando o método DRASTIC. In: CABRAL, J. J. S. **Água subterrânea: aquíferos costeiros, aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento.** Recife: UFPE.
- Press F., Grotzinger, J.; Jordan T. H., Siever R. 2007. **Para entender a Terra.** Porto Alegre: Ed. Bookman. 656pp.
- PROTEGER, 1994- PROGRAMA TÉCNICO PARA O GERENCIAMENTO NA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE - CPRM-PROTEGER. **Fontes de poluição e degradação ambiental o município de Estância Velha/RS.** Porto Alegre: CPRM.
- Rahman A. 2008. **A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India.** Applied Geography, v. 28, p. 32-53.
- Rebouças A. C. 2006. **Águas subterrâneas.** Rebouças A. C. (Ed.) In: Águas Doces no Brasil – Capital Ecológico, Uso e Conservação; 3ª Ed. –São Paulo: Editora Escrituras; p. 111-144.
- Renne P. R., Glen, J.M., Milner, S.C., Duncan A.R. 1996. **Age of Etendeka flood volcanism and associated intrusions in southwestern Africa.** Geology V. 24; no. 7; p. 659-662.
- Scherer C. M. S., Faccini U.E., Lavina L.E. 2000. **Arcabouço Estratigráfico do Mesozóico da Bacia do Paraná.** In: Holz M. & De Ros L. F. Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, CIGO- Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 335-354.
- Secunda S., Collin M. L., Melloul A. J. 1998. **Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region.** Journal of Environmental Management, v. 54, p. 39-57.



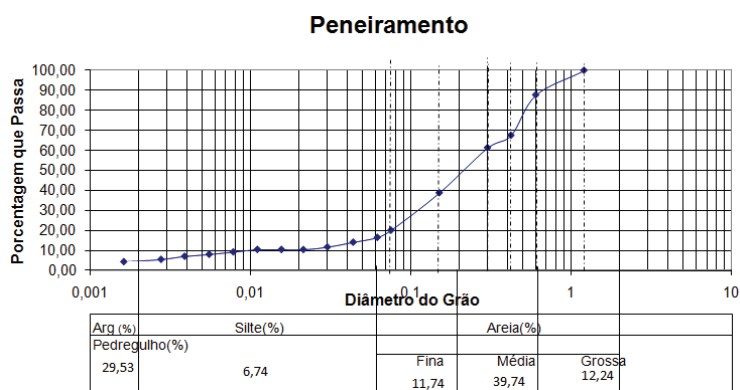
- SEMA- SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. 2000. Código Estadual do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/>. Acesso em: set/2009.
- SIAGAS - SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 2009. **Dados digitais de poços tubulares**. CPRM: Porto Alegre.
- Souza Santos, P. 1989. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. rev. ampl. São Paulo: Edgard Blucher.
- Streck V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008.222p.
- Tedesco M. J., Selbach P. A., Gianello, C., Camargo, F. A. O. 2008. **Resíduos orgânicos no solo e os impactos no ambiente**. In: Santos G. de A., Silva L. da S., Canellas L.P., Camargo F.A. de O. (Ed.), Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Ed: Metrópole, p.: 113-135.
- Tucci C. E. M., Cabral J. J. S. P. 2003. **Qualidade da água subterrânea – relatório final**. CGEE: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Disponível em: [http://novo.cgee.org.br/arquivos/a2b\\_agua\\_sub.pdf](http://novo.cgee.org.br/arquivos/a2b_agua_sub.pdf) em agosto de 2008. Acesso: ago.2008.
- Tucci C.E.M. 2006. **Água no meio urbano**. In.: Rebouças A. C. (Ed.) Águas Doces no Brasil – Capital Ecológico, Uso e Conservação. 3ª Ed. –São Paulo: Editora Escrituras. p.: 399-432.
- Wildner W., Lopes R. da C., Romanini S., Camozzato E. 2003. **Contribuição à estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná**. In: I Encontro sobre a estratigrafia do Rio Grande do Sul: escudo e bacias. p.: 204-210.
- Wojahn D. –no prelo- **Modelagem geológica e hidrogeológica do Sistema Aquífero Guarani na sub-bacia do Arroio Portão - RS**.. Dissertação de Mestrado em Geologia - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo (no prelo).
- Worrall F., Kolpin D. 2004. **Aquifer vulnerability to pesticide pollution—combining soil, land-use and aquifer properties with molecular descriptors**. Journal of Hydrology. 293, p.191-204.

## 8. APÊNDICE

Resultados das análises de sedimentação e peneiramento das amostras de solo.

### Amostra HAP1

Amostra Parcial Úmida W (g):		70,00	Amostra Parcial Seca Ws (g) :		70,00
Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra Parcial (%)	% Material Passado da Amostra Total	Peneira (mm)
nº 16	0,01	69,99	99,99	12,24	1,2
nº 30	8,57	61,42	87,74	39,74	0,6
nº 40	14,13	47,29	67,56	11,74	0,42
nº 50	4,33	42,96	61,37	6,74	0,3
nº 100	15,77	27,19	38,84		0,15
nº 200	13,08	14,11	20,16		0,075
Soma	55,89				



