

LUIZA SILVA BETIM

**CARACTERIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS SOLOS E  
ESTUDO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS  
DA SUB-BACIA DO CÓRREGO PALMITAL - VIÇOSA/MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B563c  
2013

Betim, Luiza Silva, 1988-

Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do Córrego Palmital – Viçosa/MG / Luiza Silva Betim. – Viçosa, MG, 2013.

xxi, 186f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 129-140

1. Solos - Permeabilidade. 2. Águas subterrâneas - Contaminação. 3. Bacias hidrográficas. 4. Aterro sanitário. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

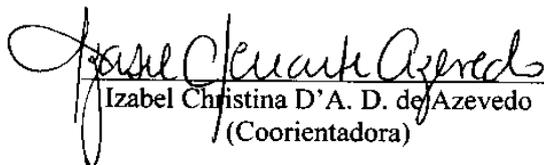
CDD 22. ed. 631.433

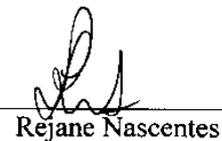
LUIZA SILVA BETIM

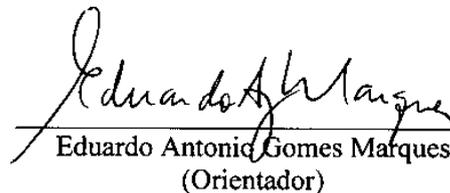
**CARACTERIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS SOLOS E  
ESTUDO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQUIFEROS  
DA SUB-BACIA DO CÓRREGO PALMITAL – VIÇOSA/MG**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção do  
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2013.

  
Izabel Christina D'A. D. de Azevedo  
(Coorientadora)

  
Rejane Nascentes

  
Eduardo Antonio Gomes Marques  
(Orientador)

*Dedico aos meus pais, Evilásio e Elineide, e ao meu irmão, Fernando. Dedico também a todos que contribuíram ativamente para a realização do trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Evilásio e Elineide, pelo amor incondicional e por me darem liberdade de buscar o que fosse melhor para minha formação e crescimento pessoal, mesmo que isso implicasse em distância. Ao meu irmão Fernando, pelo carinho e confiança.

Ao Vinícius Carvalho, pelo amor, apoio, ensinamentos e companhia quase em tempo integral nos últimos 2 anos, bem como por ceder tanto dados para a realização desse trabalho.

Ao Professor Eduardo Marques, pela amizade e orientação nos últimos quatro anos, da IC ao mestrado. Aos estudantes Klinger Senra, Aline Marques, Brahmani Paes, Vitor Reis, Renan Costa e Leandro Roque e aos funcionários do Laboratório e do Departamento de Engenharia Civil da UFV, especialmente ao Julinho, Paulo P3, Guilherme e Luciano, pelas boas risadas e imensa ajuda nos trabalhos de campo e de laboratório. Ao engenheiro Hugo Castro, pela enorme prestatividade em ajudar nas idas e vindas do aterro de Viçosa. Ao agrônomo César Chagas, pela elucidação das dúvidas sobre solos e atualização do mapa pedológico. Ao Rodrigo Sigolo, pela marcação dos pontos com o GPS topográfico. Às Prof.<sup>as</sup> Izabel Cristina de Azevedo e Rejane Nascentes, pelas informações e sugestões valiosas.

Aos amigos da Pós-graduação em Engenharia Civil, atuais e das antigas, pelas dicas, cafés e gargalhadas... em especial: à Luana Andrade e Gustavo Franco, que foram meus orientadores também, em suas respectivas pesquisas; à Thaís Felicori e Geanne Brito, grandes amigas e companheiras de labuta desde o início dos trabalhos com o Prof. Eduardo; ao Paulo Caixeta e Marcos Vinicius Abreu, pelas valiosas dicas de ArcGis.

Aos professores Robson Carlos Tonello e Jessé Ribeiro de Andrade e demais amigos da Academia Shaolin de Kung Fu Viçosa pela companhia e disciplina nos treinos árduos e revigorantes e pelos inesquecíveis momentos de reflexão e bagunça, constituindo uma família para mim nos últimos dois anos... “um abraço pra galera do Kung Fu”!

Às companheiras de república durante o mestrado, Adriellem Soares, Silmara Costa e Ângela Lima. Aos amigos da EAB e demais amigos que fiz nessa maravilhosa trajetória de quase sete anos na UFV. Enfim, a todos os familiares e amigos que

ajudaram a construir minha história e me proporcionam alegria a cada momento, a cada lembrança.

À Universidade Federal de Viçosa pela estrutura e conhecimento concedido, especialmente aos professores e funcionários. Ao CNPQ, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos moradores do Palmital, pela confiança e prestatividade, permitindo a realização dos trabalhos.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização do presente trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xx</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....</b>	<b>6</b>
2.1.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E O CICLO HIDROLÓGICO.....	6
2.1.2 AQUÍFEROS: CONCEITO E SEUS PRINCIPAIS TIPOS .....	7
2.1.3 RECARGA E DESCARGA DE AQUÍFEROS .....	9
2.1.4 IMPACTOS SOBRE AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	10
2.1.4.1 Superexploração .....	10
2.1.4.2 Poluição das águas subterrâneas .....	10
2.1.4.3 Impermeabilização do solo.....	12
<b>2.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E OUTRAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AQUÍFEROS</b>	<b>12</b>
2.2.1 POROSIDADE .....	12
2.2.2 COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO.....	13
2.2.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	14
2.2.3.1 A Lei de Darcy .....	14
2.2.3.2 Anisotropia e heterogeneidade .....	15
2.2.3.3 Permeabilidade intrínseca .....	16
2.2.3.4 Fatores que influenciam a condutividade hidráulica.....	17
2.2.3.5 Métodos para determinação da condutividade hidráulica .....	21

2.2.3.5.1	Determinação da condutividade hidráulica a partir de ensaios de laboratório	22
2.2.3.5.2	Determinação da condutividade hidráulica a partir de ensaios de campo	24
2.2.3.6	Variabilidade dos valores de condutividade hidráulica	28
<b>2.3</b>	<b>DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PERCOLADO DE ATERRO SANITÁRIO</b>	<b>29</b>
<b>2.4</b>	<b>AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL DOS AQUÍFEROS À POLUIÇÃO</b>	<b>32</b>
2.4.1	CONCEITO DE VULNERABILIDADE NATURAL	32
2.4.2	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL	33
2.4.2.1	DRASTIC	33
2.4.2.2	GOD	35
2.4.3	CRITÉRIOS PARA A ESCOLHA DA MELHOR METODOLOGIA	38
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS SOLOS DA SUB-BACIA DO CÓRREGO PALMITAL</b>	<b>39</b>
3.2.1	TRABALHOS DE CAMPO	39
3.2.1.1	Ensaios de permeabilidade <i>in situ</i>	39
3.2.1.1.1	Ensaio de carga variável	44
3.2.1.1.2	Ensaio de carga constante	45
3.2.1.2	Coleta de amostras indeformadas	46
3.2.1.3	Coleta de percolado de aterro sanitário	49
3.2.2	ENSAIOS EM LABORATÓRIO	50
3.2.2.1	Determinação de índices físicos e da granulometria das amostras de solo	50
3.2.2.2	Análises físico-químicas e microbiológica do percolado de aterro sanitário	50
3.2.2.3	Ensaios de permeabilidade em laboratório	51
3.2.2.4	Análise dos resultados de condutividade hidráulica	55
<b>3.3</b>	<b>ESTUDO DA VULNERABILIDADE DE CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS DA SUB-BACIA DO CÓRREGO PALMITAL</b>	<b>56</b>
3.3.1	ELABORAÇÃO DO MAPA POTENCIOMÉTRICO	57
3.3.2	AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS SEGUNDO A METODOLOGIA GOD	60

3.3.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS SEGUNDO A METODOLOGIA DRASTIC .....	60
3.3.3.1 Elaboração do mapa de vulnerabilidade segundo a metodologia DRASTIC ...	66
<b>4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA HIDROGRAFIA .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2 CLIMA .....</b>	<b>68</b>
<b>4.3 HIDROGRAFIA LOCAL.....</b>	<b>68</b>
<b>4.4 GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA .....</b>	<b>69</b>
<b>4.5 GEOMORFOLOGIA E RELEVO .....</b>	<b>72</b>
<b>4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....</b>	<b>74</b>
4.6.1 LATOSSOLOS .....	75
4.6.2 ARGISSOLOS .....	77
4.6.3 CAMBISSOLOS .....	78
<b>4.7 USOS DO SOLO.....</b>	<b>79</b>
<b>4.8 POÇOS DE CAPTAÇÃO E USOS DA ÁGUA.....</b>	<b>81</b>
<b>4.9 PROBLEMAS AMBIENTAIS.....</b>	<b>82</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>84</b>
<b>5.1 CARACTERIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS SOLOS DA SUB-BACIA DO CÓRREGO PALMITAL .....</b>	<b>84</b>
5.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS .....	84
5.1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PERCOLADO DE ATERRO SANITÁRIO UTILIZADOS NOS ENSAIOS .....	86
5.1.3 CARACTERIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM CAMPO.....	88
5.1.4 CARACTERIZAÇÃO DA PERMEABILIDADE INTRÍNSECA E CONDUTIVIDADES HIDRÁULICAS DOS SOLOS À ÁGUA E PERCOLADO DE ATERRO SANITÁRIO OBTIDAS EM LABORATÓRIO .....	92

5.1.4.1 Variabilidade dos resultados de condutividade hidráulica e permeabilidade intrínseca .....	101
5.1.4.2 Estimativa do tempo de percolação do percolado e discussão sobre a adequabilidade dos solos residuais estudados como camada de impermeabilização de base em aterros sanitários.....	103
5.1.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA OBTIDOS EM CAMPO E EM LABORATÓRIO.....	106
<b>5.2 ESTUDO DA VULNERABILIDADE DE CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS DA SUB-BACIA DO CÓRREGO PALMITAL.....</b>	<b>107</b>
5.2.1 MAPA POTENCIOMÉTRICO .....	107
5.2.2 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS SEGUNDO METODOLOGIA GOD.....	109
5.2.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS SEGUNDO A METODOLOGIA DRASTIC .....	111
5.2.3.1 Profundidade do nível d'água (nível estático) – D.....	112
5.2.3.2 Recarga do aquífero - R .....	112
5.2.3.3 Material do aquífero – A .....	113
5.2.3.4 Tipo de solo – T .....	113
5.2.3.5 Topografia – T.....	114
5.2.3.6 Impacto da zona vadosa – I.....	115
5.2.3.7 Condutividade Hidráulica do Aquífero – C .....	115
5.2.3.8 Mapa de vulnerabilidade .....	116
5.2.4 COMPARAÇÃO E ANÁLISE CONJUNTA DA APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS GOD E DRASTIC.....	118
5.2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCALA UTILIZADA.....	123
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>124</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>128</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>129</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>141</b>

<b>ANEXO II .....</b>	<b>146</b>
<b>ANEXO III.....</b>	<b>169</b>
<b>ANEXO IV .....</b>	<b>178</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo hidrológico (FONTE: MMA, 2007). .....	6
Figura 2: Representação da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diferentes zonas de umidade (CLEARY, 1989). .....	7
Figura 3: Ilustração dos tipos de aquífero classificados segundo a formação geológica. Fonte: Iritani & Ezaki (2008). .....	8
Figura 4: Fontes comuns de poluição de águas subterrâneas (FOSTER <i>et al.</i> , 2006). ...	11
Figura 5: Esquema representativo do experimento de Darcy. Fonte: Feitosa & Filho (2000). .....	15
Figura 6: Alguns tipos de permeâmetros de parede rígida: (a) molde de compactação; (b) tubo superdimensionado. Fonte: Daniel (1994) adaptado por Morandini (2009). ....	23
Figura 7: Permeâmetro de parede flexível. ....	24
Figura 8: Ensaios com injeção de água no furo de sondagem, acima do nível d'água: ..	25
Figura 9: Ensaios com retirada de água no furo de sondagem, abaixo do nível d'água: (a) Ensaio de bombeamento; (b) Ensaio de recuperação. ....	26
Figura 10: Permeâmetro Guelph durante ensaio de campo (LISBOA, 2006). ....	27
Figura 11: Ilustração dos ensaios <i>Slug test</i> e <i>Bail Test</i> (FIORI, 2010). ....	28
Figura 12: Diagrama explicativo para a Metodologia GOD. Fonte: Foster <i>et al.</i> , 2006.	37
Figura 13: Localização dos furos nos quais foram realizados os ensaios de permeabilidade. ....	40
Figura 14: (a) Trado mecânico utilizado para a realização dos furos; (b) imagem exemplificando a execução de furo. ....	41
Figura 15: Indicação de parte dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de permeabilidade. ....	43
Figura 16: (a) “Permeâmetro” utilizado para as leituras da variação de carga hidráulica; (b) realização de leituras. ....	44
Figura 17: Ábaco para obtenção do coeficiente empírico $C_u$ , necessário à determinação do coeficiente de permeabilidade em ensaio de carga constante acima no nível d'água. ....	45
Figura 18: Localização dos pontos de coleta de amostras indeformadas. ....	47
Figura 19: Retirada de amostras indeformadas em campo. ....	48
Figura 20: Amostras indeformadas coletadas em campo, acondicionadas e identificadas. ....	48

Figura 21: Coleta de percolado na lagoa do aterro sanitário do município de Viçosa....	49
Figura 22: Conjunto utilizado para a realização dos ensaios de permeabilidade de carga variável, formado pelo permeâmetro e as buretas graduadas. ....	52
Figura 23: (a) Moldagem de corpo-de-prova para realização de ensaio de permeabilidade. (b) Permeâmetro sendo montado para realização de ensaio, com o corpo de prova ao centro. ....	54
Figura 24: (a) Aparato utilizado para a realização dos ensaios de permeabilidade com percolado de aterro; (b) Homogeneização do percolado a fim de evitar a sedimentação dos sólidos.....	55
Figura 25: Poços de monitoramento do nível d'água.....	57
Figura 26: Localização da sub-bacia do Córrego Palmital dentro do contexto regional. Fonte: Fernandes <i>et al.</i> (2007). ....	67
Figura 27: Nascentes e rede de drenagem da área de estudos.....	69
Figura 28: Geologia da área de estudos. ....	70
Figura 29: Exemplos de afloramentos de gnaiss na área de estudo (ANDRADE, 2010). ....	71
Figura 30: Mapa de províncias hidrogeológicas do Brasil. Fonte: MMA (2013).....	72
Figura 31: Mapa hipsométrico da área de estudo.....	73
Figura 32: Mapa de declividade da área de estudos.....	74
Figura 33: Mapa semidetalhado dos solos da sub-bacia. Adaptado de Andrade (2010).76	
Figura 34: Presença de Latossolo na área de estudo. (a) Perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo (ANDRADE, 2010); (b) Cafezal em Latossolo, no entorno do perfil. ....	77
Figura 35: Presença de Argissolo na área de estudo. (a) Perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo (ANDRADE, 2010); (b) Área de entorno do perfil, em terraço de elevação...78	
Figura 36: Presença de Cambissolo na área de estudo. (a) Perfil de Cambissolo Háptico (ANDRADE, 2010); (b) Arredores do perfil de Cambissolo, mostrando a ocorrência em pastagem, em relevo fortemente ondulado.....	79
Figura 37: Uso e ocupação do solo na área de estudo. Adaptado de Andrade (2010)....	80
Figura 38: Vista de parte da paisagem da área de estudo, ilustrando seus principais usos do solo. ....	81
Figura 39: Poços existentes na área de estudo. ....	82
Figura 40: Problemas ambientais evidentes na área de estudos: (a) Pastagem degradada, comum na paisagem; (b) Entorno de uma nascente, um curral com presença de fezes de bovinos. Fonte: Andrade (2010). ....	83

Figura 41: Percolado do aterro sanitário de Viçosa (MG), utilizado nos ensaios de permeabilidade em laboratório.....	86
Figura 42: Indicação de grande macroporo (“megaporo”). .....	102
Figura 43: Presença de fraturas (a) e raízes (a e b) nas amostras, que por vezes, impediam a moldagem dos corpos de prova. ....	103
Figura 44: Mapa potenciométrico da área de estudo. ....	108
Figura 45: Mapa de vulnerabilidade de contaminação do aquífero na área de estudo segundo a metodologia GOD. ....	110
Figura 46: Classificação da profundidade do nível d’água segundo metodologia DRASTIC.....	112
Figura 47: Classificação da recarga do aquífero segundo metodologia DRASTIC.....	113
Figura 48: Classificação dos tipos de solo segundo metodologia DRASTIC.....	114
Figura 49: Classificação da topografia segundo metodologia DRASTIC. ....	115
Figura 50: Mapa de vulnerabilidade de contaminação do aquífero na área de estudo segundo a metodologia DRASTIC. ....	117
Figura 51: Poços e fossas cadastrados na área de estudos. ....	120

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica à água para vários materiais não-consolidados.....	17
Tabela 2 - Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica à água para rochas diversas.....	17
Tabela 3 - Faixas de valores típicos de porosidade e condutividade hidráulica à água para diferentes materiais consolidados e não consolidados. ....	19
Tabela 4 - Valores típicos de coeficientes de permeabilidade de solos sedimentares. ...	20
Tabela 5 - Principais tipos de ensaios realizados em furos de sondagem (ABGE, 1999). .....	25
Tabela 6 – Variação da composição química de percolados em aterros de resíduos brasileiros.....	31
Tabela 7 - Viscosidade do “chorume” do aterro de Muribeca (PE).....	31
Tabela 8 - Pesos atribuídos a cada parâmetro no cálculo do índice DRASTIC.....	34
Tabela 9 - Classificação da vulnerabilidade segundo índice DRASTIC. ....	34
Tabela 10 - Classes de vulnerabilidade segundo índice obtido pela metodologia GOD.	36
Tabela 11 - Identificação, localização e altitude dos pontos de realização dos ensaios de permeabilidade em campo.....	41
Tabela 12 - Identificação e localização dos pontos de coleta de amostras de solo e sua respectiva classe. ....	47
Tabela 13 - Metodologias utilizadas na determinação dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos do percolado estudado.....	51
Tabela 14 - Identificação, localização, cota e nível d’água mínimo dos poços de monitoramento instalados na área de estudo.....	58
Tabela 15 - Faixas de profundidade do nível d’água e respectivos índices de avaliação. .....	61
Tabela 16 - Faixas de recarga do aquífero e respectivos índices de avaliação. ....	62
Tabela 17 - Tipos de material do aquífero e os respectivos valores do índice de avaliação.....	62
Tabela 18 - Tipos de solo e respectivos valores do índice de avaliação. ....	63
Tabela 19 - Classes de declividade e respectivos valores do índice de avaliação. ....	64
Tabela 20 - Tipos de material da zona vadosa e respectivos valores do índice de avaliação segundo sua influência na atenuação do potencial de contaminação.....	65

Tabela 21 - Intervalos de condutividade hidráulica e respectivos índices de avaliação.	65
Tabela 22 - Resultados da análise granulométrica dos solos pertencentes às amostras de ensaio da condutividade hidráulica.	84
Tabela 23 - Resultados dos índices físicos analisados nas amostras de solos coletadas em cinco pontos da área de estudos para ensaio de permeabilidade.	85
Tabela 24 - Características físico químicas e microbiológica do percolado estudado.	87
Tabela 25 - Resultados dos ensaios de permeabilidade em campo.	88
Tabela 26 - Valores médios de condutividade hidráulica para as classes de solo presentes na área de estudo.	91
Tabela 27 - Resultados obtidos para a condutividade hidráulica dos solos utilizando como fluido percolante a água.	93
Tabela 28 - Resultados obtidos para a condutividade hidráulica dos solos utilizando como fluido percolante o percolado de aterro sanitário.	94
Tabela 29 - Resultados obtidos para a permeabilidade intrínseca (k) dos solos estudados.	95
Tabela 30 - Valores médios de permeabilidade intrínseca (k) para as diferentes classes de solo estudadas.	95
Tabela 31 - Condutividade hidráulica obtida para cada classe de solo estudada considerando como fluidos a água e o percolado de aterro sanitário.	97
Tabela 32 - Velocidades e tempos de percolação do percolado de aterro da superfície ao lençol freático para cada classe de solo estudada.	105
Tabela 33 - Índices atribuídos a cada parâmetro avaliado na metodologia GOD para a sub-bacia do Córrego Palmital.	109
Tabela 34 - Abrangência das classes de vulnerabilidade em área e percentual na sub-bacia do Córrego Palmital.	109
Tabela 35 - Abrangência das classes de vulnerabilidade segundo DRASTIC em área e percentual na sub-bacia do Córrego Palmital.	116

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- A – área da seção transversal de uma amostra de solo
- ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM - American Society For Testing Materials
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil)
- cSt - Centistoke
- CV – Coeficiente de variação
- D - diâmetro do furo de sondagem
- D<sub>1</sub> – diâmetro do permeâmetro
- DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
- DQO – Demanda Química de Oxigênio
- e – índice de vazios
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- E. coli* – Escherichia coli
- GPS – Global Positioning System
- HNO<sub>3</sub> – ácido nítrico
- i – gradiente hidráulico
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- K – condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade
- K<sub>20</sub> - coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20° C
- k – permeabilidade intrínseca
- L – distância percorrida pelo fluido
- L – trecho ensaiado no furo de sondagem em ensaio de permeabilidade
- LEC – Laboratório de Engenharia Civil
- MDE – Modelo Digital de Elevação

MG – Minas Gerais

MMA – Ministério do Meio Ambiente

n – porosidade total

$n_e$  – porosidade efetiva

Na – Sódio

NA – Nível d'água

NPK – fertilizante constituído de nitrogênio, fósforo e potássio

NTK - Nitrogênio Total Kjeldahl

P – Total – Fósforo total

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PSA – Plano de Segurança da Água

pH – potencial hidrogeniônico

Q – vazão constante

r – raio do furo de sondagem

Re – Retenção específica

S – coeficiente de armazenamento

UFV – Universidade Federal de Viçosa

USCS - Unified Soil Classification System

$V_v$  – volume de vazios

V – volume total da amostra de solo

$v_x$  - velocidade de percolação

w – umidade

$\Delta t$  – intervalo de tempo

$\gamma$  - peso específico do fluido

$\mu$  - viscosidade do fluido

$\gamma_n$  - Peso específico natural do solo

$\gamma_s$  - Peso específico dos sólidos

$\gamma_d$  - Peso específico seco do solo

## RESUMO

BETIM, Luiza Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2013. **Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do Córrego Palmital – Viçosa/MG.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientadora: Izabel Christina d’Almeida Duarte de Azevedo.

A crescente importância e utilização das águas subterrâneas torna fundamental a avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, a qual pode constituir uma ótima ferramenta de planejamento ambiental. Tal avaliação exige uma caracterização do meio físico, especialmente relacionada às propriedades físicas dos solos e aquíferos, dentre as quais destaca-se a condutividade hidráulica. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivos o estudo da condutividade hidráulica dos solos e a avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do córrego Palmital, baseada em uma detalhada caracterização da área de estudo, localizada na Zona Rural do município de Viçosa. Além disso, a pesquisa visa o conhecimento sobre a condutividade hidráulica das classes de solo da sub-bacia, representativas da Zona da Mata, ao percolado de aterro sanitário, a fim de avaliar a possibilidade de disposição dos resíduos sólidos sem a adoção de impermeabilização de base em aterros sanitários localizados em topos de morro na região. A caracterização da condutividade hidráulica dos solos em profundidade foi feita através da realização de ensaios de permeabilidade (infiltração) em furos de sondagem, acima do nível d’água, em seis pontos da sub-bacia. O estudo da condutividade hidráulica dos solos envolveu também a coleta de amostras indeformadas de solo a cerca de 1,0m de profundidade, em cinco pontos da bacia, com posterior determinação dos índices físicos e realização de ensaios de permeabilidade à carga variável em laboratório, usando água e percolado de aterro sanitário como fluidos. A avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos foi realizada utilizando os métodos GOD e DRASTIC. A caracterização da área de estudos mostrou que a sub-bacia é coberta por solos residuais de gnaiss e por um aquífero livre. Com relação à pedologia, os solos que cobrem a bacia são classificados em Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Cambissolos Háplicos. Os resultados obtidos em campo variaram de  $10^{-4}$  a  $10^{-7}$   $\text{cm.s}^{-1}$ , evidenciando a heterogeneidade da permeabilidade dos solos em profundidade. Os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade em laboratório utilizando água mostraram que os Argissolos possuem condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$

cm.s<sup>-1</sup>, menores que os Latossolos e Cambissolos, os quais apresentaram valores próximos, da ordem de 10<sup>-3</sup> e 10<sup>-4</sup> cm.s<sup>-1</sup>. Os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade em laboratório utilizando percolado mostraram que os Cambissolos possuem condutividade hidráulica da ordem de 10<sup>-6</sup> e 10<sup>-7</sup> cm.s<sup>-1</sup>, menores que os Latossolos e Argissolos. Os resultados confirmam o efeito da estrutura dos Latossolos em seu comportamento hidráulico, se comparado com outros solos com elevada fração de argila. Os resultados dos ensaios de permeabilidade em laboratório mostraram ainda que a condutividade hidráulica dos solos residuais estudados ao percolado de aterro sanitário é menor do que à água, devido principalmente à obstrução dos poros, considerando percolados com quantidades significativas de sólidos em suspensão. Com relação à avaliação da vulnerabilidade de contaminação dos aquíferos da área, a aplicação dos métodos GOD e DRASTIC resultou em mapas parecidos e evidenciaram a grande influência da profundidade do lençol freático na avaliação. A sub-bacia é dividida em áreas de baixa e média vulnerabilidade, sendo as últimas predominantes nas áreas de menor altitude e relevo menos ondulado, onde o lençol freático é mais raso. Nas áreas de média vulnerabilidade, existe risco de contaminação das águas subterrâneas devido à disposição inadequada de efluentes domésticos e à presença de dejetos animais provenientes de pocilgas, currais e pastagens, demonstrando a necessidade de uma melhoria da estrutura sanitária na sub-bacia.

## ABSTRACT

BETIM, Luiza Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, 2013 february. **Characterization of the hydraulic conductivity of soils and study of vulnerability to contamination of aquifers from the Palmital stream watershed - Viçosa / MG.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques. Co-adviser: Izabel Christina d'Almeida Duarte de Azevedo.

The growing importance and use of groundwater turns out to be necessary to evaluate the vulnerability of groundwater to contamination, which can be an important tool for environmental planning. Such evaluation requires a characterization of the physical environment, especially related to its soil and aquifers physical properties, among which the hydraulic conductivity stands out. In this context, this research aims to study the hydraulic conductivity of soils and the assessment of natural vulnerability to groundwater contamination of the Palmital stream watershed, based on a detailed characterization of the study area, located in the rural part of Viçosa city. Furthermore, the research seeks knowledge on the hydraulic conductivity of the soil classes present on the watershed, which are representative of Zona da Mata region, to landfill leachate, in order to verify the possibility of solid waste disposal in natural soil in landfills located in the region hilltops. The characterization of soils hydraulic conductivity at depth was done by the completion of permeability tests in boreholes, in six points on the watershed. The study of hydraulic conductivity of soils also involved the collection of undisturbed soil samples to about 1,0 m deep, at five points on the watershed, with subsequent determination of physical characteristics and performance of variable head permeability tests at laboratory, using water and landfill leachate as fluids. The assessment of the aquifers pollution vulnerability was performed by applying the DRASTIC and GOD methods. The characterization of the study area revealed that the watershed is covered by gneiss residual soils and an unconfined aquifer. Regarding pedology, soils are classified as Red-Yellow Latosols, Red-Yellow Acrisols and Haplic Cambisols. The results obtained in field varied from  $10^{-4}$  to  $10^{-7}$   $\text{cm.s}^{-1}$ , demonstrating the heterogeneity in soil in relation to the hydraulic conductivity. The results of water permeability laboratory tests have shown that Acrisols have hydraulic conductivity of the order of  $10^{-4}$  and  $10^{-5}$   $\text{cm.s}^{-1}$ , lower than Latosols and Cambisols, which presented similar values, of the order of  $10^{-3}$  and  $10^{-4}$   $\text{cm.s}^{-1}$ . The results confirm the effect of the Latosols fabric in its hydraulic behavior compared with other soils with high clay content. The results of leachate permeability laboratory tests have shown that Cambisols

have hydraulic conductivity of the order of  $10^{-6}$  and  $10^{-7}$   $\text{cm.s}^{-1}$ , lower than Latosols and Acrisols. The results of laboratory permeability tests have also demonstrate the hydraulic conductivity of studied residual soils to landfill leachate is lower than to water, mainly due to clogged pores, considering a leachate containing significant amounts of suspended solids. Regarding aquifers vulnerability assessment to contamination, the application of DRASTIC and GOD methods resulted in similar maps and showed the great influence of the depth to water table in the evaluation. The watershed is divided into areas of low and medium vulnerability, the latter being predominant in areas of lower altitude and less wavy relief, where the water table is shallow. In the medium vulnerability areas, there is a risk of groundwater contamination due to the improper disposal of domestic sewage and the presence of animal waste from pig sty, corrals and pastures show that, demonstrating the need for improvement in sanitary structure in the watershed.

## 1. INTRODUÇÃO

A contaminação do solo e a perda da qualidade da água resultantes do desenvolvimento das atividades econômicas constituem graves problemas ambientais, podendo afetar a qualidade de vida de todos, sendo por isso, objeto de diversos estudos. Além disso, o crescimento populacional e a mudança nos padrões de consumo da sociedade têm acarretado um aumento na demanda por recursos hídricos. Em contrapartida, a escassez de água já é uma realidade em diversas regiões do planeta; segundo a PNUD (2006), cerca 1,1 bilhão de pessoas no mundo não têm acesso à água potável.

Percentualmente, 97,6% da água do planeta é constituída pelos oceanos, mares e lagos de água salgada. A água doce, representada pelos 2,4% restantes, tem sua maior parte situada nas calotas polares e geleiras (1,9%), estando inacessível aos seres humanos pelos meios tecnológicos atuais. Da parcela restante (0,5%), mais de 95% é constituída pelas águas subterrâneas (CAPUCCI *et al.*, 2001). Dados como esses, atrelados à questão da disponibilidade de água adequada para consumo, tornam evidente a importância dos mananciais subterrâneos no suprimento das necessidades humanas, sendo estes os responsáveis pelo suprimento de água de grande parte da população mundial. Segundo Struckmeier *et al.* (2005), mais de 80% da água potável consumida na Europa é subterrânea; no norte da África e no Oriente Médio os percentuais são ainda maiores.

A importância das águas subterrâneas como fonte de abastecimento doméstico, industrial ou agrícola, em comparação com as águas superficiais tende a crescer e se explica por diversos fatores, dentre os quais citam-se: a ocorrência em áreas extensas, permitindo o acesso de cada usuário através de poços, sem a necessidade de sistemas de distribuição, tendo por isso, grande valor, especialmente em comunidades não atendidas pelos serviços de abastecimento público; as baixas variabilidades sazonal e anual do fluxo em relação às águas superficiais; a melhor qualidade das águas subterrâneas, em geral, por serem naturalmente mais protegidas da contaminação resultante das atividades antrópicas, dispensando muitas vezes tratamento físico-químico; menor valor da perfuração de poços, assim como dos prazos de execução, em relação aos necessários para as obras de captação e distribuição de águas superficiais, apesar dos custos com o bombeamento serem relativamente elevados (MMA, 2007).

Nesse contexto, os conhecimentos técnicos e científicos sobre as águas subterrâneas, em termos quantitativos e qualitativos, bem como sobre a vulnerabilidade de contaminação de aquíferos, são fundamentais ao planejamento ambiental. Além disso, é importante que a legislação sobre a água subterrânea se desenvolva, garantindo sua proteção e inserção na gestão dos recursos hídricos. De acordo com Struckmeier *et al.* (2005), apesar do uso generalizado e crescente das águas subterrâneas para consumo humano e animal, irrigação e indústria nas últimas décadas, conhecimentos básicos sobre recursos hídricos subterrâneos e seu uso sustentável são insuficientes, uma vez que a hidrogeologia ainda é uma ciência jovem.

A contaminação das águas subterrâneas e sua prevenção é um assunto de grande relevância, não só pelos impactos diretos ao recurso e pela persistência dos episódios de contaminação, como também pelos elevados custos ou pela impraticabilidade técnica da reabilitação dos aquíferos (FOSTER & HIRATA, 1988). Apesar de menos vulnerável à contaminação, esta pode acontecer também com as águas subterrâneas e nesse caso, o tratamento é muito mais difícil e oneroso do que o das águas superficiais (FEITOSA & FILHO, 2000).

O diagnóstico de áreas vulneráveis à contaminação dos aquíferos exige uma caracterização do meio físico, especialmente relacionada às propriedades físicas do solo ou substrato rochoso, destacando-se a condutividade hidráulica, foco do presente trabalho. Segundo Fiori *et al.* (2010), a condutividade hidráulica de um solo - em superfície e em profundidade - é um parâmetro fundamental para determinar ou prever o funcionamento hídrico dos diferentes tipos de coberturas. Trata-se de um parâmetro importante não apenas para a caracterização dos solos e avaliação de sua vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, mas também para as avaliações de condições de recarga dos aquíferos, regularização de vazões de cursos d'água superficiais, comportamento de plumas de contaminação, entre outras aplicações.

A sub-bacia do córrego Palmital, área de estudo da presente pesquisa, tem sido objeto de diversos estudos nos últimos anos. Um dos motivos para o interesse despertado pela bacia está relacionado à sua importância em termos de abastecimento público, uma vez que integra a Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, de onde é captada, pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) e pela Universidade Federal de Viçosa, a água para o abastecimento da instituição de ensino e de grande parte da população da cidade.

Apesar de não tratar-se de uma sub-bacia cujas nascentes tem alta produção de água, sua qualidade ambiental, inclusive no que se refere aos recursos hídricos, merece atenção, uma vez que o município de Viçosa possui demanda crescente de água e pequena disponibilidade desse recurso. A vazão do ribeirão São Bartolomeu vem diminuindo ano após ano devido a diversos problemas, como a construção de pequenas represas próximas às cabeceiras, retirada indiscriminada da cobertura vegetal e implantação de novos condomínios. Além disso, os habitantes da sub-bacia consomem água de poços, já que o sistema de abastecimento municipal não atende a região, o que torna bastante importantes estudos acerca da vulnerabilidade de contaminação das águas subterrâneas. Verifica-se na bacia a presença de grande número de fossas negras, inclusive próximas dos poços em muitos casos, além da presença de currais próximos às nascentes, fatos que constituem risco sanitário aos habitantes. Soma-se a esses fatores, como justificativa da necessidade desse tipo de estudo na bacia, visando o planejamento ambiental, a possibilidade de aumento da ocupação da região do Palmital e adjacências nos próximos anos, o que implicaria em um provável aumento dos impactos ambientais devido ao uso dos solos.

No contexto dessa pesquisa, a sub-bacia tem importância ainda por ser representativa de toda a Zona da Mata mineira e até de parcela significativa do país, no que se refere às classes de solos predominantes e ao processo de formação dos solos residuais. O estudo das propriedades geotécnicas dos solos dessa área, com ênfase na condutividade hidráulica, constitui, portanto, uma contribuição à ampliação das informações sobre a permeabilidade dos solos residuais tropicais, ainda limitadas na literatura, apesar da importância desses materiais na engenharia.

Um problema que pode implicar em contaminação das águas subterrâneas e que tem merecido atenção não apenas na Zona da Mata mineira, mas em todo Brasil, é a disposição inadequada de resíduos sólidos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, regulamentada em dezembro de 2010, prevê, entre outras obrigações, a extinção de todos os lixões (depósito de resíduos a céu aberto) até 2014. A decomposição da matéria orgânica de resíduos sólidos gera um percolado com significativo potencial poluente, não só pela considerável carga orgânica, mas pela potencial presença de metais traço que podem ser tóxicos, dentre outros contaminantes. Sendo assim, torna-se necessária a produção de informações técnicas que possam orientar projetos de implantação de aterros, permitindo a alocação adequada desses empreendimentos a partir da avaliação

de sua viabilidade técnica, financeira e ambiental. Nesse contexto, o estudo da condutividade hidráulica dos solos típicos da Zona da Mata ao percolado de aterro sanitário é importante, permitindo o entendimento do comportamento hidráulico desses solos frente a essa carga contaminante e, como consequência, a avaliação da possibilidade da disposição dos resíduos sólidos no solo sem a implantação de uma camada compactada na base dos aterros sanitários de pequeno porte, dependendo de seu contexto hidrogeológico.

## **1.1 Objetivos**

### ***Objetivos gerais***

Essa pesquisa tem como objetivos o estudo da condutividade hidráulica dos solos por meio de ensaios de campo e laboratório e a avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos da sub-bacia do córrego Palmital, embasando-se em uma detalhada caracterização do meio físico da área. Além disso, a pesquisa visa o conhecimento sobre a condutividade hidráulica das principais classes de solo da Zona da Mata ao percolado de aterro sanitário, a fim de verificar a possibilidade de disposição dos resíduos sólidos no solo em estado natural em aterros sanitários.

### ***Objetivos específicos***

- a) Consolidação das informações pré-existentes a respeito dos estudos físico-ambientais já realizados na sub-bacia do córrego Palmital.
- b) Caracterização geotécnica/física dos solos da área de estudo.
- c) Determinação da condutividade hidráulica dos solos residuais da área por meio de ensaios de campo, para diferentes profundidades, até o nível d'água.
- d) Determinação da condutividade hidráulica dos solos em subsuperfície - horizonte B, à cerca de 1,0 m de profundidade -, para cada classe de solo mapeada, através de ensaios de laboratório utilizando como fluidos percolantes água e percolado de aterro sanitário.

e) Análise dos resultados de condutividade hidráulica em campo e em laboratório e comparação dos resultados obtidos nos ensaios com água e percolado de aterro sanitário, verificando a existência de possível correlação entre os dados.

f) Aplicação das metodologias GOD e DRASTIC para a obtenção dos índices de vulnerabilidade natural à contaminação da área de estudo e produção dos mapas de vulnerabilidade à contaminação do aquífero da sub-bacia segundo as duas metodologias.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Águas subterrâneas

#### 2.1.1 Águas subterrâneas e o ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico (Figura 1) é o movimento contínuo da água entre os mares, lagos e rios, atmosfera e continentes, alimentado pela energia solar e pela gravidade.

Por efeito da radiação solar, as águas dos mares, rios e lagos evaporam-se e formam nuvens. Estas, ao encontrarem correntes frias de ar ou baixas pressões atmosféricas, condensam-se e precipitam-se sob a forma de chuvas, granizo ou neve. Da água precipitada, parte evapora-se antes de atingir o próprio solo ou ser interceptada pelas folhas dos vegetais; outra parte escoam para os rios, lagos e mares; e, finalmente, outra parte infiltra-se no subsolo formando os aquíferos. A água subterrânea, através de um fluxo lento, também alimenta os rios, lagos e mares ou emerge à superfície, formando nascentes. As águas superficiais então evaporam novamente e o ciclo é reiniciado (CAPUCCI *et al.*, 2001). Como parte do ciclo hidrológico, portanto, a água subterrânea encontra-se intimamente relacionada com os processos atmosféricos, climáticos e com o regime de águas superficiais (SOUZA, 2009).

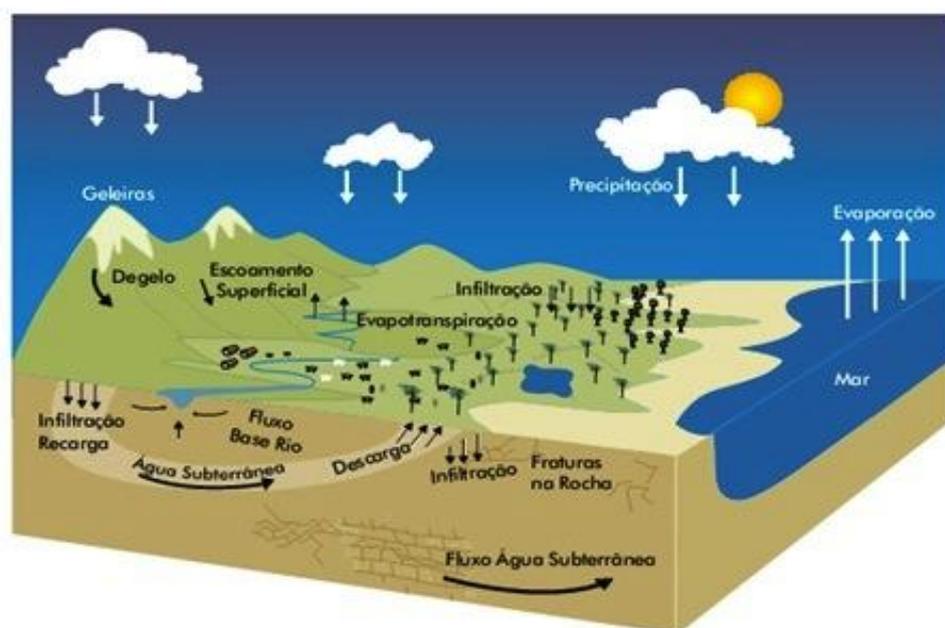


Figura 1: Ciclo hidrológico (FONTE: MMA, 2007).

A água subterrânea ocorre em aberturas nas rochas que formam a crosta terrestre. O tamanho das aberturas e outras características das rochas dependem da composição mineral, origem, idade e estrutura. Portanto, para compreender a ocorrência de água no solo em uma área, é necessário ter uma compreensão de sua geologia (GLASSER *et al.*, 2007).

Abaixo da superfície do terreno, a água contida no solo e nas formações geológicas é dividida em duas zonas horizontais (Figura 2):

- **Zona saturada**, onde todos os vazios existentes no terreno estão preenchidos com água, situada abaixo da superfície freática, definida como o lugar geométrico dos pontos em que a água se encontra submetida à pressão atmosférica. Na hidrogeologia, a denominação água subterrânea é atribuída apenas à água que circula na zona saturada.
- **Zona não saturada**, zona de aeração ou zona vadosa, situada entre a superfície freática e a superfície do terreno, onde os poros estão parcialmente preenchidos por gases (principalmente vapor d'água e ar) e água.

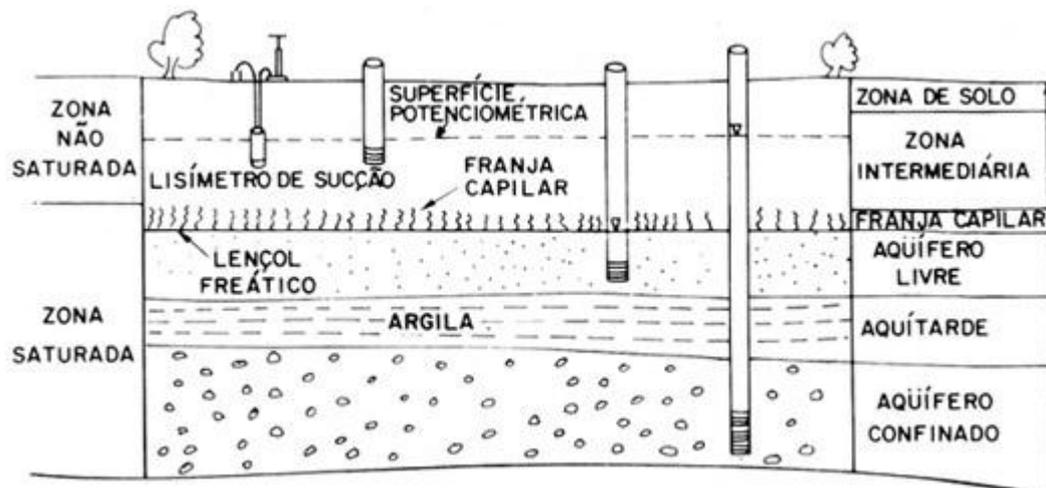


Figura 2: Representação da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diferentes zonas de umidade (CLEARY, 1989).