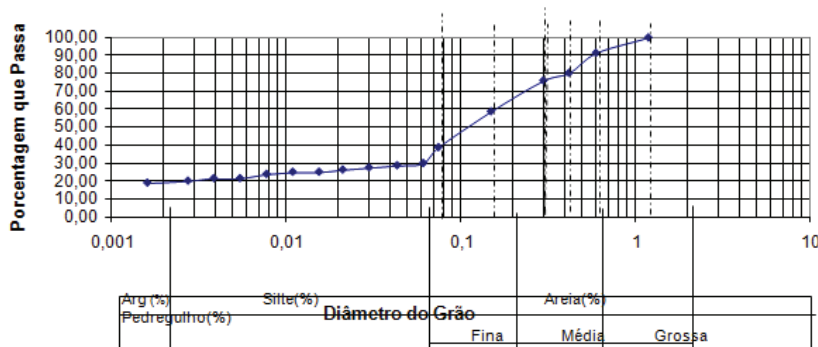
	DIÂMETRO	%
PENEIRAMENTO	1,2	99,99
	0,6	87,74
	0,42	67,56
	0,3	61,37
	0,15	38,84
	0,075	20,16
SEDIMENTAÇÃO	0,061533	16,54606
	0,043511	14,13664
	0,030032	11,72721
	0,021259	10,48109
	0,015508	10,5225
	0,010966	10,5225
	0,007763	9,276365
	0,005489	8,071636
0,003856	7,118153	
0,002751	5,579724	
0,00161	4,422657	

em seg.	Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_w$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	YS	WS
	30	23,3	1,011	19,27501	1,002632772	0,99737	9,51178E-06	0,087021	0,201602	20,1602	2,45	70
	60	23,3	1,0095	19,27501	1,002632772	0,99737	9,51178E-06	0,061533	0,165461	16,54606	2,45	70
	120	23,3	1,0085	19,27501	1,002632772	0,99737	9,51178E-06	0,043511	0,141366	14,13664	2,45	70
	240	23,3	1,0075	18,36501	1,002632772	0,99737	9,51178E-06	0,030032	0,117272	11,72721	2,45	70
	480	23,2	1,007	18,36131	1,002650019	0,997391	9,53484E-06	0,021259	0,104811	10,48109	2,45	70
	900	23,3	1,007	18,36501	1,002632772	0,99737	9,51178E-06	0,015508	0,105225	10,5225	2,45	70
	1800	23,3	1,007	18,36501	1,002632772	0,99737	9,51178E-06	0,010966	0,105225	10,5225	2,45	70
	3600	23,2	1,0065	18,36131	1,002650019	0,997391	9,53484E-06	0,007763	0,092764	9,276365	2,45	70
	7200	23,2	1,006	18,36131	1,002650019	0,997391	9,53484E-06	0,005489	0,080716	8,071636	2,45	70
	14400	23,8	1,0055	18,38374	1,002545496	0,997269	9,39768E-06	0,003856	0,071182	7,118153	2,45	70
	28800	23	1,005	18,35395	1,002684305	0,997432	9,5812E-06	0,002751	0,055797	5,579724	2,45	70
	90000	20	1,005	18,25073	1,003165283	0,998043	0,000010315	0,00161	0,044227	4,422657	2,45	70
<b>Umidade ensaio de Granulometria</b>												
	Cápsula + Solo úmido		70									
	Cápsula + solo Seco		70									
	Cápsula		0									
	Água		0									
	Solo Seco - WS		70									
	Umidade - w		0									

# Amostra HBP1

Amostra Parcial Úmida W (g):		70,00	Amostra Parcial Seca Ws (g)		70,00
Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra	% Material Passado da Amostra Total	Peneira (mm)
nº 16	0,02	69,98	99,97		1,2
nº 30	6,00	63,98	91,40		0,6
nº 40	7,83	56,15	80,21		0,42
nº 50	2,98	53,17	75,96		0,3
nº 100	12,06	41,11	58,73		0,15
nº 200	14,00	27,11	38,73		0,075
Soma	42,89				

## Peneiramento



	DIÂMETRO	%
PENEIRAMENTO	1,2	99,97
	0,6	91,40
	0,42	80,21
	0,3	75,96
	0,15	58,73
	0,075	38,73
SEDIMENTAÇÃO	0,06146	29,8392
	0,04346	28,6345
	0,03	27,4298
	0,02121	26,2251
	0,01551	24,979
	0,01097	24,979
	0,00775	23,7743
	0,00547	21,4479
	0,00387	21,4479
	0,00275	20,0369
0,00161	18,8859	

em seg.		correção da lei peso esp								PESO ESPECÍF peso do st	
Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_0$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	YS	WS
1	30	23,4	1,016	19,27872	1,002615456	0,99735	9,4888E-06	0,086924	0,322486	2,45	70
2	60	23,4	1,015	19,27872	1,002615456	0,99735	9,4888E-06	0,061465	0,298392	2,45	70
3	120	23,4	1,0145	19,27872	1,002615456	0,99735	9,4888E-06	0,043462	0,286345	2,45	70
4	240	23,4	1,014	18,36872	1,002615456	0,99735	9,4888E-06	0,029998	0,274298	2,45	70
5	480	23,4	1,0135	18,36872	1,002615456	0,99735	9,4888E-06	0,021212	0,262251	2,45	70
6	900	23,3	1,013	18,36501	1,002632772	0,99737	9,51178E-06	0,015508	0,24979	2,45	70
7	1800	23,3	1,013	18,36501	1,002632772	0,99737	9,51178E-06	0,010966	0,24979	2,45	70
8	3600	23,3	1,0125	18,36501	1,002632772	0,99737	9,51178E-06	0,007754	0,237743	2,45	70
9	7200	23,5	1,0115	18,37245	1,00259807	0,99733	9,4659E-06	0,005471	0,214479	2,45	70
10	14400	23,5	1,0115	18,37245	1,00259807	0,99733	9,4659E-06	0,003868	0,214479	2,45	70
11	28800	23	1,011	18,35395	1,002684305	0,997432	9,5812E-06	0,002751	0,200369	2,45	70
12	90000	20	1,011	18,25073	1,003165283	0,998043	0,000010315	0,00161	0,188859	2,45	70

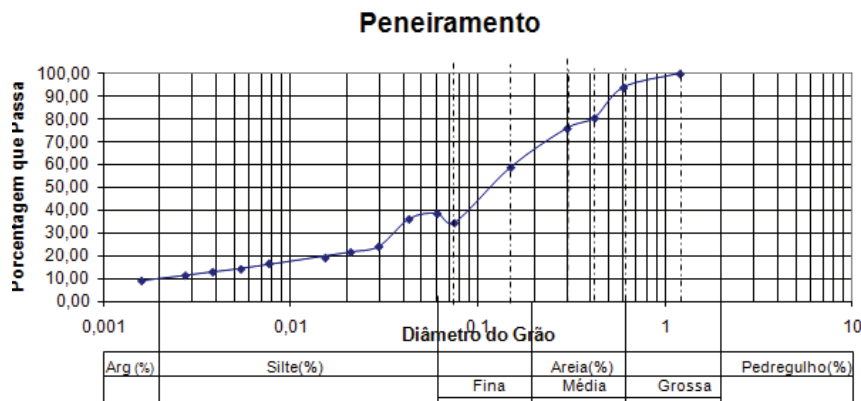
Umidade ensaio de Granulometria	
Cápsula + Solo úmido	70
Cápsula + solo Seco	70
Cápsula	0
Água	0
Solo Seco - WS	70
Umidade - w	0





# HEP1

Amostra Parcial Úmida W (g):		70,00	Amostra Parcial Seca Ws (g)		70,00	
Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra	% Material Passado da Amostra Total	Peneira (mm)	
nº 16	0,00	70,00	100,00		1,2	
nº 30	4,25	65,75	93,93		0,6	
nº 40	9,33	56,42	80,60		0,42	
nº 50	3,19	53,23	76,04		0,3	
nº 100	11,94	41,29	58,99		0,15	
nº 200	17,06	24,23	34,61		0,075	
Soma	45,77					



DIÂMETRO	%	
	1,2	100,00
0,6	93,93	
0,42	80,60	
0,3	76,04	
0,15	58,99	
0,075	34,61	
0,06072	38,7361	
0,04293	36,327	
0,02964	24,282	
0,02098	21,8297	
0,01535	19,3346	
#REF!	#REF!	
0,00769	16,84	
0,00545	14,3883	
0,00386	13,1413	
0,00275	11,6035	
0,00161	9,27983	

em seg.		correção da lei peso esp										PESO ESP: peso do solo seco	
Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_w$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	YS	WS		
1	30	24,5	1,019	19,32058	1,002420394	0,997126	9,2413E-06	0,085869	0,399406	39,94057	2,45	70	
2	60	24,5	1,0185	19,32058	1,002420394	0,997126	9,2413E-06	0,060719	0,387361	38,73606	2,45	70	
3	120	24,5	1,0175	19,32058	1,002420394	0,997126	9,2413E-06	0,042935	0,363327	36,32704	2,45	70	
4	240	24,5	1,0125	18,41058	1,002420394	0,997126	9,2413E-06	0,029636	0,24282	24,28195	2,45	70	
5	480	24,4	1,0115	18,4067	1,002438474	0,997146	9,2634E-06	0,020979	0,218297	21,82969	2,45	70	
6	900	24,2	1,0105	18,39899	1,002474425	0,997187	9,30784E-06	0,015354	0,193346	19,33457	2,45	70	
7	1800	24	1,01	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	2,45	70	
8	3600	24	1,0095	18,39133	1,002510099	0,997228	9,3526E-06	0,007694	0,1684	16,83998	2,45	70	
9	7200	23,9	1,0085	18,38753	1,002527832	0,997248	9,3751E-06	0,005447	0,143883	14,38827	2,45	70	
10	14400	23,8	1,008	18,38374	1,002545496	0,997269	9,39768E-06	0,003856	0,131413	13,14129	2,45	70	
11	28800	23	1,0075	18,35395	1,002684305	0,997432	9,5812E-06	0,002751	0,116035	11,60354	2,45	70	
12	90000	20,1	1,007	18,25395	1,003150257	0,998022	1,02894E-05	0,001608	0,092798	9,279827	2,45	70	

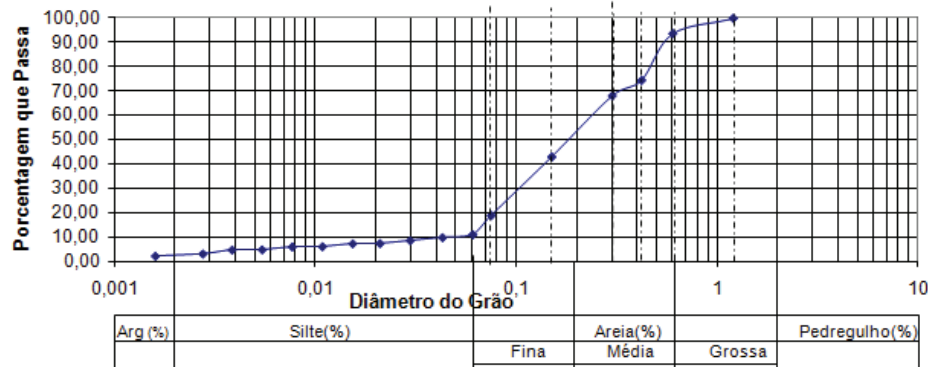
Umidade ensaio de Granulometria	
Cápsula + Solo úmido	70
Cápsula + solo Seco	70
Cápsula	0
Água	0
Solo Seco - WS	70
Umidade - w	0

# Amostra HEP2

Amostra Parcial Úmida W (g):		70,00	Amostra Parcial Seca Ws (g)		70,00	
Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra	% Material Passado da Amostra Total	Peneira (mm)	
nº 16	0,02	69,98	99,97		1,2	
nº 30	4,40	65,58	93,69		0,6	
nº 40	13,46	52,12	74,46		0,42	
nº 50	4,43	47,69	68,13		0,3	
nº 100	17,59	30,10	43,00		0,15	
nº 200	16,88	13,22	18,89		0,075	
Soma	56,78					