### 2.1.2 Aquíferos: conceito e seus principais tipos

Um aquífero é uma formação geológica com suficiente permeabilidade e porosidade interconectada para armazenar e transmitir quantidades significativas de água, sob

gradientes hidráulicos naturais (CLEARY, 1989). Sua espessura pode variar de decímetros até centenas de metros, dependendo de fatores como a natureza geológica e as propriedades hidrogeológicas do subsolo, bem como vegetação e pluviosidade (CAPUCCI *et al.*, 2001). As propriedades físicas importantes na caracterização de um aquífero serão abordadas adiante.

Os tipos básicos de aquíferos (Figura 3) de acordo com a formação rochosa na qual está contido, de acordo com Capucci *et al.* (2001) e MMA (2007), são:

- Aquíferos granulares ou porosos: aqueles em que a água está armazenada e flui nos espaços entre os grãos em sedimentos e rochas sedimentares de estrutura granular, como os arenitos.
- Aquíferos fissurais: aqueles nos quais a água está presente nas fraturas e fendas das rochas cristalinas, relativamente impermeáveis, como os granitos, gnaisses e diabásios.
- Aquíferos cársticos: aqueles formados em rochas carbonáticas, nos quais a água armazena-se em cavidades produzidas pela dissolução do carbonato, como ocorre em calcários.

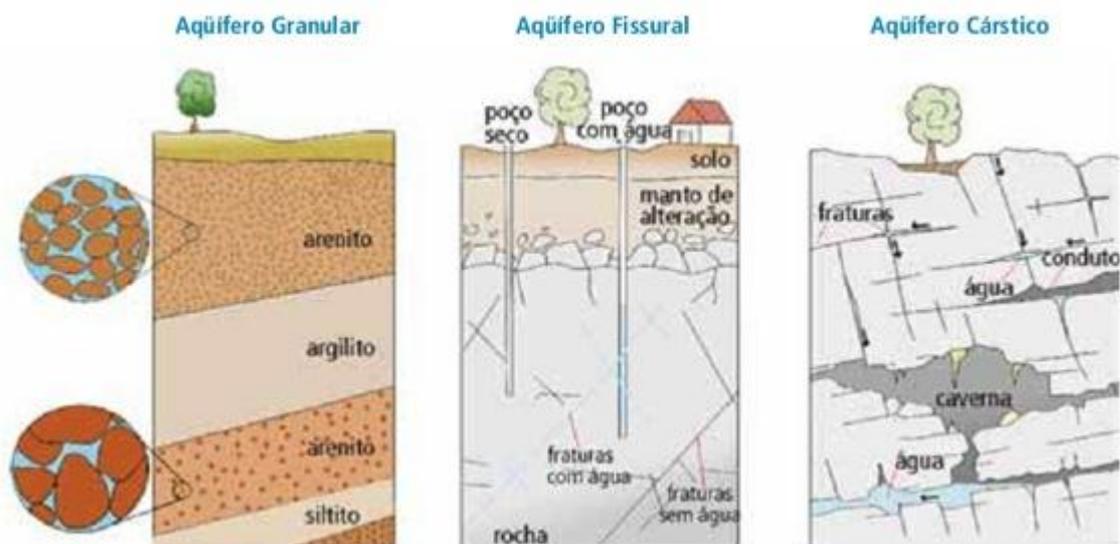


Figura 3: Ilustração dos tipos de aquífero classificados segundo a formação geológica. Fonte: Iritani & Ezaki (2008).

Os aquíferos podem ser classificados de acordo com a pressão das águas nas suas superfícies limítrofes (Figura 4), bem como em função da sua capacidade de transmissão de água nas camadas confinantes superior e inferior. Quando a superfície

que limita a zona saturada dos aquíferos coincide com o lençol freático, estando todos os seus pontos sob pressão atmosférica, eles são chamados aquíferos livres ou não-confinados; estes podem ser drenantes (ou de base semipermeável) ou não drenantes (ou de base impermeável). Quando o aquífero encontra-se entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis, é denominado confinado ou artesiano, condição em que a água na camada está sob pressão superior à pressão atmosférica. O aquífero confinado pode ser considerado não drenante quando suas camadas superior e inferior são impermeáveis; e drenantes quando pelo menos uma dessas camadas é semipermeável, permitindo a entrada ou saída de fluxos, ainda que pequenos. O poço que capta água dos aquíferos confinados é chamado poço artesiano pois o seu nível d'água está acima do lençol freático. Quando o nível d'água eleva-se acima da superfície do solo, o poço é chamado surgente ou jorrante (CAPUCCI *et al.*, 2001; FEITOSA & FILHO, 2000).

### **2.1.3 Recarga e descarga de aquíferos**

A adição de água a um aquífero é chamado de recarga. Ocorre principalmente através da infiltração da água da chuva ou da neve derretida no solo, seguida por percolação através da zona vadosa até o lençol freático. O montante de água que participa da recarga através da precipitação depende de fatores como pluviometria, tipo de solo, geologia, declividade, profundidade do lençol freático e cobertura vegetal. Outros mecanismos de ocorrência natural de recarga incluem infiltração das águas superficiais e fluxo de água subterrânea proveniente de aquíferos adjacentes. A recarga também pode ser criada artificialmente através do estabelecimento de lagoas de infiltração e galerias, bem como pela injeção de água através de poços (GLASSER *et al.*, 2007). Além dos fatores citados, influenciam o volume de água recarregado a condutividade hidráulica vertical e a transmissividade do aquífero (POEHLS & SMITH, 2009). As áreas em que esse processo ocorre são denominadas zona de recarga e são extremamente importantes para a manutenção da qualidade e quantidade das águas subterrâneas (MMA, 2007), ao mesmo tempo em que destacam-se como áreas de elevado potencial de poluição dos aquíferos (SOUZA, 2009). A proteção dessas áreas, portanto, é fundamental, evitando-se o desmatamento, o uso incorreto dos solos e a instalação de atividades potencialmente poluidoras (MMA, 2007).

A descarga de água é o fluxo de saída de água da zona saturada (POEHLS & SMITH, 2009) e ocorre por mecanismos como transpiração das plantas e evaporação direta, bem como fluxo para nascentes, rios e lagos, além de extração através de poços (GLASSER *et al.*, 2007).

#### **2.1.4 Impactos sobre as águas subterrâneas**

No Brasil, os problemas mais comuns das águas subterrâneas estão relacionados com a superexploração, com a impermeabilização do solo e com a poluição (MMA, 2007).

##### **2.1.4.1 Superexploração**

A superexploração, definida como a extração de água subterrânea além dos limites de produção das reservas do aquífero, levando ao rebaixamento do nível potenciométrico (ABAS, 2012), pode provocar além da exaustão do aquífero:

- mudanças nas vazões dos rios e diminuição da produção de água em nascentes (MMA, 2007);
- subsidência dos terrenos, devido à diminuição das poropressões e assim, aumento da tensão intergranular na matriz sólida (FEITOSA & FILHO, 2000), provocando uma compactação do terreno que pode levar ao colapso das construções civis;
- indução do deslocamento de água contaminada para a região do aquífero causada pelo avanço de uma pluma poluidora devido à alteração dos gradientes naturais e aumento da velocidade do fluxo em direção às áreas onde ocorre a retirada de água (SOUZA, 2009);
- salinização, devido à intrusão salina, definida como a movimentação da água do mar em subsuperfície no sentido do continente, invadindo o aquífero e ocupando os vazios deixados pelas águas subterrâneas doces. Tal processo é particularmente comum em aquíferos costeiros (MMA, 2007; TEIXEIRA *et al.*, 2009).

##### **2.1.4.2 Poluição das águas subterrâneas**

A poluição dos aquíferos ocorre nos pontos em que a carga contaminante presente em emissões e lixiviados produzidos por atividades antrópicas é disposta no solo e

inadequadamente controlada excedendo, em certos componentes, a capacidade de atenuação natural dos solos e das camadas de cobertura (FOSTER *et al.*, 2006).

O movimento da água e o transporte de contaminantes da superfície terrestre para os aquíferos pode, em muitos casos, ser um processo lento (FOSTER *et al.*, 2006). Devido às baixas velocidades de infiltração e aos processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem na zona não saturada, os aquíferos são naturalmente mais protegidos da poluição, havendo a possibilidade de ocorrer decomposição dos contaminantes degradáveis. Porém, ao contrário das águas superficiais, uma vez ocorrida a poluição, a recuperação da qualidade é muito lenta. Quando a água subterrânea torna-se visivelmente poluída, geralmente grandes volumes do aquífero já estão comprometidos. Dependendo do tipo de contaminante, essa recuperação pode levar anos, com frequentes dificuldades técnicas e custos elevados, não raro, proibitivos (MMA, 2007; FOSTER *et al.*, 2006).

As fontes mais comuns de poluição e contaminação direta das águas subterrâneas são: disposição inadequada de resíduos sólidos no solo; esgotos e fossas; atividades agrícolas que utilizam de fertilizantes e inseticidas; cemitérios; vazamento de substâncias tóxicas; lagoas de estabilização de resíduos industriais mal impermeabilizadas; e atividades de mineração. As formas mais comuns de poluição/contaminação indireta são: filtragem vertical descendente (poluição de um aquífero mais profundo pelas águas de um aquífero livre superior), contaminação natural (provocada pela transformação química e dissolução de minerais), e poços mal construídos e/ou abandonados (MMA, 2007). Na Figura 4, ilustram-se alguns processos que constituem fontes de poluição da água subterrânea.

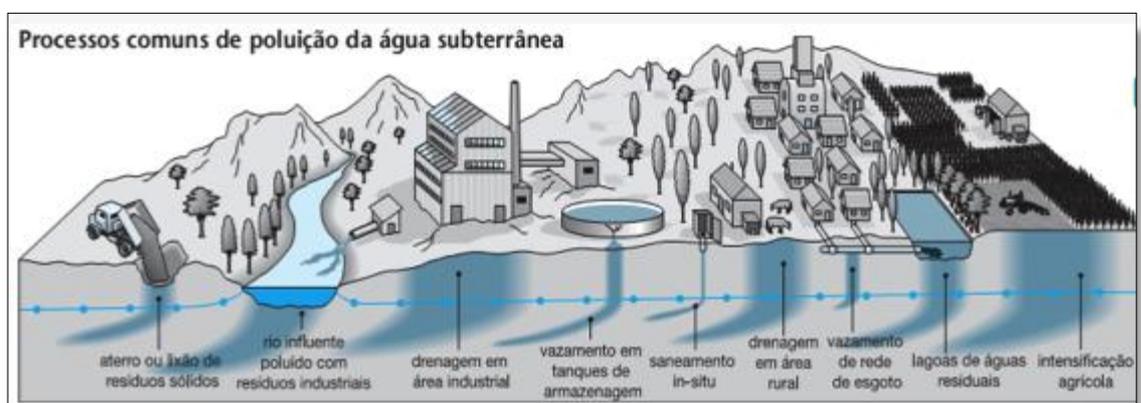


Figura 4: Fontes comuns de poluição de águas subterrâneas (FOSTER *et al.*, 2006).

#### 2.1.4.3 Impermeabilização do solo

A impermeabilização do solo reduz a capacidade de infiltração da água, gerando grandes volumes de escoamento superficial. As águas adquirem velocidade nas áreas de declive acentuado. Os resultados desse processo são a redução do volume de água na recarga dos aquíferos, erosão dos solos, enchentes e assoreamento dos cursos de água (MMA, 2007).

## 2.2 Condutividade hidráulica e outras propriedades físicas dos aquíferos

São três as propriedades físicas importantes que definem um aquífero: a condutividade hidráulica, a porosidade e o coeficiente de armazenamento (FEITOSA & FILHO, 2000). A primeira será abordada com maior detalhamento por ser de grande importância tanto para a hidrogeologia quanto na geotecnia, áreas relacionadas à presente pesquisa.

### 2.2.1 Porosidade

A porosidade total é o percentual de rocha ou solo ocupada por vazios (FETTER, 2001), sendo definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total do material:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (1)$$

Em que:  $n$  é a porosidade total;  $V_v$  é o volume de vazios; e  $V$  é o volume total do material.

A quantidade de água que um aquífero pode armazenar é determinada pela porosidade, a qual depende do tamanho dos grãos, de sua forma e arranjo (POEHLS & SMITH, 2009), bem como de sua distribuição. Se os grãos são de tamanho variado, a porosidade tende a ser menor do que quando os grãos são uniformes, uma vez que os menores grãos ocupam os espaços vazios entre os maiores (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983).

A porosidade é também função do processo de formação do material. A porosidade primária origina-se na formação da matriz do solo ou rocha e inclui vesículas, poros intergranulares e discordâncias. A porosidade secundária é formada pelos espaços

criados depois da formação da matriz, incluindo falhas, fraturas e cavidades de dissolução em rochas, além de rachaduras no solo devido à atividade biológica de plantas e animais (POEHLS & SMITH, 2009).

No contexto de aquíferos, é importante definir o conceito de porosidade efetiva. Nem todos os poros são interconectados ou suficientemente grandes para conter moléculas de água, impedindo o fluxo de fluido. A porosidade efetiva exclui esses poros, considerando apenas os vazios que de fato estão disponíveis para o fluxo (FETTER, 2001). O parâmetro pode ser definido como a razão entre o volume de água efetivamente liberado de uma amostra de material saturado e seu volume total (FEITOSA & FILHO, 2000).

Em complementaridade ao conceito de porosidade efetiva, a retenção específica ( $R_e$ ) é a relação entre o volume de água que uma rocha ou solo retém, em contrapartida à drenagem por ação gravitacional (FETTER, 2001). Nesse caso a água é retida devido às forças de capilaridade ou por adsorção (GLASSER *et al.*, 2007). A porosidade total é igual à soma da porosidade efetiva e da retenção específica (FEITOSA & FILHO, 2000).

### **2.2.2 Coeficiente de armazenamento**

O coeficiente de armazenamento ( $S$ ) é definido como o volume de água que um aquífero desprende ou armazena por unidade de área superficial do aquífero por variação unitária da componente de carga hidráulica normal aquela superfície. Pode ser determinado através de ensaios de bombeamento (FREEZE & CHERRY, 1979).

Os coeficientes de armazenamento assumem valores bem diferentes em aquíferos confinados e livres, uma vez que os mecanismos de liberação de água são diferentes. No caso do aquífero livre, a água é liberada para poços ou fontes principalmente através da drenagem dos poros (FEITOSA & FILHO, 2000). O coeficiente de armazenamento em um aquífero livre é aproximadamente igual à porosidade efetiva, e normalmente tem valores de 0,05 a 0,30, enquanto em um aquífero confinado geralmente é muito menor, tipicamente variando de  $10^{-5}$  a  $10^{-3}$ . Coeficientes de armazenamento são baixos em aquíferos confinados pois a água liberada do aquífero é resultante de uma combinação

da compressão do aquífero e da expansão da água bombeada, mas os vazios do solo não são esvaziados durante o bombeamento. Assim, apenas uma pequena quantidade de água é liberada por alteração de unidade na carga. Portanto, para alterações iguais de carga hidráulica, um aquífero livre irá produzir um maior volume de água do que um aquífero confinado (GLASSER *et al.*, 2007).

### 2.2.3 Condutividade Hidráulica

Dentre as variáveis que influenciam o fluxo de água no solo, e assim, a recarga, bem como o transporte de poluentes, a condutividade hidráulica (K) ou coeficiente de permeabilidade se destaca. A condutividade hidráulica é definida como a medida da resistência da água ao movimento através de um meio poroso (POEHLS & SMITH, 2009) ou como a medida da facilidade com a qual um meio transmite água (FITTS, 2002). Seu significado físico é definido pelo “volume de líquido que flui perpendicularmente a uma unidade de área de um meio poroso sobre influência de um gradiente hidráulico unitário” (DELLEUR, 1999). É função tanto das características do meio, como porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas (FEITOSA & FILHO, 2000), quanto das características do fluido, como peso específico e viscosidade cinemática (FETTER, 2001).

#### 2.2.3.1 A Lei de Darcy

A condutividade hidráulica é um coeficiente proveniente da Lei de Darcy, que descreve o fluxo da água em meios porosos. A lei foi desenvolvida pelo engenheiro Henry Darcy através do experimento ilustrado na Figura 5 e pode ser expressa pela seguinte equação:

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (2)$$

Em que:

Q = vazão constante que passa pelo meio poroso (L<sup>3</sup>/T); A = área da seção transversal através da qual a água flui (L<sup>2</sup>); L = distância percorrida pelo fluido (L); h<sub>1</sub> e h<sub>2</sub> são as cargas hidráulicas (L) nos pontos 1 e 2 respectivamente.

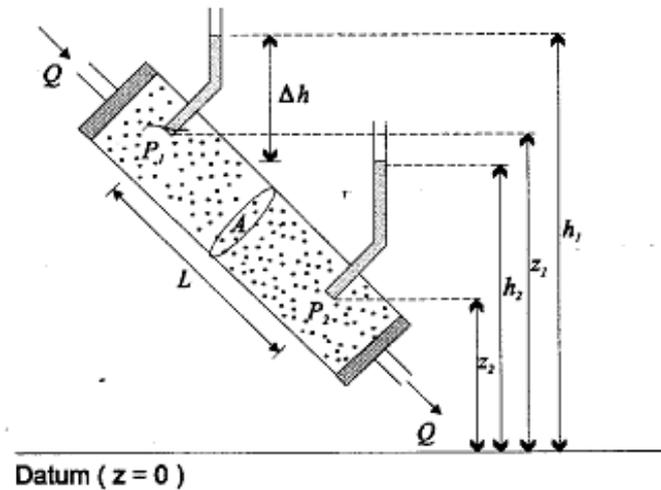


Figura 5: Esquema representativo do experimento de Darcy. Fonte: Feitosa & Filho (2000).

A razão entre a diferença ( $h_1 - h_2$ ) e o comprimento  $L$  é denominada gradiente hidráulico  $i$ , e representa a taxa de perda de carga por unidade de comprimento (FEITOSA & FILHO, 2000). Assim, a vazão é proporcional à perda de carga do fluido entre os dois pontos.

Uma diferença deve ficar clara ao estimar a verdadeira velocidade do fluxo de água subterrânea e do transporte de soluto. A velocidade de percolação ( $v_x$ ) ou velocidade linear média do fluido é diferente da velocidade de Darcy ( $q = Ki$ ) e é definida conforme a equação:

$$v_x = \frac{K}{n_e} \times i \quad (3)$$

Em que:  $n_e$  é a porosidade efetiva do meio (DELLEUR, 1999). Segundo Fitts (2002),  $v_x$  é a velocidade média que um contaminante teria em água corrente, se não reagisse com a matriz do aquífero ou com outras substâncias químicas.

### 2.2.3.2 Anisotropia e heterogeneidade

A heterogeneidade é a variação de determinada propriedade espacialmente. Já a anisotropia é a variação dos valores da propriedade em um mesmo ponto, em diferentes direções (FREEZE & CHERRY, 1979). Quando não ocorre essa variação, ou seja, em

um ponto a propriedade analisada assume valores iguais em todas as direções, o meio é dito isotrópico.

Poucos parâmetros físicos variam tanto quanto a condutividade hidráulica. Rochas e solos exibem variação de até 12 ordens de grandeza para a condutividade hidráulica (HEATH, 1983). Com relação a esse parâmetro, considerando-se a definição clássica, não há formação geológica homogênea, sendo considerado como homogêneo o meio que mantém constante um valor médio espacialmente. Os valores de condutividade hidráulica na maioria das formações geológicas mostram variações internas de 1 - 2 ordens de magnitude (FREEZE & CHERRY, 1979). Geralmente, a condutividade hidráulica na maioria das rochas e especialmente em depósitos inconsolidados e acamamentos horizontais em rochas sedimentares é maior na direção horizontal do que na vertical (HEATH, 1983).

#### 2.2.3.3 Permeabilidade intrínseca

A permeabilidade intrínseca ( $k$ ) é uma constante representativa das características apenas do meio poroso, sendo função especialmente do tamanho dos seus poros (FETTER, 2001). É dependente do tamanho dos grãos, arranjo, forma e distribuição dos poros do material do solo (DANIEL, 1993). A permeabilidade intrínseca é dada por:

$$k = Cd^2 \quad (4)$$

Em que:  $C$  é o chamado “fator de forma” (adimensional), dependente apenas das características do meio poroso, e  $d$  é o diâmetro médio dos poros (L).

A permeabilidade intrínseca tem dimensões de área. A relação de  $k$  com a condutividade hidráulica é:

$$K = k \left( \frac{\gamma}{\mu} \right) \quad (5)$$

Em que:  $K$  é a condutividade hidráulica,  $k$  é a permeabilidade intrínseca do meio,  $\gamma$  é o peso específico do fluido e  $\mu$  é a viscosidade do fluido.

Na Tabela 1 e na Tabela 2 apresentam-se faixas de valores típicos de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para materiais não-consolidados e rochas,

respectivamente. Para problemas que envolvem variações significativas nas concentrações de solutos ou na temperatura da água, que modificam, respectivamente, a densidade e a viscosidade do fluido, é preferível utilizar a permeabilidade intrínseca.

Tabela 1 - Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica à água para vários materiais não-consolidados.

Material	Permeabilidade intrínseca (cm <sup>2</sup> )	Condutividade hidráulica (cm.s <sup>-1</sup> )
Argila	10 <sup>-14</sup> – 10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-9</sup> – 10 <sup>-6</sup>
Silte; silte arenoso	10 <sup>-11</sup> – 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-4</sup>
Areia argilosa	10 <sup>-11</sup> – 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-4</sup>
Areia siltosa; Areia fina	10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-3</sup>
Areia bem distribuída	10 <sup>-8</sup> – 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-1</sup>
Cascalho bem distribuído	10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-2</sup> – 10 <sup>0</sup>

Fonte: Fetter (2001).

Tabela 2 - Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica à água para rochas diversas.

Rocha	Permeabilidade Intrínseca (cm <sup>2</sup> )	Condutividade Hidráulica (cm.s <sup>-1</sup> )
<b>Xisto</b>		
Intacto	10 <sup>-16</sup> -10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-11</sup> -10 <sup>-7</sup>
Fraturado/ temperizado	10 <sup>-12</sup> -10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-4</sup>
<b>Arenito</b>		
Firmemente cimentado	10 <sup>-13</sup> -10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-5</sup>
Fracamente cimentado	10 <sup>-11</sup> -10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-3</sup>
<b>Calcário e Dolomita</b>		
Não cárstico	10 <sup>-12</sup> -10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-3</sup>
Cárstico	10 <sup>-9</sup> -10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>4</sup>
<b>Carbonato de cálcio</b>	10 <sup>-11</sup> -10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-3</sup>
<b>Basalto</b>		
Não fraturado	10 <sup>-14</sup> -10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-9</sup> -10 <sup>-6</sup>
Fraturado/ vesicular	10 <sup>-9</sup> -10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>3</sup>
<b>Rochas ígnea e metamórfica não fraturada</b>	10 <sup>-17</sup> -10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-12</sup> -10 <sup>-8</sup>
<b>Rochas ígnea e metamórfica fraturada</b>	10 <sup>-13</sup> -10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-4</sup>

Fonte: Sanders (1998) *apud* Poehls & Smith (2009).

#### 2.2.3.4 Fatores que influenciam a condutividade hidráulica

As características do solo que afetam a permeabilidade são: o grau de saturação, o tamanho das partículas, o índice de vazios, a composição e a estrutura (LAMBE &

WHITMAN, 1969). A essas características estão relacionados outros fatores, tornando a estimativa dessa propriedade de grande complexidade. Ellies *et al.* (1997) relatam que a condutividade hidráulica do solo saturado descreve a funcionalidade de seu sistema poroso, englobando propriedades tais como, quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros, motivo pelo qual varia fortemente de um local a outro, apresentando em determinados sítios valores extremos. De acordo com Mesquita & Moraes (2004), o fluxo e a retenção de água no solo dependem da profundidade, textura, estrutura, porosidade e pedoforma, as quais podem integrar-se das mais variadas maneiras.

O valor máximo de condutividade hidráulica é atingido quando o solo se encontra saturado, e é denominado condutividade hidráulica do solo saturado, nesse trabalho abreviado como K. De acordo com Poehls & Smith (2009), a condutividade hidráulica dentro da zona saturada é, em geral, substancialmente maior que na zona vadosa pois há muita água nos poros para sustentar as propriedades de adesão e coesão, permitindo que o excesso de água flua livremente. De acordo com Carvalho (2002), em meios não-saturados, a condutividade hidráulica varia com a umidade do solo e com o potencial matricial no ponto considerado. Assim, o grau de saturação é um fator com influência relevante sobre os valores de K.

A porosidade exerce grande influência sobre a condutividade hidráulica. A correlação entre índice de vazios ou porosidade com a condutividade hidráulica é comumente relatada na literatura sobre mecânica dos solos. A permeabilidade do solo aumenta com o aumento do índice de vazios (DAS, 2008). Lambe & Whitman (1969) constataram a mesma tendência, mostrando a existência de uma relação linear entre o índice de vazios e o logaritmo do coeficiente de permeabilidade para 30 solos estudados. A propriedade é também relacionada à granulometria e estrutura dos solos. Vários autores afirmam, porém, que K é muito mais relacionada à macroporosidade do solo do que à porosidade em si (SANTOS, 2008), não sendo encontrada correlação entre K e porosidade total em alguns casos. Na Tabela 3 são mostradas faixas de valores típicos de porosidade e condutividade hidráulica para diferentes materiais.

Tabela 3 - Faixas de valores típicos de porosidade e condutividade hidráulica à água para diferentes materiais consolidados e não consolidados.

Litologia	Porosidade (%)	K (cm.s <sup>-1</sup> )
<b>Não consolidado</b>		
Cascalho	25-40	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>-2</sup>
Areia	25-50	10 <sup>-4</sup> -1
Silte	35-50	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-3</sup>
Argila	40-70	10 <sup>-10</sup> -10 <sup>-7</sup>
<b>Consolidado</b>		
Basalto fraturado	5-50	10 <sup>-5</sup> -1
Calcário cárstico	5-50	10 <sup>-4</sup> -10
Arenito	5-30	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-4</sup>
Calcário, Dolomita	0-20	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-4</sup>
Xisto	0-10	10 <sup>-11</sup> -10 <sup>-7</sup>
Rocha cristalina fraturada	0-10	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-2</sup>
Rocha cristalina densa	0-5	10 <sup>-12</sup> -10 <sup>-8</sup>

Fonte: Adaptado de Delleur (1999).

A forte associação entre a macroporosidade e K faz com que pequenas mudanças no valor daquela alterem consideravelmente os valores dessa (REICHERT *et al.*, 2007), uma vez que a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional ao quadrado de seu diâmetro (Lei de Poiseville), ou seja, a presença de um “megaporo” a mais em uma amostra de solo afetará pouco sua macroporosidade, mas muito sua permeabilidade, um dos motivos pelo qual é comum obter valores discrepantes para este parâmetro (MESQUITA & MORAES, 2004). Silva & Kato (1997), estudando a relação da macroporosidade de solos das áreas de manejo convencional e plantio direto com valores de K, encontraram valores da macroporosidade correlacionados positivamente com a condutividade hidráulica saturada, evidenciando o efeito do manejo na estrutura do solo. Dessa forma, segundo Carvalho (2002), os tamanhos dos poros apenas podem não ser tão relevantes para permitir maior K, pois esta propriedade é mais dependente da distribuição de tamanho dos poros e de sua continuidade.

O tamanho das partículas determina a textura ou granulometria dos solos. Segundo Fernandes (2006), a granulometria é o fator mais relevante para a permeabilidade. A Tabela 4 apresenta valores típicos que o autor cita dos coeficientes de permeabilidade de solos sedimentares segundo a textura. As taxas de infiltração da água no solo e a capacidade de retenção de água são amplamente influenciadas pela composição granulométrica dos solos (CARVALHO, 2002). Intuitivamente, quanto menores forem

as partículas do solo, menores serão as dimensões dos canais de fluxo, e, portanto menor será a condutividade hidráulica (ALONSO, 2005). Não se pode prever, entretanto, para todas as classes de solo, a retenção de água somente a partir da textura, por serem importantes os efeitos concorrentes, principalmente da mineralogia, da estrutura e da porosidade (MESQUITA & MORAES, 2004).

Tabela 4 - Valores típicos de coeficientes de permeabilidade de solos sedimentares.

Tipo de solo	K (cm.s <sup>-1</sup> )
Cascalhos limpos	> 10 <sup>0</sup>
Areia grossa	10 <sup>0</sup> a 10 <sup>-1</sup>
Areia média	10 <sup>-1</sup> a 10 <sup>-2</sup>
Areia fina	10 <sup>-2</sup> a 10 <sup>-3</sup>
Siltes	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-6</sup>
Argilas	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-8</sup>

Fonte: Fernandes (2006).

A estrutura do solo é uma das características mais influentes sobre a permeabilidade, especialmente quando se trata de solos finos. Comparando amostras de solo com o mesmo índice de vazios, observa-se que a amostra em estado mais flocculado tende a apresentar maior permeabilidade do que a que se encontra em estado mais disperso (LAMBE & WHITMAN, 1969). Ao aumentar o grau de agregação de um solo a distribuição dos valores dessa condutividade hidráulica se torna cada vez menos variável. A estruturação dos solos tropicais faz com que esses sejam solos argilosos com comportamento diferenciado, em diversas situações apresentando comportamento de solos arenosos devido à alta porosidade natural (CORRÊA, 2004). Jarvis & Messing (1995) observaram valores elevados de K em solos de textura mais fina, com pouca areia, ao contrário das relações de K com textura relatadas na literatura, e atribuem tais resultados à continuidade de macroporos em campo em solos estruturados.

Com relação à composição do solo, sua influência na permeabilidade dos solos é geralmente pequena para areias, siltes e cascalhos, mas determinante em solos argilosos (LAMBE & WHITMAN, 1969). Assim, a permeabilidade guarda forte relação com a mineralogia da fração argila, a qual influenciará na agregação do solo. Segundo Das (2008), a permeabilidade depende da espessura da camada de água adsorvida às partículas de solo, o que é função da capacidade de troca catiônica, da valência dos

cátions, dentre outros fatores. O coeficiente de permeabilidade tende a diminuir com o aumento da espessura da dupla camada difusa.

No que se refere às características do fluido, destacam-se na determinação da condutividade hidráulica a viscosidade, densidade e concentração do percolado (DAS, 2008). De acordo com Boscov (2008), as alterações na permeabilidade causadas pela percolação de substâncias químicas estão relacionadas a seu efeito sobre a estrutura dos solos, fortemente influenciadas pelas forças de repulsão entre partículas, os quais controlam os mecanismos de floculação/dispersão e de contração/expansão.

Observa-se, portanto, que devido ao grande número de fatores que influenciam a condutividade hidráulica e suas correlações, bem como as grandes variações da propriedade, é difícil fazer generalizações sobre seu comportamento. Torna-se delicado inclusive estabelecer relações entre o coeficiente de permeabilidade e outros atributos físicos do solo, uma vez que estes não determinam o fluxo de água de forma isolada. Segundo Mesquita e Moraes (2004), dados medidos e relações deduzidas são para locais específicos e interpretados como informações de um tipo particular de solo. Assim, a utilização de  $K$  e conclusões a partir dela devem ser feitas com critério.

#### 2.2.3.5 Métodos para determinação da condutividade hidráulica

Diversos ensaios para a determinação da condutividade hidráulica têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo do tempo, buscando-se maior representatividade dos resultados, redução de custos dos ensaios e o aperfeiçoamento dos equipamentos de medição em campo, tornando-os mais práticos e de fácil utilização. A maioria dos ensaios é realizada com permeâmetros ou infiltrômetros visando a determinação da condutividade hidráulica em condições de saturação (LISBOA, 2006).

De modo geral, as metodologias para determinação da condutividade hidráulica estão divididas em métodos de laboratório e métodos de campo. Os ensaios em laboratório, quando comparados com ensaios em campo, apresentam vantagens em relação ao controle das condições de contorno (saturação, carga hidráulica e direção de fluxo), tempo de ensaio e custo, além de permitirem medidas de anisotropia hidráulica, quando as amostras são ensaiadas em direções específicas de fluxo, o que não é possível nos

ensaios de campo. A desvantagem dos ensaios em laboratório está no efeito de escala, pois o volume de solo geralmente envolvido no processo de fluxo é reduzido, assim como, nas dificuldades de manutenção da estrutura do solo. Muitas vezes, existem variações entre as determinações de laboratório e de campo, causadas por problemas de amostragem (DOURADO, 2003). Por mais que se tenha cuidado na retirada da amostra, sempre se causa alguma perturbação. Além disso, estes ensaios têm menor representatividade do que um ensaio de campo, já que uma amostra pode não englobar algumas estruturas do solo, como raízes, macroporos e fraturas (AGUIAR, 2001).

Já os ensaios em campo, apesar de terem maior representatividade, são menos controlados, requerem muitas vezes a instalação de aparelhos pesados e complicados, podem ser de alto custo e lentos, além de perturbarem as condições naturais do solo. Além disso, na maioria dos ensaios *in situ*, o estado de tensões não pode ser controlado e o gradiente hidráulico não pode ser medido com acurácia (BENSON *et al.*, 1994).

Vários pesquisadores já estudaram as diferenças. DeGroot & Lutnegger (1994) comparando resultados de ensaios de laboratório e de campo na determinação da condutividade hidráulica de argilas, obtiveram maiores valores para os ensaios de campo que de laboratório. Os autores também observaram diferenças entre metodologias de campo, evidenciando a influência de efeitos de escala.

A escolha do melhor método requer otimização de vários fatores interdependentes, incluindo o tipo e a precisão das medições, tipo de solo, e as dificuldades práticas da investigação - por exemplo, custo financeiro, disponibilidade de mão de obra, simplicidade, portabilidade do aparelho e limitações de tempo (LES *et al.*, 1985).

#### 2.2.3.5.1 Determinação da condutividade hidráulica a partir de ensaios de laboratório

No que se refere aos ensaios de laboratório, esses normalmente são realizados através de permeâmetros, os quais podem ser de parede rígida ou de parede flexível. Os ensaios podem ser realizados ainda estabelecendo cargas constante ou variável. São diversas as metodologias estabelecidas para o uso desses permeâmetros em laboratório. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece metodologias para a realização de ensaios a carga constante e variável. Internacionalmente, são muito utilizadas as normas estabelecidas pela ASTM (*American Society For Testing Materials*).

Segundo Daniel *et al.* (1985), as maiores vantagens dos permeômetros de parede rígida são baixo custo, simplicidade, aplicabilidade em testar amostras compactadas, compatibilidade com uma grande diversidade de líquidos percolados e ausência de necessidade de aplicação de altas pressões confinantes. Já os permeômetros de parede flexível possuem a vantagem de minimizar perda lateral pelas paredes - o que é pontuado como um problema no caso do uso de permeômetros de parede rígida -, permite controle de tensões e medida das deformações da amostra, bem como verificação da saturação, além da possibilidade de testar amostras com diâmetros diversos na mesma célula.

### a) Permeômetros de parede rígida

Daniel (1994) cita quatro tipos de permeômetros de parede rígida: (1) moldes de compactação; (2) tubo superdimensionado; (3) células de adensamento; (4) tubo amostrador. Na Figura 6, são ilustrados os dois primeiros equipamentos citados. O procedimento de percolação através do tubo superdimensionado utiliza material selante (bentonita) em torno da amostra, sendo análogo à metodologia utilizada nos ensaios de laboratório nesta pesquisa.

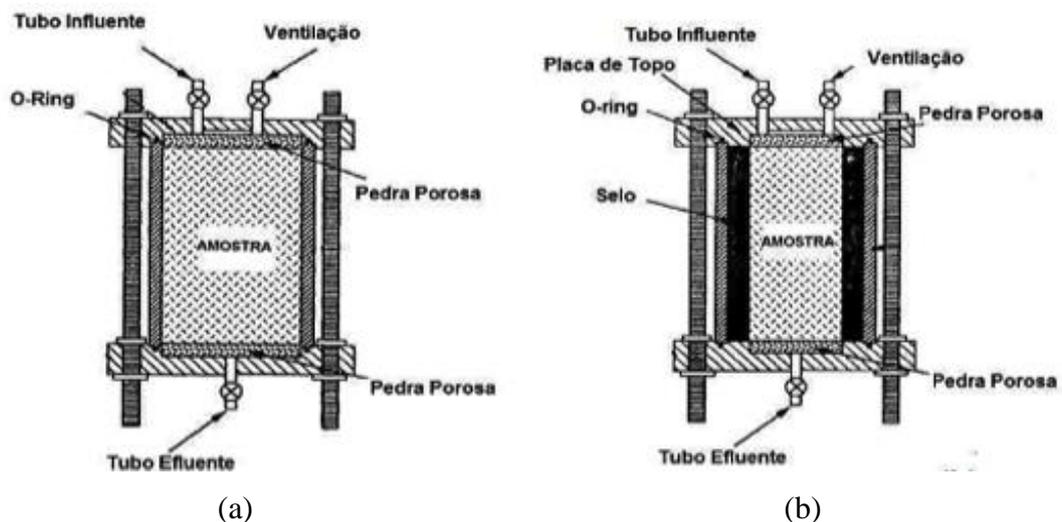


Figura 6: Alguns tipos de permeômetros de parede rígida: (a) molde de compactação; (b) tubo superdimensionado. Fonte: Daniel (1994) adaptado por Morandini (2009).

## b) Permeômetros de parede flexível

Esse tipo de permeômetro é composto por uma câmara em cujo interior é posicionado o corpo de prova, entre duas pedras porosas, e envolto em uma membrana flexível (ALONSO, 2005). Uma prática comum é a utilização da câmara triaxial como permeômetro de parede flexível, neste caso, sendo o ensaio denominado de adensamento e permeabilidade em câmara triaxial (MORANDINI, 2009). Na Figura 7, é ilustrado um permeômetro de parede flexível.

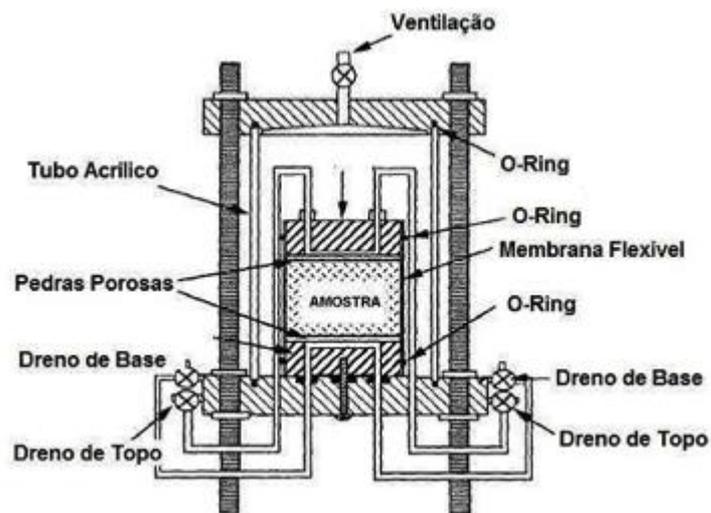


Figura 7: Permeômetro de parede flexível.  
Fonte: Daniel (1994) adaptado por Morandini (2009).

### 2.2.3.5.2 Determinação da condutividade hidráulica a partir de ensaios de campo

São diversos os ensaios de campo para determinação da condutividade hidráulica saturada dos solos. Segundo Lisboa (2006), estes ensaios podem ser feitos em furos de sondagem, em poços ou em cavas; aproveitando piezômetros e utilizando equipamentos e arranjos especiais, como os infiltrômetros.

Alguns métodos de campo serão aqui apresentados, pela sua utilização na presente pesquisa ou pelo destaque na literatura científica: a) ensaio de permeabilidade em furos de sondagem; b) permeômetro de Guelph; c) *slug test*.

**a) Ensaio de permeabilidade em furos de sondagem:** executado em furos de sondagem a percussão, é genericamente conhecido por ensaio de infiltração. Juntamente com o ensaio de perda d'água sob pressão (aplicável em sondagens rotativas), constitui

o conjunto de ensaios de permeabilidade executados em furos de sondagens, mais comumente utilizados no campo para a caracterização hidrogeotécnica dos terrenos naturais. Consiste na medida da vazão, representada pelo volume d'água absorvido ou retirado, durante um intervalo de tempo, em função da aplicação de diferenciais de pressão induzida por colunas d'água, resultante da injeção ou da retirada de água do furo (ABGE, 1999). Podem ser realizados a diversas profundidades, permitindo, portanto, determinar a variação vertical da condutividade hidráulica. Os principais tipos de ensaio, com injeção e retirada de água do furo, são descritos na Tabela 5 e ilustrados na Figura 8 e na Figura 9. Os ensaios de infiltração e de rebaixamento só podem ser realizados na porção do maciço acima do nível d'água, enquanto os ensaios de bombeamento e de recuperação apenas são realizados na porção situada abaixo do nível freático (ABGE, 1996).

Tabela 5 - Principais tipos de ensaios realizados em furos de sondagem (ABGE, 1999).

Ensaio realizado com injeção de água no furo	Ensaio realizado com retirada de água no furo
Ensaio de infiltração, também denominado infiltração a nível constante: mantém-se uma carga constante e mede-se a vazão necessária para mantê-la.	Ensaio de bombeamento (pontual): bombeia-se água e mede-se a vazão necessária para manter estabilizado o nível rebaixado
Ensaio de rebaixamento, também denominado infiltração a nível variável: estabelece-se uma coluna d'água inicial, interrompe-se a introdução da água e acompanha-se, no tempo, o rebaixamento do nível d'água.	Ensaio de recuperação: bombeia-se a água, até que seu nível esteja rebaixado o suficiente em relação ao nível freático ou piezométrico, medindo-se em seguida, a velocidade de recuperação.

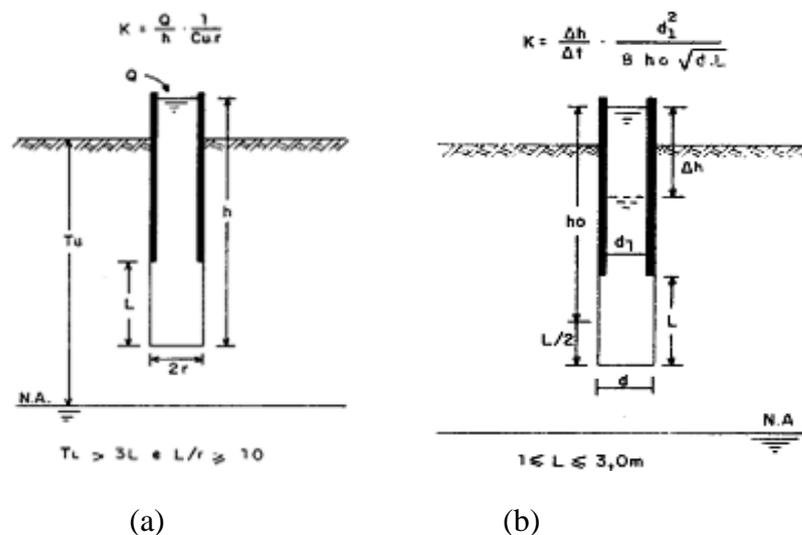


Figura 8: Ensaio com injeção de água no furo de sondagem, acima do nível d'água: (a) Ensaio de infiltração; (b) Ensaio de rebaixamento.

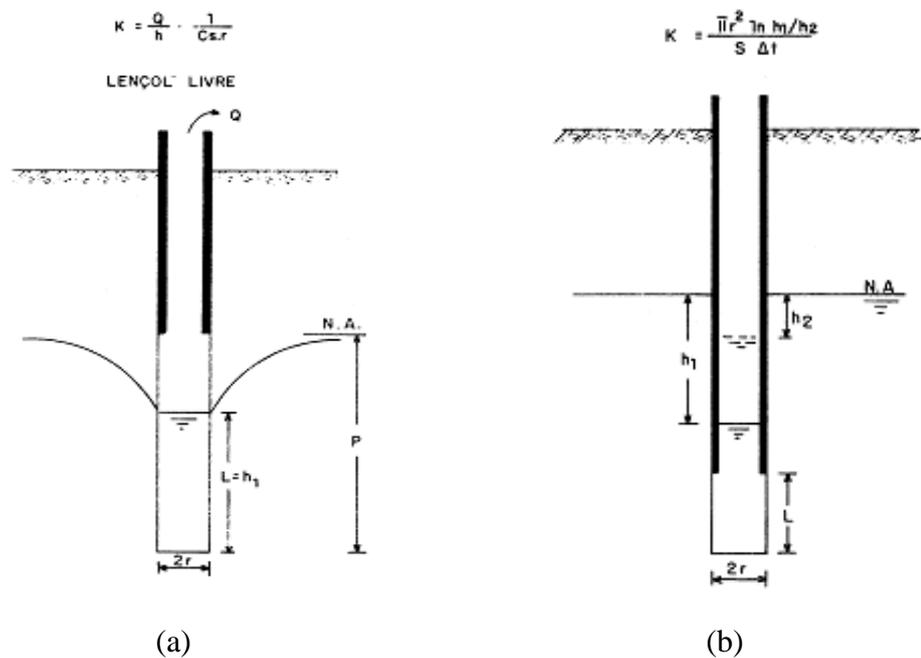


Figura 9: Ensaio com retirada de água no furo de sondagem, abaixo do nível d'água:  
 (a) Ensaio de bombeamento; (b) Ensaio de recuperação.

### b) Permeâmetro Guelph

O aparelho consiste em um conjunto de tubos concêntricos. O tubo central tem a função de permitir a entrada de ar e regular o nível d'água dentro do furo de sondagem. Os demais têm função de reservatório e suporte (SILVA, 2010). Permite medições em qualquer posição no perfil, em um orifício aberto por trado no solo, sendo possível a identificação de diferentes valores de permeabilidades, resultantes da estratificação, do bloqueamento dos poros ou da compactação (COSTA & NISHIYAMA, 2007).

O reservatório de água desse permeâmetro permite armazenar água e medir a taxa de variação do nível d'água durante o ensaio através de uma escala em centímetros timbrada no tubo do reservatório. Para estudos em solos com condutividade hidráulica baixas, usa-se o reservatório interno para se obter uma melhor resolução na medição da taxa de fluxo. Quando se trabalha com solos com condutividade hidráulica mais elevada, a combinação de reservatórios é necessária (LISBOA, 2006).

O equipamento possui algumas vantagens, dentre as quais a rapidez dos ensaios e o volume reduzido de água utilizado. O ensaio permite a determinação da condutividade

hidráulica saturada e do potencial matricial de fluxo, a partir dos quais é possível avaliar a função da condutividade hidráulica não saturada  $K(\theta)$  (LISBOA, 2006). O Permeâmetro de Guelph (Figura 10) é projetado para medir a condutividade entre  $10^{-2}$  e  $10^{-6} \text{ cm.s}^{-1}$ . Abaixo ou acima destas ordens de grandeza, as medições apresentam erros ou não se consegue realizar o ensaio.



Figura 10: Permeâmetro Guelph durante ensaio de campo (LISBOA, 2006).

### c) *Slug Test*

O método de execução deste teste é realizado em zona saturada e consiste em elevar ou rebaixar instantaneamente um volume d'água em um poço de monitoramento (piezômetro) de reduzido diâmetro. No campo, essa variação do nível d'água pode ser realizada pela introdução ou retirada de um cilindro sólido de dentro do poço. O volume deslocado equivale à adição ou à retirada de água do aquífero e é igual ao volume do cilindro. Quando o volume d'água é removido o teste é conhecido como *bail test* e quando adicionado, *slug test* (ALMEIDA, 2011). Na Figura 11, ilustram-se as duas variações do método.

A partir da medida das variações (subida ou descida) do nível d'água em determinado intervalo de tempo, obtém-se dados que, em conjunto com as características geométricas do poço e através do método de análise adequado, fornecem o valor de condutividade hidráulica nas imediações do poço de monitoramento ensaiado (SILVA, 2008). As medições do nível podem ser realizadas manualmente, com auxílio de

medidores de nível, ou automaticamente, através do uso de um transdutor de pressão (acoplado a um computador) (FIORI, 2010). Segundo Campbell *et al.* (1990), são vários os métodos de análise do slug test, desenvolvidos para condições particulares de subsuperfícies, dentre os quais citam-se: Hvorslev (1951), Cooper-Bredehoeft-Papadoulos (1967), Theis (1935) e Bouwer-Rice (1976).

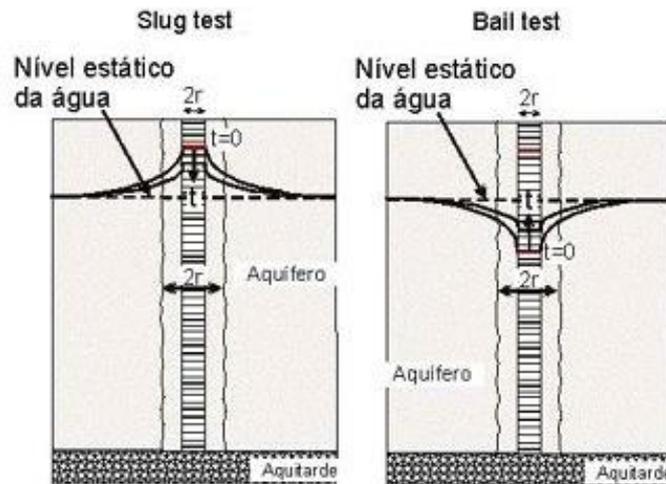


Figura 11: Ilustração dos ensaios *Slug test* e *Bail Test* (FIORI, 2010).

#### 2.2.3.6 Variabilidade dos valores de condutividade hidráulica

Problemas metodológicos envolvidos na obtenção da condutividade hidráulica do solo saturado, desde a amostragem até a sua determinação em laboratório e também em campo, podem levar a uma elevada variabilidade e grandes desvios entre os valores determinados (WARRICK & NIELSEN, 1980; FIELD *et al.*, 1984). Estudos comparando metodologias de determinação de K mostram diferenças significativas entre os valores obtidos, o que pode ser justificado por limitações experimentais ou matemáticas assumidas pelos métodos. Entre as limitações experimentais destacam-se as propriedades do solo que variam interferindo na determinação de K e entre as limitações matemáticas destacam-se o tratamento estatístico dos dados obtidos e a escolha de um valor representativo (MOHANTY *et al.*, 1991; MOHANTY *et al.*, 1994; FALLEIROS *et al.*, 1998; MESQUITA & MORAES, 2004).

A variação de resultados de K que ocorrem em uma área de aproximadamente 100 m<sup>2</sup> enfatiza a necessidade de repetições necessárias a fim de que uma média representativa

possa ser obtida, ou que a variabilidade espacial possa ser adequadamente descrita. Na verdade, para algumas aplicações este requisito de repetibilidade aumenta, pela necessidade de alta precisão nas medições individuais de K (LES *et al.*, 1999; GUIMARÃES, 2013).

A alta variabilidade da K pode chegar ao ponto de não permanecer constante no mesmo solo, em consequência das variações contínuas dos processos físicos, químicos e biológicos. Este é o principal problema que dificulta a obtenção de valores médios, que sejam representativos de grandes áreas agrícolas e que possam ser usados com segurança nos estudos da dinâmica da água no solo (CADIMA *et al.*, 1980).

A variabilidade dos dados de K são confirmadas por diversos autores, como Abreu *et al.* (2004), Dalbianco (2009), Warrick & Nielsen (1980), Lundgren (2004) e Silva (2010). Em alguns casos, segundo Elrick & Reynolds (1992), a variabilidade da condutividade hidráulica saturada de campo pode ser extrema, com coeficientes de variação de várias centenas, em termos percentuais.

### **2.3 Definição e caracterização de percolado de aterro sanitário**

Segundo a NBR 8419, o chorume é definido como o líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada demanda bioquímica de oxigênio (ABNT, 1992). Sob a ação da chuva, o chorume mistura-se com a água que infiltra na massa de resíduos sólidos formando o percolado (CARVALHO, 2001). Assim, o lixiviado ou percolado de aterro sanitário pode ser definido como o líquido resultante da degradação biológica dos materiais orgânicos dos resíduos sólidos, bem como da umidade natural e água de constituição presente nestes, além da água infiltrada na camada de cobertura e no interior das células de aterramento, somados aos materiais dissolvidos ou suspensos, extraídos dos resíduos (LANGE & AMARAL, 2009).

O processo de geração e as características dos lixiviados produzidos nos aterros dependem das propriedades (composição gravimétrica, compactação, permeabilidade, granulometria, peso específico) e profundidade dos resíduos sólidos, de fatores climáticos (precipitação, evapotranspiração e temperatura), da hidrogeologia do local

(escoamento superficial, infiltração, topografia e geologia), do *design* da camada de cobertura, da idade dos resíduos, da interação do lixiviado com o meio ambiente, da concepção e operação do aterro e até dos procedimentos de amostragem (REINHART & GROS, 1998; LANGE & AMARAL, 2009). Assim, a composição química do lixiviado varia muito, dependendo ainda da idade do aterro (HAMADA, 1997). Há evidências significativas de que a concentração de diversos componentes do percolado diminui com o tempo devido à quebra de componentes orgânicos em compostos mais simples, precipitação de elementos solúveis (como no caso de alguns metais) e ainda diluição (ROWE, 1995). Na Tabela 6, é apresentada a composição média de percolados de aterros brasileiros. A análise dos parâmetros demonstra que o percolado de aterro sanitário é um líquido constituído principalmente de compostos orgânicos e nitrogenados, sólidos e substâncias químicas diversas, dentre os quais, alguns metais traço. Devido ao elevado potencial poluidor dos percolados, são inúmeras as pesquisas acerca de materiais adequados para utilização como barreiras na base dos aterros sanitários.

Com relação à densidade e viscosidade dos percolados de aterro sanitário são escassos os dados na literatura. Monteiro *et al.* (1997) mediram o peso específico do lixiviado do aterro da Muribeca (PE) e obtiveram valores de,  $10,04 \text{ kN/m}^3$  e  $10,06 \text{ kN/m}^3$ , pelos métodos do densímetro e do picnômetro, respectivamente, próximos ao peso específico da água. Os resultados que os autores obtiveram em relação à viscosidade cinemática do lixiviado em diferentes valores de pH e temperatura, estão indicados na Tabela 7. Trata-se de valores discretamente maiores que da viscosidade da água.

Tabela 6 – Variação da composição química de percolados em aterros de resíduos brasileiros.

Variável	Faixa máxima	Faixa mais provável	FVMP (%) *
pH	5,7 - 8,6	7,2 - 8,6	78
Alcalinidade total (mg. L <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub> )	750 - 11400	750 - 7100	69
Dureza (mg.L <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub> )	95 - 3100	95 - 2100	81
Condutividade (µS. cm <sup>-3</sup> )	2950 - 2500	2950 - 17 660	77
DBO (mg. L <sup>-1</sup> de O <sub>2</sub> )	< 20 - 30000	< 20 - 8600	75
DQO (mg. L <sup>-1</sup> de O <sub>2</sub> )	190 - 80000	190 - 22300	83
Óleos e graxas (mg/L)	10 - 480	10 - 170	63
NTK (mg. L <sup>-1</sup> de N)	80 - 3100	Não há	-
Fenóis (mg/L de C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)	0,9 - 9,9	0,9 - 4,0	58
N-amoniaco (mg. L <sup>-1</sup> de N)	0,4 - 3000	0,4 - 1800	72
N-orgânico (mg. L <sup>-1</sup> de N)	5 - 1200	400 - 1200	80
N-nitrito (mg L <sup>-1</sup> de N)	0 - 50	0 - 15	69
Nitrato (mg. L <sup>-1</sup> de N)	0 - 11	0 - 3,5	69
P-total (mg L <sup>-1</sup> )	0,1 - 40	0,1 -15	63
Sulfeto (mg L <sup>-1</sup> )	0 - 35	0 - 10	78
Sulfato (mg L <sup>-1</sup> )	0 - 5400	0 - 1800	77
Cloreto (mg L <sup>-1</sup> )	500 - 5200	500 - 3000	72
Sólidos totais (mg. L <sup>-1</sup> )	3 200 - 21900	3 200 - 14400	79
Sólidos totais fixos (mg. L <sup>-1</sup> )	630 - 20000	630 - 5000	60
Sólidos totais voláteis (mg. L <sup>-1</sup> )	2100 - 14 500	2100 - 8300	74
Sólidos suspensos totais (mg. L <sup>-1</sup> )	5 - 2800	5 - 700	68
Sólidos suspensos voláteis (mg. L <sup>-1</sup> )	5 - 530	5 - 200	62
Ferro (mg L <sup>-1</sup> )	0,01 - 260	0,01 - 65	67
Manganês (mg. L <sup>-1</sup> )	0,04 - 2,6	0,04 - 2,0	79
Cobre (mg. L <sup>-1</sup> )	0,005 - 0,6	0,05 - 0,15	61
Níquel (mg. L <sup>-1</sup> )	0,03 - 1,1	0,03 - 0,5	71
Cromo (mg L <sup>-1</sup> )	0,003 - 0,8	0,003 - 0,5	89
Cádmio (mg L <sup>-1</sup> )	0 - 0,26	0 - 0,065	67
Chumbo(mg. L <sup>-1</sup> )	0,01 - 2,8	0,01 - 0,5	64
Zinco (mg L <sup>-1</sup> )	0,01 - 8,0	0,01 - 1,5	70

\*FVMP: Frequência de ocorrência dos valores mais prováveis. Fonte: Souto e Povinelli (2007) citado por Lange & Amaral (2009).

Tabela 7 - Viscosidade do “chorume” do aterro de Muribeca (PE).

Temperatura (°C)	Viscosidades cinemáticas (cSt)	
	Chorume pH 5,0	Chorume pH 7,8
27	0,9228	0,9252
20	1,0897	1,0836

Fonte: Monteiro *et al.* (1997).

## **2.4 Avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos à poluição**

### **2.4.1 Conceito de vulnerabilidade natural**

Segundo Foster *et al.* (1988), a vulnerabilidade de um aquífero à poluição significa sua maior ou menor susceptibilidade de ser afetado por uma carga poluente imposta. Neste caso, uma carga contaminante antrópica refere-se apenas à carga contaminante de origem artificial (SANTOS *et al.*, 2010).

De acordo com Tripet *et al.* (2000), a vulnerabilidade natural pode ser definida como a propriedade intrínseca de um aquífero, dada pelas características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e hidrogeológicas, que determina a sensibilidade à poluição das águas subterrâneas pelas atividades humanas, incluindo fontes de poluição difusa e pontual.

Segundo Foster *et al.* (1988) a vulnerabilidade do aquífero é função da:

- a) acessibilidade hidráulica da penetração de contaminantes; e
- b) capacidade de atenuação dos estratos acima da zona saturada do aquífero, como resultado de sua retenção física e reações químicas com o contaminante.

Esses dois fatores naturais podem interagir com os seguintes elementos característicos da carga poluidora (FOSTER *et al.*, 1988):

- a) o modo de disposição no solo ou em subsuperfície; e
- b) a mobilidade físico-química e a persistência do poluente.

A interação desses fatores permite avaliar o risco de poluição ao qual o aquífero está submetido. Segundo Foster e Hirata (1988) e Foster *et al.* (2006) o conceito de risco de contaminação pode ser definido através da interação dos seguintes fatores:

- (a) A carga contaminante aplicada à superfície, como resultado da atividade antrópica; e
- (b) A vulnerabilidade do aquífero à contaminação devido às características naturais do substrato que o cobre e separa da superfície.

Assim, pode-se ter alta vulnerabilidade, mas nenhum perigo de poluição, devido à ausência de carga contaminante significativa, e vice-versa. Na prática, as duas

condições são perfeitamente compatíveis. Além disso, a carga contaminante pode ser controlada ou modificada, mas a vulnerabilidade do aquífero é essencialmente determinada pelo contexto hidrogeológico natural (FOSTER *et. al*, 2006).

#### **2.4.2 Métodos de determinação da vulnerabilidade natural**

O desenvolvimento dos métodos de avaliação da vulnerabilidade acompanha a necessidade crescente de exploração das águas subterrâneas, analisando os diferentes tipos de aquífero (SANTOS *et al*, 2010). Existem várias metodologias para avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos presentes na literatura, que podem ser classificados em três grupos principais: Ambientes Hidrogeológicos, Modelos Analógicos e Sistemas Paramétricos. Os sistemas paramétricos, que serão usados no presente trabalho, utilizam parâmetros convenientemente selecionados para representar a vulnerabilidade, aos quais são atribuídos diferentes pesos e interações para gerar um índice de vulnerabilidade absoluto ou relativo (VRBA & ZAPOROZEC, 1994 *apud* PAVÃO, 2004). Nesse caso, os parâmetros individualmente classificados são sobrepostos para compor o mapa geral de vulnerabilidade (TAVARES *et al.*, 2009). Alguns dos principais métodos de índices são: DRASTIC; GOD; SINTACS e EPIK.

Serão abordados nesse trabalho dois dos métodos mais conhecidos e utilizados, DRASTIC e GOD.

##### **2.4.2.1 DRASTIC**

Desenvolvido por Aller *et al.* (1987), este método é uma abordagem popular nos estudos da vulnerabilidade das águas subterrâneas, por ser relativamente barato e simples, além de utilizar dados que estão geralmente disponíveis ou que podem ser estimados, gerando um produto de fácil interpretação (MARGANE, 2003).

O índice DRASTIC corresponde à soma ponderada de sete valores relacionados aos seguintes parâmetros ou indicadores hidrogeológicos: D – profundidade da superfície freática (*Depth to water table*); R – recarga do aquífero (*Net recharge*); A – tipo de aquífero (*Aquifer media*); S – tipo de solo (*Soil media*); T – topografia ou declividade do terreno (*Topography*); I – Influência na zona não saturada (*Impact of the vadose*

zone); e C – condutividade hidráulica do aquífero (*Hydraulic Conductivity of the aquifer*). O nome DRASTIC resulta da junção das letras iniciais dos parâmetros, em inglês. A cada parâmetro é atribuído um índice, que varia entre 1 e 10, segundo suas características na área. O índice local é calculado multiplicando o valor atribuído ao parâmetro pelo seu peso relativo; cada parâmetro tem um peso pré-determinado (Tabela 8) que reflete a sua importância relativa na quantificação da vulnerabilidade, sendo que os parâmetros mais importantes têm peso 5, enquanto o menos importante tem peso 1.

Tabela 8 - Pesos atribuídos a cada parâmetro no cálculo do índice DRASTIC.

<b>Parâmetro</b>	<b>Peso</b>
Profundidade do nível d'água	5
Recarga profunda de aquíferos	4
Material aquífero	3
Tipo de solo	2
Topografia	1
Impacto da zona não-saturada	5
Condutividade hidráulica da zona saturada	3

Fonte: Aller *et al.*, 1987.

O índice final é obtido somando-se os produtos do valor de cada parâmetro pelo respectivo peso. O índice final varia entre 23 e 230. Quanto mais elevado o índice, maior a vulnerabilidade (Tabela 9) (SOUZA, 2009; SANTOS *et al.*, 2010).

Tabela 9 - Classificação da vulnerabilidade segundo índice DRASTIC.

<b>Índice DRASTIC</b>	<b>Vulnerabilidade</b>
>199	Muito Alta
160-199	Alta
120-159	Moderada
<120	Baixa

Fonte: Monteiro *et al.* (2008).

Ainda que seja um método muito difundido, o fato de empregar sete variáveis, mais do que a maioria dos métodos, gera uma dificuldade de aplicação prática quando não se dispõe dos valores de algumas delas. Além disso, quando os dados são escassos, incertos ou mal distribuídos no espaço, a aplicação dessa metodologia torna-se imprecisa (SOUZA, 2009). Outro problema é a interação entre os variados parâmetros ponderados, alguns dos quais são fortemente correlacionados (PAVÃO, 2004). Segundo

Margane (2003), o método subestima a vulnerabilidade de aquíferos fraturados (comparado com a dos aquíferos não consolidados) e os pesos atribuídos aos parâmetros não possuem embasamento científico.

#### 2.4.2.2 GOD

Este método, proposto por Foster (1987), foi amplamente testado na América Latina e no Caribe durante a década de 1990 e, graças à sua simplicidade conceitual e de aplicação, tornou-se um método bastante difundido. O índice GOD baseia-se nos seguintes fatores: G – tipo de aquífero (*Groundwater*); O – classe de aquífero em termos de grau de confinamento e litologia (*Overall*); D – profundidade do nível da água subterrânea (*Depth*) (SANTOS *et al.* 2010; SOUZA, 2009).

A metodologia empírica (FOSTER & HIRATA, 1988) para a classificação da área estudada segundo esses parâmetros envolve as seguintes etapas:

- 1) Identificação do tipo de ocorrência da água subterrânea no que se refere ao grau de confinamento e posterior indexação desse parâmetro em uma escala de 0,0 – 1,0;
- 2) Caracterização dos estratos de cobertura do aquífero em termos de (a) grau de consolidação, e, portanto, provável presença ou ausência de permeabilidade por fissuras; e (b) tipo de litologia, e, assim, indiretamente, a porosidade, permeabilidade da matriz e retenção específica da zona vadosa. Tal caracterização permite uma segunda pontuação, em uma escala de 0,4 – 1,0;
- 3) Estimativa da profundidade até o lençol freático, no caso de aquíferos livres, ou da profundidade do “teto” dos aquíferos confinados, com classificação em uma escala de 0,6 – 1,0.

O índice final integral de vulnerabilidade do aquífero é o produto dos três índices desses parâmetros (Figura 12). A metodologia ilustrada nessa figura apresenta algumas modificações em relação à versão original (FOSTER & HIRATA, 1988), como consequência dos resultados obtidos com as experiências de aplicação desse método durante a década de 1990. As modificações incluem uma pequena redução nos índices do parâmetro “distância até a água subterrânea”, dentre outras (FOSTER *et al.*, 2006).

As classes de vulnerabilidade do aquífero foram subdivididas por Foster & Hirata (1988) em cinco categorias, sendo que sua definição prática e respectivos índices de vulnerabilidade associados estão representados na Tabela 10.

Tabela 10 - Classes de vulnerabilidade segundo índice obtido pela metodologia GOD.

<b>Classes de vulnerabilidade do índice GOD</b>	<b>Definição prática</b>	<b>Índice de vulnerabilidade</b>
Extrema	Vulnerável a muito poluentes, com rápido impacto em muitos cenários de contaminação	0,7 - 1,0
Alta	Vulnerável a muito poluentes, exceto aqueles muito pouco móveis	0,5 - 0,7
Moderada	Vulnerável a alguns poluentes, mas somente quando continuamente lançados	0,3 - 0,5
Baixa	Somente vulnerável a contaminantes conservativos em longo prazo, quando continuamente e amplamente lançados	0,1 - 0,3
Desprezível	Camadas confinadas com fluxo vertical descendente não significativo	0 - 0,1

Alguns investigadores têm proposto modificações ao método GOD, que incorporam um fator relacionado com a capacidade de atenuação do solo baseado em sua textura. A justificativa para a inserção de tal fator é de que a maioria dos processos que provocam a atenuação e/ou eliminação dos contaminantes no subsolo ocorre com mais frequência na zona biologicamente ativa do solo, como resultado do maior teor de matéria orgânica e de material argiloso, além da presença mais numerosa de populações bacterianas. Em termos gerais considera-se válido incluir o “fator de solo”, com exceção de áreas onde o solo tenha sido removido ou alterado e em casos onde a carga contaminante é aplicada abaixo dele (FOSTER *et al.*, 2006).

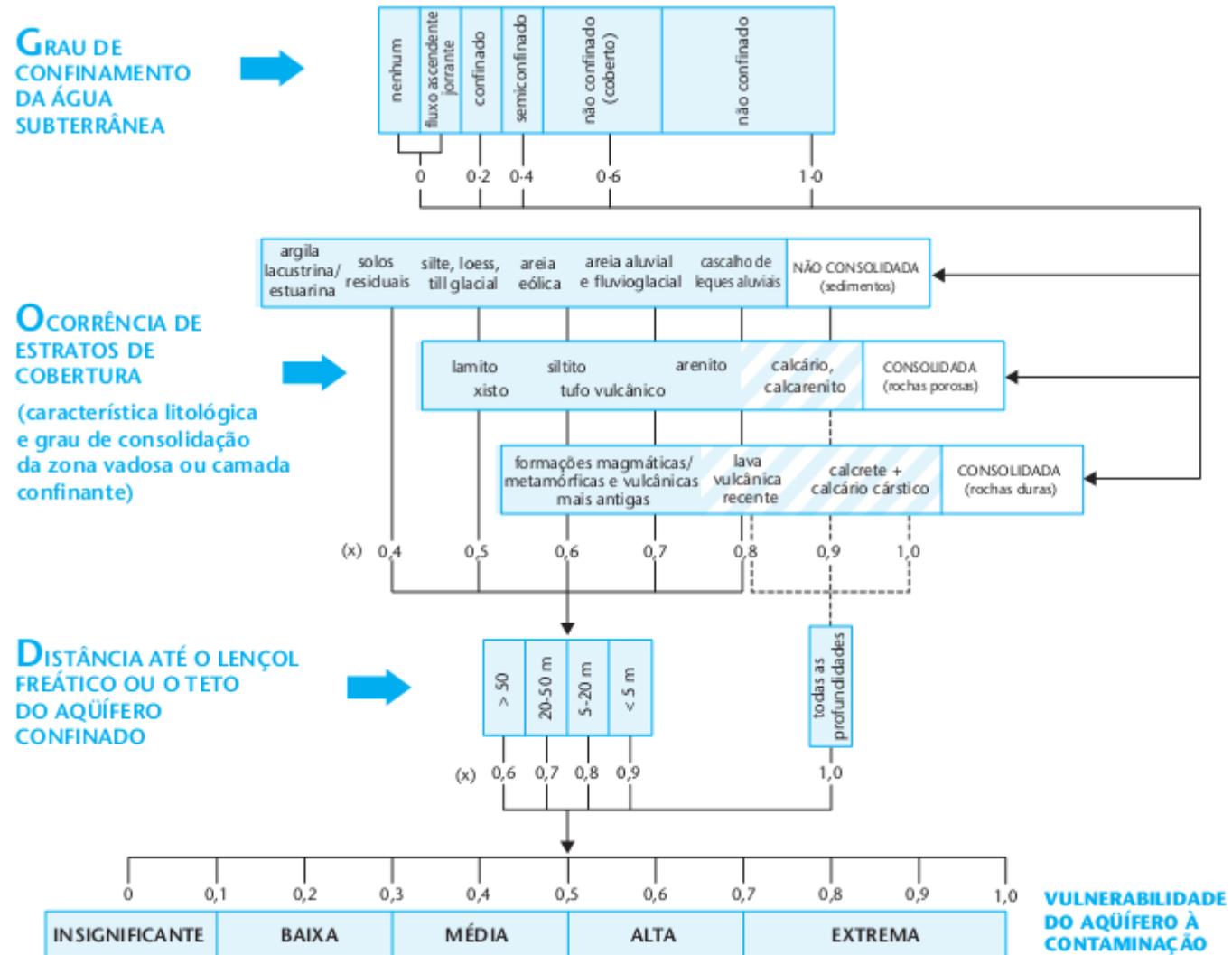


Figura 12: Diagrama explicativo para a Metodologia GOD. Fonte: Foster *et al.*, 2006.

### **2.4.3 Critérios para a escolha da melhor metodologia**

Para Auge (2004), a escolha da metodologia mais adequada à avaliação da vulnerabilidade de contaminação da água subterrânea em uma região depende de vários fatores, dentre os quais:

- Conhecimento e difusão da metodologia: existem regiões ou países em que alguns métodos são mais difundidos que outros, a exemplo do DRASTIC (mais utilizado na América do Norte), GOD (muito utilizado na América Latina, Espanha e Inglaterra), SINTACS (utilizado na maioria dos países europeus) e EPIK (utilizado na costa do Mediterrâneo);
- Informações disponíveis: uma condizente avaliação da vulnerabilidade demanda a obtenção de informações preliminares. Um método que utiliza mais variáveis é mais difícil de aplicar.
- Escala de avaliação: segundo Auge (2004), o grau de detalhe da avaliação depende do objetivo proposto, sendo que para trabalhos semirregionais (normalmente são utilizadas escalas de 1:100.000 a 1:500.000) e regionais (1:500.000 ou menores), mostram-se práticos os métodos que requerem menos parâmetros, como o GOD. Para os estudos de semidetalhes (utiliza-se 1:25.000 a 1:100.00) e de detalhe (maiores de 1:25.000), tem-se melhores definições para métodos com maiores quantidades de parâmetros, como o DRASTIC.
- Validade dos resultados: para avaliar a representatividade dos mapas de vulnerabilidade, Auge (2004) sugere que sejam aplicadas diferentes metodologias nos sítios afetados por cargas contaminantes, a fim de verificar qual delas apresentará maior adequação para ser empregada com o objetivo de prevenir a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1 Caracterização da área de estudo**

A caracterização da área de estudo baseou-se no trabalho de Andrade (2010), que realizou um detalhado diagnóstico físico e socioambiental da sub-bacia do Córrego Palmital, bem como de outros trabalhos realizadas na área de estudos e arredores. Durante a presente pesquisa novas observações e registros da paisagem durante os trabalhos de campo corroboraram e complementaram as informações previamente existentes. Foram confeccionados mapas ilustrando diversos aspectos físicos da área utilizando o *software ArcGis 10.0*, a partir de imagem IKONOS, do ano de 2007, com resolução de 1,0 m, além de curvas de nível com distanciamento de 5 metros. Os mapas de pedologia e usos do solo foram elaborados a partir do banco de dados do trabalho de Andrade (2010), tendo sido o mapa pedológico atualizado.

Vale frisar que, no presente trabalho, refere-se à área de estudo como sub-bacia do Córrego Palmital, apesar dessa, na verdade, estar inserida em uma bacia maior já denominada pelo mesmo nome em trabalhos anteriores, como será detalhado no item 4.

#### **3.2 Caracterização da condutividade hidráulica dos solos da sub-bacia do Córrego Palmital**

##### **3.2.1 Trabalhos de campo**

###### **3.2.1.1 Ensaios de permeabilidade *in situ***

Foram realizados ensaios para obtenção da condutividade hidráulica *in situ*, em furos de sondagem acima do nível d'água, segundo metodologia do Manual de “Ensaios de permeabilidade em solos – Orientações para sua execução em campo” (ABGE, 1996), além de algumas diretrizes do “Manual de Sondagens” (ABGE, 1999). Os ensaios foram realizados em seis pontos da bacia, sendo dois em cada classe de solo presente na área, como representado na Figura 13, no período de 14 de março a 26 de abril de 2012, à exceção do realizado no ponto ENS6, cujo ensaio foi realizado no dia 23 de setembro

de 2011 pela empresa Geopontual Engenharia. A identificação dos pontos onde os ensaios foram realizados, bem como suas coordenadas, levantadas com GPS topográfico, são mostradas na Tabela 11. Os furos foram realizados utilizando trados manual e mecânico, conforme ilustrado na Figura 14.

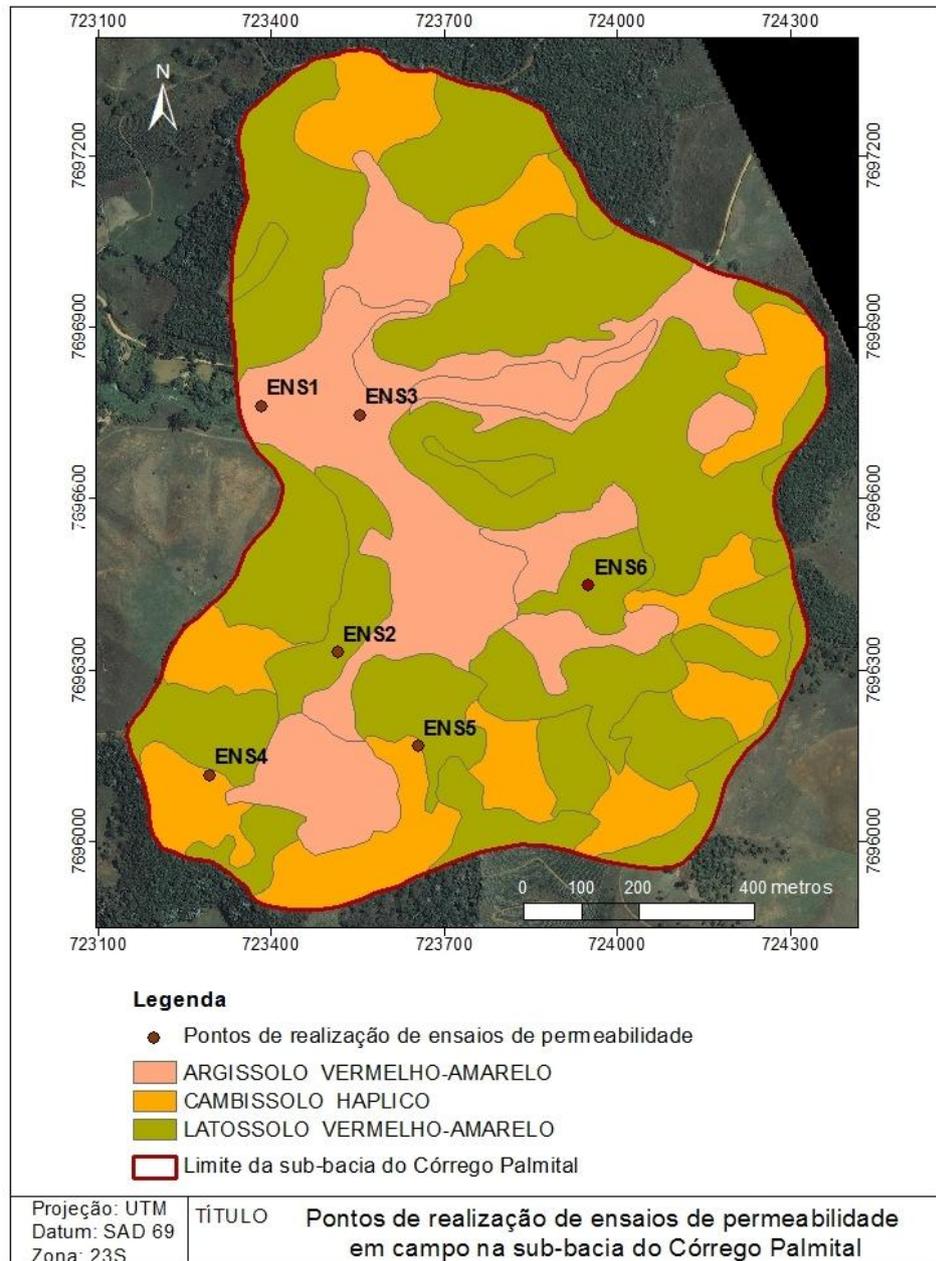


Figura 13: Localização dos furos nos quais foram realizados os ensaios de permeabilidade.

Tabela 11 - Identificação, localização e altitude dos pontos de realização dos ensaios de permeabilidade em campo.

Ponto	Coordenadas UTM*		Cota (m)	Classe pedológica
	Norte	Este		
ENS 1	7696760,59076	723382,83613	723,028	Argissolo vermelho-amarelo
ENS 2	7696330,01751	723515,69804	754,463	Latossolo vermelho-amarelo
ENS 3	7696745,25883	723554,66085	725,626	Argissolo vermelho-amarelo
ENS 4	7696114,71281	723292,81147	773,542	Cambissolo háplico
ENS 5	7696165,15383	723655,35586	774,735	Cambissolo háplico
ENS 6	7696446,80145	723951,3453	752,701	Latossolo vermelho-amarelo

\*SAD69, Zona 23



(a)

(b)

Figura 14: (a) Trado mecânico utilizado para a realização dos furos; (b) imagem exemplificando a execução de furo.

Em cada ponto, foram feitos dois furos de sondagem, com distância de aproximadamente dois a três metros. Os ensaios foram realizados em profundidades crescentes, ocorrendo alternância dos trechos ensaiados entre os dois furos de sondagem, de maneira a se evitar que a água infiltrada no ensaio do trecho anterior modificasse as características naturais do solo no trecho subsequente. A profundidade dos furos e, assim, a máxima profundidade do trecho ensaiado era limitada pelo nível d'água ou, no caso dos pontos ENS4 e ENS5, pela impraticabilidade técnica da realização de furos com mais de 8,0 m de profundidade, devido ao número de hastes disponível para perfuração; dessa forma, nesses pontos a perfuração foi encerrada antes de alcançar o nível d'água. Quando da realização do furo, suas paredes recebiam

revestimento de aço até determinada profundidade, abaixo da qual o furo não era revestido, a fim de permitir o fluxo vertical e radial da água. A essa parte final do furo corresponde o trecho ensaiado, o qual, na maioria dos casos, foi de 1,0 m de comprimento.

Assim, por exemplo, para obter a condutividade hidráulica no trecho de 1,0 a 2,0 m de profundidade em um ponto, foi realizado um furo com profundidade de 2,0 m, sendo que no trecho inicial, da superfície do solo até a profundidade de 1,0 m, foi cravado um tubo de revestimento com uma luva na extremidade inferior. Após a cravação do revestimento, foi colocada bentonita no espaço entre as paredes do furo e o revestimento, no trecho logo acima da luva, a fim de garantir a vedação e impedir o fluxo ascendente da água através das laterais do tubo, sendo o restante do espaço acima preenchido com solo do próprio local. O trecho seguinte seria de 2,0 a 3,0 m de profundidade, sendo o ensaio realizado no outro furo, seguindo o mesmo procedimento: o furo foi feito com 3,0 m, sendo o revestimento cravado na profundidade de 0,0 a 2,0 m. Para a profundidade de 3,0 a 4,0 m, repetia-se o procedimento no primeiro furo; assim, eram feitos sucessivos aprofundamentos, alternando-se os furos de sondagem até atingir-se a cota do nível d'água.

Ao revestimento foi acoplado um “permeâmetro” construído durante o presente trabalho, para as medições da variação da carga hidráulica com o tempo, nos ensaios de carga variável. Os principais equipamentos utilizados nos ensaios em campo são ilustrados na Figura 15. O “permeâmetro” (Figura 16 a) consiste basicamente de um tubo de PVC com diâmetro aproximadamente igual ao do revestimento, no qual foram feitos dois furos, um superior e outro inferior, para o encaixe de joelhos; nesses foi acoplado um tubo de acrílico transparente e graduado, constituindo um vaso comunicante. Assim, a diminuição da carga hidráulica dentro do furo e por consequência, no “permeâmetro”, era registrada através de leituras no tubo graduado.

Após a finalização do furo, adicionava-se água ao furo até sua boca durante 5 a 10 minutos, em média, até atingir a “saturação” do solo no trecho ensaiado. Diz-se “saturação” pois, segundo Almeida & Schalch (2008), durante o ensaio não é conseguida a saturação total - muito difícil de ser atingida em uma situação real -, e sim uma chamada saturação de campo, pois no campo não se consegue expulsar completamente o ar dos vazios. Após esse procedimento, realizavam-se medições da

variação da carga hidráulica em determinado intervalo de tempo (geralmente 10 minutos), a fim de verificar a proximidade dos valores lidos. As vazões foram consideradas estabilizadas quando não havia variação progressiva nos valores e a diferença entre leituras isoladas e seu valor médio não superava 20% do valor médio, segundo recomendação do manual (ABGE, 1999).



Figura 15: Indicação de parte dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de permeabilidade.

As leituras eram feitas enchendo-se o furo com água até a boca, interrompendo-se o fornecimento de água e tomando-se como instante zero ( $t=0$  s) o momento em que o nível d'água atinge o zero na escala graduada (Figura 16 b). Após o intervalo de tempo de interesse, realizava-se nova leitura. Se as velocidades resultantes fossem de até  $10 \text{ cm.min}^{-1}$ , prosseguia-se com o ensaio de rebaixamento ou de carga variável; do contrário, realizava-se o ensaio de infiltração ou carga constante, segundo critério estabelecido no manual.



Figura 16: (a) “Permeâmetro” utilizado para as leituras da variação de carga hidráulica; (b) realização de leituras.

#### 3.2.1.1.1 Ensaio de carga variável

No ensaio de carga variável, realizavam-se sucessivas medições da variação da carga hidráulica em intervalos de tempo pré-determinados (15”, 30”, 1’, 2’, etc) até atingir 30 minutos de ensaio ou uma variação de 20% da carga inicial aplicada - como determina a norma – ou rebaixamento tal que impedisse as leituras no tubo de leitura.

No ensaio de carga variável, o valor da condutividade hidráulica,  $K$ , é calculado segundo a seguinte equação:

$$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}} \quad (6)$$

Em que:  $\Delta h$  é a variação das leituras de carga hidráulica no intervalo de tempo  $\Delta t$ ;  $D_1$  é o diâmetro do “permeâmetro”;  $D$  é o diâmetro do furo de sondagem;  $L$  é o comprimento do trecho de ensaio; e  $h_0$  é a altura entre o ponto de leitura no tempo  $t=0$  e o ponto médio do trecho ensaiado ( $\Delta h$  + profundidade do revestimento abaixo do solo +  $L/2$ ), como ilustrado na Figura 8.

### 3.2.1.1.2 Ensaio de carga constante

No ensaio de carga constante, retirava-se o “permeâmetro” do revestimento. Enchia-se um recipiente com um volume conhecido de água e media-se então o tempo gasto para a adição desse volume ao furo, mantendo constante o nível da água dentro do tubo de revestimento.

Nos ensaios de carga constante, a vazão foi calculada pela relação entre o volume conhecido e o tempo necessário para a adição deste ao furo. A condutividade hidráulica por fim foi calculada conforme a equação abaixo, proposta pela ABGE (1996):

$$K = \frac{Q}{h} \cdot \frac{1}{Cu \cdot r} \quad (7)$$

em que:

Q a vazão adicionada ao furo, r o raio do furo, h a distância entre o nível da água no furo e o fundo do furo; L é o comprimento do trecho de ensaio; e Cu um coeficiente que é função de L, h e r, calculado segundo o ábaco ilustrado na Figura 17.