## Peneiramento



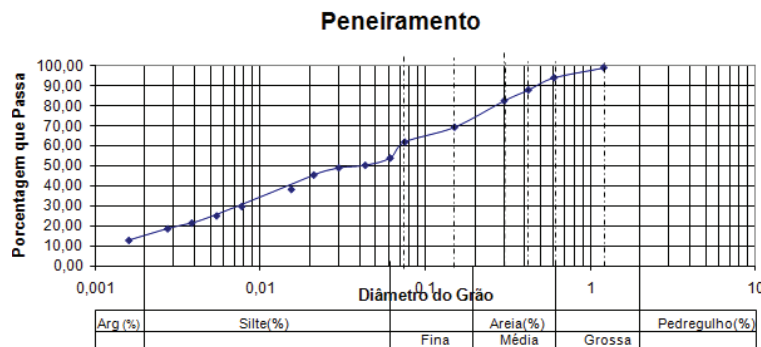
		DIÂMETRO	%
PENEIRAMENTO		1,2	99,97
		0,6	93,69
		0,42	74,46
		0,3	68,13
		0,15	43,00
		0,075	18,89
SEDIMENTAÇÃO		0,06072	11,0324
		0,04293	9,82785
		0,02967	8,5799
		0,02098	7,37538
		0,01535	7,28897
		0,01086	6,08441
		0,00769	5,99864
		0,00544	4,79404
		0,00386	4,7089
		0,00276	3,08834

em seg.	Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_{00}$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	PESO ESPÉ	peso do solo seco
1	30	24,5	1,0085	19,32058	1,002420394	0,997126	9,2413E-06	0,085869	0,146459	14,64588	2,45	70
2	60	24,5	1,007	19,32058	1,002420394	0,997126	9,2413E-06	0,060719	0,110324	11,03235	2,45	70
3	120	24,5	1,0065	19,32058	1,002420394	0,997126	9,2413E-06	0,042935	0,098278	9,827845	2,45	70
4	240	24,4	1,006	18,4067	1,002438474	0,997146	9,2634E-06	0,029668	0,085799	8,579902	2,45	70
5	480	24,4	1,0055	18,4067	1,002438474	0,997146	9,2634E-06	0,020979	0,073754	7,375376	2,45	70
6	900	24,2	1,0055	18,39899	1,002474425	0,997187	9,30784E-06	0,015354	0,07289	7,288971	2,45	70
7	1800	24,2	1,005	18,39899	1,002474425	0,997187	9,30784E-06	0,010857	0,060844	6,084411	2,45	70
8	3600	24	1,005	18,39133	1,002510099	0,997228	9,3526E-06	0,007694	0,059986	5,998637	2,45	70
9	7200	24	1,0045	18,39133	1,002510099	0,997228	9,3526E-06	0,005441	0,04794	4,794043	2,45	70
10	14400	23,8	1,0045	18,38374	1,002545496	0,997269	9,39768E-06	0,003856	0,047089	4,708899	2,45	70
11	28800	22,8	1,004	18,34665	1,002718314	0,997472	9,62788E-06	0,002757	0,030883	3,088342	2,45	70
12	90000	20,4	1,004	18,26372	1,003104762	0,997961	0,000010213	0,001603	0,021579	2,157886	2,45	70

Umidade ensaio de Granulometria	
Cápsula + Solo úmido	70
Cápsula + solo Seco	70
Cápsula	0
Água	0
Solo Seco - WS	70
Umidade - w	0

## Amostra P3NEO

Amostra Parcial Úmida w' (g):	70,00	Amostra Parcial Seca Ws (g)	70,00	
Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra	% Material Passado da Amostra Total
nº 16	0,48	69,52	99,31	
nº 30	3,53	65,99	94,27	
nº 40	4,26	61,73	88,19	
nº 50	3,80	57,93	82,76	
nº 100	9,24	48,69	69,56	
nº 200	5,21	43,48	62,11	
Soma	26.52			



		DIÂMETRO	%
PENEIRAMENTO		1,2	99,31
		0,6	94,27
		0,42	88,19
		0,3	82,76
		0,15	69,56
		0,075	62,11
SEDIMENTAÇÃO		0,06119	54,0986
		0,04327	50,4847
		0,0299	49,2384
		0,02114	45,6245
		0,01544	38,3966
		#REF!	#REF!
		0,00774	29,8807
		0,00545	25,1876
		0,00386	21,5737
		0,00276	18,7507
	0,00161	12,9318	

em seg.		correção da lei peso esp										PESO ESPE peso do solo seco	
	Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_w$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	YS	WS	
1	30	23,8	1,0265	19,29374	1,002545496	0,997269	9,39768E-06	0,086537	0,577125	57,7125	2,45	70	
2	60	23,8	1,025	19,29374	1,002545496	0,997269	9,39768E-06	0,061191	0,540986	54,09862	2,45	70	
3	120	23,8	1,0235	19,29374	1,002545496	0,997269	9,39768E-06	0,043268	0,504847	50,48474	2,45	70	
4	240	23,7	1,023	18,37996	1,00256309	0,997289	9,42034E-06	0,029898	0,492384	49,23841	2,45	70	
5	480	23,7	1,0215	18,37996	1,00256309	0,997289	9,42034E-06	0,021141	0,456245	45,62448	2,45	70	
6	900	23,7	1,0185	18,37996	1,00256309	0,997289	9,42034E-06	0,015439	0,383966	38,39661	2,45	70	
7	1800	23,5	1,0165	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	2,45	70	
8	3600	23,7	1,015	18,37245	1,00259807	0,99733	9,4659E-06	0,007737	0,298807	29,88067	2,45	70	
9	7200	23,8	1,013	18,38374	1,002545496	0,997269	9,39768E-06	0,005453	0,251876	25,18756	2,45	70	
10	14400	23,8	1,0115	18,38374	1,002545496	0,997269	9,39768E-06	0,003856	0,215737	21,57368	2,45	70	
11	28800	22,8	1,0105	18,34665	1,002718314	0,997472	9,62788E-06	0,002757	0,187507	18,75069	2,45	70	
12	90000	20,2	1,0085	18,25719	1,003135161	0,998002	1,02638E-05	0,001607	0,129318	12,93179	2,45	70	