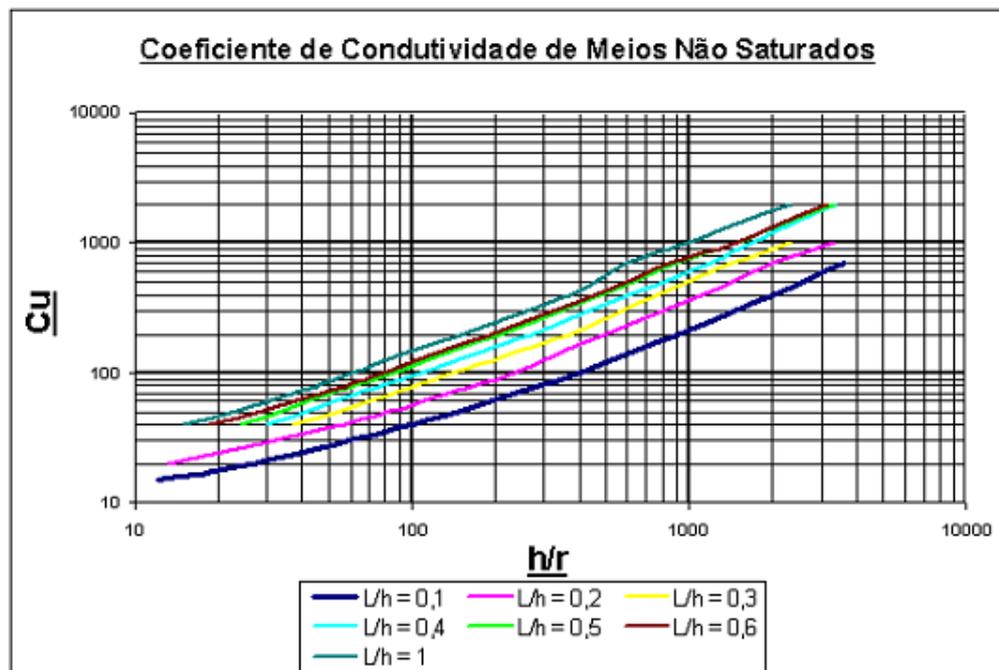


Figura 17: Ábaco para obtenção do coeficiente empírico Cu, necessário à determinação do coeficiente de permeabilidade em ensaio de carga constante acima no nível d'água.

Fonte: ABGE (1996).

### 3.2.1.2 Coleta de amostras indeformadas

A coleta de amostras indeformadas foi realizada nos dias 10 e 15 de fevereiro de 2012. Foram coletadas amostras em cinco pontos da bacia – dois pontos localizados em Latossolo, dois pontos localizados em Argissolo e um ponto localizado em Cambissolo – como mostra a Figura 18. A identificação e localização dos pontos de coleta são mostradas na Tabela 12.

As amostras indeformadas foram retiradas em taludes, a aproximadamente 90 cm – 1,0 m de profundidade (considerando a base inferior da amostra). Inicialmente, procedia-se uma pré-moldagem de corpos de prova de formato cilíndrico, nos quais cravava-se um anel de PVC com 15 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Após a cravação, retirava-se cuidadosamente a amostra, utilizando uma espátula sob a base do anel (Figura 19).

Por fim, para evitar deformação e perda de umidade, envolvia-se a amostra com parafina e plástico filme. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e guardadas no LEC até a realização das análises (Figura 20). Em cada ponto foram retiradas oito amostras, para a realização dos ensaios de condutividade hidráulica em laboratório com água e percolado de aterro sanitário.

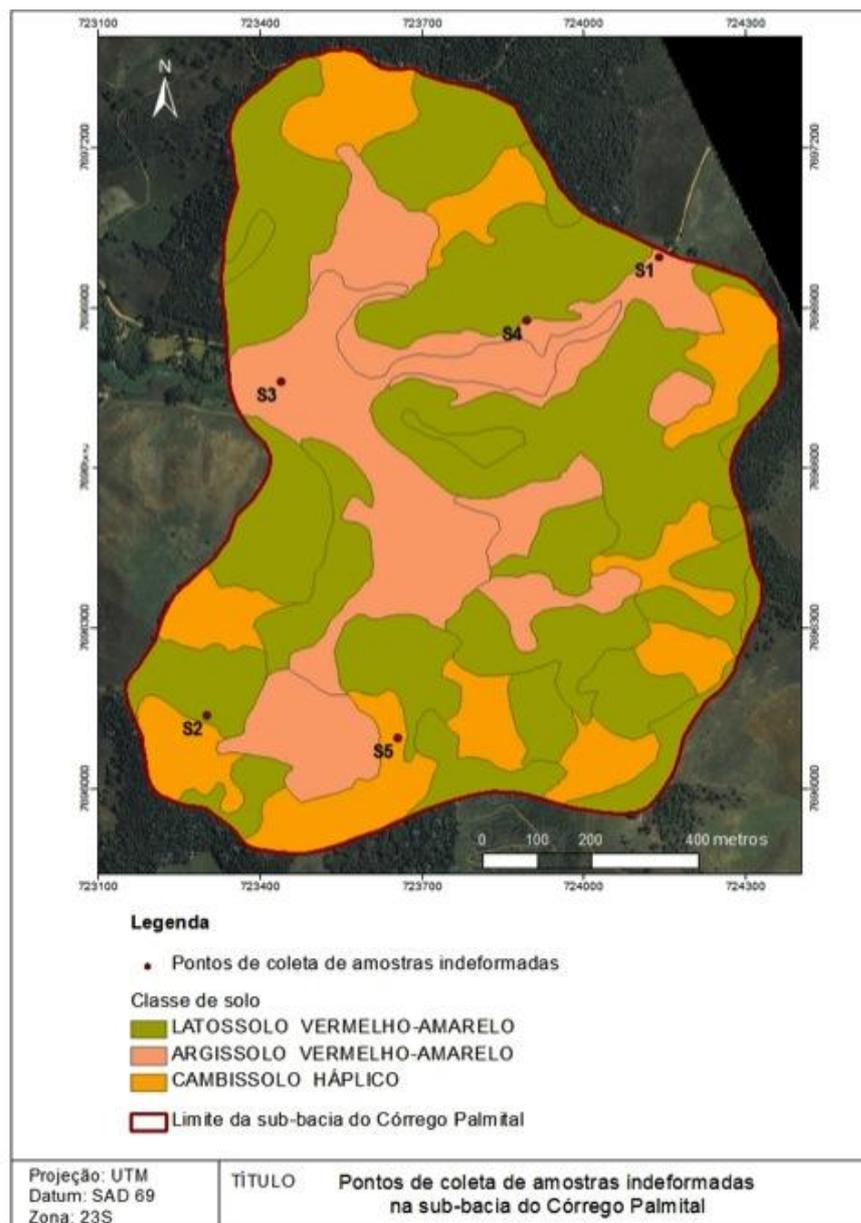


Figura 18: Localização dos pontos de coleta de amostras indeformadas.

Tabela 12 - Identificação e localização dos pontos de coleta de amostras de solo e sua respectiva classe.

Ponto	Coordenadas UTM*		Cota (m)	Classe pedológica
	Norte	Este		
S1	7696994,56659	724141,62881	764,442	Argissolo vermelho-amarelo
S2	7696136,69277	723302,59345	777,706	Latossolo vermelho-amarelo
S3	7696761,98877	723440,91304	722,297	Argissolo vermelho-amarelo
S4	7696876,34771	723292,81147	773,542	Latossolo vermelho-amarelo
S5	7696095,62995	723896,51325	744,430	Cambissolo Háplico

\*SAD 69, Zona 23S



Figura 19: Retirada de amostras indeformadas em campo.



Figura 20: Amostras indeformadas coletadas em campo, acondicionadas e identificadas.

### 3.2.1.3 Coleta de percolado de aterro sanitário

A coleta de percolado foi realizada no aterro sanitário do município de Viçosa, no período de 21 a 29 de setembro de 2012. O percolado foi coletado na entrada da lagoa de estabilização do referido aterro, diretamente da tubulação na qual o líquido proveniente dos drenos chega à lagoa, utilizando balde previamente lavado com  $\text{HNO}_3$  e “ambientado” no local com o próprio percolado. O esquema para a coleta do percolado é ilustrado na Figura 21. Durante a coleta, foi realizada análise *in situ* dos parâmetros pH, condutividade elétrica (CE) e temperatura do percolado, utilizando-se sonda Multiparâmetros Hanna. Após a coleta, o percolado foi armazenado em bombonas também previamente lavadas com  $\text{HNO}_3$  e levadas ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFV para acondicionamento em sala com temperatura controlada (cerca de  $17^\circ$ ), a fim de retardar a decomposição dos componentes orgânicos do percolado durante o período de realização dos ensaios. Amostras também foram encaminhadas para a realização de análises físico-químicas.



Figura 21: Coleta de percolado na lagoa do aterro sanitário do município de Viçosa.

### 3.2.2 Ensaios em laboratório

#### 3.2.2.1 Determinação de índices físicos e da granulometria das amostras de solo

Para caracterização física do solo analisado, foram feitas em triplicata as determinações do teor de umidade segundo a NBR 6457/86 e da massa específica dos sólidos segundo a NBR 6508/84, bem como a análise granulométrica conjunta conforme a NBR 7181/84. Os limites de liquidez foram determinados segundo a NBR 6459/84 enquanto os limites de plasticidade foram determinados segundo NBR 7180/84. Também foi calculado o peso específico natural das amostras, a partir do volume e massa dos corpos de prova, obtidos assim que moldados. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal de Viçosa. Índice de vazios, porosidade e peso específico seco foram calculados a partir de relações matemáticas entre os índices físicos determinados em laboratório.

#### 3.2.2.2 Análises físico-químicas e microbiológica do percolado de aterro sanitário

As análises físico-químicas e microbiológica do percolado utilizado nos ensaios de permeabilidade em laboratório foram realizadas, principalmente, a fim de dar suporte à análise dos resultados e justificar possíveis comportamentos inesperados durante os ensaios, uma vez que as características do líquido podem afetar o comportamento do fluxo através do corpo de prova. Além disso, a caracterização amplia o conhecimento sobre percolados de aterros, permitindo a comparação com resultados obtidos em pesquisas prévias.

As análises foram realizadas em maioria pelo laboratório da empresa Analag Consultoria e Serviços, segundo metodologias do *Standart Methods for Examination of Water and Wasterwater*. Os parâmetros analisados foram: cádmio, chumbo, cobre, cromo, zinco, nitrogênio, nitrogênio amoniacal total, cloretos, *E. coli*, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e sólidos totais. Os parâmetros escolhidos são os sugeridos na Nota Técnica 003 de 2005 da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) intitulada “Programa de monitoramento de efluentes líquidos, águas subterrâneas e águas superficiais associadas a aterros sanitários”. Além disso, foram

analisados alguns parâmetros em campo como detalhado no item 3.2.1.3. As metodologias estão especificadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Metodologias utilizadas na determinação dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos do percolado estudado.

<b>Parâmetros</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Data do ensaio</b>
Cádmio Total (mg/L)	SMEWW 3030 B,D,F/3120	01/10/2012
Chumbo Total (mg/L)	SMEWW 3030 B,D,F/3113	02/10/2012
Cloretos (mg/L)	SMEWW 4500-Cl <sup>-</sup> B	24/09/2012
Cobre Solúvel (mg/L)	SMEWW 3030 B,D,F/3120	28/09/2012
Cromo Total (mg/L)	SMEWW 3030 B,D,F/3120	01/10/2012
DBO (mg/L)	SMEWW 5210 B	22/09/2012
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	SMEWW 4500-NH <sub>3</sub> D	08/10/2012
Sólidos Totais (mg/L)	SMEWW 2540 B	25/09/2012
Zinco Total (mg/L)	SMEWW 3030 B,D,F/3120	01/10/2012
pH	Sonda Multiparâmetros HI 9828 Hanna	21/09/2012
Condutividade elétrica (mS.cm <sup>-1</sup> )		
Temperatura (°C)		

### 3.2.2.3 Ensaios de permeabilidade em laboratório

Os ensaios de condutividade hidráulica com água e percolado de aterro sanitário foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil, utilizando permeômetros, baseando-se em uma adaptação da metodologia proposta pela NBR 14545 - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável (ABNT, 2000). As mudanças foram a utilização de parafina e não apenas argila plástica no espaço entre as paredes do permeômetro e o corpo de prova e o uso de papel filtro ao invés do anel de borracha sobre a camada inferior de areia, além da não utilização da tela metálica. A escolha pelo ensaio com carga variável justifica-se pelo fato de predominarem nos solos da bacia, no horizonte B – em que foram coletadas as amostras -, a fração argila, de acordo com informações de Andrade (2010). Segundo a NBR 14545, esse método é aplicado à corpos de prova com coeficientes de permeabilidade de até 10<sup>-3</sup> cm.s<sup>-1</sup>.

Para cada um dos pontos de coleta de amostras indeformadas, foram analisadas três amostras de solo, para cada um dos dois fluidos de percolação estudados.

Os permeômetros utilizados são constituídos por um cilindro de PVC com aproximadamente 15 cm de diâmetro e 20 cm de altura, acoplado a duas tampas de *nylon*: a tampa inferior é dotada de um orifício que permite, tanto na fase de saturação do corpo-de-prova quanto na fase de leituras, a entrada do líquido percolante; a tampa superior é dotada de um orifício central que permite a saída do líquido, além de um “suspiro”, que permite a saída do ar. Ao orifício da tampa inferior é acoplada, através de uma mangueira, uma bureta de vidro graduada, para medição das cargas hidráulicas. Na montagem dos permeômetros, são empregados o’rings de borracha, que garantem o ajuste e a vedação das tampas, impedindo perda de líquido, o que poderia causar superestimativas das leituras. O nylon e o PVC são materiais praticamente inertes, condição importante para a realização desse tipo de ensaio com líquidos percolantes reativos, com presença de metais e substâncias orgânicas, como é o caso do percolado. A Figura 22 ilustra o conjunto descrito.



Figura 22: Conjunto utilizado para a realização dos ensaios de permeabilidade de carga variável, formado pelo permeômetro e as buretas graduadas.

Primeiramente, foi realizada a moldagem dos corpos-de-prova (Figura 23a) a partir das amostras indeformadas retiradas em campo. Os corpos-de-prova foram moldados com cerca de 10 cm de diâmetro e 12 cm de altura, sendo que várias medidas dessas dimensões foram realizadas com paquímetro, permitindo o cálculo de uma altura e um diâmetro médios e assim, do volume da amostra. Além disso, foi obtida a massa do corpo de prova, permitindo assim o cálculo do peso específico natural do solo.

A montagem dos permeâmetros (Figura 23b) para realização dos ensaios era feita da seguinte forma:

- Primeiramente, colocava-se uma camada de areia na base do permeâmetro, de cerca de 3,0 cm e sobre esta, um anel de papel filtro, a fim de evitar a subida da areia com a passagem de água;
- Depois disso, introduzia-se a amostra de solo no permeâmetro.
- Em suas laterais, entre o corpo de prova e as paredes do equipamento, adicionava-se uma camada de parafina, com cerca de  $\frac{1}{4}$  da altura do corpo de prova, a fim de garantir que a amostra fique na posição vertical;
- Após o resfriamento da parafina, colocava-se sobre ela uma camada de bentonita com aproximadamente metade da altura do corpo de prova e sobre ela, novamente uma camada de parafina, até a altura do topo do corpo de prova. A bentonita tem como objetivo garantir a vedação, impedindo perda de fluido pelas paredes do permeâmetro e garantindo assim, a passagem vertical fluido apenas através do corpo de prova.
- Uma última camada de areia era colocada até o topo do permeâmetro, que por fim era tampado e encaminhado para o ensaio.

O ensaio propriamente dito consiste em saturar o corpo de prova por meio de percolação do fluido no sentido ascendente, efetuada pelo orifício localizado na tampa inferior. O processo é considerado satisfatório quando ocorrer o surgimento de fluido no orifício superior e a percolação se processar sem a presença de bolhas de ar; por isso, mesmo após o surgimento de fluido, o processo de saturação foi mantido após algumas horas. Após a saturação, efetuavam-se sucessivas medidas das cargas hidráulicas, dos tempos decorridos e da temperatura do líquido percolante pelo corpo de prova, sendo o ensaio conduzido até a obtenção de pelo menos quatro leituras relativamente próximas, sem

tendências evidentes, quer de crescimento, quer de diminuição das variações de carga hidráulica.



(a)

(b)

Figura 23: (a) Moldagem de corpo-de-prova para realização de ensaio de permeabilidade. (b) Permeômetro sendo montado para realização de ensaio, com o corpo de prova ao centro.

O cálculo do coeficiente de permeabilidade ( $K$ ) é feito segundo a seguinte expressão:

$$K = \frac{aH}{A\Delta t} \ln \left[ \frac{h_1}{h_2} \right] \quad (8)$$

Em que:

$K$  é o coeficiente de permeabilidade (condutividade hidráulica), expresso de forma exponencial (base 10), com dois algarismos significativos, em centímetros por segundo;  $\Delta t$  é dado pela diferença entre os instantes  $t_2$  e  $t_1$ , em segundos;  $h_1$  é a carga hidráulica no instante  $t_1$ , em centímetros;  $h_2$  é a carga hidráulica no instante  $t_2$ , em centímetros.

Os coeficientes de permeabilidade calculados são corrigidos para temperatura de 20° C, através da expressão:

$$K_{20} = R_T K \quad (9)$$

Em que:

$K_{20}$  é o coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20° C, em centímetros por segundo;  $R_T$  é a relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20° C.

O ensaio realizado com percolado seguiu a mesma metodologia utilizada para a água; entretanto, foi realizado em laboratório organizado para tal (Figura 24), especificamente para o presente estudo, sob condições controladas de temperatura, a qual foi mantida em torno de 20°C durante os ensaios e a 17°C no restante do tempo, a fim de minimizar a decomposição do líquido. Durante os ensaios, o percolado foi armazenado em galões de polipropileno previamente lavados com  $HNO_3$ , sendo homogeneizado com frequência a fim de evitar grande sedimentação dos sólidos presentes no líquido.



(a)

(b)

Figura 24: (a) Aparato utilizado para a realização dos ensaios de permeabilidade com percolado de aterro; (b) Homogeneização do percolado a fim de evitar a sedimentação dos sólidos.

#### 3.2.2.4 Análise dos resultados de condutividade hidráulica

Após tabulação e organização dos resultados obtidos em campo e laboratório, foi feito o cálculo dos valores de condutividade hidráulica segundo cada uma das metodologias

apresentadas anteriormente e posterior correção para a temperatura de 20°C. A permeabilidade intrínseca foi calculada através da Equação 5, a partir dos dados de condutividade hidráulica obtidos com água em laboratório. Para sustentar a interpretação e facilitar a comparação de alguns resultados, foram calculados valores médios, coeficientes de variação (CV) e coeficientes de correlação (r). Todos os cálculos foram realizados utilizando o *software* Microsoft Office Excel 2007.

O coeficiente de variação é calculado através da seguinte equação:

$$CV = \frac{s}{X_m} \times 100$$

Em que: CV é o coeficiente de variação; s é o desvio padrão e X é a média aritmética dos dados.

Quando utilizado CV para avaliar a variabilidade dos resultados, tal variação foi classificada com base nos valores de CV apresentados por Warrick & Nielsen (1980), como baixa (CV < 12%), média (12 ≤ CV ≤ 62%) e alta (CV > 62%).

A interpretação dos coeficientes de correlação (r) basearam-se nos intervalos sugeridos pelo Laboratório de Estatística da Universidade Federal do Paraná (UFPR, 2013). Valores de r (+ ou -) de 0,70 a 0,89 e de 0,90 a 1,00 correspondem a correlações forte e muito forte, respectivamente. Quando r = 1 ou r = -1, as duas variáveis se correlacionam perfeitamente. Ao contrário, se r = 0, não existe nenhuma associação linear.

Por fim, a discussão dos resultados foi feita através de comparação com dados da literatura, buscando a compreensão dos fatores de influência e a corroboração dos resultados obtidos.

### **3.3 Estudo da vulnerabilidade de contaminação dos aquíferos da sub-bacia do Córrego Palmital**

Os mapas necessários à avaliação da vulnerabilidade de contaminação de aquíferos foram produzidos utilizando o *software* Arcgis 10.0. Foram utilizadas para a avaliação da vulnerabilidade da sub-bacia duas metodologias já consagradas, GOD e DRASTIC. A metodologia GOD foi escolhida por sua simplicidade de aplicação. A metodologia

DRASTIC foi escolhida por seu maior grau de detalhamento, sendo mais adequada a estudos de detalhe, ou seja, para maiores escalas, como no caso do presente estudo. Detalhes sobre a utilização de cada uma das metodologias serão descritos a seguir. Antes, entretanto, será descrito o procedimento para a produção do mapa potenciométrico, o qual será utilizado em ambas as metodologias.

### 3.3.1 Elaboração do mapa potenciométrico

Os dados de profundidade do nível d'água foram obtidos a partir da pesquisa de Carvalho (2013), que realizou o monitoramento dos níveis d'água em seis poços (Figura 25) distribuídos na área de estudo durante um ano hidrológico.

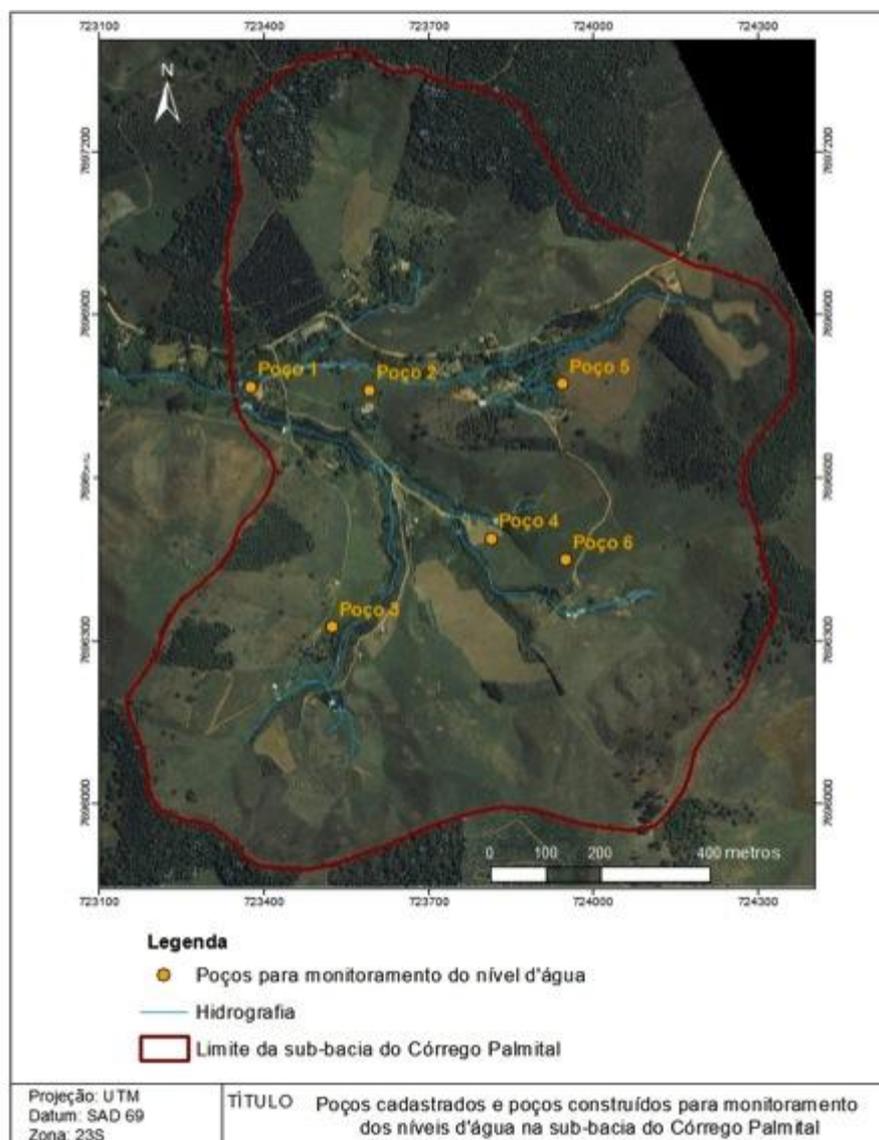


Figura 25: Poços de monitoramento do nível d'água.

Para a elaboração do mapa potenciométrico, baseado na interpolação de dados de profundidade do nível d'água, foram utilizados os valores mínimos de profundidade de superfície freática obtidos no monitoramento dos poços durante o ano, considerando assim o cenário de maior susceptibilidade possível, a fim de não subestimar a vulnerabilidade à contaminação. A identificação, localização e valores de nível d'água mínimos verificados nos poços de monitoramento estão indicados na Tabela 14.

Tabela 14 - Identificação, localização, cota e nível d'água mínimo dos poços de monitoramento instalados na área de estudo.

Ponto	Coordenadas UTM*		Cota (m)	Profundidade mínima do nível estático (m)
	Norte	Este		
Poço 1	7696766,06775	723377,73814	722,624	1,80
Poço 2	7696760,01682	723593,54278	728,781	2,45
Poço 3	7696324,10653	723525,23103	753,380	3,28
Poço 4	7696486,72634	723816,12650	733,869	1,88
Poço 5	7696772,05490	723945,69420	743,648	1,17
Poço 6	7696446,80145	723951,3453	752,701	-

\*SAD 69, Zona 23S

Além disso, somam-se aos dados obtidos nos poços, os dados das nascentes e hidrografia da sub-bacia. Às nascentes, foi atribuída profundidade de nível d'água igual a zero, por ser este o ponto de surgência da água na superfície. Para a inserção dos dados de hidrografia, fez-se a conversão dos vértices das *polylines* que formam a hidrografia para pontos, no *ArcGis 10.0*, utilizando a ferramenta *Feature Vertices to Points (Data Management Tools – Features)*. Assim, obteve-se grande número de pontos da hidrografia, aos quais se atribuiu também profundidade do nível d'água igual a zero; apesar de, na realidade, a profundidade do nível d'água não ser igual a zero na rede de drenagem como ocorre nas nascentes, tratando-se de uma lâmina d'água acima da superfície do terreno, julgou-se coerente fazer tal consideração visto que os pequenos córregos que cortam a bacia são bastante rasos.

Também foram utilizados os dados de três dos furos feitos para a realização dos ensaios de permeabilidade *in situ* (ENS 3, ENS 4 e ENS 5), aos quais atribuíram-se valores de profundidade do nível d'água segundo observações de campo. Para os pontos ENS 4 e ENS 5, localizados em áreas mais altas da bacia, atribuíram-se valores de nível d'água entre 8 m e 15 m, uma vez que durante a execução dos furos atingiu-se a profundidade de 8,0 m sem indício de água. Para estes pontos, existem dois possíveis contextos

hidrogeológicos: o primeiro seria a existência de aquífero livre em solo residual a profundidades relativamente grandes (maior que 8,0 m); o segundo seria a não ocorrência de aquífero livre - como ocorre no Poço 6, no qual atingiu-se o limite do impenetrável durante a execução do furo de sondagem a cerca de 6,0 m de profundidade, sem a presença de zona saturada no solo – sendo que nesse caso pode ocorrer água nas fissuras das rochas subjacentes ao solo residual, mas não se tem informações definitivas sobre essa hipótese. Sendo assim, preferiu-se trabalhar mais uma vez com a situação que causaria maior susceptibilidade aos aquíferos, ou seja, a ocorrência de aquífero livre a profundidades maiores. Foram criados, por fim, diversos pontos, baseando-se no mapa hipsométrico, em altitudes iguais ou maiores que a dos pontos ENS 4 e ENS 5, nas proximidades do divisor de águas, aos quais foram atribuídos, dentro da mesma lógica, valores de nível d'água entre 8,0 m e 15,0 m. As estimativas estabelecidas em relação a esses pontos foram necessárias à produção de um mapa potenciométrico condizente com a situação real, uma vez que a interpolação dos dados apenas dos poços e nascentes resultaria em um mapa infiel, atribuindo valores de lençol freático raso a regiões de elevadas altitudes e declividades, o que seria hidrogeologicamente incoerente e contraditório à experiência e observações de campo.

Com essa base de dados, elaborou-se uma tabela de atributos no *ArcGis 10.0* contendo todos os pontos e seus respectivos níveis d'água (NA). Utilizando a ferramenta *IDW (Spatial Analyst - Interpolation)* com *power* igual a 3 foi realizada a interpolação dos dados de NA, gerando assim o mapa potenciométrico. Segundo ESRI (2007), o *IDW (Inverse distance weighted)* é um método de interpolação que estima valores de células pela média dos valores de uma amostra de pontos vizinhos à célula de processamento. Quanto mais próximo um ponto é do centro da célula cujo valor está sendo estimado, mais influência, ou peso, esta tem no cálculo da média. O *power* define o quão influente os pontos mais próximos serão na estimativa do valor da célula; definindo um valor alto de *power*, maior ênfase é dada nos pontos mais próximos e a superfície resultante é mais detalhada. O valor *default* (padrão) do *Arcgis 10.0* é 2, mas nesse trabalho utilizou-se 3 pois verificou-se que com esse valor o mapa gerado seria mais coerente.

O mapa foi reclassificado segundo as classes de interesse para as metodologias GOD e DRASTIC, como será detalhado a seguir.

### **3.3.2 Avaliação da vulnerabilidade de contaminação de aquíferos segundo a metodologia GOD**

Para a aplicação da metodologia GOD, descrita no item 2.4.2.2, foi feita a classificação da área para os seguintes parâmetros: tipo de aquífero; grau de consolidação e litologia das camadas de cobertura (zona vadosa); e profundidade do nível da água subterrânea.

Para a indexação das profundidades do nível d'água na bacia segundo os intervalos propostos na metodologia GOD, foi feita a reclassificação do mapa potenciométrico no *software ArcGis 10.0*, atribuindo-se o índice proposto segundo a classe do parâmetro. Por fim, foi feita a multiplicação dos três índices, resultando no índice de vulnerabilidade. Aos índices resultantes foram atribuídas classes de vulnerabilidade, segundo classificação da Tabela 11. O resultado final foi o mapa de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos produzido no *software Arcgis 10.0*, a partir das classes obtidas no cálculo.

### **3.3.3 Avaliação da vulnerabilidade de contaminação de aquíferos segundo a metodologia DRASTIC**

Para a aplicação da metodologia DRASTIC, descrita no item 2.4.2.1, foi feita a classificação da área para os sete parâmetros que compõe o índice final, como descrito a seguir. Segundo Aller *et al.* (1987) cada parâmetro foi dividido em faixas de valores ou classes relevantes, aos quais foram atribuídos índices de 1 a 10, que descrevem sua importância relativa no que se refere ao potencial de poluição.

**Profundidade do nível d'água (nível estático) - D:** em um aquífero livre, tal profundidade refere-se à distância até a superfície freática. No caso de aquífero confinado, a profundidade é a distância ao topo do aquífero. Trata-se de um parâmetro importante pois determina a espessura de material que um contaminante tem que percorrer para atingir o aquífero. De modo geral, maiores profundidades até a água implicam em maiores tempos de transporte até o aquífero e maior atenuação da carga contaminante. A esse parâmetro atribui-se peso 5 (ALLER *et al.*, 1987). Os intervalos

de profundidade do nível estático e respectivos índices ( $D_i$ ) considerados no método são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Faixas de profundidade do nível d'água e respectivos índices de avaliação.

<b>Profundidade do nível estático (m)</b>	<b>Índice de Avaliação (<math>D_i</math>)</b>
0 - 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2
> 30,5	1

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

O mapa potenciométrico da área de estudo foi classificado segundo as faixas estabelecidas na Tabela 15 e a elas foi atribuído o respectivo índice de avaliação utilizando a ferramenta *Reclassify* do software *Arcgis 10.0*.

**Recarga do aquífero - R:** representa a quantidade de água proveniente da precipitação que infiltra através do solo e chega anualmente ao aquífero. A recarga condiciona o transporte de um poluente e a disponibilidade de água para os processos de dispersão e diluição tanto na zona vadosa como na zona saturada (ALLER *et al.*, 1987). Um elevado volume de recarga contribui na diminuição do potencial de poluição ao favorecer a diluição das substâncias poluentes; por outro lado, considera-se que uma recarga elevada aumenta a lixiviação dos contaminantes para o aquífero (MACHADO, 2011). A metodologia considera que quanto maior a recarga, maior o potencial de poluição. Na Tabela 16, são mostrados os intervalos de recarga e os respectivos índices de avaliação ( $R_i$ ) propostos por Aller *et al.* (1987). A esse parâmetro atribui-se peso 4.

Os valores de recarga do aquífero na área de estudo foram calculados através do Método da Variação do Nível Freático por Carvalho (2013). A definição do índice de avaliação baseou-se na recarga média obtida através dos valores calculados para quatro poços de monitoramento instalados na sub-bacia, igual a 233 mm/ano. As áreas da sub-bacia com declividade de até 30% - classificadas, de acordo com EMBRAPA (2006), como relevo

forte ondulado - foram classificadas segundo a recarga média total; já às áreas com declividade acima de 30% foi atribuído índice de avaliação inferior ao da classe anterior, uma vez que nesses pontos é marcante o escoamento superficial, diminuindo consideravelmente a infiltração de água no solo e assim, a recarga do aquífero.

Tabela 16 - Faixas de recarga do aquífero e respectivos índices de avaliação.

Recarga do Aquífero (mm/ano)	Índice de Avaliação ( $R_i$ )
< 51	1
51 - 102	3
102 - 178	6
178 - 254	8
> 254	9

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

**Material do aquífero – A:** exerce influência sobre a mobilidade do contaminante, uma vez que governa o sistema de escoamento da água no aquífero, que em conjunto com a condutividade hidráulica e o gradiente hidráulico, determinam o tempo disponível para a ocorrência dos processos de atenuação (ALLER *et al.*,1987; MACHADO, 2011). A Tabela 17 lista os materiais do aquífero e respectivos índices, estabelecidos segundo a capacidade de atenuação do potencial poluidor. Cada material tem um intervalo de valores. A escolha do valor adequado deve se basear em informação específica sobre o material do aquífero. Se esta informação não existir, deve-se utilizar o índice típico, indicado entre parênteses. A esse parâmetro atribui-se peso 3.

Tabela 17 - Tipos de material do aquífero e os respectivos valores do índice de avaliação.

Material do aquífero	Índice de Avaliação ( $A_i$ )
Xisto argiloso, argilito	1 – 3 (2)
Rocha metamórfica / ígnea	2 – 5 (3)
Rocha metamórfica / ígnea alterada	3 – 5 (4)
Arenito, calcário e argilito estratificado	5 – 9 (6)
Arenito maciço / Calcário maciço	4 – 9 (6)
Areia e cascalho	4 – 9 (8)
Basalto	2 – 10 (9)
Calcário carstificado	9 – 10 (10)
( ) Índice típico a atribuir	

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

**Tipo de solo - S:** refere-se ao material da porção superior e mais alterada da zona vadosa, com uma espessura normalmente inferior a 2 m, caracterizada por grande atividade biológica. O tipo de solo tem um impacto significativo sobre o volume de recarga e potencial atenuador da poluição. Espessura, textura, tipo de argila presente e teor de matéria orgânica são algumas das propriedades do solo que condicionam o potencial de poluição (ALLER *et al.*, 1987). Na Tabela 18 são mostrados os 11 diferentes tipos de solos aos quais os autores da metodologia atribuíram índices de avaliação, *Si*, entre 1 e 10, em função das propriedades supracitadas. A esse parâmetro atribui-se peso 2.

Tabela 18 - Tipos de solo e respectivos valores do índice de avaliação.

<b>Tipos de solo</b>	<b>Índice de Avaliação (<i>Si</i>)</b>
Fino ou ausente	10
Cascalho	10
Areia	9
Turfa	8
Argila agregada ou expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
“Muck” (solo predominantemente orgânico)	2
Argila não agregada e não expansível	1

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

A classificação da área de estudo em relação a esse parâmetro foi feita segundo a classificação pedológica da sub-bacia, baseando-se na textura dos solos descrita em Andrade (2010) e nos resultados dos ensaios de granulometria do presente estudo.

**Topografia - T:** refere-se à declividade do terreno em termos percentuais. Este parâmetro condiciona a probabilidade de um poluente escoar superficialmente ou permanecer à superfície durante tempo suficiente para se infiltrar. Além disso, a declividade também influencia o desenvolvimento do solo e assim, sua capacidade de atenuação (ALLER *et al.*, 1987). O aumento na declividade do terreno diminui a possibilidade de infiltração do contaminante juntamente com a água escoada e, assim, da lixiviação para o aquífero (MACHADO, 2011). Aller *et al.* (1987) definiram as

classes de declividade e os respectivos índices de avaliação,  $T_i$ , para este parâmetro, ao qual atribui-se peso 1, conforme descrito na Tabela 19.

Tabela 19 - Classes de declividade e respectivos valores do índice de avaliação.

<b>Declividade (%)</b>	<b>Índice de Avaliação (<math>T_i</math>)</b>
< 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
> 18	1

Fonte: Aller *et al.*, 1987.

A classificação da área segundo os intervalos definidos para essa metodologia foi feita a partir do mapa de declividades da área. O mapa de declividades foi produzido utilizando o *software Arcgis 10.0*, através do comando *Slope*, tendo como entrada o modelo digital de elevação (MDE) da área. O MDE, por sua vez, foi gerado através do comando *Topo to raster*, a partir do limite, das curvas de nível e da hidrografia da sub-bacia.

**Influência da zona vadosa - I:** o tipo do meio da zona vadosa, incluindo o horizonte típico do solo e a rocha ou solo acima do nível freático, determina a atenuação característica do material, inclusive no que se refere ao tempo disponível para a ocorrência de processos como biodegradação, filtração mecânica, reações químicas, volatilização e dispersão. A esse parâmetro é atribuído peso 5 (ALLER *et al.*, 1987). A Tabela 20 mostra os principais tipos de materiais da zona vadosa e seu respectivo índice de avaliação, segundo sua importância nos processos de atenuação do potencial de poluição dos contaminantes.

A atribuição do índice de avaliação para esse parâmetro baseou-se na descrição dos perfis e textura dos solos descrita em Andrade (2010) e nos resultados dos ensaios de granulometria e observações realizadas em campo no presente estudo.

Tabela 20 - Tipos de material da zona vadosa e respectivos valores do índice de avaliação segundo sua influência na atenuação do potencial de contaminação.

Influência da Zona Vadosa	Índice de Avaliação ( $I_i$ )
Camada confinante	1
Argila / Silte	2 - 6 (3)
Xisto argiloso, argilito	2 - 5 (3)
Calcário	2 - 7 (6)
Arenito, calcário e argilito estratificado	4 - 8 (6)
Areia e cascalho com percentagem significativa de silte e argila	4 - 8 (6)
Rochas metamórficas e ígneas	2 - 8 (4)
Areia e cascalho	6 - 9 (8)
Basalto	2 - 10 (9)
Calcário carstificado	8 - 10 (10)
( ) Índice típico a atribuir	

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

**Condutividade Hidráulica do Aquífero - C:** esse parâmetro está relacionado com a taxa de fluxo da água subterrânea, influenciando assim, o movimento de um contaminante a partir do ponto em que entra no aquífero. A esse parâmetro é atribuído peso 3 (ALLER *et al.*, 1987).

Os intervalos mostrados na Tabela 21 e respectivos valores de avaliação,  $C_i$ , basearam-se nas classes estabelecidas por Aller *et al.* (1987), mas sofreram algumas modificações visando maior conservadorismo na avaliação de vulnerabilidade, além da aplicabilidade, uma vez que originalmente a metodologia estabelece valores em galões/dia/pé<sup>2</sup>, unidade pouco usual no Brasil e fora do sistema internacional.

Tabela 21 - Intervalos de condutividade hidráulica e respectivos índices de avaliação.

Condutividade Hidráulica do Sistema Hidrogeológico ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	Índice de Avaliação ( $C_i$ )
$< 5,0.10^{-4}$	1
$5,0.10^{-4} - 5,0.10^{-3}$	2
$5,0.10^{-3} - 1,0.10^{-2}$	3
$1,0.10^{-2} - 5,0.10^{-2}$	5
$5,0.10^{-2} - 9,0.10^{-1}$	8
$> 1,0.10^{-1}$	10

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

A atribuição do índice de avaliação para este parâmetro baseou-se na média dos dados de condutividade hidráulica obtidas em campo através dos ensaios em furos de sondagem e do *slug test*, realizado em quatro dos poços monitorados por Carvalho (2013). Os dados resultantes do *slug test* foram utilizados também por serem realizados diretamente na zona saturada, tratando-se da condutividade hidráulica do aquífero, como requerido pelo método DRASTIC.

### 3.3.3.1 Elaboração do mapa de vulnerabilidade segundo a metodologia DRASTIC

O mapa de vulnerabilidade de contaminação de aquíferos segundo o método DRASTIC foi produzido utilizando álgebra de mapas, a partir da ferramenta *Raster Calculator* do *software ArcGis 10*. A equação utilizada para o cálculo do índice de vulnerabilidade DRASTIC é:

$$\text{Índice DRASTIC} = D_p D_i + R_p R_i + A_p A_i + S_p S_i + T_p T_i + I_p I_i + C_p C_i$$

Em que:

$D_i, R_i, A_i, S_i, T_i, I_i, C_i$  são os índices de avaliação atribuídos aos parâmetros avaliados e  $D_p, R_p, A_p, S_p, T_p, I_p, C_p$  são os pesos correspondentes a cada um dos parâmetros.

Por fim, após o cálculo dos índices, a vulnerabilidade na área foi classificada segundo a Tabela 9, utilizando a ferramenta *Reclassify* do *software ArcGis 10.0*.

## 4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 Localização e características gerais da hidrografia

A sub-bacia em estudo (Córrego Palmital) está localizada na zona rural do município de Viçosa, pertencente à Zona da Mata de Minas Gerais. Compreende uma área de aproximadamente 125,6 ha e está inserida na Bacia do ribeirão São Bartolomeu. A bacia do ribeirão São Bartolomeu localiza-se na sub-bacia do Rio Turvo Sujo, pertencente à sub-bacia do Rio Piranga, por sua vez localizada na Bacia do Rio Doce (Figura 26).