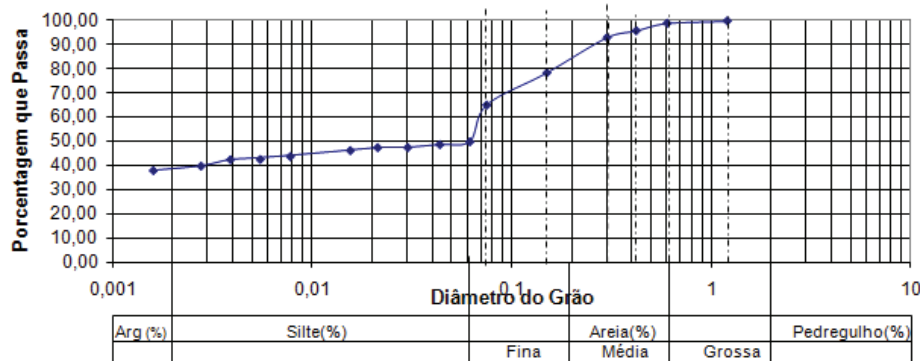
  

Umidade ensaio de Granulometria	
Cápsula + Solo úmido	70
Cápsula + solo Seco	70
Cápsula	0
Água	0
Solo Seco - WS	70
Umidade - w	0

### Amostra P4

Amostra Parcial Úmida w (g):		70,00	Amostra Parcial Seca Ws (g)		70,00	
Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra	% Material Passado da Amostra Total		Peneira (mm)
nº 16	0,01	69,99	99,99			1,2
nº 30	0,64	69,35	99,07			0,6
nº 40	2,19	67,16	95,94			0,42
nº 50	1,95	65,21	93,16			0,3
nº 100	10,22	54,99	78,56			0,15
nº 200	9,30	45,69	65,27			0,075
Soma	24,31					

### Peneiramento



	DIÂMETRO	%
PENEIRAMENTO	1,2	99,99
	0,6	99,07
	0,42	95,94
	0,3	93,16
	0,15	78,56
	0,075	65,27
SEDIMENTAÇÃO	0,06181	50,1156
	0,04371	48,9108
	0,03017	47,706
	0,02135	47,6658
	0,0156	46,461
	#REF!	#REF!
	0,00781	44,0113
	0,00552	42,8065
	0,00392	42,6871
	0,00279	40,0429
0,00161	38,1702	

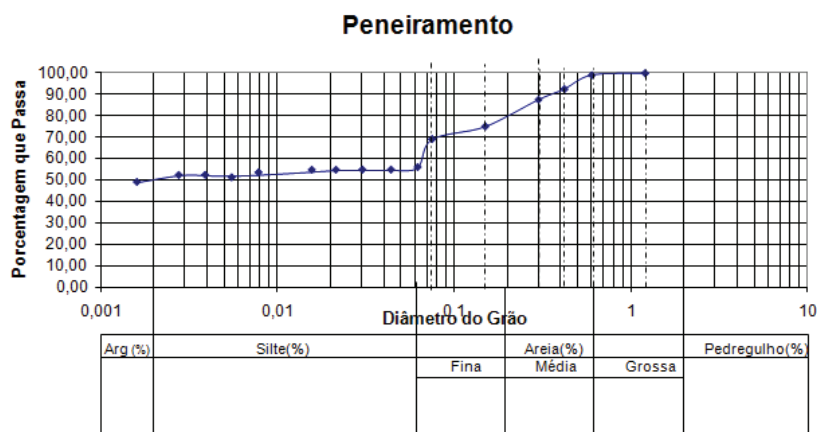
em seg.		correção da lei peso esp										PESO ESP? peso do solo seco	
	Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_w$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	YS	WS	
1	30	22,9	1,025	19,26029	1,002701344	0,997452	9,6045E-06	0,087414	0,537299	53,72992	2,45	70	
2	60	22,9	1,0235	19,26029	1,002701344	0,997452	9,6045E-06	0,061811	0,501156	50,11558	2,45	70	
3	120	22,9	1,023	19,26029	1,002701344	0,997452	9,6045E-06	0,043707	0,489108	48,91081	2,45	70	
4	240	22,9	1,0225	18,35029	1,002701344	0,997452	9,6045E-06	0,030166	0,47706	47,70603	2,45	70	
5	480	22,8	1,0225	18,34665	1,002718314	0,997472	9,62788E-06	0,021355	0,476658	47,66581	2,45	70	
6	900	22,8	1,022	18,34665	1,002718314	0,997472	9,62788E-06	0,015595	0,46461	46,46101	2,45	70	
7	1800	22,7	1,0215	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	2,45	70	
8	3600	22,7	1,021	18,34302	1,002735214	0,997493	9,65134E-06	0,007806	0,440113	44,01131	2,45	70	
9	7200	22,7	1,0205	18,34302	1,002735214	0,997493	9,65134E-06	0,00552	0,428065	42,8065	2,45	70	
10	14400	22,4	1,0205	18,33223	1,002785498	0,997554	9,7222E-06	0,003916	0,426871	42,68713	2,45	70	
11	28800	21,8	1,0195	18,31105	1,002884192	0,997676	9,86608E-06	0,002788	0,400429	40,04295	2,45	70	
12	90000	20	1,019	18,25073	1,003165283	0,998043	0,000010315	0,00161	0,381702	38,17021	2,45	70	

Umidade ensaio de Granulometria	
Cápsula + Solo úmido	70
Cápsula + solo Seco	70
Cápsula	0
Água	0
Solo Seco - WS	70
Umidade - w	0

### Amostra P5

Amostra Parcial Úmida W (g):		70,00		Amostra Parcial Seca Ws (g)		70,00	
Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra	% Material Passado da Amostra Total	Peneira (mm)		
nº 16	0,04	69,96	99,94		1,2		
nº 30	0,61	69,35	99,07		0,6		
nº 40	4,58	64,77	92,53		0,42		
nº 50	3,47	61,30	87,57		0,3		
nº 100	8,78	52,52	75,03		0,15		
nº 200	4,18	48,34	69,06		0,075		
Soma	21,66						