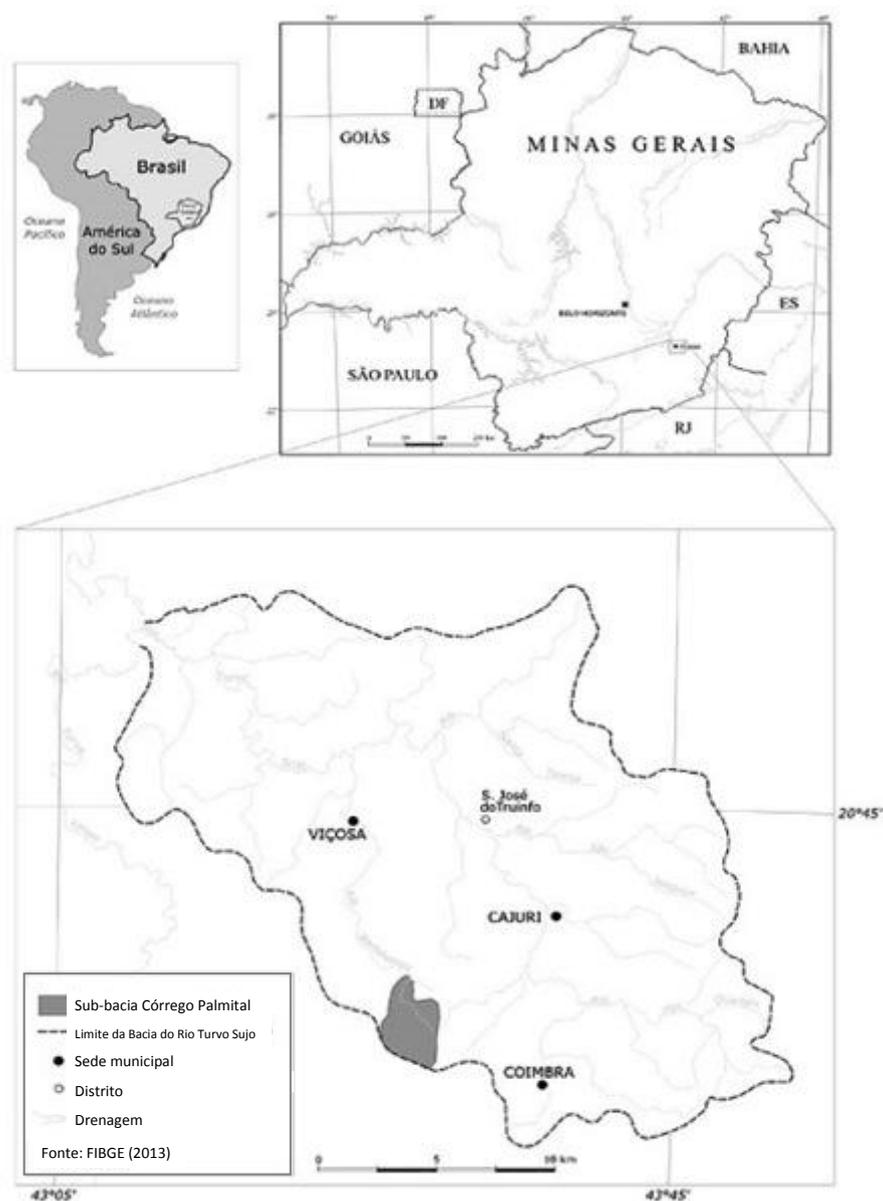


Figura 26: Localização da sub-bacia do Córrego Palmital dentro do contexto regional.  
Fonte: Fernandes *et al.* (2007).

A sub-bacia do Córrego Palmital inicialmente definida por Fernandes (1996) localiza-se entre os meridianos de 42°50'W e 42°52'W e entre os paralelos de 20°49'S e 20°51'S, na porção média da bacia do Rio Turvo Sujo e totaliza 175 ha.

## **4.2 Clima**

A região apresenta clima do tipo Cwa, de acordo com a classificação de Köppen, com inverno seco e verão chuvoso, temperaturas médias do mês mais frio inferior a 18°C e do mês mais quente superior a 22°C, respectivamente (CARVALHO FILHO, 1989). A temperatura média anual é de 19,9°C com precipitação média anual de 1324 mm e umidade relativa do ar média de 82, 1%, segundo dados coletados na Estação Meteorológica de Viçosa de 1991 a 1994 (FERNANDES, 1996).

## **4.3 Hidrografia local**

Segundo a classificação de Jorge & Uehara (1998) a sub-bacia apresenta uma rede de drenagem exorréica, drenagem aberta que se destina a rios perenes e periódicos, pouco ramificada e do tipo dendrítica. Os cursos d'água existentes na sub-bacia são, de modo geral, rasos e estreitos (ANDRADE, 2010).

Foram identificadas na sub-bacia, nos trabalhos de Carvalho (2013) e Andrade (2010), 19 nascentes, que nortearam o mapeamento da rede hidrográfica local. As nascentes e a rede hidrográfica podem ser observadas na Figura 27 a seguir.

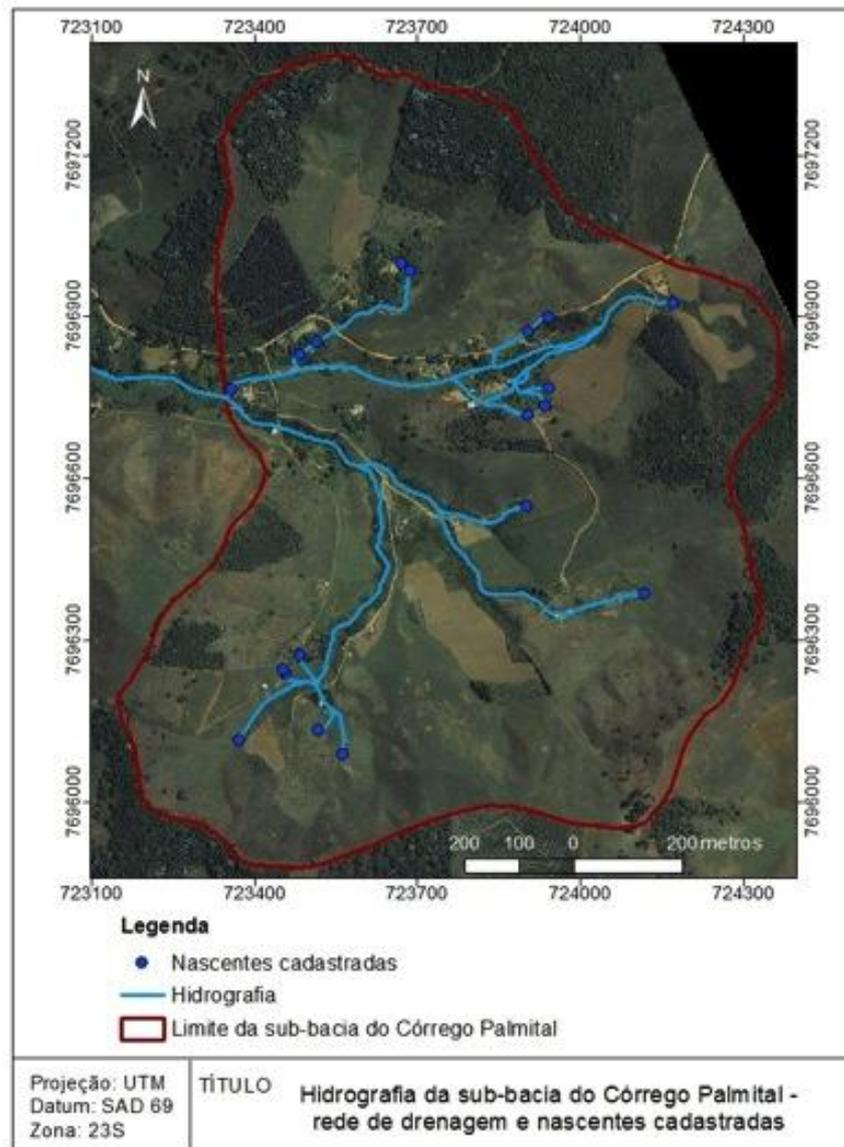


Figura 27: Nascentes e rede de drenagem da área de estudos.

#### 4.4 Geologia e hidrogeologia

A área de estudo está embasada em rochas do Complexo Cristalino, do Pré-cambriano Indiviso, compreendendo gnaisses e migmatitos diversos (BRASIL, 1984). Ocorre, esporadicamente, presença de diques de diabásio e corpos remanescentes de anfibolitos (FERNANDES, 1996). A geologia local insere-se na Província Mantiqueira (FERNANDES *et al.*, 2007), na qual estão inseridos diversos litotipos, dentre os quais o Complexo Mantiqueira, onde localiza-se a presente área de estudo. A Figura 28 representa o mapa geológico da área e mostra a ocorrência do Complexo Mantiqueira e

dos Sedimentos Aluvionares de Idade Quaternária, estes localizados ao longo da drenagem.

O Complexo Mantiqueira é constituído por anfibólio ortognaisses de aspecto bandado, por vezes migmatíticos, exibindo comumente intercalações de rochas anfibolíticas. Na área são registrados gnaisses bandados que apresentam porções quartzo feldspáticas alternadas com porções máficas, ricas em biotita e/ou hornblenda. A alternância de bandas félsicas (claras) e máficas (escuras) é uma característica marcante das rochas do Complexo Mantiqueira. Corpos de anfibolito concordantes com a foliação/bandamento dos gnaisses são frequentes. Microscopicamente, as rochas do Complexo Mantiqueira possuem granulação média, textura granoblástica e subordinadamente nematoblástica. São constituídas por anfibólio, plagioclásio, biotita e quartzo (CPRM, 2007).

Sedimentos Quaternários ocorrem ao longo dos vales, constituindo depósitos aluvionares de caráter argiloso, argilo-arenoso ou arenoso, representados por terraços e leitos maiores de deposição mais recente (QUINTEIRO, 1997).

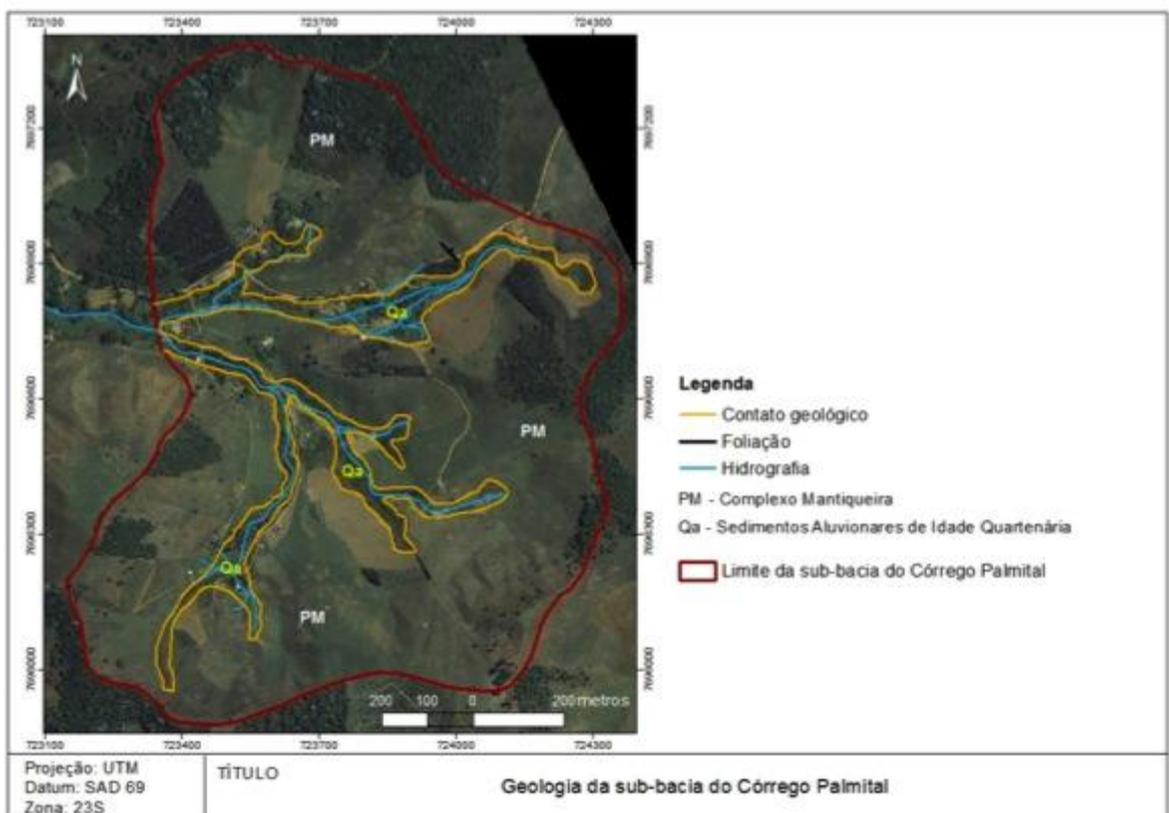


Figura 28: Geologia da área de estudos.

Segundo Andrade (2010), o gnaissé é o principal tipo de rocha presente na bacia em estudo, cuja geologia é bastante homogênea. Essa rocha é encontrada em toda a área de estudo em diversos estágios de alteração intempérica, com predomínio dos materiais mais intemperizados (Figura 29). De fato, de acordo com Lopes & Muggler (1989), a geologia de Viçosa caracteriza-se pelo predomínio de biotita-gnaisses, biotita-anfibólio-gnaisses e biotita-anfibólio-granada-gnaisses, tendo, subordinadamente intercalações de quartzitos, xistos, anfibolitos e rochas cálcio-silicáticas. A delimitação desses litotipos em mapa, entretanto, segundo PSA (2008), é extremamente dificultada pela escassez de afloramentos de rocha sã na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu.



Afloramento de gnaissé extremamente alterado, com nível de quartzo leitoso bem preservado, micáceo, de cor rósea, com níveis caulinizados de cor branca.

Corte mostrando solo residual jovem de gnaissé (SRJ).

Figura 29: Exemplos de afloramentos de gnaissé na área de estudo (ANDRADE, 2010).

A região está inserida hidrogeologicamente no Mapa de Províncias Hidrogeológicas do Brasil na Sub-província ESCUDO ORIENTAL 6-b – SUDESTE (Figura 30). Na Província Escudo Oriental predominam rochas cristalinas, principalmente gnaissé, migmatitos, xistos, quartzitos e granitos (MENTE *et al.*, 1980), sendo o meio aquífero caracterizado pelas fissuras e diáclases interconectadas resultantes dos esforços tectônicos sofridos. Na porção sudeste da província, o potencial hidrogeológico é fraco a médio (MME/BIRD, 2009), mais favorável que a porção nordeste, graças ao espesso manto de decomposição (MENTE *et al.*, 1980).

Na área de pesquisa ocorrem dois tipos de aquíferos: os granulares e os fraturados. Os aquíferos do tipo granular livre ou em parte confinados serão mais detalhados por serem de interesse no presente trabalho. Os aquíferos granulares na área são representados por uma variedade de sedimentos inconsolidados, compostos por coberturas coluvionares e aluvionares (Formações Quaternárias Aluviais) e pelos solos de alteração das rochas metamórficas pré-Cambrianas. Estes aquíferos têm reduzida expressão em termos regionais, mas na área de estudo compõem a principal fonte de água para os habitantes, sendo extraídas quantidades significativas desse recurso através de poços, localizados nos solos de alteração, nos quais a água subterrânea encontra-se em condições favoráveis de captação.



Figura 30: Mapa de províncias hidrogeológicas do Brasil. Fonte: MMA (2013).

#### 4.5 Geomorfologia e relevo

As serras e planaltos do leste e sudeste mineiros inserem-se no planalto Atlântico do Brasil Sudeste, uma das unidades integrantes do planalto Brasileiro. Tal segmento do relevo constitui um planalto cristalino rebaixado, na qual atuaram, de forma bastante intensa, processos morfogenéticos tropicais predominantemente químicos. As feições morfológicas observadas na paisagem denotam, entretanto, forte influência das variáveis geológicas (litologias, falhamentos e foliações), bem como de oscilações

climáticas mesozóicas a cenozóicas, que levaram à elaboração de superfícies cíclicas de erosão (PAIVA, 2006).

A sub-bacia faz parte do Planalto de Viçosa, que compreende uma área deprimida, em forma de sela, situada entre o Planalto do Alto Rio Grande (Serra da Mantiqueira) e os prolongamentos da Serra do Caparaó. A região tem por característica um relevo predominantemente forte ondulado e montanhoso (“Mar de Morros”), com encostas de perfil convexo-côncavo embutidos em vales de fundo chato, formados por terraços e leitos maiores, onde meandram pequenos córregos (CORRÊA, 1984). A área de estudo apresenta altimetria variando entre 720 a 860 m, em média (Figura 31). A partir da classificação do relevo adotada pela EMBRAPA (2006), com base nas declividades, apenas 1,81% da área de estudo apresenta relevo plano (0 – 3%), enquanto 6,97% apresenta relevo suave ondulado (3 – 6%), 31,92% corresponde ao relevo ondulado (6 – 20%), 43,84% apresenta relevo forte ondulado (20-45%), 14,97% apresenta relevo montanhoso (45-75%) e 0,49% se encontra em relevo escarpado (>75%) (Figura 32).

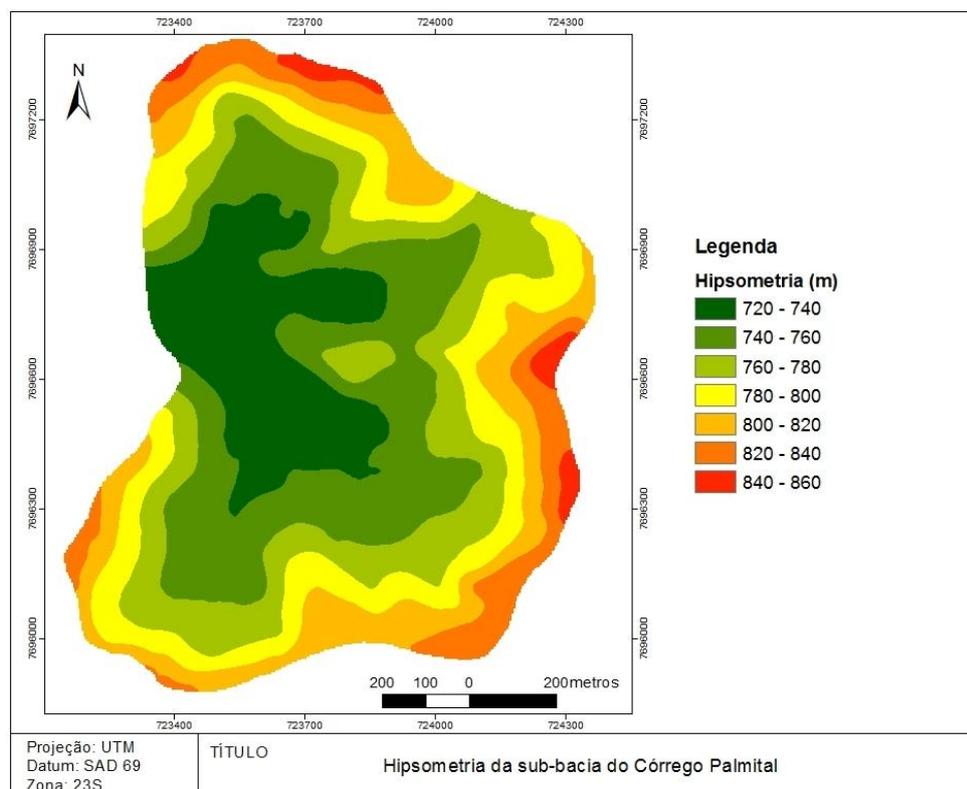


Figura 31: Mapa hipsométrico da área de estudo.

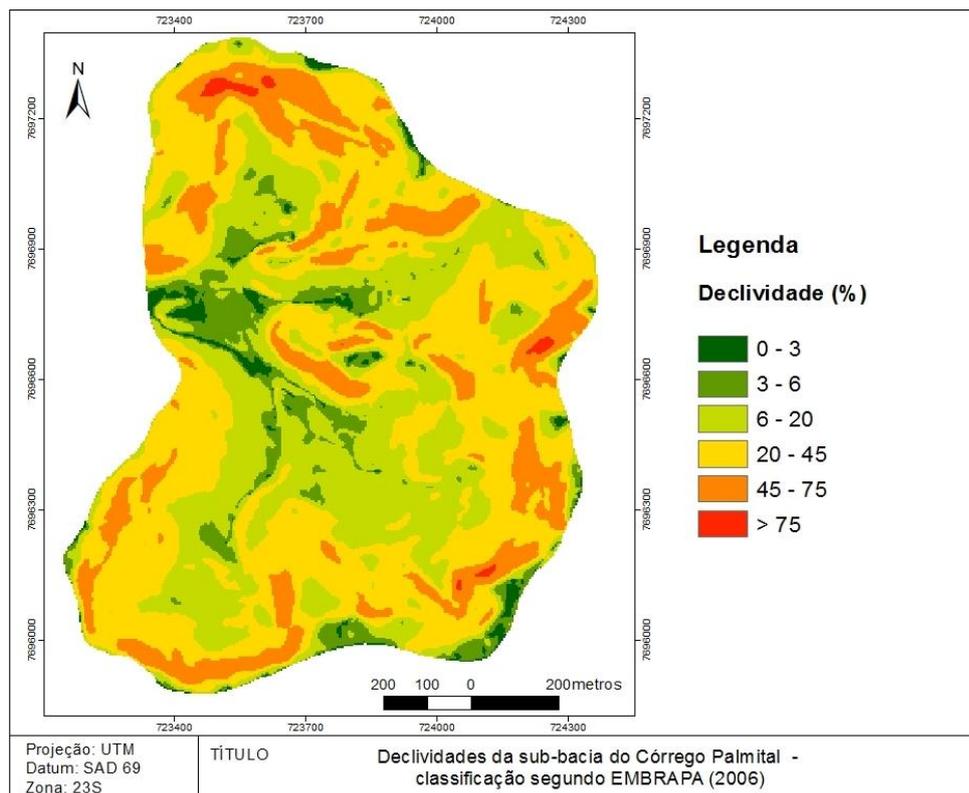


Figura 32: Mapa de declividade da área de estudos.

#### 4.6 Caracterização dos solos

Do ponto de vista geotécnico, ocorrem na bacia solos residuais de gnaise, maduros e jovens, com espessura variada e de natureza predominantemente argilosa. A tendência argilosa dos solos da região foi verificada em diversos trabalhos como Rezende (1971), Baruqui (1982), Corrêa (1984) e Carvalho Filho (1989). Carvalho (2013), ao realizar um furo de sondagem em um terraço da bacia encontrou uma camada de 30 m de solo residual de gnaise, em diferentes graus de alteração até o encontro com o topo rochoso.

Segundo Azevedo (1998), o perfil de solo típico da Microrregião de Viçosa apresenta-se com um horizonte B com estruturação, em geral, microgranular e, em alguns casos, em blocos subangulares. A textura dos solos é bastante variável, com perfis porosos e permeáveis e propriedades geotécnicas variáveis. As frações argilosas desses solos nas condições prevaletentes do planalto de Viçosa são predominantemente caulínicas e oxídicas. Abaixo dessa camada superficial, surge o horizonte C, uma camada que diferencia-se pela cor rosada ou mais avermelhada, onde há aumento dos teores de silte

e areia, bem como presença de partículas micáceas e flocos grandes de caulinita pseudomorfa de biotita.

Do ponto de vista pedológico, segundo Andrade (2010), ocorrem na sub-bacia: Latossolo Vermelho-Amarelo, dominante na paisagem; Argissolo Vermelho-Amarelo, com ocorrência nos vales da bacia; e Cambissolo Háplico, que ocorre em manchas, em pontos de relevo fortemente ondulado. O mapa semidetalhado dos solos da sub-bacia estudada é apresentado na Figura 33. Os Latossolos Vermelho-Amarelo cobrem 56% da área de estudo, enquanto os Argissolos Vermelho-Amarelo e o Cambissolo Háplico cobrem 25% e 19% da área, respectivamente. Uma descrição das classes de solo é apresentada a seguir.

#### **4.6.1 Latossolos**

Esta classe, predominante na área de estudo (Figura 34), compreende solos com horizonte B latossólico, ricos em sesquióxido de ferro e alumínio, de textura média a muito argilosa, imediatamente abaixo de qualquer dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, exceto hístico (EMBRAPA, 2006). São predominantemente constituídos por argilas do tipo caulinita (IBGE, 2005).

São solos espessos, muito porosos, ácidos, poucos férteis, com fraca distinção entre os horizontes e com baixa saturação de bases, distróficos ou alumínicos. Geralmente, variam de fortemente a bem drenados. A estrutura é granular fraca a moderadamente desenvolvida, sendo friável a muito friável. São solos muito evoluídos, em avançado estágio de intemperização, como resultado de intensas transformações no material de origem através da atuação expressiva de processo de latolização, sendo pobres em minerais primários facilmente intemperizáveis (EMBRAPA, 2006).

Sua elevada permeabilidade está associada à alta porosidade e à uma maior resistência aos processos erosivos. Apesar de sua baixa fertilidade, são muito utilizados na agricultura em razão de relevo pouco movimentado no qual normalmente ocorre e de suas boas propriedades físicas. Os Latossolos Vermelho-Amarelos, os quais ocorrem na área, são bem drenados, pouco férteis e possuem cores vermelho-amareladas; sua profundidade é de mais de 3 m (SHINZATO *et al.*, 2008).

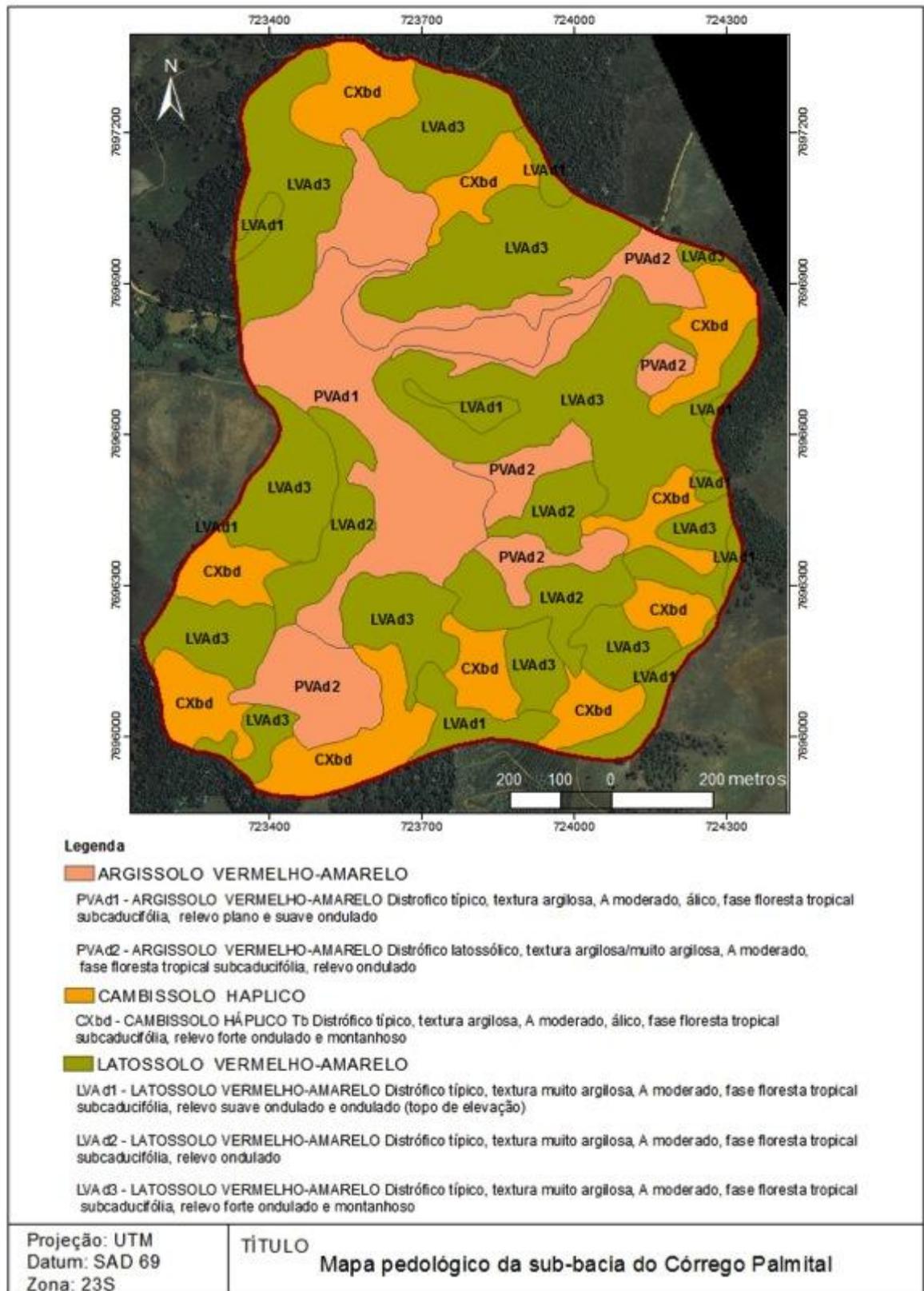


Figura 33: Mapa semidetalhado dos solos da sub-bacia. Adaptado de Andrade (2010).



(a)

(b)

Figura 34: Presença de Latossolo na área de estudo. (a) Perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo (ANDRADE, 2010); (b) Cafezal em Latossolo, no entorno do perfil.

#### 4.6.2 Argissolos

Essa classe (Figura 35) cobre 26% da área de estudo e constitui solos minerais, apresentando horizonte B diagnóstico textural (Bt), não hidromórficos, argila de atividade baixa, e profundidade variável. Os solos desta classe têm como característica marcante um aumento do teor de argila do horizonte superficial para o subsuperficial. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt, sempre havendo aumento de argila daquele para este (EMBRAPA, 2006). Geralmente essa mudança é acompanhada de boa diferenciação também de cores e características físicas e químicas. O contraste dos teores de argila entre os horizontes A e B pode conferir uma baixa permeabilidade (FRANCO, 2010).

A saturação por bases nos Argissolos, em geral, é baixa, com exceção dos horizontes eutróficos, os quais possuem saturação por bases superior a 50%. Os valores de pH estão normalmente abaixo de 6,4, indicando caráter ácido (FRANCO, 2010). A argila constituinte é principalmente do tipo caulinita (IBGE, 2005). Ocorrem frequentemente associados a Latossolos no território nacional (SHINZATO *et al.*, 2008), o que também é evidente na área de estudo.



(a) (b)

Figura 35: Presença de Argissolo na área de estudo. (a) Perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo (ANDRADE, 2010); (b) Área de entorno do perfil, em terraço de elevação.

#### 4.6.3 Cambissolos

Esta classe (Figura 36), resultante de pedogênese pouco avançada, é constituída por material mineral, com horizonte B incipiente, subjacente a horizonte A ou hístico. A drenagem varia de acentuada a bem drenado. Muitas vezes são pedregosos, cascalhentos e moderadamente rochosos. Apresentam alta a baixa saturação de bases e desenvolvem-se em relevo forte ondulado. São solos que apresentam grande variabilidade no que tange a profundidade, desde rasos a profundos, e também em relação às demais características (EMBRAPA, 2006).

Apresentam em geral pequeno desenvolvimento e teores de silte mais elevados que em outros solos, sendo por isso mais susceptível à erosão. O Cambissolo Háplico, que ocorre na área, possui profundidade relativa menor que 2 m (SHINZATO *et al.*, 2008).

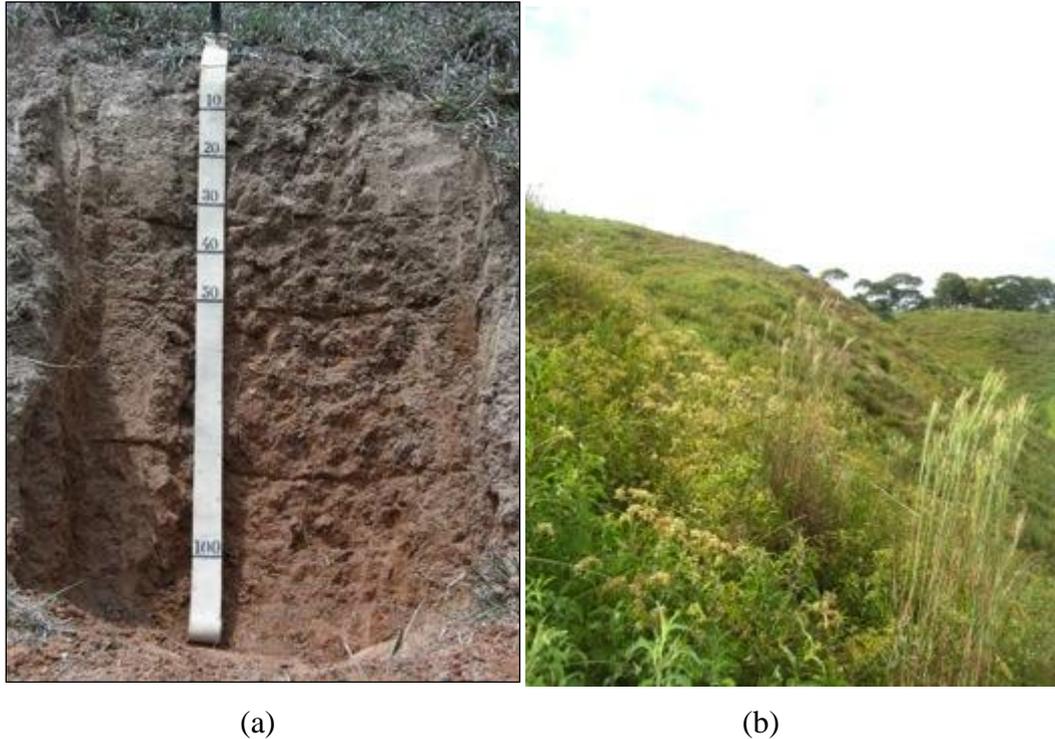


Figura 36: Presença de Cambissolo na área de estudo. (a) Perfil de Cambissolo Háplico (ANDRADE, 2010); (b) Arredores do perfil de Cambissolo, mostrando a ocorrência em pastagem, em relevo fortemente ondulado.

#### 4.7 Usos do solo

A área de estudo caracteriza-se pela presença de propriedades rurais de pequeno porte, em que predominam a agricultura, o cultivo de eucalipto e a criação de gado de corte e de leite e de pequenos animais. Os usos do solo detectados na sub-bacia foram pastagem, mata, eucalipto, café, milho, feijão, pomar, cana de açúcar e taboal (Figura 37). Destaca-se a predominância das pastagens na paisagem, característica típica da Zona da Mata mineira.

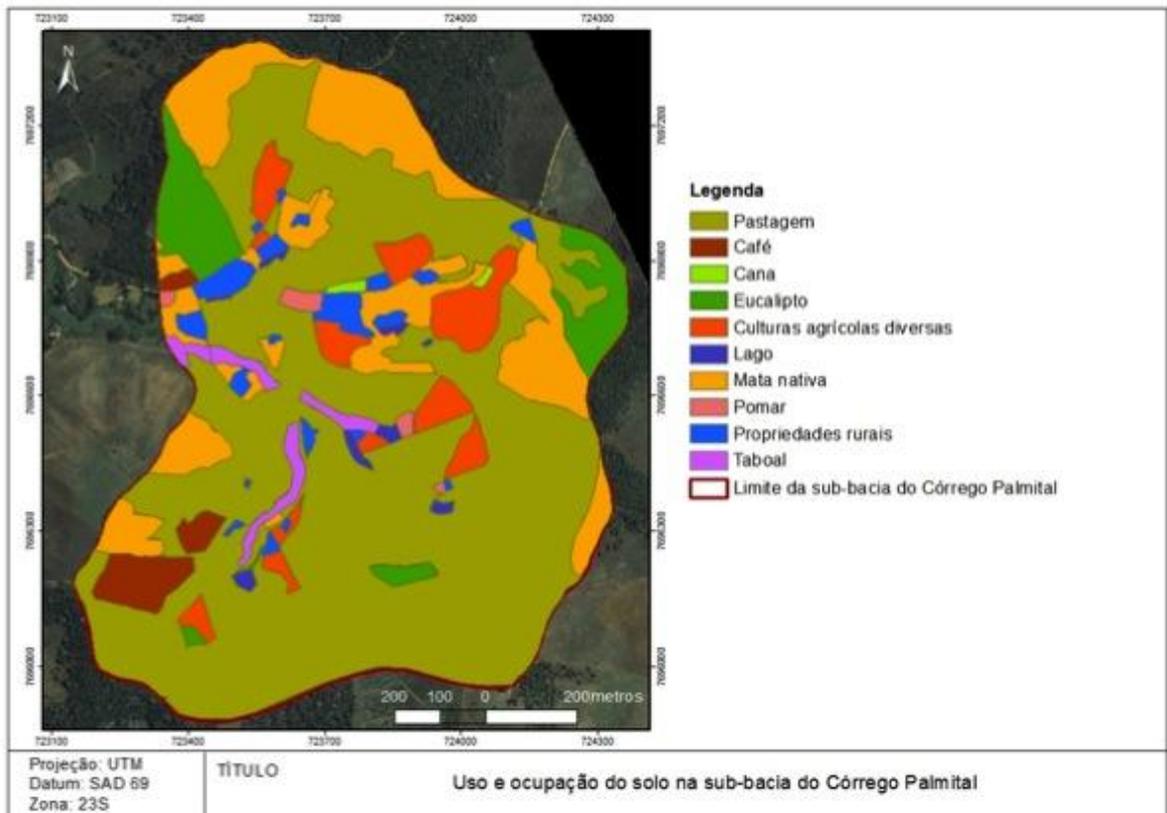


Figura 37: Uso e ocupação do solo na área de estudo. Adaptado de Andrade (2010).

Cerca de 66% da área estudada é coberta por pastagem, 15% por mata, 7% por eucalipto, 5% por café, 5% por milho e os 2% restantes cobertos por feijão, cana-de-açúcar, pomar e taboa (ANDRADE, 2010). A baixa produtividade dos solos das porções mais elevadas é fator limitante às culturas anuais, fazendo com que esses solos sejam poucos utilizados para a agricultura (FERNANDES, 1996), sendo comum a presença de pastagem nesses pontos, como observado durante os trabalhos de campo, especialmente de capim-gordura e capim colômbio. De acordo com Córrea (1984), no Planalto de Viçosa, onde está inserida a área de estudo, nos solos das elevações verificam-se poucas atividades, tais como alguns reflorestamentos com eucaliptos, pecuária e presença esparsa de lavouras de café, enquanto nos vales é evidenciado o desenvolvimento das atividades agropecuárias e habitação; tais aspectos relativos ao uso dos solos são ainda hoje claramente evidenciados na área de estudos (Figura 38).



Figura 38: Vista de parte da paisagem da área de estudo, ilustrando seus principais usos do solo.

#### **4.8 Poços de captação e usos da água**

Os principais usos da água identificados foram: abastecimento humano, dessedentação de animais e irrigação de hortaliças. A água para tais usos é predominantemente obtida através de poços (cisternas), uma vez que a rede de abastecimento municipal não contempla a área. Na área de estudos foram identificados 18 poços de captação de água subterrânea, cuja distribuição é demonstrada na Figura 39, juntamente com os poços construídos para monitoramento do nível d'água (NA) em trabalho de Carvalho (2013). Os dados de NA serão necessários no presente trabalho para a análise de vulnerabilidade utilizando a metodologia GOD.

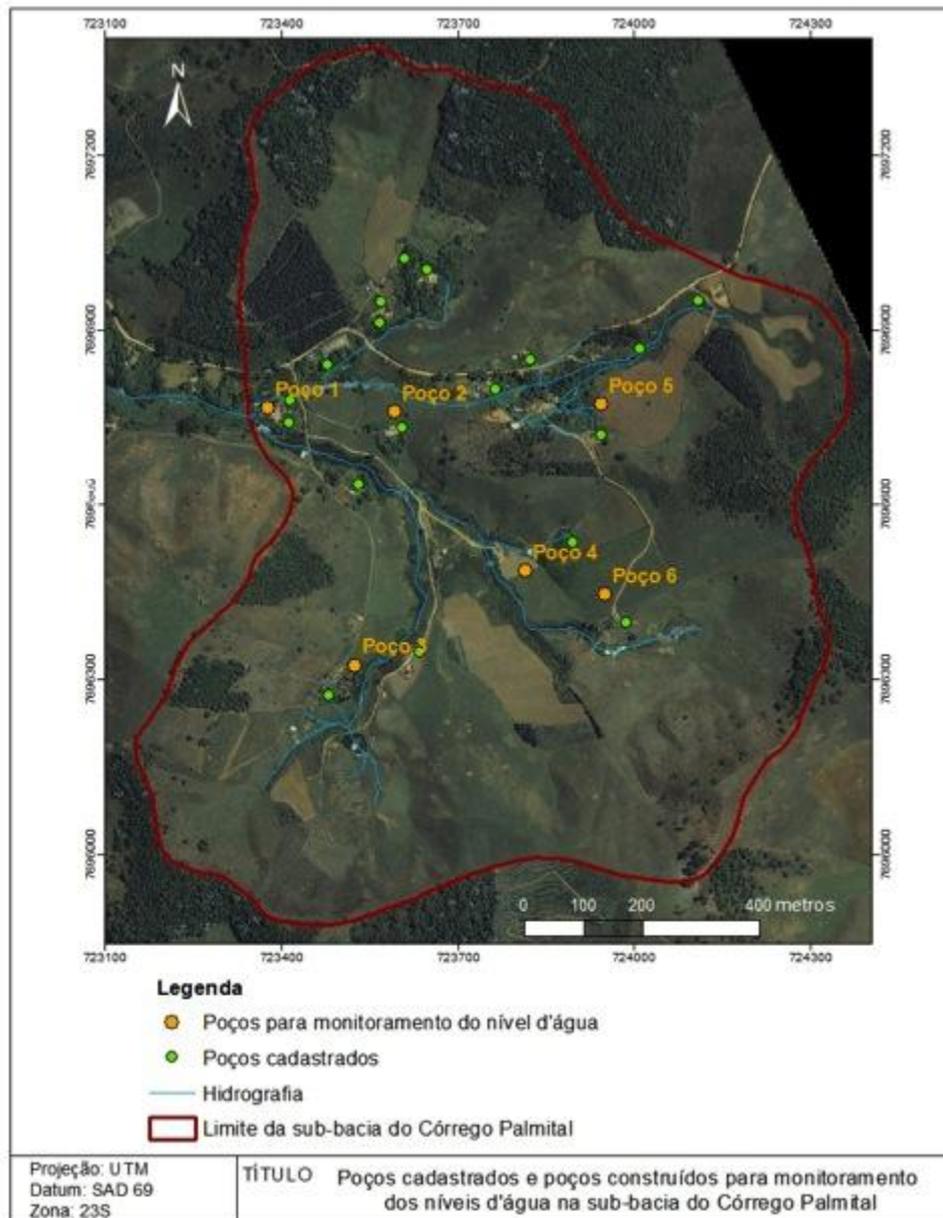


Figura 39: Poços existentes na área de estudo.

#### 4.9 Problemas ambientais

Os principais problemas ambientais observados na área de estudo por Andrade (2010) e durante o desenvolvimento da presente pesquisa, também pontuados por Arruda (1997) como característicos da zona rural do município de Viçosa, são:

- Comprometimento da vazão devido à construção de pequenas represas próximas às cabeceiras.

- Desmatamento, inclusive de matas ciliares, acarretando a diminuição da infiltração e percolação da água no solo.
- Aparecimento de focos de erosão em áreas de pastagem e agricultura.
- Traçado inadequado de estradas e caminhos rurais, com o corte de pequenos canais de drenagem, presença de rampas muito íngremes e desmoronamento de taludes.
- Contaminação de mananciais hídricos por efluentes de origem animal, advindos de currais e pocilgas, bem como por efluentes domésticos.

No que se refere mais especificamente à qualidade da água, Andrade (2010) realizando uma avaliação integrada da qualidade das águas superficial e subterrânea da bacia, a partir da análise físico-química e microbiológica de amostras de nascentes e poços da área, verificou notável impacto da presença de fossas de infiltração, bem como das fezes provenientes da pecuária nas pastagens e pocilgas. A presença de *E. coli* e coliformes totais nas nascentes e poços monitorados indicou contaminação fecal, atribuída à proximidade dos pontos com as áreas de pastagem e à poluição por dejetos de animais e à influência da percolação de efluentes domésticos provenientes das fossas ao lençol freático. Segundo a autora, as áreas de pastagem existentes na sub-bacia encontram-se, de modo geral, degradadas, com presença de solos expostos, erosões laminares e sulcos erosivos, devido ao escoamento superficial das águas de chuva e ocupação indiscriminada de áreas de proteção permanente (Figura 40).