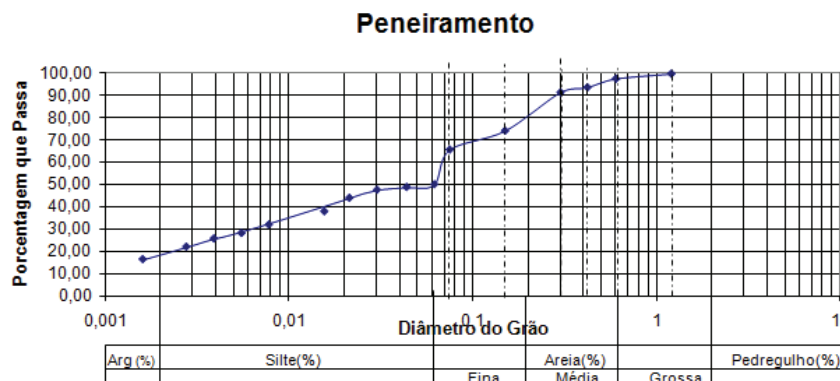
	DIÂMETRO	%
PENEIRAMENTO	1,2	99,94
	0,6	99,07
	0,42	92,53
	0,3	87,57
	0,15	75,03
0,075	69,06	
SEDIMENTAÇÃO	0,06223	55,9014
	0,044	54,6965
	0,03034	54,7358
	0,0215	54,6574
	0,0157	54,6574
	#REF!	#REF!
	0,00785	53,4525
	0,00554	51,1212
0,00393	52,2476	
0,00278	52,1697	
0,00161	48,9471	



em seg.	correção da lei peso esp										PESO ESPÉ peso do solo seco	
Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_w$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	YS	WS	
1	30	22,3	1,0265	19,23867	1,00280212	0,997574	9,74598E-06	0,088009	0,571062	57,10624	2,45	70
2	60	22,3	1,026	19,23867	1,00280212	0,997574	9,74598E-06	0,062232	0,559014	55,90136	2,45	70
3	120	22,3	1,0255	19,23867	1,00280212	0,997574	9,74598E-06	0,044005	0,546965	54,69648	2,45	70
4	240	22,4	1,0255	18,33223	1,002785498	0,997554	9,7222E-06	0,030337	0,547358	54,73577	2,45	70
5	480	22,2	1,0255	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,0215	0,546574	54,65736	2,45	70
6	900	22,2	1,0255	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,015701	0,546574	54,65736	2,45	70
7	1800	22,2	1,0255	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	2,45	70
8	3600	22,2	1,025	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,007851	0,534525	53,45246	2,45	70
9	7200	22,4	1,024	18,33223	1,002785498	0,997554	9,7222E-06	0,005539	0,511212	51,12118	2,45	70
10	14400	22,2	1,0245	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,003925	0,522476	52,24756	2,45	70
11	28800	22	1,0245	18,31805	1,002851571	0,997635	9,8178E-06	0,002782	0,521697	52,16975	2,45	70
12	90000	19,8	1,0235	18,24433	1,003195128	0,998084	1,03665E-05	0,001614	0,489471	48,94707	2,45	70
<b>Umidade ensaio de Granulometria</b>												
Cápsula + Solo úmido												
Cápsula + solo Seco												
Cápsula												
Água												
Solo Seco - WS												
Umidade - w												

### Amostra P6

Amostra Parcial Úmida W (g):		70,00	Amostra Parcial Seca Ws (g)		70,00
Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra	% Material Passado da Amostra Total	Peneira (mm)
nº 16	0,14	69,86	99,80		1,2
nº 30	1,55	68,31	97,59		0,6
nº 40	2,72	65,59	93,70		0,42
nº 50	1,62	63,97	91,39		0,3
nº 100	12,03	51,94	74,20		0,15
nº 200	5,94	46,00	65,71		0,075
Soma	24,00				

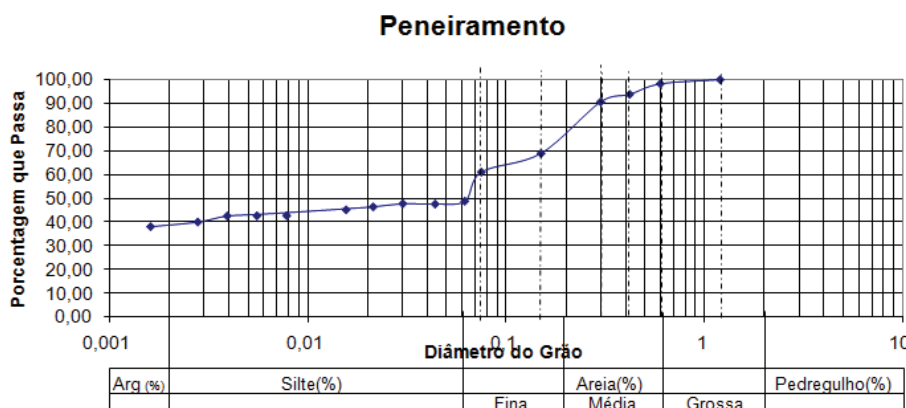


	DIÂMETRO	
	DIÂMETRO	%
PENEIRAMENTO	1,2	99,80
	0,6	97,59
	0,42	93,70
	0,3	91,39
	0,15	74,20
	0,075	65,71
SEDIMENTAÇÃO	0,06188	50,0754
	0,04376	48,8706
	0,03023	47,6258
	0,02138	44,0113
	0,01563	37,9472
	#REF!	#REF!
	0,00781	31,9632
	0,00554	28,1891
	0,00393	25,7398
	0,00278	22,0465
0,00161	16,4039	

em seg.	correção da lei peso esp										PESO ESPÉ peso do solo seco	
Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_w$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	YS	WS	
1	30	22,8	1,024	19,25665	1,002718314	0,997472	9,62788E-06	0,087512	0,512802	51,28019	2,45	70
2	60	22,8	1,0235	19,25665	1,002718314	0,997472	9,62788E-06	0,061881	0,500754	50,0754	2,45	70
3	120	22,8	1,023	19,25665	1,002718314	0,997472	9,62788E-06	0,043756	0,488706	48,8706	2,45	70
4	240	22,7	1,0225	18,34302	1,002735214	0,997493	9,65134E-06	0,030234	0,476258	47,62575	2,45	70
5	480	22,7	1,021	18,34302	1,002735214	0,997493	9,65134E-06	0,021379	0,440113	44,01131	2,45	70
6	900	22,6	1,0185	18,33941	1,002752044	0,997513	9,67488E-06	0,015631	0,379472	37,94722	2,45	70
7	1800	22,7	1,017	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	2,45	70
8	3600	22,6	1,016	18,34302	1,002735214	0,997493	9,65134E-06	0,007806	0,319632	31,96318	2,45	70
9	7200	22,3	1,0145	18,32867	1,00280212	0,997574	9,74598E-06	0,005545	0,281891	28,1891	2,45	70
10	14400	22,2	1,0135	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,003925	0,257398	25,73981	2,45	70
11	28800	22	1,012	18,31805	1,002851571	0,997635	9,8178E-06	0,002782	0,220465	22,04646	2,45	70
12	90000	19,8	1,01	18,24433	1,003195128	0,998084	1,03665E-05	0,001614	0,164039	16,40387	2,45	70
<b>Umidade ensaio de Granulometria</b>												
Cápsula + Solo úmido												
Cápsula + solo Seco												
Cápsula												
Água												
Solo Seco - WS												
Umidade - w												

## Amostra P7

Amostra Parcial Úmida W (g):		70,00		Amostra Parcial Seca Ws (g) :		70,00	
Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra Parcial	% Material Passado da Amostra Total		Peneira (mm)	
nº 16	0,07	69,93	99,90			1,2	
nº 30	1,23	68,70	98,14			0,6	
nº 40	3,10	65,60	93,71			0,42	
nº 50	2,19	63,41	90,59			0,3	
nº 100	15,16	48,25	68,93			0,15	
nº 200	5,52	42,73	61,04			0,075	
Soma	27,27						



DIÂMETRO		%
PENEIRAMENTO	1,2	99,90
	0,6	98,14
	0,42	93,71
	0,3	90,59
	0,15	68,93
	0,075	61,04
SEDIMENTAÇÃO	0,06195	48,8306
	0,04381	47,6258
	0,03013	47,7464
	0,02138	46,4209
	0,01561	45,2161
	#REF!	#REF!
	0,00782	42,7268
	0,00554	42,6871
	0,00393	42,6084
	0,00279	40,0429
0,00161	38,0993	

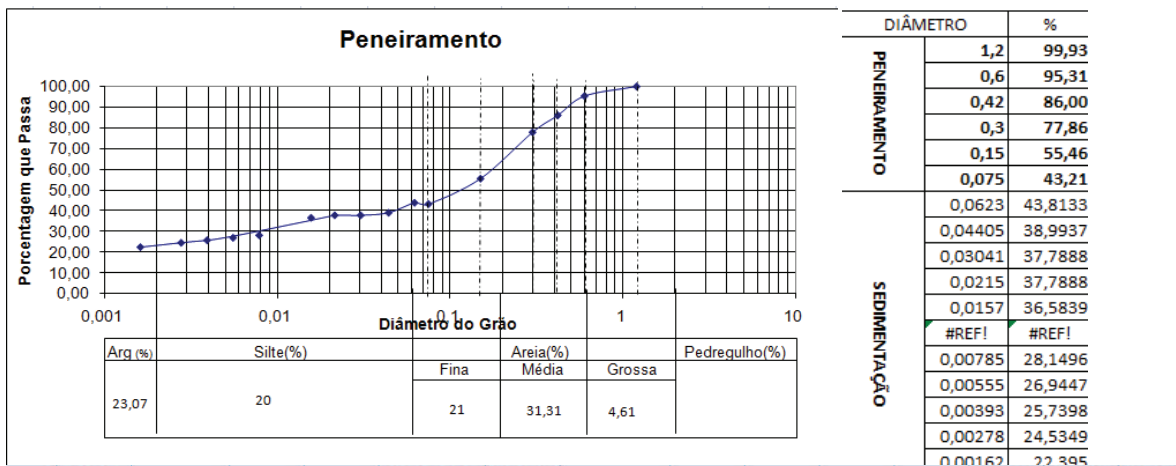
em seg.		correção da lei peso esp										PESO ESPº peso do solo seco	
Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_0$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	YS	WS		
1	30	22,7	1,0235	19,25302	1,002735214	0,997493	9,65134E-06	0,087611	0,500354	50,03538	2,45	70	
2	60	22,7	1,023	19,25302	1,002735214	0,997493	9,65134E-06	0,06195	0,488306	48,83056	2,45	70	
3	120	22,7	1,0225	19,25302	1,002735214	0,997493	9,65134E-06	0,043806	0,476258	47,62575	2,45	70	
4	240	23	1,0225	18,35395	1,002684305	0,997432	9,5812E-06	0,030133	0,477464	47,74641	2,45	70	
5	480	22,7	1,022	18,34302	1,002735214	0,997493	9,65134E-06	0,021379	0,464209	46,42094	2,45	70	
6	900	22,7	1,0215	18,34302	1,002735214	0,997493	9,65134E-06	0,015613	0,452161	45,21612	2,45	70	
7	1800	22,5	1,021	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	2,45	70	
8	3600	22,5	1,0205	18,33581	1,002768806	0,997533	9,6985E-06	0,007824	0,427268	42,72675	2,45	70	
9	7200	22,4	1,0205	18,33223	1,002785498	0,997554	9,7222E-06	0,005539	0,426871	42,68713	2,45	70	
10	14400	22,2	1,0205	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,003925	0,426084	42,60838	2,45	70	
11	28800	21,8	1,0195	18,31105	1,002884192	0,997676	9,86608E-06	0,002788	0,400429	40,04295	2,45	70	
12	90000	19,8	1,019	18,24433	1,003195128	0,998084	1,03665E-05	0,001614	0,380993	38,09934	2,45	70	