Figura 40: Problemas ambientais evidentes na área de estudos: (a) Pastagem degradada, comum na paisagem; (b) Entorno de uma nascente, um curral com presença de fezes de bovinos. Fonte: Andrade (2010).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização da condutividade hidráulica dos solos da sub-bacia do Córrego Palmital

Nesse tópico, serão apresentados e discutidos os resultados referentes aos ensaios de permeabilidade realizados em campo e às análises realizadas em laboratório tendo como fluido permeante a água e o percolado de aterro sanitário, visando a ampliação do conhecimento acerca da permeabilidade dos solos residuais da região de Viçosa bem como uma contribuição ao entendimento do comportamento natural dos solos frente à percolação dos fluidos supracitados. São apresentadas também a caracterização física dos solos e a caracterização físico-química do percolado de aterro sanitário utilizado no estudo, análises que constituíram suporte à interpretação dos valores de condutividade hidráulica. Os dados foram corroborados e as discussões embasadas a partir de resultados de trabalhos científicos sobre o tema.

#### 5.1.1 Caracterização física dos solos

Os resultados das análises granulométricas são apresentados na Tabela 22 e ilustrados através das curvas granulométricas no ANEXO I, e evidenciam a predominância da textura argilo-arenosa nos solos residuais maduros da área de estudo. Os resultados dos índices físicos (média) obtidos para os solos dos pontos S1, S2, S3, S4 e S5 são apresentados na Tabela 23. O ANEXO I contém os resultados dos índices físicos obtidos em cada uma das amostras com as quais realizou-se ensaio de permeabilidade em laboratório, a partir dos quais calculou-se o valor médio apresentado na Tabela 23.

Tabela 22 - Resultados da análise granulométrica dos solos pertencentes às amostras de ensaio da condutividade hidráulica.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)	Textura
S1	69	7	24	0	Argila arenosa
S2	76	4	20	0	Argila arenosa
S3	28	31	41	0	Areia silto-argilosa
S4	72	2	26	0	Argila arenosa
S5	47	23	30	0	Argila arenosa

Tabela 23 - Resultados dos índices físicos analisados nas amostras de solos coletadas em cinco pontos da área de estudos para ensaio de permeabilidade.

Ponto	$\gamma_n$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	n (%)	e	w (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
S1	16,77	24,69	12,96	47,50	0,905	29,42	70	38	32
S2	14,10	25,24	10,55	58,19	1,397	33,74	64	37	27
S3	16,04	24,09	12,23	49,25	0,971	31,22	57	29	28
S4	16,74	25,12	12,33	50,93	1,038	35,83	84	44	40
S5	12,54	20,25	9,61	52,53	1,108	30,41	61	27	34

Em que:  $\gamma_n$  - Peso específico natural;  $\gamma_s$  - Peso específico dos sólidos;  $\gamma_d$  - Peso específico seco; n – Porosidade; e – índice de vazios; w – umidade; LL – Limite de liquidez; LP – Limite de plasticidade; IP – Índice de Plasticidade.

Para o peso específico dos sólidos, observa-se grande proximidade dos valores obtidos para as amostras dos pontos S1, S2, S3 e S4, o que é esperado para esse índice, tendo apenas o valor verificado para o ponto S5 – localizado no domínio dos Cambissolos – mostrando discrepância. Tal diferença foi atribuída a diferenças na mineralogia dos solos estudados a qual, por sua vez, está relacionada com o grau de desenvolvimento dos solos. Segundo Andrade (2010), os solos da sub-bacia são constituídos principalmente por óxidos de ferro e de alumínio, bem como caulinita. Os Latossolos, pelo profundo intemperismo sofrido, possuem concentrações elevadas, na fração de argila, de óxidos; os Argissolos também possuem tais óxidos, não apenas devido ao processo de formação, mas também pelo fato de que em suas áreas de ocorrência, de baixada, deve haver a contribuição de partículas de argila transportadas, provenientes dos Latossolos. No caso dos Cambissolos, entretanto, o intemperismo é menos pronunciado devido à formação em áreas de elevada declividade e, apesar da mineralogia da fração argila ser parecida com a das demais classes, a amostra coletada provavelmente se encontrava na zona de transição entre os horizontes B e C. Assim, o material coletado provavelmente já continha um material menos intemperizado e mais micáceo, possuindo em sua constituição menos óxidos, os quais tem peso específico elevado tanto em relação à caulinita quanto aos minerais formadores do gnaiss, como feldspato e mica, ainda presentes no horizonte C desses solos residuais.

Observa-se que os valores de LP foram menores para os solos dos pontos S3 e S5, como esperado, uma vez que estas amostras possuem maiores frações de areia em relação aos

solos dos demais pontos. Com relação aos índices de plasticidade pode-se dizer que esses são considerados altos, como predomina em solos argilosos, e que, assim, os solos podem ser classificados como muito plásticos.

### 5.1.2 Caracterização do percolado de aterro sanitário utilizados nos ensaios

O percolado utilizado nos ensaios (Figura 44) é um líquido de coloração amarelo-amarronzada e grande quantidade de sólidos totais, os quais sedimentam rapidamente. Os resultados da caracterização físico-química e microbiológica do percolado estudado são mostrados na Tabela 24.

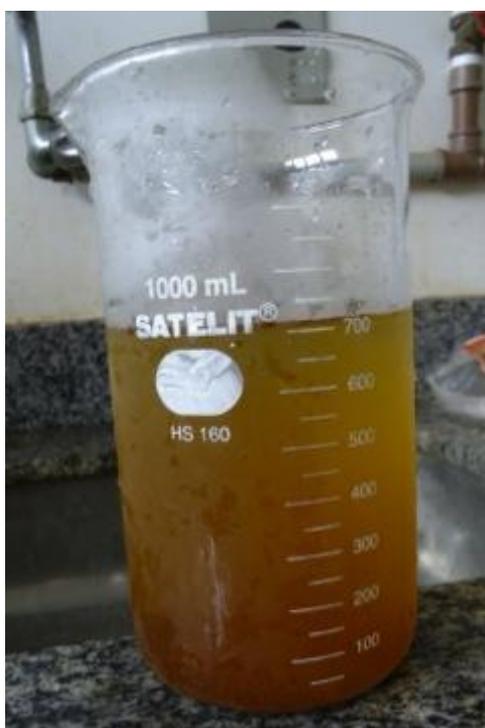


Figura 41: Percolado do aterro sanitário de Viçosa (MG), utilizado nos ensaios de permeabilidade em laboratório.

Embora as variações das características dos percolados variem muito de um aterro para outro e mesmo para o mesmo aterro, ao longo do tempo, os resultados obtidos para os parâmetros analisados são condizentes com as faixas de valores mais prováveis apresentada por Souto & Povinelli (2007) *apud* Gomes (2009) para aterros brasileiros.

O resultado obtido para a DBO é um valor que pode ser considerado baixo para esse tipo de efluente. De acordo com Gomes (2009), as faixas de concentração dos parâmetros relativas aos aterros novos são, em maioria, mais elevadas do que nos aterros antigos, comparando dados de diversos aterros norte americanos. O valor reflete a mistura que ocorre no aterro entre percolado proveniente da decomposição de resíduos novos e antigos. A DQO não foi determinada nesse trabalho, mas Buselli (2013), que também realizou a caracterização do percolado do aterro de Viçosa, obteve valores de DBO e DQO de 50,40 mg.L<sup>-1</sup> O<sub>2</sub> e 370 mg.L<sup>-1</sup> O<sub>2</sub>, o que resulta em uma razão DBO/DQO igual a 0,14; tratando-se portanto de um efluente de baixa biodegradabilidade (relação DBO/DQO inferior a 0,3), segundo Heyer & Stegmann (1998).

Tabela 24 - Características físico químicas e microbiológica do percolado estudado.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultado</b>
Cádmio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,016
Chumbo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,013
Cloretos (mg.L <sup>-1</sup> )	1400,7
Cobre Solúvel (mg.L <sup>-1</sup> )	<0,001
Cromo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	<0,01
Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg.L <sup>-1</sup> )	67,2
Nitrogênio Amoniacal (mg.L <sup>-1</sup> )	28,5
Sólidos Totais (mg.L <sup>-1</sup> )	3340,0
Zinco Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,06
pH	8,36
Condutividade elétrica (mS.cm <sup>-1</sup> )	12,57
Temperatura (°C)	27,5

O pH do percolado é elevado, evidenciando um efluente de caráter básico, o que também deve estar relacionado à mistura que ocorre no aterro entre percolado proveniente da decomposição de resíduos novos e antigos. A presença de metais traço, como chumbo e cádmio, bem como de substâncias reconhecidas pela grande mobilidade, como os cloretos, demonstram a necessidade de tratamento e de cuidados para a disposição desse tipo de efluente.

No contexto desse trabalho, destaca-se a concentração de sólidos totais do percolado, comum a esse tipo de efluente, mas de grande influência no comportamento físico dos solos estudados em relação à permeabilidade, como será discutido no item 5.1.4.

### 5.1.3 Caracterização da condutividade hidráulica em campo

Os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade em profundidade realizados em campo são resumidamente mostrados na Tabela 25. Aos dados detalhados referentes aos ensaios de campo encontram-se no ANEXO II.

Tabela 25 - Resultados dos ensaios de permeabilidade em campo.

Ponto	Classe de solo	Profundidade ensaiada (cm)	Condutividade hidráulica (cm.s <sup>-1</sup> )	Média (cm.s <sup>-1</sup> )
ENS 1	Argissolo Vermelho-Amarelo	80 – 130	9,26E-05	5,78E-05
		130 – 180	2,31E-05	
ENS 2	Latossolo Vermelho-Amarelo	50 -150	1,01E-05	5,59E-05
		150 – 250	6,04E-05	
		250 – 350	3,57E-05	
		350 – 450	1,17E-04	
ENS 3	Argissolo Vermelho-Amarelo	95 – 195	4,42E-06	3,43E-06
		195 – 215	2,44E-06	
ENS 4	Cambissolo Háptico	100 – 200	5,93E-06	2,80E-05
		200 – 300	1,00E-04	
		300 – 400	3,70E-06	
		400 – 500	4,44E-05	
		500 – 600	8,14E-06	
		600 – 700	1,39E-05	
		600 – 800	1,99E-05	
ENS 5	Cambissolo Háptico	100 – 200	3,90E-05	7,97E-05
		200 – 300	7,36E-05	
		300 – 400	1,18E-04	
		400 – 500	6,02E-05	
		500 – 600	6,73E-05	
		600 – 700	1,14E-04	
		600 – 800	8,63E-05	
ENS 6	Latossolo Vermelho-Amarelo	80 – 180	4,32E-07	8,21E-06
		180 – 280	2,31E-07	
		280 – 380	2,48E-05	
		380 – 480	7,21E-06	
		480 – 580	8,39E-06	

Pode-se observar que existe a tendência, ainda que não constante, de aumento da condutividade hidráulica com o aumento da profundidade, para os perfis estudados,

evidenciada nos pontos em que o ensaio não se restringiu aos dois primeiros metros. Tal fato se deve provavelmente ao menor desenvolvimento do solo em profundidade; quanto mais profundo, menor o grau de intemperismo da rocha.

De fato, segundo ABAS/ ABGE/ SBG (1992), a permeabilidade dos solos residuais de gnaisse e granito na região de São Paulo é crescente com a profundidade, atingindo seu máximo no topo rochoso alterado e fraturado, o que se espera que deva ocorrer também na área de estudo. O material em maiores profundidades apresenta, de modo geral, granulometria mais grosseira, com maior percentual de areia - como observado em campo durante a execução dos furos para a realização dos ensaios - e menor retenção da água, o que aumenta a permeabilidade do material. Azevedo *et al.* (1998) em um trabalho de caracterização geotécnica dos solos residuais de Viçosa relata o aumento dos teores de silte e areia no horizonte C dos perfis da região. Segundo Poehls & Smith (2009), um grande volume de água pode ser retido através de tensão superficial em solos de granulometria fina devido à grande área superficial e aumento das forças eletroquímicas características da maioria das argilas. Tal capacidade de retenção, portanto, é menor quando a fração areia é significativa, o que também pode implicar em maior permeabilidade.

O aumento de K em profundidade não se mostra de forma linear devido às mudanças nos estratos do solo. As variações nos valores de condutividade hidráulica em profundidade foram melhor observadas para os furos de maior profundidade, executados em Latossolo e principalmente em Cambissolo, uma vez que para os Argissolos, as menores profundidades do lençol freático limitavam a profundidade de perfuração e assim, a continuidade do ensaio. Nos furos feitos em Cambissolo, que chegaram até os 8,0 m de profundidade, foi contemplada uma grande camada de solos residuais jovens, nos quais observou-se a presença de materiais com maiores teores de silte e areia em profundidade, mais micáceos, apresentando em alguns pontos camadas ricas em caulim e quartzo, especialmente no ponto ENS 5, o que pode ser a justificativa para valores de condutividade hidráulica de ordem de grandeza de até  $10^{-4}$  cm.s<sup>-1</sup>. Segundo ABAS/ ABGE/ SBG (1992), a heterogeneidade é uma característica dos solos residuais jovens provenientes da intemperização de rochas cristalinas. A variação na macroestrutura de um perfil de intemperismo de solo residual pode resultar em grandes variações na permeabilidade, tanto lateralmente quanto em profundidade. Perfis típicos apresentados por diversos autores mostram claramente variações nos tamanhos de

grãos, índice de vazios, mineralogia, grau de fraturamento e características das fissuras, os quais afetam os valores de permeabilidade de um local para outro (BLIGHT & LEONG, 2012). Por esse motivo, de acordo com Mendes (2008), generalizações dos valores típicos de permeabilidade para outros tipos de solos residuais podem ser enganosas e, devem, portanto, ser evitadas. As diferenças verificadas nas propriedades físicas e, assim, no comportamento hidráulico do solo ao longo do perfil de intemperismo, permitem salientar que dependendo do objetivo da investigação, deve-se ser cauteloso ao utilizar valores médios, que “resumam” os resultados de vários ensaios em profundidade, para caracterizar uma espessa camada de solo. Cadima *et al.* (1980) em seu estudo em um Latossolo Vermelho-Amarelo, concluíram que a variabilidade da condutividade hidráulica no sentido vertical foi pronunciada e frisam que o uso de valores médios pode trazer consideráveis erros na estimativa de fluxo de água no solo.

No ponto ENS 4, observa-se que há uma certa alternância entre valores de condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-6}$  cm.s<sup>-1</sup> e maiores, fato que está relacionado às diferenças de comportamento hidráulico verificadas nos solos dos dois furos, já que mesmo sendo próximos (cerca de 3,0 m de distância), um furo apresentou material mais argiloso e menos permeável e o outro material mais siltoso e permeável, variação considerada normal por se tratar de um cambissolo.

As médias dos resultados obtidas para cada uma das classes de solo (Tabela 26), considerando os valores médios em seus dois respectivos pontos, mostram proximidade, situando-se na mesma ordem de grandeza ( $10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup>). Tal fato mostra, mais uma vez, que as médias podem não ser representativas das variações que ocorrem no perfil do solo e que não são interessantes na comparação de classes de solo diferentes, a não ser que se trate de camadas mais superficiais, do horizonte B de cada classe, visto que a classificação pedológica baseia-se na análise de perfis de solo não muito profundos. As diferenças na condutividade hidráulica que podem ocorrer em diferentes pontos de uma área para os solos residuais jovens não estão relacionadas à classificação pedológica das camadas subjacentes, mas sim ao grau de intemperismo e características da rocha de origem.

Apesar das limitações anteriormente ressaltadas, dependendo da aplicação prática dos resultados, valores da ordem de  $10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup> poderiam ser utilizados como critério de projeto, sendo considerados representativos dos solos residuais da área.

Tabela 26 - Valores médios de condutividade hidráulica para as classes de solo presentes na área de estudo.

Classe de solo	Condutividade hidráulica média (cm.s <sup>-1</sup> )
Latossolo Vermelho-Amarelo	3,20E-05
Argissolo Vermelho-Amarelo	3,06E-05
Cambissolo Háplico	5,39E-05

A maioria dos ensaios realizados até 2,0 m de profundidade apresentaram como resultados valores da ordem de grandeza de  $10^{-5}$  e  $10^{-6}$  cm.s<sup>-1</sup>, à exceção do ponto ENS6, cujos valores foram da ordem de  $10^{-7}$  cm.s<sup>-1</sup>. Mais precisamente para os Argissolos os resultados situaram-se na ordem de  $10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup>; para os Cambissolos, nas ordens de  $10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup> e  $10^{-6}$  cm.s<sup>-1</sup>; e para os Latossolos nas ordens de  $10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup> e  $10^{-7}$  cm.s<sup>-1</sup>. Fiori *et al.* (2010), em um estudo sobre a condutividade hidráulica em “profundidade” (de 0,5 m até 2,0 m, utilizando o método *Open End Hole* para realizar ensaios a cada 0,5 m) dos solos do estado de Goiás, encontrou valores relativamente parecidos, verificando para os Latossolos Vermelho-Amarelos valores de condutividade hidráulica em profundidade em maioria da ordem de  $10^{-4}$  cm.s<sup>-1</sup> e  $10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup>; para o grupo de solos jovens, que inclui os Cambissolos, o autor encontrou valores em maioria da ordem de  $10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup>; e por fim, para o grupo de solos que inclui os Argissolos, o autor encontrou valores de condutividade hidráulica em profundidade variando em maioria nas ordem de grandeza de  $10^{-4}$  cm.s<sup>-1</sup> a  $10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup>.

O resultado obtido para o Latossolo no ponto ENS6 contradiz a tendência que os Latossolos possuem de apresentar ótima drenagem, devido à sua estrutura granular. Tal resultado pode evidenciar a grande influência da granulometria dos estratos do solo sobre os resultados. Os furos de sondagem realizados na bacia quando da construção de poços de monitoramento (CARVALHO, 2013) mostram que, de modo geral, predomina nos solos da bacia a textura argilo-arenosa na camada de solo residual maduro – e assim, no horizonte B -, com uma tendência de incremento das frações de silte em profundidade, independentemente da classe de solo. Pequenas variações na textura e estrutura entre pontos diferentes pertencentes à mesma classe de solos, entretanto, podem explicar significativas variações na permeabilidade. Por exemplo, no caso do Latossolo Vermelho-Amarelo, para o qual a camada de solo residual maduro apresentou no ponto ENS2 – baseando-se na análise táctil-visual para o furo de sondagem do Poço 3 – textura variando de argila arenosa a argila siltosa e no ponto ENS6, segundo

relatório da Geopontuall Engenharia, textura variando de argila a argila silto-arenosa, maiores frações de areia no solo do ponto ENS2 em relação ao ponto ENS6 podem ser a justificativa para sua maior permeabilidade, uma vez que o uso dos solos não exerce influência nesse caso - em ambos os pontos, a cobertura é a pastagem.

Respeitadas as variações espaciais e em profundidade, que são amplas e dificultam generalizações, os resultados dessa pesquisa mostraram-se condizentes com dados da literatura. Azevedo *et al.* (1998) estudaram as características geotécnicas, incluindo a permeabilidade, dos solos residuais de Viçosa e obtiveram em ensaios de permeabilidade a carga variável em campo valores de K da ordem de  $10^{-4}$  cm.s<sup>-1</sup> para Cambissolos, Argissolos e Latossolos; os autores frisam entretanto que valores menores eram esperados, como ocorrido no presente trabalho. Mendes (2008) estudando a condutividade hidráulica saturada de solos residuais de granito-gnaise em profundidade com infiltrômetro de minidisco encontrou valores da ordem de  $10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup> para o horizonte B, com textura argilo-arenosa, de um furo nas profundidades de 1,3 a 5,0 m, também verificando tendência de um aumento da condutividade hidráulica com o aumento da profundidade. Pessanha (2011), realizando também ensaios de infiltração em campo em solo residual de gnaise, para profundidade de 1,8 a 2,8m, obteve valores de condutividade hidráulica da ordem  $10^{-6}$  cm.s<sup>-1</sup> para os cinco pontos analisados, com textura argilo-arenosa a areno-argilosa. Segundo Townsend (1985), pode-se esperar valores de condutividade hidráulica de campo da ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  cm.s<sup>-1</sup> para solos residuais lateríticos. Costa Filho & Vargas (1985) *apud* Blight & Leong (2012) citam valores de K para solo residual maduro e saprolito de gnaise variando de  $9,5 \cdot 10^{-5}$  a  $4,76 \cdot 10^{-4}$  cm.s<sup>-1</sup> obtidos em ensaios de infiltração e bombeamento em campo. Assim, em termos de ordem de grandeza, os resultados são corroborados por trabalhos anteriores.

#### **5.1.4 Caracterização da permeabilidade intrínseca e condutividades hidráulicas dos solos à água e percolado de aterro sanitário obtidas em laboratório**

Os resultados de condutividade hidráulica (K) obtidos nos ensaios com água e percolado de aterro sanitário para cada uma das classes de solo analisadas, bem como os valores médios e os coeficientes de variação são mostrados na Tabela 27 e na Tabela 28,

respectivamente. Os dados detalhados referentes aos ensaios de laboratório encontram-se nos ANEXO III e ANEXO IV, para água e percolado, respectivamente.

Os valores de K obtidos com água para os solos residuais estudados variaram de  $3,48.10^{-3}$  a  $4,73.10^{-5}$   $\text{cm.s}^{-1}$ , sendo que os valores médios situaram-se nas ordens de grandeza de  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  e  $10^{-3}$   $\text{cm.s}^{-1}$ . Em termos de ordens de grandeza, considerando a análise das classes pedológicas, os resultados, em  $\text{cm.s}^{-1}$ , variaram: entre  $10^{-3}$  (50% das amostras) e  $10^{-4}$  (50% das amostras) para os Latossolos; entre  $10^{-4}$  (33,3% das amostras) e  $10^{-5}$  (66,6% das amostras) para os Argissolos; e entre  $10^{-3}$  (66,6% das amostras) e  $10^{-4}$  (33,3% das amostras) para os Cambissolos.

Tabela 27 - Resultados obtidos para a condutividade hidráulica dos solos utilizando como fluido percolante a água.

Ponto	Classificação pedológica	Classificação geotécnica	Amostra	K ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	Média	Coefficiente de variação (%)
S1	Argissolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura argilo-arenosa	1	8,03E-04	3,31E-04	124
			2	7,62E-05		
			3	1,13E-04		
S2	Latossolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura argilo-arenosa	1	1,07E-03	1,62E-03	103
			2	3,48E-03		
			3	2,94E-04		
S3	Argissolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura areno-argilosa	1	4,73E-05	6,93E-05	28
			2	7,94E-05		
			3	8,11E-05		
S4	Latossolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura argilo-arenosa	1	1,22E-04	4,56E-04	108
			2	2,25E-04		
			3	1,02E-03		
S5	Cambissolo Háptico	Solo residual, textura argilo areno-siltosa	1	2,24E-03	1,30E-03	74
			2	3,15E-04		
			3	1,34E-03		

Os resultados obtidos nos ensaios com água mostram-se ainda condizentes com dados da literatura. Lisboa (2006) estudando a permeabilidade de um solo residual maduro do município de Viçosa, de textura argilo-arenosa, como os que predominam na área de estudo, em ensaios de carga variável e utilizando permeâmetro de parede rígida, obteve valor de K igual a  $1,12.10^{-3}$   $\text{cm.s}^{-1}$ . Tímbola *et al.* (2010) obteve para uma amostra de Latossolo Vermelho proveniente de horizonte B, de textura argilo-arenosa e porosidade

de 54%, K igual a  $1,39 \cdot 10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$ . Campos (2009) obteve através de metodologia da EMBRAPA (1997), um valor médio de  $3,52 \cdot 10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$  para amostras de Latossolos Vermelho-Amarelo provenientes do horizonte Bw. Ferreira *et al.* (1999) estudou a variação da condutividade hidráulica dos horizontes B em sete diferentes Latossolos da região sudeste do Brasil, obtendo valores entre  $2,8 \cdot 10^{-4}$  a  $1,9 \cdot 10^{-2} \text{ cm.s}^{-1}$ , sendo a média próxima a  $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$ . Para os Argissolos, os valores de condutividade hidráulica variam entre  $6,9 \cdot 10^{-4}$  e  $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$  (ABREU *et al.*, 2004 *apud* SOARES, 2010).

Tabela 28 - Resultados obtidos para a condutividade hidráulica dos solos utilizando como fluido percolante o percolado de aterro sanitário.

Ponto	Classificação pedológica	Classificação geotécnica	Amostra	K ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	Média	Coefficiente de variação (%)
S1	Argissolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura argilo-arenosa	1	1,49E-06	2,84E-06	48
			2	2,79E-06		
			3	4,23E-06		
S2	Latossolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura argilo-arenosa	1	7,09E-06	2,58E-05	99
			2	5,48E-05		
			3	1,54E-05		
S3	Argissolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura areno-argilosa	1	1,70E-06	8,39E-05	168
			2	2,47E-04		
			3	3,17E-06		
S4	Latossolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura argilo-arenosa	1	3,85E-05	2,04E-05	78
			2	1,47E-05		
			3	8,03E-06		
S5	Cambissolo Háptico	Solo residual, textura argilo areno-siltosa	1	1,09E-06	2,55E-06	127
			2	6,25E-06		
			3	3,09E-07		

Os valores de K obtidos com percolado de aterro sanitário para os solos residuais estudados variaram de  $2,47 \cdot 10^{-4}$  a  $3,09 \cdot 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$ , sendo que os valores médios situaram-se nas ordens de grandeza de  $10^{-5}$  e  $10^{-6} \text{ cm.s}^{-1}$ . Em termos de ordens de grandeza, considerando a análise das classes pedológicas, os resultados, em  $\text{cm.s}^{-1}$ , situaram-se: entre  $10^{-5}$  (66,6% das amostras) e  $10^{-6}$  (33,3% das amostras) para os Latossolos; em  $10^{-4}$  (16,7% das amostras) e  $10^{-6}$  (83,3% das amostras) para os Argissolos; e entre  $10^{-6}$  (66,6% das amostras) e  $10^{-7}$  (33,3% das amostras) para os Cambissolos.

Na Tabela 29, são mostrados os valores de permeabilidade intrínseca (k) obtidos para os solos estudados a partir dos resultados de condutividade hidráulica.

Os valores de permeabilidade intrínseca (k) obtidos para os solos residuais estudados variaram de  $3,58.10^{-8}$  a  $4,86.10^{-10}$  cm<sup>2</sup>, sendo que os valores médios situaram-se nas ordens de grandeza de  $10^{-8}$ ,  $10^{-9}$  e  $10^{-10}$  cm<sup>2</sup>. Em termos de ordens de grandeza, considerando a análise das classes pedológicas, os resultados, em cm.s<sup>-1</sup>, variaram: entre  $10^{-8}$  (50% das amostras) e  $10^{-9}$  (50% das amostras) para os Latossolos; entre  $10^{-9}$  (33,3% das amostras) e  $10^{-10}$  (66,6% das amostras) para os Argissolos; e entre  $10^{-8}$  (66,6% das amostras) e  $10^{-9}$  (33,3% das amostras) para os Cambissolos. Na Tabela 30 são representadas as médias dos valores de k para cada classe de solo estudada.

Tabela 29 - Resultados obtidos para a permeabilidade intrínseca (k) dos solos estudados.

Ponto	Classificação pedológica	Classificação geotécnica	Amostra	k (cm <sup>2</sup> )	Média
S1	Argissolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura argilo-arenosa	1	8,24E-09	3,40E-09
			2	7,83E-10	
			3	1,16E-09	
S2	Latossolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura argilo-arenosa	1	1,10E-08	1,66E-08
			2	3,58E-08	
			3	3,01E-09	
S3	Argissolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura areno-argilosa	1	4,86E-10	7,11E-10
			2	8,16E-10	
			3	8,33E-10	
S4	Latossolo Vermelho-Amarelo	Solo residual maduro, textura argilo-arenosa	1	1,25E-09	4,68E-09
			2	2,31E-09	
			3	1,05E-08	
S5	Cambissolo Háptico	Solo residual, textura argilo areno-siltosa	1	2,30E-08	1,34E-08
			2	3,23E-09	
			3	1,38E-08	

Tabela 30 - Valores médios de permeabilidade intrínseca (k) para as diferentes classes de solo estudadas.

Classe	k (cm <sup>2</sup> )
Latossolo Vermelho- Amarelo	1,06E-08
Argissolo Vermelho- Amarelo	2,05E-09
Cambissolo Háptico	1,34E-08

Os resultados obtidos para  $k$  demonstram como textura, estrutura e mineralogia se integram na determinação da permeabilidade do solo. Segundo a Tabela 1, valores de  $k$  da ordem de  $10^{-8}$  a  $10^{-10}$   $\text{cm}^2$ , como encontrados nesse trabalho, são característicos de materiais areno-siltosos e de areias finas; as argilas, que predominam na textura de quatro das cinco amostras analisadas, tem  $k$  normalmente da ordem de  $10^{-14}$  -  $10^{-11}$   $\text{cm}^2$ . Pode-se afirmar assim que a estrutura granular comum aos Latossolos – relacionada à presença marcante de óxidos em sua mineralogia, que funcionam como agentes cimentantes - e as porcentagens da fração areia significativas nos solos estudados exercem influência determinante sobre os valores de  $k$ .

Os valores obtidos para  $k$  e também para as condutividades hidráulicas do solo à água e percolado possuem ainda relação com a mineralogia das frações argilas dos solos estudados. Segundo Andrade (2010), os solos da sub-bacia apresentam apenas uma pequena quantidade de minerais primários facilmente intemperizáveis (biotita), quase ausentes nos horizontes B, sendo constituídos predominantemente por óxidos de ferro e de alumínio, bem como argilominerais do grupo 1:1 (caulinita), apresentando também uma pequena quantidade de argilominerais do grupo 2:1 (esmectita). Todos os solos presentes na bacia apresentam grande quantidade de caulinita, inclusive os cambissolos, devido às características do gnaiss, a rocha de origem, comum a todas as classes de solo. De acordo com Elbachá (1989), as espécies de argilominerais que determinam os extremos das propriedades dos solos são a caulinita e a montmorilonita. Solos com predominância de caulinita, como os do presente estudo, possuem menor capacidade de troca catiônica, menor atividade e maior condutividade hidráulica do que solos com montmorilonita.

Os valores de  $k$  mostram elevada correlação com a porosidade dos solos; nos pontos S2 e S5, cuja porosidade é maior que para os demais pontos (os quais apresentam valores bastante parecidos), são verificados os maiores valores de  $k$ . O coeficiente de correlação verificado entre os valores médios obtidos para a porosidade e a permeabilidade intrínseca nos cinco pontos foi de 0,89, considerado “forte”, tendendo a “muito forte”. A porosidade, nesse caso, também influencia os valores de condutividade hidráulica.

Por fim, a fim de facilitar a comparação dos valores de  $K$  obtidos para água e percolado, são apresentadas na Tabela 31 as médias dos valores de  $K$  calculadas para cada classe de solos estudada nos ensaios utilizando os dois fluidos.

Tabela 31 - Condutividade hidráulica obtida para cada classe de solo estudada considerando como fluidos a água e o percolado de aterro sanitário.

<b>Classificação pedológica</b>	<b>Fluido percolante</b>	<b>Média de K (cm.s<sup>-1</sup>)</b>
Argissolo Vermelho-Amarelo	Água	2,00E-04
	Percolado de aterro sanitário	4,34E-05
Latossolo Vermelho-Amarelo	Água	1,04E-03
	Percolado de aterro sanitário	2,31E-05
Cambissolo Háptico	Água	1,30E-03
	Percolado de aterro sanitário	2,55E-06

Assim como observado em relação aos resultados da permeabilidade intrínseca, a análise dos resultados para os ensaios realizados com água demonstra que, os menores valores foram verificados para os Argissolos, enquanto para os Latossolos e Cambissolos os valores mostraram-se próximos, analisando-se tanto a distribuição em termos de ordem de grandeza quanto os valores médios para cada classe de solo (Tabela 31). Tais resultados são coerentes com as características dos solos analisados. Os Latossolos, apesar de apresentarem teores de argila tão elevados quanto ou até superiores aos dos Argissolos possuem, como dito anteriormente, uma estrutura granular que favorece sua drenabilidade. Os valores obtidos para os Cambissolos estão provavelmente relacionados à sua textura, cujas porcentagens de areia e silte são significativas, bem como à presença de raízes e fraturas, fatores que serão melhor discutidos no próximo item; nas amostras de solo desse domínio, coletadas no ponto S5, o material aparentou baixa coesão e resistência dos solos, o que pode ter causado certa perturbação dos corpos de prova quando do desconfinamento das amostras, moldagem e manuseio para a montagem dos permeômetros, o que pode ter influenciado, ainda que minimamente, os resultados obtidos.

Com relação aos ensaios com percolado, analisando apenas as médias calculadas para cada classe de solo (Tabela 31), observam-se valores da mesma ordem de grandeza para os Argissolos e Latossolos, sendo os menores resultados referentes aos Cambissolos. Tal análise, entretanto, baseando-se apenas nos valores médios, poderia levar a uma interpretação equivocada dos resultados nesse caso. A Tabela 28 mostra que, na verdade, um único valor de condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-4}$  cm.s<sup>-1</sup>, obtido para uma das amostras do ponto S3 foi responsável pelo “deslocamento” da média obtida para os Argissolos para um valor mais elevado, visto que todas as demais

amostras de Argissolo apresentaram valores de condutividade hidráulica (K) da ordem de  $10^{-6}$  cm.s<sup>-1</sup>. Assim, ao analisar a distribuição dos resultados, observa-se que os Latossolos mostraram-se mais permeáveis que os Argissolos. Dessa forma, os Latossolos constituem a classe para a qual os maiores valores de K foram observados nos ensaios com percolado, seguido dos Argissolos e, por fim, dos Cambissolos, para os quais foram obtidos menores valores de K.

A diferença de comportamento entre os resultados obtidos para os ensaios com água e percolado evidencia a influência das características do fluido sobre os resultados de condutividade hidráulica. O percolado de aterro sanitário utilizado nesse estudo, apesar de ter viscosidade próxima a da água, possui uma concentração elevada de sólidos totais, o que favoreceu o entupimento dos vazios do solo, diminuindo, assim, a permeabilidade do sistema poroso. Nesse caso, exerceu influência também a duração do ensaio até a obtenção da “estabilidade”, uma vez que se maior a duração do ensaio, maior seria o volume de sólidos acrescentados ao sistema. Tal fato deve ser responsável por maiores valores obtidos para os Argissolos em detrimento dos Cambissolos. Devido à influência de tais fatores, foi obtido coeficiente de correlação praticamente nulo entre os valores de K obtidos nos ensaios com água e percolado. Assim, apesar dos valores de K, em relação à água, serem claramente menores quando o fluido é o percolado, estatisticamente não há correlação entre os valores que permita estabelecer, por exemplo, uma equação confiável que relacione as duas variáveis como inicialmente se pretendia.

Entretanto, observa-se que para todos os pontos analisados, os valores de condutividade hidráulica para percolado de aterro sanitário foram inferiores aos valores obtidos nos ensaios com água, devido à obstrução física exercida pelos sólidos do percolado e provavelmente, ao crescimento de biomassa bacteriana nos poros da amostra. Além disso, a interação química entre os íons presentes no percolado e a fração argila pode ter causado dispersão dos solos, devido ao aumento da dupla camada difusa, acarretando menores valores de condutividade hidráulica dos solos ao percolado se comparados aos resultados obtidos com água.

Nessa pesquisa são apresentados os valores de condutividade hidráulica obtidos segundo o critério de estabilização estabelecido pela NBR 14545, de quatro valores parecidos; entretanto, durante os ensaios, sempre buscava-se uma sequência maior de

valores próximos, o que levou os ensaios à durações de até 4 dias. Durante esses dias, observou-se que os valores apresentavam a tendência a diferentes “estabilizações”, porém sempre com valores decrescentes de condutividade hidráulica, que chegavam até a ordem de  $10^{-8}$  cm.s<sup>-1</sup>. As observações realizadas durante o acompanhamento das análises permitem afirmar que resultados de ensaios de longa duração são amplamente influenciados pela obstrução física devido às características do percolado, bem como pela atividade microbiológica ocorrida no permeâmetro, evidenciada pela presença de bolhas de gás que emergiam no menisco da bureta, inclusive dificultando as leituras. De fato, segundo Thullner *et al.* (2002), a capacidade da biomassa bacteriana de alterar as propriedades hidráulicas de um meio poroso saturado – denominada biocolmatação - foi observada em diversos estudos de laboratório. Vários autores relataram uma redução significativa de K devido ao fenômeno. Entretanto, nem sempre a redução significativa da propriedade pode ser atribuída apenas ao crescimento da biomassa, mas também à produção de gás (BAVEYE & DUMESTRE, 1998). De qualquer forma, é grande a influência da atividade microbiológica sobre a condutividade hidráulica.

As limitações apresentadas já foram relatadas na literatura. Segundo Shackelford & Redmond (1995), testes de longa duração geralmente sujeitam os solutos a uma maior exposição a processos de degradação química e/ou bioquímica que podem afetar a precisão dos parâmetros de transporte medidos. Por esse motivo, optou-se por apresentar no presente trabalho apenas os resultados referentes à primeira “estabilização”, a qual ocorria em média após 1 ou 2 dias de ensaio.

Os resultados obtidos no presente estudo são corroborados por relatos de diversos outros trabalhos. Bello & Osinub (2011) estudaram a condutividade hidráulica a água e percolado de aterro sanitário de três solos classificados como “argila inorgânica de baixa a média plasticidade”, segundo classificação da USCS, após compactação, utilizando também permeâmetro de parede rígida e carga variável. Os pesquisadores conduziram o experimento durante 90 dias e verificaram que quando as amostras eram ensaiadas com água os valores de condutividade hidráulica eram maiores do que quando ensaiadas com percolado (embora nesse trabalho a diferença tenha sido muito pequena, dentro da mesma ordem de grandeza) e que a condutividade hidráulica ao percolado diminui ao longo do tempo de ensaio, assim como foi observado no presente estudo. A justificativa que os autores deram para o fato é que os percolados de aterro sanitário podem causar um leve decréscimo na condutividade hidráulica de argilas inativas

provavelmente devido a adsorção de  $\text{Na}^+$  e à expansão da dupla camada, bem como ao entupimento devido ao crescimento bacteriano. Os resultados estão ainda de acordo com trabalhos de Daniel & Shackelford (1988) e Shackelford & Redmond (1995).

Um trabalho realizado por Prim *et al.* (2004) ensaiando dois tipos de solo compactado, um basáltico de textura siltosa argilosa e outro granítico de textura arenosa argilosa, mostrou uma tendência à impermeabilização física pela percolação de lixiviado de aterro sanitário através da camada de solo, em função das características do percolado, principalmente a quantidade de sólidos totais presentes. O solo basáltico, de textura muito argilosa, após 30 dias de ensaio em média, apresentou K em torno de  $1.10^{-8} \text{ cm.s}^{-1}$ , enquanto que os de solo granítico, de textura pouco argilosa, apresentou K também de cerca de  $10^{-8} \text{ cm.s}^{-1}$  para lixiviado com maior concentração de sólidos totais e de K igual a  $1.10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$  para lixiviado mais diluído, nesse caso com experimento de duração de 75 dias. Os autores verificaram ainda que os valores de K, ao longo do tempo, tendem à uniformização, em função do fechamento dos poros e pelo material em suspensão contido nos lixiviados. Segundo eles, quanto maior for a quantidade de material em suspensão, mais rapidamente esta tendência é verificada. Deve ser considerada na interpretação do processo de impermeabilização a ação de processos biológicos e químicos – como precipitação, adsorção, sorção, entre outros.

Corrêa *et al.* (2004) verificou para ensaio de permeabilidade a chorume em solo laterítico valor de condutividade hidráulica igual a  $3.10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$  no início do ensaio e igual a  $9.10^{-8} \text{ cm.s}^{-1}$  durante a coleta dos últimos volumes de poros. Segundo o autor, a redução de K pode estar associada à colmatação dos poros do solo ou à geração de gases decorrentes da atividade biológica no solo, que reduzem a velocidade efetiva do fluido.

É importante frisar que, apesar de terem sido observados nesse trabalho baixos valores de condutividade hidráulica para o percolado, predominantemente menores que água, nem sempre isso ocorre. A permeabilidade das argilas é altamente influenciada pelas características físico-químicas do líquido percolado. Segundo Dunn & Mitchell (1984), percolados de resíduos podem afetar os solos em uma variedade de formas que podem resultar em aumento ou diminuição da condutividade hidráulica em relação à água como um permeante. Portanto, deve-se observar as características tanto do solo como do percolado antes de fazer generalizações. De acordo com Anandarajah (2003), em alguns trabalhos foi verificado aumento da condutividade hidráulica de solos quando

permeados por alguns fluidos orgânicos em relação aos valores verificados para a água. Fernandez & Quigley (1985) explicaram com sucesso o aumento da permeabilidade devido à percolação de fluidos orgânicos em amostras previamente percoladas por água, com a ajuda da teoria da dupla camada. Segundo a teoria, uma diminuição na constante dielétrica implica na diminuição da espessura da dupla-camada, permitindo que as partículas de argila se aproximem, levando ao encolhimento dos aglomerados do solo. De acordo com os autores, tal encolhimento pode causar aumento dos vazios dos solos ou até rupturas. Assim, se o ensaio é conduzido em um permeâmetro de parede rígida, em que o volume global permanece quase constante durante o teste, o mecanismo supracitado leva ao aumento da permeabilidade.

#### 5.1.4.1 Variabilidade dos resultados de condutividade hidráulica e permeabilidade intrínseca

A análise dos coeficientes de variação evidencia a grande variabilidade que a condutividade hidráulica apresenta, mesmo para amostras próximas, como amplamente discutido na literatura sobre o assunto e exposto na fundamentação teórica da presente pesquisa. Devido à grande quantidade de fatores que influenciam esse parâmetro e às próprias limitações metodológicas em representar a realidade, é difícil discutir todos os aspectos intervenientes, bem como realizar generalizações sobre os valores de K. Segundo Warrick & Nielsen (1980), a condutividade hidráulica saturada do solo é uma das propriedades físicas altamente variáveis, para as quais é comum obter valores de coeficiente de variação maiores que 100%.

As variações de K observadas nesse trabalho para amostras retiradas no mesmo ponto e profundidade estão provavelmente relacionadas à presença de macroporos, devido a pequenas fraturas e existência de raízes – ou de espaços que estas deixaram - nos corpos de prova, as quais podem ter grande influência sobre a condutividade hidráulica. De acordo com Mesquita & Moraes (2004), variabilidades nas medidas da macroporosidade evidenciadas por coeficientes de variação geralmente variando de 15 a 20% condicionam uma alta variabilidade na condutividade hidráulica saturada, confirmada por coeficientes de variação elevados, geralmente maiores que 70%. Segundo os autores, a presença de um “megaporo” a mais em uma amostra de solo afetará pouco a macroporosidade, mas muito sua condutividade hidráulica, razão pela

qual é comum obter valores discrepantes (altos) para K devido a um “megaporo”, enquanto a macroporosidade não apresentará a mesma tendência. Não se pode excluir, portanto, nesse trabalho, a influência da atividade biológica no solo sobre os valores de condutividade hidráulica e da permeabilidade intrínseca. A presença de um “megaporo” e de raízes nos corpos de prova é ilustrada na Figura 42 e na Figura 43. Fraturas e raízes muitas vezes dificultaram a moldagem das amostras, sendo que algumas delas foram inclusive “perdidas” por rompimento, como ilustrada na Figura 43a. A moldagem era particularmente difícil para as amostras de Cambissolo, pois esse solo apresentou-se friável e com baixa coesão.