Umidade ensaio de Granulometria	
Cápsula + Solo úmido	70
Cápsula + solo Seco	70
Cápsula	0
Água	0
Solo Seco - WS	70
Umidade - w	0

## Amostra P8

Amostra Parcial Úmida W (g):		70,00		Amostra Parcial Seca Ws (g) :		70,00	
Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra Parcial	% Material Passado da Amostra Total		Peneira (mm)	
nº 16	0,05	69,95	99,93			1,2	
nº 30	3,23	66,72	95,31			0,6	
nº 40	6,52	60,20	86,00			0,42	
nº 50	5,70	54,50	77,86			0,3	
nº 100	15,68	38,82	55,46			0,15	
nº 200	8,57	30,25	43,21			0,075	
Soma	39,75						



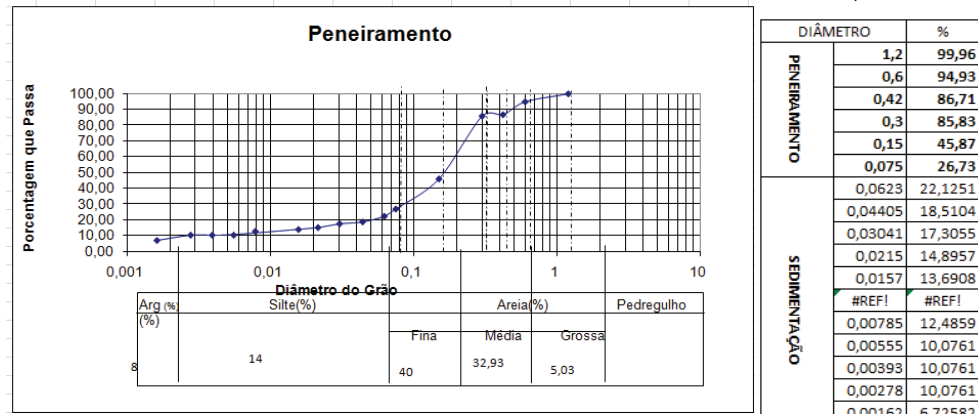


em seg.										correção da lei peso esp		PESO ESPÉ peso do solo seco	
Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_w$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	YS	WS		
1	30	22,2	1,0225	19,23511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,08811	0,47428	47,42797	2,45	70	
2	60	22,2	1,021	19,23511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,062303	0,438133	43,81328	2,45	70	
3	120	22,2	1,019	19,23511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,044055	0,389937	38,99369	2,45	70	
4	240	22,2	1,0185	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,030406	0,377888	37,78879	2,45	70	
5	480	22,2	1,0185	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,0215	0,377888	37,78879	2,45	70	
6	900	22,2	1,018	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,015701	0,365839	36,58389	2,45	70	
7	1800	22,2	1,0175	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	2,45	70	
8	3600	22,2	1,0145	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,007851	0,281496	28,14961	2,45	70	
9	7200	22,2	1,014	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,005551	0,269447	26,94471	2,45	70	
10	14400	22,2	1,0135	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,003925	0,257398	25,73981	2,45	70	
11	28800	22,2	1,013	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,002776	0,245349	24,53491	2,45	70	
12	90000	19,7	1,0125	18,24115	1,003209946	0,998104	1,03923E-05	0,001616	0,22395	22,39499	2,45	70	

Umidade ensaio de Granulometria	
Cápsula + Solo úmido	70
Cápsula + solo Seco	70
Cápsula	0
Água	0
Solo Seco - WS	70
Umidade - w	0

### Amostra P9

Peneira	Material Retido (g)	Material Passado (g)	Material Passado da Amostra Parcial	% Material Passado da Amostra Total	Peneira (mm)
nº 16	0,03	69,97	99,96		1,2
nº 30	3,52	66,45	94,93		0,6
nº 40	5,75	60,70	86,71		0,42
nº 50	0,62	60,08	85,83		0,3
nº 100	27,97	32,11	45,87		0,15
nº 200	13,40	18,71	26,73		0,075
Soma	51,29				



em seg.		correção da lei peso esp										PESO ESP peso do solo seco	
	Tempo	Temperatura	Leitura	a e a'	LD	$\gamma_w$	$\mu$	Diâmetro	Q	Q - %	YS	WS	
1	30	22,2	1,013	19,23511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,08811	0,245349	24,53491	2,45	70	
2	60	22,2	1,012	19,23511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,062303	0,221251	22,12512	2,45	70	
3	120	22,2	1,0105	19,23511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,044055	0,185104	18,51043	2,45	70	
4	240	22,2	1,01	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,030406	0,173055	17,30553	2,45	70	
5	480	22,2	1,009	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,0215	0,148957	14,89573	2,45	70	
6	900	22,2	1,0085	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,015701	0,136908	13,69084	2,45	70	
7	1800	22,2	1,008	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	#REF!	2,45	70	
8	3600	22,2	1,008	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,007851	0,124859	12,48594	2,45	70	
9	7200	22,2	1,007	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,005551	0,100761	10,07614	2,45	70	
10	14400	22,2	1,007	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,003925	0,100761	10,07614	2,45	70	
11	28800	22,2	1,007	18,32511	1,002818673	0,997595	9,76984E-06	0,002776	0,100761	10,07614	2,45	70	
12	90000	19,7	1,006	18,24115	1,003209946	0,998104	1,03923E-05	0,001616	0,067258	6,725819	2,45	70	
<b>Umidade ensaio de Granulometria</b>													
Cápsula + Solo úmido				70									
Cápsula + solo Seco				70									
Cápsula				0									
Água				0									
Solo Seco - WS				70									
Umidade - w				0									