Figura 42: Indicação de grande macroporo (“megaporo”).



Figura 43: Presença de fraturas (a) e raízes (a e b) nas amostras, que por vezes, impediam a moldagem dos corpos de prova.

#### 5.1.4.2 Estimativa do tempo de percolação do percolado e discussão sobre a adequabilidade dos solos residuais estudados como camada de impermeabilização de base em aterros sanitários

Os resultados obtidos permitem afirmar que, embora os valores de  $K$  ao percolado de aterro sanitário observados tenham sido relativamente baixos, especialmente para os Argissolos e Cambissolos, a disposição de resíduos sólidos diretamente sobre os solos estudados em condição natural, à princípio, não é recomendada pois estes não atendem ao critério técnico comumente requerido de  $K < 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$  para camadas de impermeabilização de base em aterros sanitários. A continuidade dos ensaios, em alguns casos, por mais que 2 dias, entretanto, permitiu observar a tendência de diminuição de  $K$  a valores menores do que os aqui apresentados, da ordem de  $10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$  ou inferiores. A grande quantidade de sólidos presentes no percolado estudado favorece o entupimento dos poros do solo, nos quais ainda pode ocorrer biocolmatação devido à matéria orgânica, como previamente discutido. Tais processos, entretanto, podem levar à diminuição de  $K$ , mas não se pode garantir que sejam suficientes em qualquer situação para impedir o comprometimento da qualidade das águas subterrâneas.

Além do motivo exposto acima, de modo geral, recomenda-se a utilização de tecnologias que minimizem o risco de contaminação do aquífero por percolado de aterro sanitário, quando da disposição de resíduos sólidos, devido à grande variabilidade da condutividade hidráulica. Segundo Daniel (1993), é difícil e caro provar que um estrato de solo ou rocha de ocorrência natural possua baixa condutividade hidráulica e seja uniforme em relação a essa propriedade. Por isso, o uso de solo natural como barreira de impermeabilização de base em aterros, constituindo o principal meio de proteger as águas subterrâneas da contaminação, não é normalmente recomendada. Uma exceção pode ser o caso de um estrato de material extremamente uniforme e bem caracterizado, mas estes são raríssimos. Como observado nesse trabalho, em maiores profundidades, os solos residuais podem ter valores maiores de K, aumentando a velocidade do fluxo do percolado em direção ao aquífero. Vale frisar que a presença de uma camada menos permeável e com boa capacidade de atenuação nas proximidades da superfície é suficiente para impedir a percolação em profundidade.

Visando a estimativa do tempo de percolação do percolado estudado da superfície do solo até atingir o lençol freático, as médias dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório com percolado de aterro sanitário, foram consideradas representativas, em nível de cálculo, de toda camada de solos correspondente à zona vadosa.

A Tabela 32 mostra: a porosidade efetiva para cada classe de solo (considerada igual à média das porosidades totais indicadas na Tabela 26); um valor médio estimado da profundidade da superfície freática para cada classe de solo, segundo a observação de suas áreas de ocorrência; e o tempo total estimado para o fluido atingir o nível d'água a partir da superfície, após percorrer a zona vadosa, considerando apenas o mecanismo de advecção. Para esse processo físico de transporte, a velocidade de percolação do fluido pode ser calculada a partir da condutividade hidráulica, como apresentado na Equação 3. No presente trabalho, considerou-se gradiente hidráulico igual a 1 e porosidade efetiva igual a porosidade total.

Tabela 32 - Velocidades e tempos de percolação do percolado de aterro da superfície ao lençol freático para cada classe de solo estudada.

Classificação pedológica	Porosidade efetiva estimada	Velocidade de percolação (cm.s <sup>-1</sup> )	Profundidade da camada de solo até o nível d'água (m)	Tempo total de percolação (dias)
Argissolo Vermelho-Amarelo	0,4838	8,97E-05	2,0	26
Latossolo Vermelho-Amarelo	0,5456	4,23E-05	4,0	110
Cambissolo Háptico	0,5253	4,85E-06	8,0	1909

Considerando os dados estimados mostrados na Tabela 32, a percolação dos fluidos ocorreria, especialmente para os Cambissolos, em um longo período de tempo, o que favoreceria a ocorrência dos mecanismos de atenuação, diminuindo eventuais impactos causados pela percolação do efluente nos solos estudados. Considerando que os valores de K obtidos em laboratório utilizando como fluido a água, para o horizonte B do solo, foram de modo geral maiores que os observados em campo, é esperado que os valores de K dos solos ao percolado em maiores profundidades em campo sejam menores que os observados em laboratório. Sendo o lençol freático bastante profundo em pontos elevados das bacias da região da Zona na Mata, atingindo mais de 20 m – como no caso do aterro sanitário de Viçosa -, conclui-se que para aterros sanitários de pequeno porte e operação adequada, pode-se considerar a possibilidade da disposição dos resíduos sólidos sobre o solo em condições naturais, diminuindo assim os custos da implantação de aterros sanitários em pequenas cidades. Frisa-se, entretanto, que é necessária a manutenção de uma drenagem adequada bem como cobertura dos resíduos, minimizando a entrada de água na massa de resíduos sólidos, evitando assim a diluição do percolado e a realização de um estudo hidrogeológico prévio que permita caracterizar a permeabilidade local.

Como exemplo, considerando a profundidade da superfície freática igual a 20 metros e a velocidade de percolação igual a obtida para o Cambissolo, como mostrado na Tabela 32, o tempo para que o percolado atingisse o aquífero, desconsiderando os mecanismos químicos e biológicos de atenuação, seria de mais de 13 anos. É possível nesse caso, que ao percorrer uma camada de zona vadosa de tamanha espessura, com tamanho

tempo de percolação, as cargas contaminantes presentes no percolado seriam em grande parte atenuadas.

De modo geral, no entanto, não é recomendável a disposição de resíduos sólidos diretamente sobre os solos, devido às grandes variações e tendência de aumento em profundidade dos valores de K para os solos residuais, especialmente se as condições hidrogeológicas do local forem desfavoráveis.

A compactação seria interessante para minimizar o risco de contaminação do aquífero por percolado, pois a consequente redução do índice de vazios, garantiria a construção de uma barreira de baixa condutividade hidráulica. É reconhecido na literatura que os solos residuais tropicais de caráter laterítico, como predominante na área, apesar de apresentar permeabilidade relativamente alta quando em condições naturais, quando compactados mostram-se praticamente impermeáveis (TOWNSEND, 1985). Entretanto, tal potencial deve ser confirmado através de uma caracterização dos materiais estudados em relação a outros critérios, tais como à resistência e capacidade de atenuação de contaminantes.

#### **5.1.5 Comparação dos resultados de condutividade hidráulica obtidos em campo e em laboratório**

A comparação desses dois resultados é limitada pela diferença de metodologia e de profundidades ensaiadas. Ao comparar as médias obtidas para cada classe de solo segundo as metodologias de campo e laboratório, utilizando como fluido a água, observa-se que os valores de K resultantes dos ensaios de laboratório tendem a ser maiores que os resultados obtidos por meio dos ensaios de campo. A tendência ocorre também se compararmos os resultados do primeiro ensaio feito em campo (em camada mais superficial) em cada ponto, considerando sua classe de solo, com os resultados obtidos em laboratório para a mesma classe. Isso demonstra a influência da atividade biológica sobre a estrutura da amostra, pois para o solo a 0,7 – 1,0 m de profundidade na área ainda existem raízes. A macroporosidade em função das raízes pode superestimar os valores da condutividade hidráulica devido à continuidade apresentada pelo macroporo que não necessariamente se repete no campo, devido a grande porção

de solo envolvido no ensaio (GUIMARÃES *et al.*, 2002). Além disso, a condição ideal de saturação da amostra é mais facilmente alcançada em ensaios em laboratório do que em campo.

## **5.2 Estudo da vulnerabilidade de contaminação dos aquíferos da sub-bacia do Córrego Palmital**

Neste tópico serão apresentados os resultados referentes à aplicação dos métodos GOD e DRASTIC na avaliação na vulnerabilidade natural de contaminação da área de estudos, bem como uma análise conjunta dos resultados.

### **5.2.1 Mapa potenciométrico**

O mapa potenciométrico gerado segundo a metodologia descrita no item 3.3.1, que foi utilizado como base para a aplicação das metodologias GOD e DRASTIC é ilustrado na Figura 44.

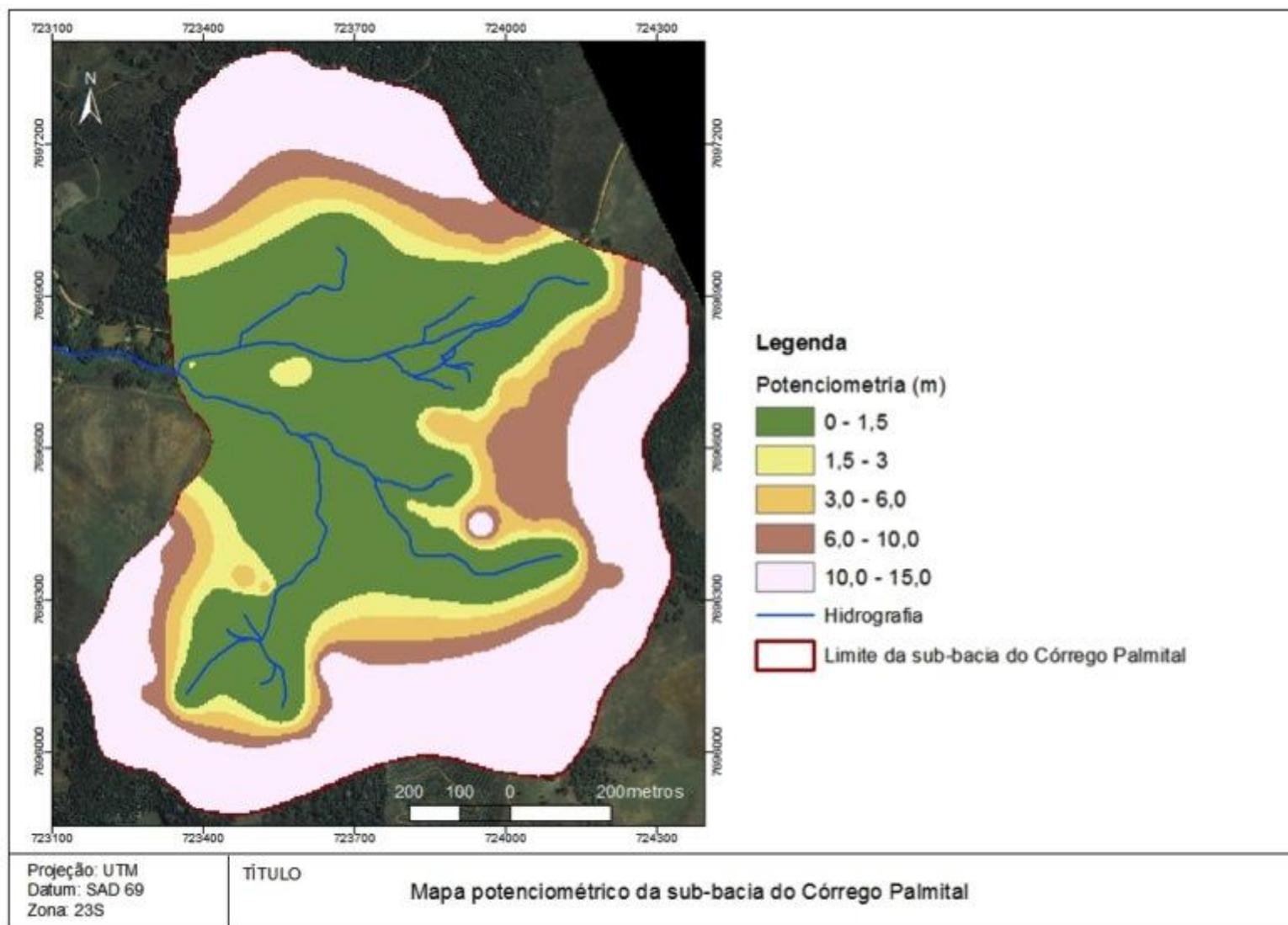


Figura 44: Mapa potenciométrico da área de estudo.

## 5.2.2 Avaliação da vulnerabilidade de contaminação de aquíferos segundo metodologia GOD

Os índices atribuídos segundo a classificação de cada parâmetro na área de estudos são mostrados na

Tabela 33. Em relação ao tipo de aquífero e ao grau de consolidação e litologia da zona vadosa, a área de estudo mostra-se bastante homogênea, tendo sido classificada como aquífero livre e solo residual, respectivamente.

Tabela 33 - Índices atribuídos a cada parâmetro avaliado na metodologia GOD para a sub-bacia do Córrego Palmital.

<b>Parâmetro</b>	<b>Classificação</b>	<b>Índice correspondente</b>
Tipo de aquífero	Aquífero livre	1,0
Grau de consolidação e litologia da zona vadosa	Solo residual	0,4
Profundidade do nível d'água	< 5,0 m	0,9
	5,0 m – 20,0 m	0,8

O mapa de vulnerabilidade gerado segundo a metodologia GOD é mostrado na Figura 48. Na bacia, os índices de vulnerabilidade obtidos foram de 0,36 e 0,28, conforme mostrado na Tabela 34. Assim, a classificação da área de estudo evidenciou a presença de áreas com vulnerabilidades de contaminação do aquífero média e baixa.

Tabela 34 - Abrangência das classes de vulnerabilidade em área e percentual na sub-bacia do Córrego Palmital.

<b>Índice de vulnerabilidade</b>	<b>Classe de vulnerabilidade</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Fração da área (%)</b>
0,36	Média ou moderada	647174	51,5
0,28	Baixa	608831	48,5

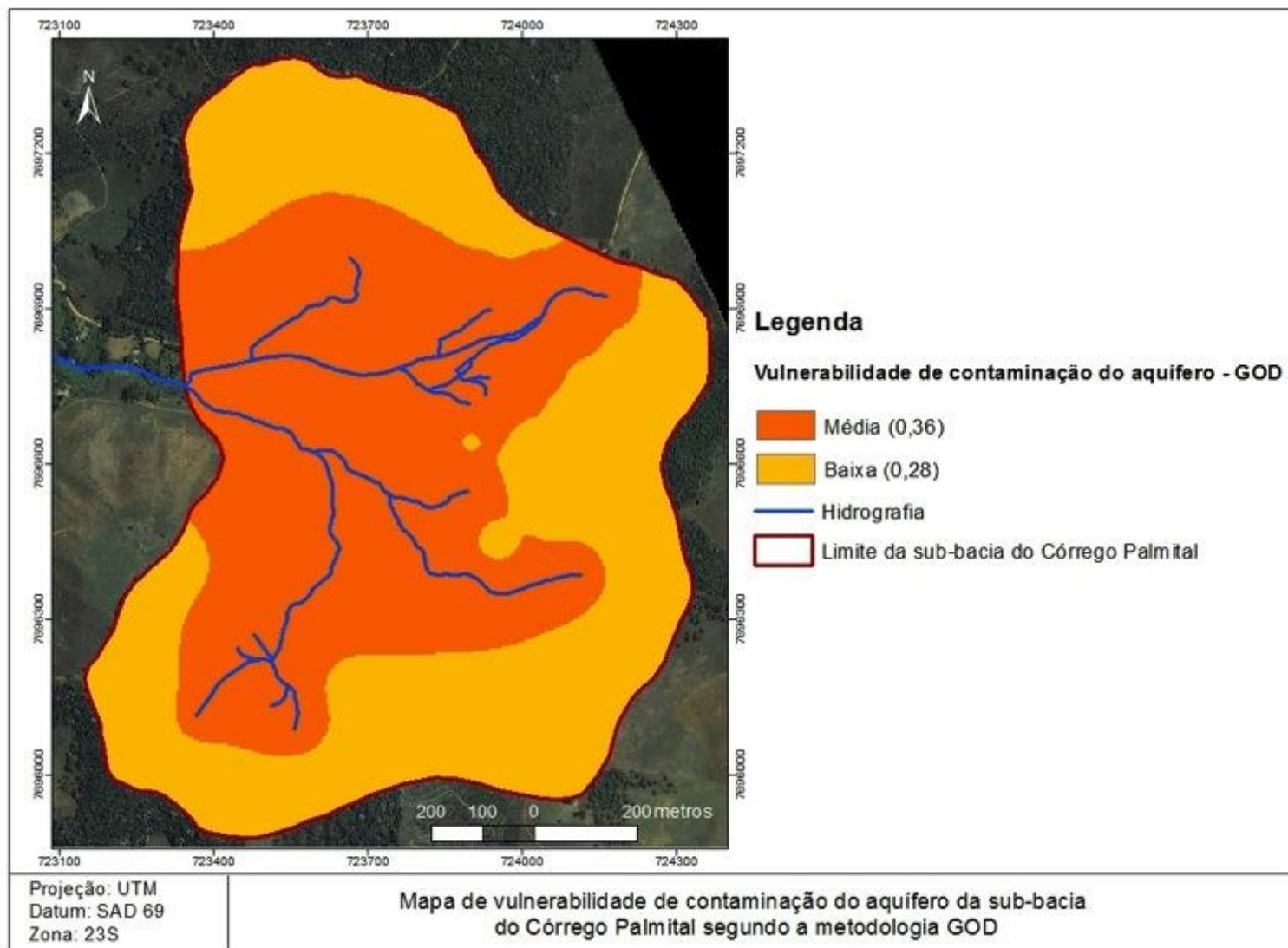


Figura 45: Mapa de vulnerabilidade de contaminação do aquífero na área de estudo segundo a metodologia GOD.

A área total da sub-bacia está quase igualmente dividida entre regiões de baixa e média vulnerabilidade, respectivamente. Entretanto, pode-se observar que nas áreas de menor altitude predomina a classe de vulnerabilidade média. Isso se deve à menor profundidade do lençol freático nessas áreas. A profundidade do nível d'água mostrou-se fator determinante na obtenção das classes de vulnerabilidade na área de estudos, uma vez que a área é homogênea tanto em relação ao grau de confinamento do aquífero quanto à litologia. Apesar dos aquíferos na área serem livres e de modo geral pouco profundos, foram verificados valores baixos dos índices graças a predominância dos solos residuais na área. Os solos residuais tropicais possuem boa capacidade de atenuação das cargas contaminantes.

Segundo Foster *et al.* (2006), áreas classificadas em vulnerabilidade média ou moderada são vulneráveis a alguns poluentes, mas somente quando continuamente lançados, enquanto as áreas classificadas em vulnerabilidade baixa são apenas vulneráveis a contaminantes conservativos a longo prazo, quando continuamente e amplamente lançados. Dessa forma, dentro do contexto atual de uso e ocupação do solo, as áreas classificadas como de vulnerabilidade baixa não são motivo de preocupação em relação ao risco de contaminação, pois além de serem pouco susceptíveis naturalmente, são pouco ocupadas e com modesto desenvolvimento de atividades agropecuárias, com destaque para a pastagem. Nas áreas classificadas em vulnerabilidade média, entretanto, o risco é presente, como será mais detalhadamente discutido posteriormente.

### **5.2.3 Avaliação da vulnerabilidade de contaminação de aquíferos segundo a metodologia DRASTIC**

Os resultados da aplicação da metodologia DRASTIC apresentados nesse tópico consistem na classificação da área de estudos para os sete parâmetros considerados e, como produto final do cruzamento desses parâmetros, o mapa de vulnerabilidade de contaminação do aquífero.

### 5.2.3.1 Profundidade do nível d'água (nível estático) – D

Segundo critérios estabelecidos no item 3.4.3, o mapa potenciométrico foi reclassificado e indexado como mostrado na Figura 46.

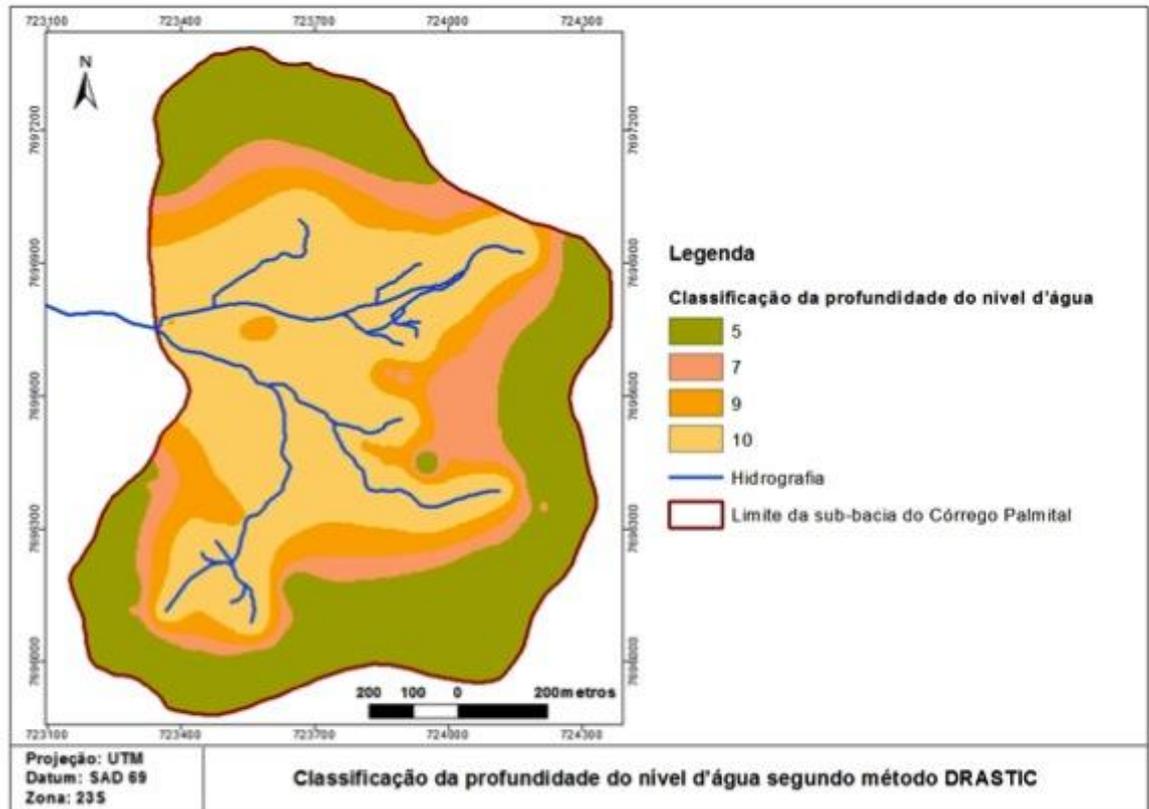


Figura 46: Classificação da profundidade do nível d'água segundo metodologia DRASIC.

### 5.2.3.2 Recarga do aquífero - R

Às áreas da sub-bacia com declividade de até 30 % foi atribuído índice 8, baseando-se na recarga média calculada igual a 233 mm/ano, segundo detalhado no item 3.4.3. Às áreas com declividade superior a 30% foi atribuído índice 3, visto ser o escoamento superficial significativamente maior do que a infiltração nesses casos. A classificação da área é mostrada na Figura 47.

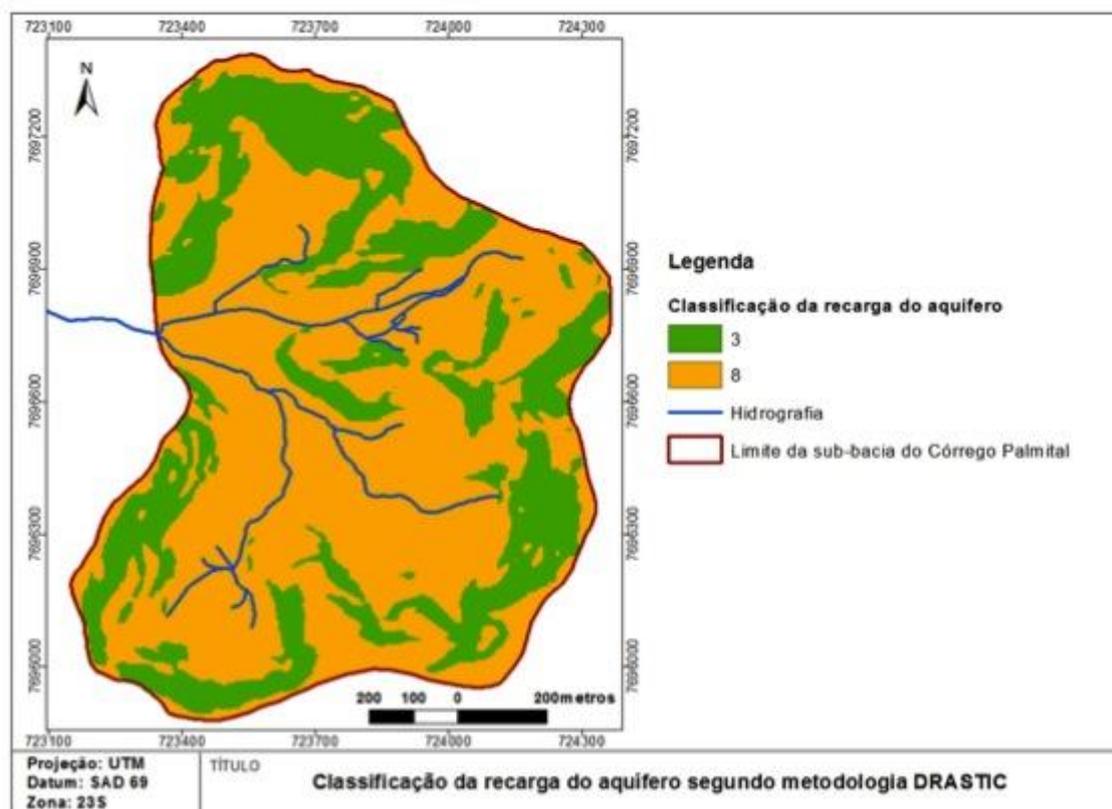


Figura 47: Classificação da recarga do aquífero segundo metodologia DRASTIC.

### 5.2.3.3 Material do aquífero – A

O material do aquífero na sub-bacia é constituído basicamente de gnaiss em diferentes graus de intemperismo, sendo classificado assim como “rocha metamórfica/ígnea alterada”, cujo índice correspondente varia de 3 a 5. Considerando que o grau de alteração do gnaiss no aquífero é significativo, constituindo solo residual, maduro ou jovem, dependendo da profundidade, o material do aquífero foi classificado como índice 5, sendo mais conservador.

### 5.2.3.4 Tipo de solo – T

No que se refere aos tipos de solo, os Latossolos foram classificados como “argila agregada ou expansível”, recebendo índice 7, por tratarem-se de solos com alto teor de argila e estrutura predominantemente granular (agregada); por outro lado os Argissolos e Cambissolos foram classificados como “franco argiloso”, recebendo índice 3, tratarem-se de solos que possuem frações de argila, silte e areia, mas com quantidade

suficiente de argila para que essa influencie notavelmente o comportamento dos solos. Existem, é claro, grandes diferenças na textura de solos de mesma classe, como se observa para os Argissolos (Tabela 22). A classificação como “franco argiloso” trata-se de uma forma de representação do comportamento médio dos Argissolos e Cambissolos na bacia, dentre as possíveis classes apresentadas pelo método DRASTIC. A classificação da sub-bacia para esse parâmetro é mostrada na Figura 48.

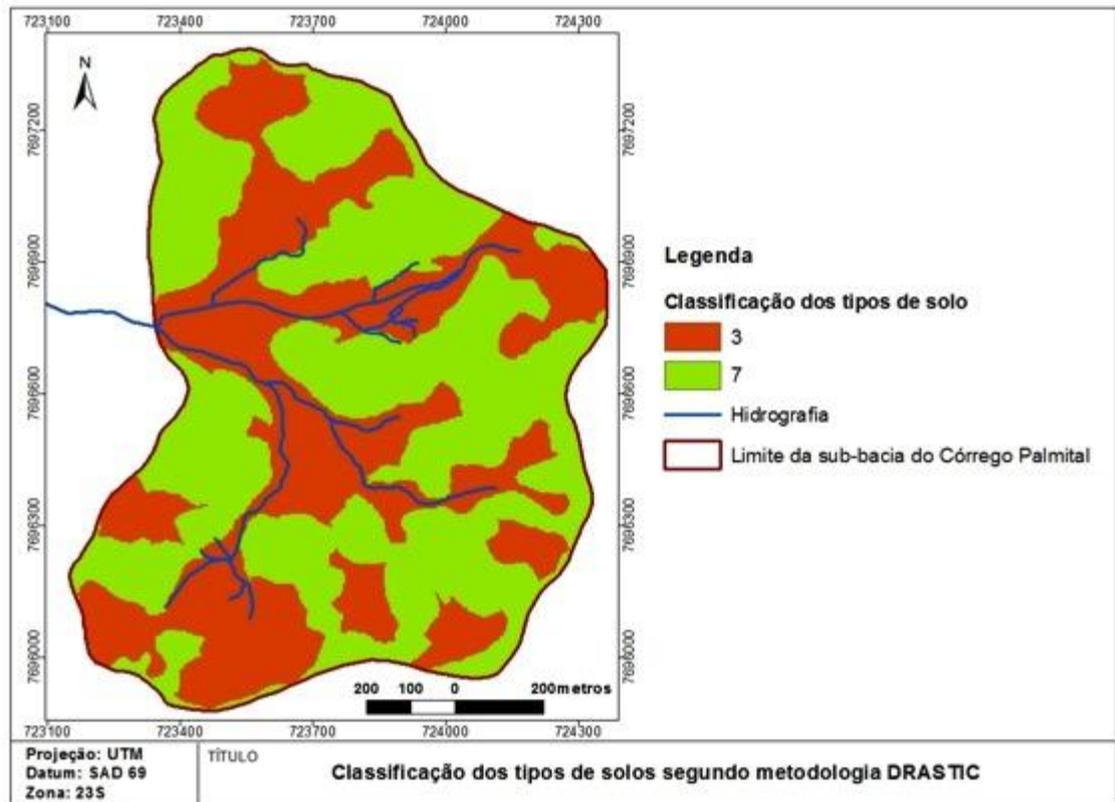


Figura 48: Classificação dos tipos de solo segundo metodologia DRASTIC.

### 5.2.3.5 Topografia – T

A classificação da topografia a partir das declividades na área de estudo, evidenciando o predomínio de valores de declividade superiores a 18%, devido ao relevo acidentado, é ilustrada na Figura 49.

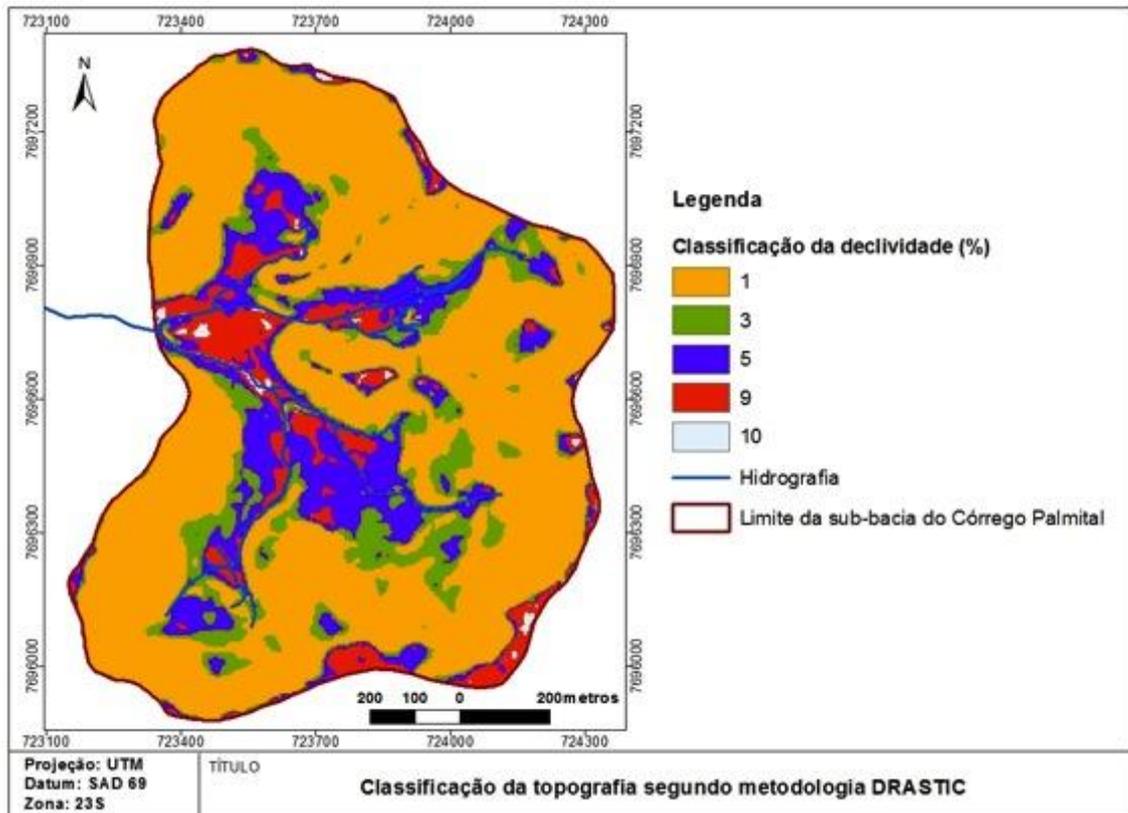


Figura 49: Classificação da topografia segundo metodologia DRASTIC.

#### 5.2.3.6 Impacto da zona vadosa – I

A classificação da influência da zona vadosa está relacionada também aos parâmetros “tipo de solo” e “material do aquífero”. Dentro das possíveis classes estabelecidas na Tabela 23, o material da zona vadosa na sub-bacia seria classificado entre “argila/silte” e “Areia e cascalho com percentagem significativa de silte e argila”, motivo pelo qual foi atribuído a esse parâmetro índice 5. Esse valor foi considerado como representativo da situação intermediária entre as duas categorias que caracterizam a bacia como um todo, devido à predominância de material argilo-arenoso nas camadas mais superficiais de solo residual e silto-arenoso/areno-siltoso nas camadas mais profundas.

#### 5.2.3.7 Condutividade Hidráulica do Aquífero – C

A condutividade hidráulica do aquífero foi classificado como índice igual a 1, baseando-se nas médias dos resultados do *slug test* e dos ensaios de permeabilidade em campo realizados no trecho mais profundo do furo, valores inferiores a  $5,0 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 5.2.3.8 Mapa de vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade segundo a metodologia DRASTIC é ilustrado na Figura 50.

Tabela 35 - Abrangência das classes de vulnerabilidade segundo DRASTIC em área e percentual na sub-bacia do Córrego Palmital.

<b>Índice de vulnerabilidade</b>	<b>Classe de</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Fração da área (%)</b>
120 - 159	Moderada	699733,3	55,7
< 120	Baixa	555846,9	44,3

Segundo essa metodologia, a sub-bacia tem predomínio de áreas de média vulnerabilidade, com percentual um pouco maior em relação à obtida com o método GOD. Mais uma vez observa-se predominância da classe de vulnerabilidade média nas áreas de menor altitude, em que o lençol freático é raso. A profundidade do lençol freático, juntamente com o “impacto da zona não-saturada”, é o parâmetro que recebe maior peso (5) dentre os 7 utilizados nesse método, o que justifica a clara correspondência entre as áreas classificadas em baixa vulnerabilidade e as áreas com profundidade do lençol maior do que 9,1 m (índice 5 para o parâmetro “Depth to water”). Soma-se a isso a grande influência do parâmetro de recarga do aquífero, de peso 4, que recebeu maiores valores para as áreas de menor altitude e relevo mais plano na bacia, o que favorece a infiltração, facilitando o transporte de possíveis substâncias contaminantes, dentro da lógica da avaliação de vulnerabilidade de contaminação.

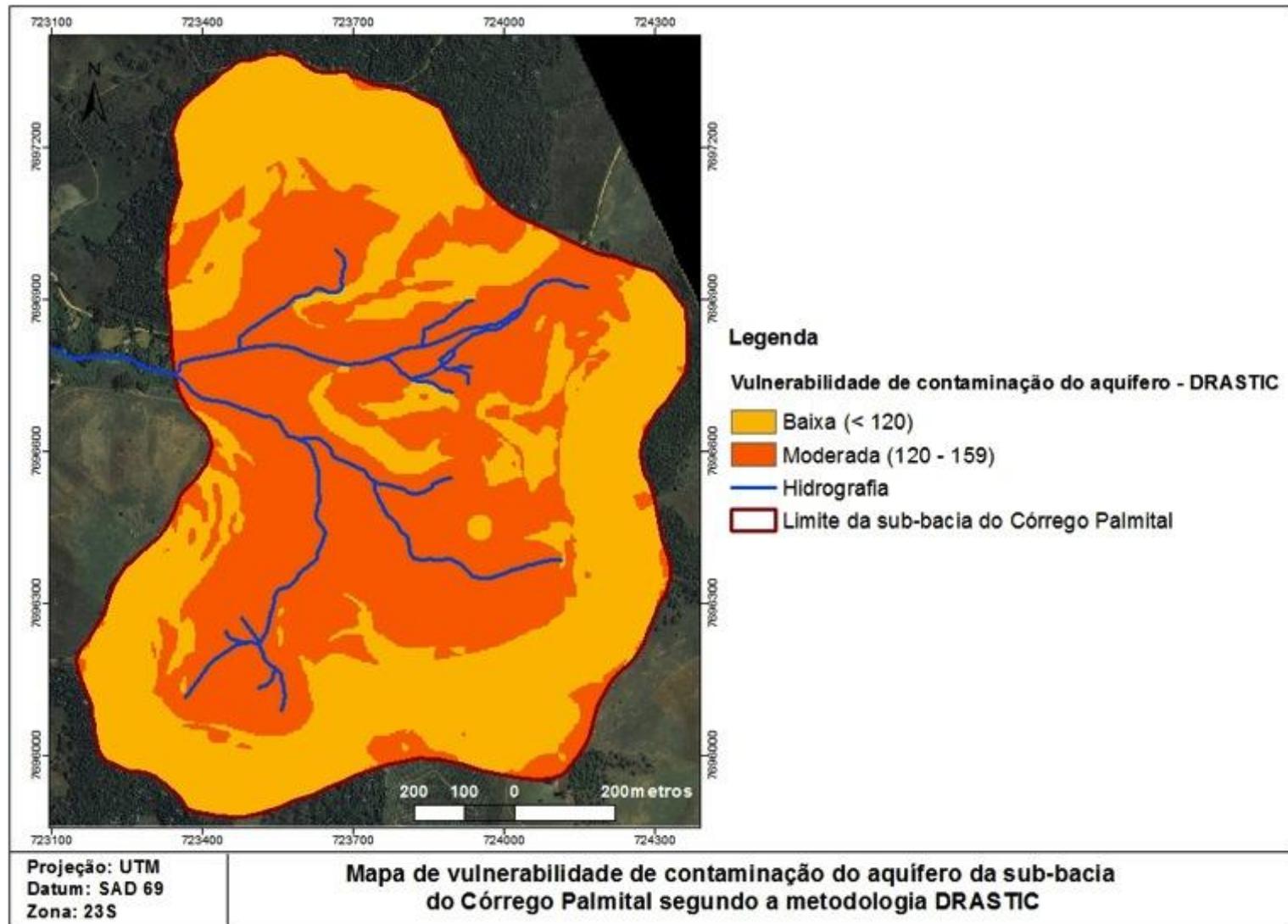


Figura 50: Mapa de vulnerabilidade de contaminação do aquífero na área de estudo segundo a metodologia DRASTIC.

#### **5.2.4 Comparação e análise conjunta da aplicação das metodologias GOD e DRASTIC**

A análise dos dois mapas de vulnerabilidade gerados mostra grande correspondência entre as classificações realizadas através dos dois métodos. A aplicação da metodologia DRASTIC gerou um maior número de áreas isoladas devido ao cruzamento de vários parâmetros, enquanto a metodologia GOD, por ser uma análise mais simplificada, gerou um mapa mais “contínuo”. Para a metodologia GOD, a área mostrou-se homogênea tanto em relação à litologia quanto ao grau de confinamento do aquífero, motivo pelo qual os limites que separavam as áreas de baixa e média vulnerabilidade foram condicionados apenas pela classificação da profundidade do nível d’água na bacia.

Considerando que a metodologia DRASTIC seja de fato mais confiável por considerar mais variáveis, pode-se afirmar que a metodologia GOD mostrou bons resultados na análise de vulnerabilidade natural de contaminação da sub-bacia estudada, mesmo sendo mais simples e normalmente utilizada para áreas maiores, a partir de mapas com menor escala. O fato de os resultados terem sido tão parecidos está relacionado provavelmente à baixa complexidade e homogeneidade hidrogeológica da área e à confiabilidade dos dados de entrada, mas principalmente à grande influência que a profundidade do lençol freático e no caso da metodologia GOD, a ausência de confinamento (aquífero livre), exercem sobre os resultados gerados através desses métodos. Além disso, apesar de simples, a metodologia GOD é baseada em parâmetros estratégicos, cuja indexação indiretamente considera propriedades da litologia, tais como permeabilidade, porosidade e grau de consolidação, como exposto por Foster & Hirata (1988). Dessa forma, apesar de suas limitações, é confirmada a eficiência desta metodologia, ao menos para áreas relativamente homogêneas em termos geológicos, mesmo quando da utilização de grandes escalas, como é o caso do presente trabalho.

Os mapas de vulnerabilidade gerados mostraram-se representativos, uma vez que são perfeitamente lógicos do ponto de vista técnico. Nas áreas de maior altitude, por ser o lençol freático profundo, talvez até inexistente em alguns pontos, a vulnerabilidade é predominantemente baixa, enquanto nas áreas de menores altitudes e declividades, próximas aos cursos d’água, onde o lençol freático é mais raso, predomina a vulnerabilidade média. A vulnerabilidade natural ou intrínseca de contaminação das águas subterrâneas é mais alta nas áreas de menor altitude e profundidade do lenço

freático uma vez que nestas a acessibilidade de eventuais contaminantes é favorecida tanto pela maior facilidade de infiltração da água quanto pela menor espessura de solo até o nível d'água (zona vadosa), o que pode diminuir o tempo para que ocorra atenuação das cargas.

A vulnerabilidade natural determinada através de ambos os métodos são independentes da carga poluente. No caso da determinação do risco de uma determinada área com relação a um tipo específico de poluente é necessário considerar outros fatores, como as propriedades físico-químicas do poluente e sua persistência, a intensidade de aplicação, dentre outros fatores, informações difíceis de serem obtidas e que não constituíam o foco dessa pesquisa. Entretanto, algumas considerações sobre o risco potencial de poluição em termos qualitativos podem ser pontuadas, baseando-se em aspectos do uso e ocupação do solo e das práticas de saneamento que caracterizam a área de estudos, observados no presente trabalho e já descritos por Andrade (2010).

As áreas classificadas como de vulnerabilidade média na sub-bacia merecem especial atenção pois, além da sua maior susceptibilidade natural à contaminação do aquífero, tratam-se dos locais com maior concentração de residências e de maior desenvolvimento das atividades agropecuárias. Na área de estudos, a agricultura e as pastagens se destacam como principais usos do solo, sendo a primeira mais destacada nas áreas de vulnerabilidade média, enquanto a segunda cobre porção significativa da bacia, inclusive nos pontos de altitudes mais elevadas. As cargas contaminantes na área provêm de agroquímicos, dejetos animais e efluentes domésticos.

No que se refere à agricultura, não é comum na área de estudo a utilização de agrotóxicos, mas o uso de NPK como fertilizante foi relatado em cinco das quinze propriedades cadastradas da área (ANDRADE, 2010). Os constituintes do NPK são o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K). Segundo Paralta *et al.* (2002), enquanto os dois últimos apresentam pouca mobilidade na maioria dos solos, não constituindo grande perigo de poluição difusa, a contaminação por nitratos das águas subterrâneas é frequentemente observada nas zonas agrícolas, devido à práticas de adubação não controladas, que provocam a acumulação de compostos nitrogenados no solo. O íon nitrato apresenta elevada mobilidade, devido à sua grande solubilidade, à sua adsorção praticamente nula e a um retardamento baixo ou nulo. Assim, o uso de fertilizantes pode passar a ser preocupante caso essa prática seja crescente e descontrolada na área.

Com relação à criação animal, os currais e pocilgas localizam-se de modo geral próximos às residências e se concentram também nas áreas de vulnerabilidade média de contaminação. Nestas áreas, são gerados, embora de forma pontual, volumes consideráveis de dejetos animais, com potencial poluidor significativo pela sua elevada carga orgânica e possível presença de patógenos.

A maior preocupação em termos de carga contaminante, entretanto, está relacionada à forma inadequada de disposição dos efluentes domésticos na sub-bacia, já que tanto a rede de esgoto como a rede de abastecimento de água, não existem na área de estudos. Assim, predomina na área como forma de disposição alternativa de esgotos domésticos, as fossas de infiltração, presente em doze das quinze propriedades cadastradas por Andrade (2010) na sub-bacia. As fossas de infiltração são inadequadas do ponto de vista técnico e sanitário, pois não possuem fundo impermeabilizado, o que permite a percolação do esgoto “in natura” através do solo, tendo com única forma de tratamento, a própria capacidade de atenuação desse material através da filtração, retenção física e processos químicos e biológicos. A Figura 51 mostra as fossas de infiltração presentes na área em 2010 e realça a proximidade das mesmas com os poços de captação de água para abastecimento das residências.

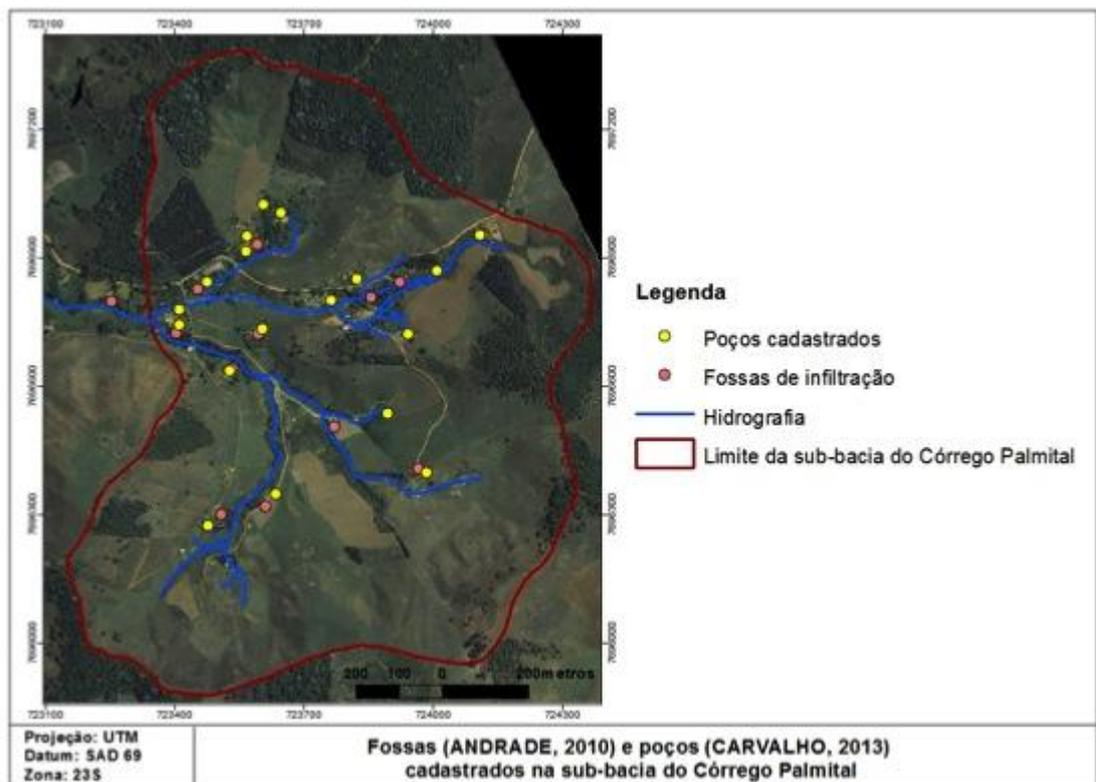


Figura 51: Poços e fossas cadastrados na área de estudos.

Um agravante para esse fato no que se refere à avaliação da vulnerabilidade de contaminação das águas subterrâneas é que os índices gerados através de ambos os métodos, no caso específico da carga contaminante ser o esgoto doméstico, são subestimados, uma vez que o efluente é disposto abaixo da superfície do solo, estando a uma profundidade menor do aquífero em relação à cota do terreno. Assim, no caso de cargas contaminantes que não são lançados diretamente na superfície do terreno, as metodologias mostram limitações. De acordo com Machado (2011), a aplicação do método DRASTIC parte do pressuposto de que o contaminante é introduzido na superfície do terreno. Segundo Foster *et al.* (2006), os mapas de vulnerabilidade não devem ser usados, a rigor, para avaliar o risco de contaminação em relação a contaminantes despejados abaixo do subsolo (como, por exemplo, no caso de vazamentos de grandes tanques de armazenagem subterrâneos, de lixiviação de aterros de resíduos sólidos sob a camada de solo e com retirada da zona vadosa) e quando ocorre derramamento de solventes orgânicos sintéticos imiscíveis (DNAPLs). Esses casos provavelmente resultarão em alto risco de contaminação, independentemente da vulnerabilidade do aquífero. A única coisa a considerar, em tais circunstâncias, será a intensidade e provável duração da carga.

Os resultados obtidos segundo os métodos GOD e DRASTIC são em parte corroborados pelos dados de Andrade (2010) em estudo da qualidade da água de poços e nascentes presentes na área de estudo. Ao comparar os resultados com os padrões da Resolução CONAMA nº 396/08 obtidos para 10 dos poços ilustrados na Figura 54, a autora observou não-conformidades para diversos parâmetros, dentre os quais, DBO, coliformes totais e *E. coli*, evidenciando a contaminação dos aquíferos. Os poços analisados concentram-se na área classificada como de média vulnerabilidade. As principais causas para tal contaminação são a poluição por efluentes domésticos e dejetos animais provenientes de currais, pocilgas e pastagens. A situação exposta evidencia a necessidade de melhoria da estrutura sanitária da sub-bacia através da construção de fossas sépticas, a fim de garantir uma maior proteção das águas subterrâneas e, assim, da qualidade de vida da população. Andrade (2010) também observou a presença de nitrato nas águas de alguns poços, entretanto, em concentrações abaixo do limite estabelecido pela legislação.

Vale frisar, entretanto, que, segundo Foster & Hirata (1988), sobre a metodologia GOD, “a tentativa de definir uma vulnerabilidade geral a um contaminante universal em um

típico cenário de poluição pode gerar interpretações errôneas. Com efeito, a interação entre os componentes da vulnerabilidade à contaminação e da carga contaminante no subsolo é muito complexa. Na verdade, certos tipos de carga, tais como os que contêm contaminantes altamente móveis e persistentes ou aqueles lançados abaixo do nível d'água causam alto risco de contaminação do aquífero independentemente da vulnerabilidade natural da área.” Portanto, devem ficar claras as limitações dos índices de vulnerabilidade, os quais podem ser de uso prático para a determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas a um nível de reconhecimento, mantendo sua validade técnica quando as cargas contaminantes avaliadas não são contaminantes persistentes e móveis.

Foster & Hirata (1988) frisam que a confiança nos mapas de vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos estará assegurada, desde que fiquem claras ao usuário as limitações associadas ao método utilizado.

Assim, os resultados comprovam que as áreas apresentam vulnerabilidade de contaminação do aquífero e que o risco é presente, mesmo sendo modesta a ocupação na sub-bacia estudada, e, assim, as cargas contaminantes resultantes da atividade antrópica. Segundo Foster & Hirata (1988), o impacto nos aquíferos também dependerá da densidade populacional, proporcional à concentração de contaminantes. Dessa forma, deve-se ter atenção ao aumento da população na região do Córrego Palmital, para que os impactos ambientais já evidentes na área, não constituam riscos sanitários ainda maiores do que os presentes.

Nesse contexto, os mapas de vulnerabilidade mostram-se como ferramenta ao planejamento ambiental da área. A ocupação e implantação de empreendimentos na sub-bacia que podem ocorrer no futuro, considerando o grande crescimento do município de Viçosa, devem ser realizados com critério técnico e analisando os aspectos referentes à proteção dos aquíferos na região. Atualmente, o futuro da região em termos de ocupação é, de certa forma, imprevisível, desde que algumas propriedades foram declaradas como “áreas de servidão” devido à construção de um mineroduto que passa pela área, motivo pelo qual alguns moradores teriam que mudar-se de suas residências.

### **5.2.5 Considerações sobre a escala utilizada**

Como abordado na revisão de literatura, métodos como o GOD são normalmente utilizados para trabalhos semirregionais e regionais, ou seja, para escalas menores que 1:100.000, enquanto o método DRASTIC é mais utilizado para estudos de semidetalhes (1:25.000 a 1:100.00) e de detalhe (maiores de 1:25.000). No presente trabalho, os mapas foram elaborados em escalas sempre superiores a 1:10.000, uma vez que o levantamento detalhado de dados em uma área relativamente pequena permitiu esse tipo de abordagem. Dessa forma, em princípio, o método DRASTIC mostraria-se mais adequado na avaliação da vulnerabilidade da sub-bacia do que o método GOD.

Entretanto, a justificativa para tal fato, segundo a interpretação de Auge (2004), parece estar condicionada à facilidade de obtenção de dados para a indexação de parâmetros. Assim, para uma área de grandes proporções, é mais viável realizar um bom levantamento para a caracterização da área segundo três parâmetros do que segundo sete parâmetros, o que provavelmente seria inviável técnica e financeiramente. A utilização do método DRASTIC a partir de dados resumidos ou pouco confiáveis, por outro lado, resultaria em um mapa de pouca credibilidade. Por este motivo, é mais adequado utilizar métodos que usam poucos parâmetros, como o GOD, para mapeamento da vulnerabilidade de grandes áreas territoriais. Os resultados do presente trabalho sugerem, entretanto, que um método considerado simplificado como o GOD pode ser aplicado em áreas pequenas para gerar mapas de grande escala, se os mapas que compõem o método também forem gerados ou disponíveis em escala de detalhe. Assim, a escala poderia limitar o método, mas o método não limitaria a escala, dependendo do detalhamento dos “dados de entrada”.

## 6. CONCLUSÕES

A caracterização física dos solos permite concluir que os solos residuais maduros de gnaiss analisados são de textura predominantemente argilo-arenosa, mas, de modo geral, as frações silte e areia aumentam em profundidade nos solos estudados.

Os resultados de permeabilidade obtidos através dos ensaios em campo permitem concluir que os solos residuais de gnaiss exibem significativa heterogeneidade em relação à condutividade nas camadas mais profundas de seus perfis, característica comum em materiais resultantes da intemperização de rochas cristalinas. Os valores de  $K$  variaram entre as ordens de grandeza de  $10^{-4}$   $\text{cm.s}^{-1}$  a  $10^{-7}$   $\text{cm.s}^{-1}$ , apresentando tendência de aumento em profundidade para os perfis estudados. Os resultados permitem concluir também que o estudo da condutividade hidráulica em profundidade é adequado à caracterização do material como solo residual, mas não segundo a classificação pedológica, uma vez que esta considera em seu diagnóstico, de modo geral, camadas mais superficiais do solo, correspondentes aos horizontes A e B. Conclui-se ainda que deve-se ter cuidado na utilização de valores médios de condutividade hidráulica para a caracterização de um perfil como um todo ou mesmo para uma mesma classe de solo em uma área, bem como generalizações acerca desse parâmetro.

Com relação aos ensaios de permeabilidade em laboratório, utilizando água como fluido percolante e amostras do horizonte B das classes de solo presentes na sub-bacia, pode-se concluir que os Argissolos Vermelho-Amarelos possuem condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$   $\text{cm.s}^{-1}$ ; menores que os Latossolos Vermelho-Amarelos e Cambissolos Háplicos, os quais apresentaram valores próximos para esse parâmetro, da ordem de  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$   $\text{cm.s}^{-1}$ . Os resultados confirmam o efeito da estrutura dos Latossolos no aumento de sua permeabilidade em relação a outros solos com elevadas frações de argila. Pode-se concluir também que a condutividade hidráulica e a permeabilidade intrínseca possuem forte correlação com a porosidade nos solos estudados.

Com relação aos ensaios de permeabilidade em laboratório com percolado de aterro sanitário, os menores valores foram obtidos para os Cambissolos Háplicos, os quais apresentaram valores da ordem de  $10^{-6}$  e  $10^{-7}$   $\text{cm.s}^{-1}$ . Ao analisar a distribuição dos

resultados, observa-se que os Latossolos Vermelho-Amarelos possuem condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-5}$  e  $10^{-6}$   $\text{cm.s}^{-1}$  para esse fluido, maior que dos Argissolos Vermelho-Amarelos, para os quais predominaram valores da ordem de  $10^{-6}$   $\text{cm.s}^{-1}$ .

As principais conclusões em relação aos ensaios de permeabilidade em laboratório são:

- Para percolados com quantidades significativas de sólidos, a condutividade hidráulica dos solos residuais maduros ao percolado de aterro sanitário é menor do que à água, devido principalmente à obstrução dos poros.
- A duração dos ensaios de permeabilidade utilizando percolado influenciará fortemente a condutividade hidráulica, devido à obstrução dos vazios da amostra, atividade microbiológica e acúmulo de sólidos no sistema de análise como um todo.
- A presença de raízes e fraturas modificam a estrutura do solo e influenciam os valores de condutividade hidráulica, fato que não pode ser isolado dos demais fatores, limitando, em certa escala, a comparação dos resultados com relação às classes de solo.
- O estabelecimento da percolação de determinado volume de poros como critério para o término dos ensaios de permeabilidade com percolado pode ser mais interessante que o utilizado nesse trabalho, baseado na “estabilização” dos dados, uma vez que a duração diferenciada dos ensaios influencia os resultados e pode dificultar a comparação dos mesmos.

Os resultados da determinação da condutividade hidráulica das classes de solos estudadas em campo e em laboratório no presente estudo, utilizando como fluido tanto água quanto percolado de aterro sanitário são relevantes na medida em que essas classes são representativas não apenas da Zona da Mata mineira, como de todo território brasileiro. Além disso e, principalmente, são escassos na literatura dados de permeabilidade de solos em condição natural ao percolado de aterro sanitário, visto que na maioria das vezes os experimentos utilizam amostras de solo compactadas e/ou utilizam soluções sintéticas. Conhecer as condições naturais - ainda que não seja comum tampouco recomendável a utilização de solo sem compactação como barreira de impermeabilização de base em aterro-, é importante para entender melhor o comportamento da condutividade hidráulica em função das características do percolado, permitindo analisar a possibilidade de disposição dos resíduos sólidos em solo natural

em aterros sanitários de pequeno porte. Além disso, tais conhecimentos podem auxiliar em estudos de risco de contaminação, eventualmente, podendo gerar dados que permitam até mesmo a criação de metodologias específicas para avaliação de risco de contaminação por percolados de aterros sanitários.

Com relação ao mapeamento da vulnerabilidade de contaminação do aquífero, pode-se concluir que a sub-bacia do Córrego Palmital possui áreas de baixa e média vulnerabilidades. A classificação mostrou grande dependência da profundidade do lençol freático para ambos os métodos aplicados, GOD e DRASTIC. A metodologia GOD mostrou-se eficiente na avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos da área, tendo como resultado um mapa de vulnerabilidade bastante parecido com o resultante da aplicação da metodologia DRASTIC.

A classe de “média vulnerabilidade” concentrou-se nas áreas de menores altitudes, onde o nível d’água dos aquíferos é mais raso e é menor a zona vadosa, enquanto a classe de baixa vulnerabilidade mostrou-se dominante nas áreas mais altas da bacia, onde a recarga e a acessibilidade ao aquífero são, de modo geral, menores. Não existem informações detalhadas sobre a carga de contaminantes na bacia, mas, através de uma análise qualitativa, pode-se afirmar que existe risco de contaminação, ainda que este seja pequeno devido à baixa densidade populacional. Tal conclusão baseia-se no fato de que os efluentes domésticos e dejetos animais constituem cargas contaminantes e são gerados e dispostos principalmente nas áreas de maior susceptibilidade (vulnerabilidade média). O estudo da vulnerabilidade natural dos aquíferos da sub-bacia do Córrego Palmital facilita a compreensão do cenário atual de poluição das águas subterrâneas, exposto no trabalho de Andrade (2010). Conclui-se, assim, que há necessidade de uma melhoria da estrutura sanitária na sub-bacia visando a disposição adequada dos efluentes domésticos, por exemplo, através da construção de fossas sépticas.

Os resultados obtidos na presente pesquisa e o aprofundamento dos mesmos são relevantes pela importância que as nascentes e águas subterrâneas da bacia possuem, em escala local e regional. Ainda que os mapas de vulnerabilidade intrínseca do aquífero à contaminação tenham, segundo a literatura, suas limitações, os resultados desse trabalho constituem uma forma de reconhecimento preliminar de áreas de maior susceptibilidade à contaminação, nas quais deve ser exercido controle da poluição, já existente e potencial; além disso, visando a proteção das águas subterrâneas na bacia, os mapas de

vulnerabilidade auxiliam no planejamento do uso do solo, e poderão ser usados na alocação mais adequada de possíveis atividades ou empreendimentos que futuramente venham a ser instalados na área de estudo, sendo base para a avaliação do risco de contaminação ou vulnerabilidade específica a determinado contaminante.

## **7. RECOMENDAÇÕES**

A partir das observações realizadas nesse estudo, recomenda-se a realização de alguns estudos complementares:

- Aprimoramento da metodologia de determinação da condutividade hidráulica para percolados de aterro sanitário, visando maior fidelidade dos resultados às condições reais. As dúvidas surgidas e observações feitas durante esse trabalho permitem sugerir o estudo da utilização ou do desenvolvimento de outros materiais com objetivo de impedir o fluxo radial e a passagem de fluido pelas paredes do permeâmetro, os quais interajam menos que a bentonita com o percolado.

- Para a atualização do mapa de vulnerabilidade natural de contaminação dos aquíferos, recomenda-se a realização de mais furos de sondagem e instalação de maior número de poços, especialmente em áreas mais elevadas da bacia, a fim de obter uma melhor descrição dos solos da sub-bacia em profundidade e, principalmente, maior conhecimento sobre a posição do lençol freático nestes locais, permitindo a elaboração de um mapa potenciométrico mais confiável e detalhado, muito importante em estudos hidrogeológicos.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Águas subterrâneas, o que são? Disponível em: <<http://www.abas.org/educacao.php>>. Acesso: 26 fev. 2012.

ABAS, ABGE, SBG/SP. **Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: ABAS, ABGE, SBG/SP. 1992. 290p.

ABGE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. Manual de Sondagem. Coordenação de Wilson Shoji Iyomasa. Boletim n° 3, 4ª edição. São Paulo, 1999. 73 p.

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, maio/jun. 2004.

APHA, AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21ed. Washington: APHA, 2005. 1000p.

ANANDARAJAH, A. Mechanism controlling permeability change in clays due to changes in pore fluid. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*, v. 129, n. 2, p. 163-172, 2003.

ANDRADE, T. Variabilidade Espacial e Temporal de Atributos Hidrológicos para Gerenciamento de Recursos Hídricos em Aluvião no Semi-árido sob uso Agrícola. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - ABGE. Ensaio de permeabilidade em solos (orientações para sua execução no campo). Boletim n° 4, 3ª edição. São Paulo, 1996. 35 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14545**. Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8419**. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181**. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6508**. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457**. Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

AGUIAR, B. **O emprego do permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura**. 2001. 67p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHER, J.; PETTY, R. **DRASTIC: a standardized system for evaluation groundwater pollution potential using hydrogeologic settings.** USEPA Report 600/2-85/018. 1987. p. 38-57.

ALONSO, T. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeâmetro de parede flexível.** 2005. 120p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ALMEIDA, G. B. O. **Caracterização Hidrogeológica de um Sítio Experimental da Formação Barreiras no Recôncavo Baiano.** 2011. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ALMEIDA, T. L.; SCHALCH, V. Avaliação da contaminação de líquidos contaminantes percolados nos poros do solo em locais de disposição de resíduos sólidos. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15, 2008, Natal. **Anais eletrônicos...** São Paulo: ABAS, 2008. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23367/15456>>. Acesso em: 07 jan. 2013.

ANDRADE, L. C. **Estudo da influência do meio físico e das atividades antrópicas na qualidade da água na Sub-bacia do Córrego Palmital – Viçosa/MG.** 2010. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ARRUDA, P. R. R. **Uma contribuição ao estudo ambiental da Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa, Minas Gerais.** 1997. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

AZEVEDO, M. A. A.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; MINETTE, E.; SCHAEFFER, C. E. G. R. Caracterização geotécnica das formações superficiais de solo de Viçosa-MG. In: COBRAMSEG, 11 1998, BRASILIA, DF - BRASIL. **Anais...** Brasília: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 1998. v. I. p. 81-88.

AUGE, M. Vulnerabilidade de aquíferos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeologia*, n. 4, p. 85-103. 2004.

BARUQUI, F. M. **Inter-relações solo: pastagens nas regiões Mata e Rio Doce do estado de Minas Gerais.** 1982. 119p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1982.

BAVEYE, P.; DUMESTRE, A. Comments on: experimental study on the reduction of soil hydraulic conductivity by enhanced biomass growth by Wu *et al.*. *Soil Science*, v. 163, n. 9, p. 759–761, set. 1998.

BELLO, A. A.; OSINUBI, K. J. Attenuative Capacity of Compacted Abandoned Dumpsite Soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 16, 2011. p. 71-91. Disponível em: <http://www.ejge.com/2011/Ppr11.005/Ppr11.005a.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2012.

BENSON, C. H.; HARDIANTO, F. S.; MOTAN, E. S. **Representative Specimen Size for Hydraulic Conductivity Assessment of Compacted Soil Liners**, Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM, Philadelphia. 1994.

BLIGHT, G.E.; LEONG, E.C. **Mechanics of residual soils**. 2<sup>a</sup> Ed. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema. 2012. 354p.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. v. 1. 248 p.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. Geologia do Brasil: Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Escala 1:25000000. Brasília, DF, 1984. 501p.

BUSELLI, A. A. P. T. **Proposta de gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD) no Município de Viçosa, MG**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

CADIMA, Z. A.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, no campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 4, n. 2, p.63-66, 1980.

CAMPBELL, M. D.; STARRETT, M. S.; FOWLER, J. D.; KLEIN, J. **Slug Tests and Hydraulic Conductivity**. In: Proc. Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water and Restoration, API/NWWA Conference, October 31 -November 2, 1990, Houston, Texas, Peer Reviewed. p. 85-99.

CAMPOS, P. **Influência físico-hídrica nos atributos diagnósticos em latossolos do Distrito Federal**. 2009. 99p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias). Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CAPUCCI, E.; MARTINS, A. M.; MANSUR, K. L.; MONSORES, A. L. M. Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas. DRM-RJ - Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SEMADS, 2001. 66 p.

CARVALHO FILHO, A. **Caracterização mineralógica, química e física de solos de duas unidades de paisagem do Planalto de Viçosa-MG**. 1989. 114p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1989.

CARVALHO, A. L. **Contaminação de águas subsuperficiais em área de disposição de resíduos sólidos urbanos – o caso do antigo lixão de Viçosa (MG)**. 2001. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

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

- CARVALHO, V. E. C. **Modelagem hidrogeológica de uma sub-bacia hidrográfica da Zona da Mata de Minas Gerais**. 2013. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.
- CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. Princenton Groundwater Inc.: Clean Environment Brasil, 1989. 117 p.
- CORRÊA, G. F. **Modelo de evolução e mineralogia da fração argila dos solos do Planalto de Viçosa, MG**. 1984. 86p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1984.
- CORRÊA, A. C. S. S.; SOUSA, T. C.; SOUZA, N. M. Características dos solos tropicais aplicadas como barreiras naturais contra a contaminação de aquíferos. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 13, 2004, Cuiabá. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2004. p. 177-177.
- COSTA, F. P. M.; NISHIYAMA, L. Utilização do permeâmetro Guelph e penetrômetro de impacto em estudos de uso e ocupação dos solos em bacias hidrográficas. **Caminhos da geografia**, Uberlândia, v. 8, n. 24, p. 131–143, dez. 2007.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Programa Geologia do Brasil: Geologia da Folha Manhuaçu SF 23-X-B-III. Brasília, 2007.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterránea**. 2º Edición. Tomo II. Barcelona: Ediciones Omega S. A., 1983.
- DALBIANCO, L. **Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural**. 2009. 115p. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2009.
- DANIEL, D. **Geotechnical practice for Waste Disposal '87**. London: Chapman and Hall, 1993. 683 p.
- DANIEL, D.; SHACKELFORD, C. Disposal barriers that release contaminants only by molecular diffusion. **Nuclear and Chemical Waste Management**, v. 8, p. 299-305, abr. 1988.
- DANIEL, D.E. 1994, State-of-the-Art: Laboratory Tests for Saturated Soils. In: **Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil**, ASTM STP 1142, DANIEL, D. E.; TRAUTWEIN, S. J. (Eds). American Society for Testing and Materials. Philadelphia. 1994.
- DANIEL, D. E.; ANDERSON, D. C., BOYNTON, S. S. Fixed-Wall versus Flexible-Wall Permeameters. In: A. I. JOHNSON; R. K. FROBEL; N. J. CAVALLI; C. B. PETTERSSON (Eds). **Hydraulic Barriers in Soil and Rock**. ASTM Special Technical Publications 874. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1985, p. 107-126.
- DAS, B. M. **Advanced soil mechanics**. 3 ed. London and New York: Taylor & Francis, 2008. 567p.

- DEGROOT, D. J.; LUTENEGGER, A. J. A comparison between field and laboratory measurements of hydraulic conductivity in a varved clay. In: **Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil**, ASTM STP 1142, DANIEL., D. E.; TRAUTWEIN, S. J. (Eds). American Society for Testing and Materials. Philadelphia. 1994.
- DELLEUR, J. W. **The Handbook of Groundwater Engineering**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. 969 p.
- DOURADO, K. A. **Condutividade Hidráulica de Materiais de Baixa Permeabilidade: Desenvolvimento, Construção e Teste de um Sistema de Medida**. 2003. 89p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- DUNN, R.; MITCHELL, J. Fluid conductivity testing of fine-grained soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 110, n. 11, p. 1648-1665, nov. 1984.
- ELBACHÁ, A. T. **Estudo da Influência de Alguns Parâmetros no Transporte de Massa em Solos Argilosos**. 1989. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.
- ELLIES, A.; GREZ, R.; RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta par el diagnostico de la estructura del suelo. **Agro Sur**, v. 5, p.51-56, 1997.
- ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D. Methods for analyzing constant head well permeameter data. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 56, n. 1, p. 320-323, jan. 1992
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- ESRI. **Implementing Inverse Distance Weighted (IDW)**. 2007. Disponível em: <[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Implementing\\_Inverse\\_Distance\\_Weighted\\_\(IDW\)](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Implementing_Inverse_Distance_Weighted_(IDW))>. Acesso em: 08 jan. 2013.
- FALLEIROS, M.C.; PORTEZAN, O.; OLIVEIRA, J.C.M.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Spatial and temporal variability of soil hydraulic conductivity in relation to soil water distribution, using an exponential model. *Soil and Tillage Research*, v.45, p.279-285, may. 1998.
- FEITOSA, F. A .C.; FILHO, J. M. (Coords.). 2 ed. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 2000. 412 p.
- FERNANDES, M. M. **Caracterização de solos e uso atual empregando-se aerofotos não-convencionais nas sub-bacias Marengo, Palmital e Silibar - Rio Turvo Sujo, MG**. 1996. 107p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1989.

- FERNANDES, M. M., KER, J. C., REZENDE, S. B. Delineamento semi-detalhado de solos empregando aerofotos não-convencionais na sub-bacia Palmital - rio Turvo Sujo, MG. *Geonomos.*, v. 15, p.01-07, 2007.
- FERNANDES, M. M. **Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais**. Porto: FEUP, 2006. 450p.
- FERNANDEZ, F.; QUIGLEY, R.M. Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons. *Canadian Geotechnical Journal*, vol.22, 1985. p. 205- 214.
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da Mineralogia da Fração Argila nas Propriedades Físicas de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 23, p. 515-524, 1999.
- FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 4 ed. New Jersey: Prentice-Hall Inc.. 2001. 691p.
- FIORI, J. O.; CAMPOS, J.; ALMEIDA, L. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do estado de Goiás. *Geociências*. São Paulo, v. 3, n. 1, p. 229-235, 2010.
- FIORI, J. **Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados**. 2010. 107p. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- FIELD, J. A.; PARKER, J. C.; POWELL, N. L. Comparison of field and laboratory-measured and predicted hydraulic properties of soil with macropores. *Soil Science*, v.138, n.6, p.385-396, 1984.
- FITTS, C. R. **Groundwater Science**. London: Academic Press, 2002. 450 p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. São Paulo: SERVIMAR, 2006. 114 p.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Determinacion del Riesgo de Contaminacion de Águas Subterráneas – una metodologia basada en datos existentes**. 1ª Edição. Lima: Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente / Organizacion Mundial de la Salud. 1988. 48p.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R.; ROCHA, G. A. Riscos de poluição de águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 5, 1988, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABAS. p.175 – 185.
- FRANCO, G. B. **Fragilidade ambiental e qualidade da água na Bacia do Rio Almada - Bahia**. 2010. 345p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall, 1979. 604p.

HAMADA J. Estimativas de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19, 1997, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: ABES, 1997. p. 1801-1810.

HEYER, K.U.; STEGMANN, R. Leachate management: generation, collection, treatment and costs. In: International Seminar Present and Future of MSW Landfilling, 24 a 26 de junho, Cittadella, Italy, Proceedings Edizioni Euro Waste, 1998.

GLASSER, S.; GAUTHIER-WARINNER, J.; GURRIERI, J.; KEELY, J.; TUCCI, P.; SUMMERS, P.; WIREMAN, M.; MCCORMACK, K. **Technical Guide to Managing Ground Water Resources**. 2007. 295 p.

GUIMARÃES, M. S. B., VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F. Comparação da condutividade hidráulica saturada medida através de métodos de campo e de laboratório. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 10, 2002, Ouro Preto. **Coletânea dos Anais do CBGE (1969 – 2008)**. São Paulo: ABGE, 2011. p. 1-12.

GUIMARÃES, W. D. **Geoestatística aplicada ao mapeamento da variabilidade espacial de variáveis do solo**. 2013. 92p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013

HEATH, R.C. **Basic ground-water hydrology**. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 1983. 84 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2005. 316p.

IRITANI, M.A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo, Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 2008. 104p.

JARVIS, N. J.; MESSING, I. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal*, v.59, p.27-34, 1995.

JORGE, F. N.; UEHARA, K. Águas de Superfície. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. p.101-109.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. John Wiley e Sons, 1969. 553 p.

LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S. Geração e Características do Lixiviado. In: GOMES, L. P. (Coord.) **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. cap 2, p. 26-59.

LES, D. M., REVNOR-OS, W. D.; ELONTCX, D. E. ENO CLORUTEN, B. E. A comparison of three field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 65, p. 563-573, ago. 1985.

LISBOA, R. L. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório.** 2005. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2006

LOPES, L.M.; MUGGLER, C.C.. Aspectos da geologia de Viçosa, Minas Gerais. *Experientiae*. v.30, n. 9, 1989. 10p.

LUNDGREN, W. J. C. **Uso da co-krigagem na caracterização da variabilidade espacial da condutividade hidráulica.** 2004. 87p. Dissertação (Mestrado em Biometria) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

MACHADO, D. A. **Caracterização hidrogeológica e vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no entorno do centro nacional de pesquisa milho e sorgo - Sete Lagoas/MG.** 2011. 215p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MARGANE, A. **Guideline for Groundwater Vulnerability Mapping and Risk Assessment for the Susceptibility of Ground Water Resources to Contamination.** Technical Cooperation, Project 1996.2189.7, 4, April 2003, 53 p., Damascus.

Ministério do Meio Ambiente – Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. MMA – SRHU. **Águas Subterrâneas, um recurso conhecido a ser protegido.** Brasília, 2007. 38p.

Ministério do Meio Ambiente - MMA Províncias e sub-províncias hidrogeológicas do Brasil. Disponível em:  
[http://www.mma.gov.br/estruturas/srh/imagens/73\\_18092008052958.jpg](http://www.mma.gov.br/estruturas/srh/imagens/73_18092008052958.jpg). Acesso em: 05 mar. 2013.

MME/BIRD - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA/ BANCO INTERNACIONAL PARA A RECONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO. **Análise das informações sobre recursos hídricos subterrâneos no país.** Relatório Técnico 015. 2009. 111p.

MENDES, R. M. **Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba (SP).** 2008. 236p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MENTE, A.; PESSOA, M. D.; LEAL, O. MONT'ALVERNE, A. F. Províncias Hidrogeológicas do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1, Recife, 1980. São Paulo: ABAS. **Anais...** 1980. p. 461-474.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, mai.-jun., 2004.

MOHANTY, B. P.; KANVAR, R. S.; EVERTS, C. J. Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p.672-677, 1994.

MOHANTY, B. P.; KANVAR, R. S.; HORON, R. A robust-resistant approach to

interpret spatial behavior of saturated hydraulic conductivity of a glacial-till soil under no-tillage system. *Water Resources Research*, v.27, n.11, p. 2979-2992, 1991

MONTEIRO, V. E. D.; SANTOS, E. A.; JUCÁ, J. F. T. Estudos para o Dimensionamento de uma Cortina de Argila para Contenção de Contaminantes. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19, 1997, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: ABES, 1997. p. 1721-1729. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/argila.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2012.

MONTEIRO, A. B.; FREIRE, P. K. C.; BARBOSA, G. F.; CABRAL, J. J. S. P.; SILVA, S. R. DRASTIC : Vulnerabilidade do aquífero barreiras nos bairros de Ibura e Jordão – Recife – Pernambuco. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15, 2008, Natal – RN. **Anais...** São Paulo: ABAS, 1-20, 2008.

MORANDINI, T. L. C. **Condutividade hidráulica e compatibilidade em combinações de solo tropical e bentonita para uso em barreiras**. 2009. 171p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro preto, Ouro Preto, 2009.

PAIVA, G. P. Estimativa da recarga em uma unidade detrítica de uma micro-bacia do rio Piranga (MG). 2006. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

PARALTA, E. A.; FRANCÉS, A. P.; SARMENTO, P. A. Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade à poluição agrícola do aquífero mio-pliocénico da região de Canhestros (Alentejo). In: Congresso da Água, 6, 2002, Porto, Portugal. Resumos de Comunicações. Porto: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos. p.41-43. Disponível em: <<http://repositorio.ineg.pt/bitstream/10400.9/493/1/33629.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

PAVÃO, A. D. M. **Avaliação do índice de vulnerabilidade na bacia hidrográfica do rio Santa Maria - RS**. 2004. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.

PESSANHA, A. O. S. **Avaliação da contaminação por metais pesados das águas subterrâneas no entorno do aterro sanitário de Visconde do Rio Branco – MG**. 2011. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

POEHLS, D.; SMITH, G. **Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology**. Boston: Academic Press/Elsevier, 2009. 528 p.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Relatório do Desenvolvimento Humano 2006. Além da escassez: poder, pobreza e a crise mundial da água. 2006. 421 p. Disponível em: <[http://hdr.undp.org/en/media/01\\_HDR06%20frontmatter\\_PT\\_revCA.pdf](http://hdr.undp.org/en/media/01_HDR06%20frontmatter_PT_revCA.pdf)>. Acesso em: 09 de Nov. 2012.

PRIM, E. C. C.; CASTILHOS JUNIOR, A. B.; OLIVEIRA, J. C. Impermeabilização de aterros com solos argilosos: Estudo da permeabilidade segundo a lei de Darcy. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, 2004, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: ICTR, 2004, v. 01. p. 01-15.

PSA – PLANO DE SEGURANÇA DA ÁGUA. Mapeamento Geológico da Sub-Bacia do Ribeirão São Bartolomeu (MG). Relatório técnico. 2008. 45p.

QUINTEIRO, F. Q. L. **Levantamento do Uso da Terra e Caracterização de Ambiente da Bacia Hidrográfica do Rio Turvo Sujo com utilização de aerofotos não-convencionais**. 1997. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1997.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2007, v. 5, p. 49-134.

REINHART, D. R.; GROS, C. J. **Analysis of Florida MSW Landfill Leachate Quality**. University of Central Florida, Civil and Environmental Engineering Department, 1998. 108p.

REZENDE, S. B. **Estudo da cromo-toposequência em Viçosa – Minas Gerais**. 1971. 71p. Dissertação (Mestrado em Solos) – Universidade Federal de Viçosa, 1971.

ROWE, R. K. **Leachate characteristics for MSW landfills**. Geotechnical Research Centre Report. 1995. 19p. Disponível em: <<http://www.gaeatech.com/Research/Leachate%20characteristics.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2013.

SANTOS, R. **Propriedades de retenção e condução de água em solos, sob condições de campo e em forma de agregados, submetidos aos plantios convencional e direto**. 2008. 102p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2008.

SANTOS, R. A.; CRUZ, M. J. M.; NASCIMENTO, S. A. M. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Cadernos de Geociências*, nº 7, 2010.

SHACKELFORD, C. D.; REDMOND, P. L. Solute breakthrough curves for processed kaolin at low flow rates. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 121, n. 7012, p. 17-32, 1995.

SHINZATO, E.; CARVALHO FILHO, A. de; TEIXEIRA, W. G. **Solos tropicais**. In: SILVA, C. R. (Ed.). Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 121- 145.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.32, n.2, p.213-220, 1997.

SILVA, E. L. **Determinação da condutividade hidráulica através do método Hazen no campus da UFRRJ**. 2008. 60p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em

geologia) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, J. R. L. **Caracterização físico-hídrica de três bacias experimentais do Estado de Pernambuco para suporte à modelagem hidrológica.** 2010. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2010.

SOARES, R. C. V. **Caracterização do fluxo subterrâneo das águas na porção sudoeste da bacia representativa de Juatuba.** 2010. 147p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SOUZA, N. A. S. **Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas – um estudo do aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG.** 2009. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

STRUCKMEIER, W; RUBIN, Y.; JONES, J. A. A. 2005. “**Groundwater—Reservoir for a Thirsty Planet?**” Leiden, Netherlands, Earth Sciences for Society. Disponível em: [www.esfs.org/downloads/Groundwater.pdf](http://www.esfs.org/downloads/Groundwater.pdf). Acesso em: 13 de fev. 2012.

TAVARES, R. P. L.; CASTRO, M. A. H.; COSTA, C. T. F.; SILVEIRA, J. G. P.; ALMEIDA JÚNIOR, F. J. B. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 62, n. 2, p. 227-236, abr. 2009.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (organizadores). **Decifrando a Terra.** São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. 623p.

TÍMBOLA, R., KORF, E. P., SANTOS, V. C., THOMÉ, A. Influência nos parâmetros de transporte de cádmio e níquel presentes em soluções com diferentes pH e percolados em diferentes estruturas de um solo residual argiloso. In: COBRAMSEG, 11, 2010, Gramado, RS. **Anais...** Gramado: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010. p. 1-6.

THULLNER, M.; ZEYER, J.; KINZELBACH, W. Influence of microbial growth on hydraulic properties of pore networks. *Transport in Porous Media*, v. 49, p. 99-122, 2002.

TOWNSEND, F. C. Geotechnical Characteristics of Residual Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 111, n. 1, p. 77-94, jan. 1985.

TRIPET, J.; DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F.; DELPORTE, C. Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland. *Acta Carsologica*, Ljubljana, v. 29, n. 1, p. 163-171, 2000.

UFPR - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Coeficiente de correlação. Laboratório de Estatística da Universidade Federal do Paraná. 2013. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html>. Acesso em: jan. 2013.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). **Applications of Soil Physics**. New York: Academic, 1980. p.319–344.

## **ANEXO I**

### **Curvas granulométricas e características físicas dos solos estudados**

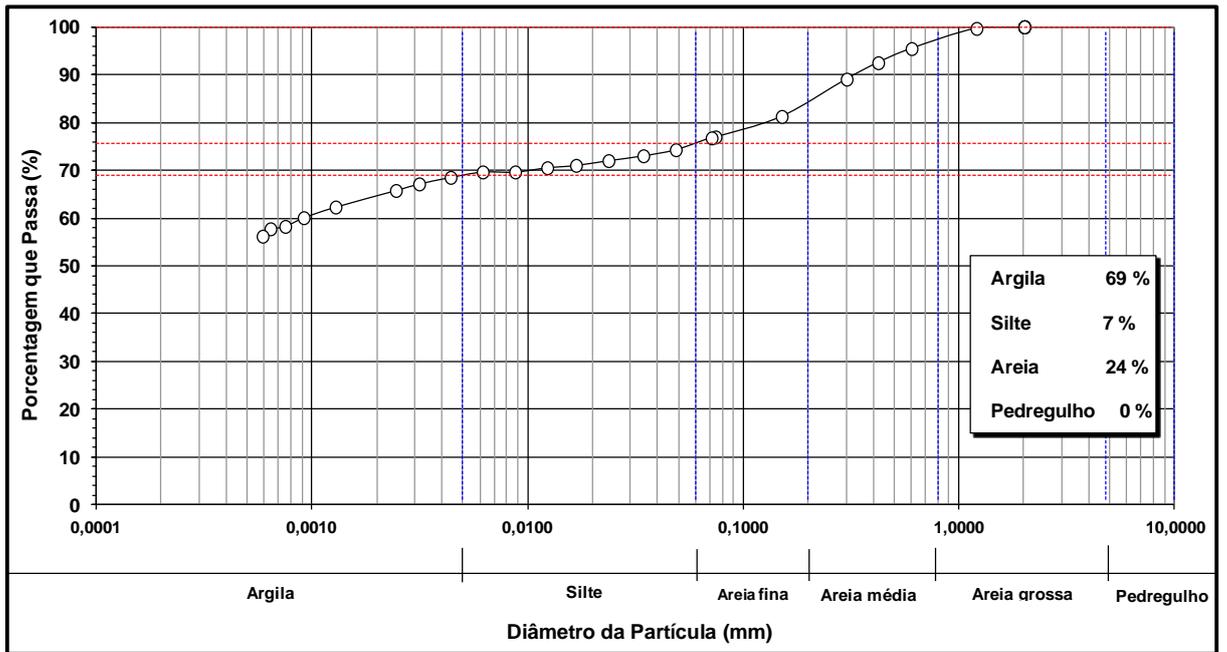


Figura 1: Curva granulométrica do solo de uma amostra do ponto S1.

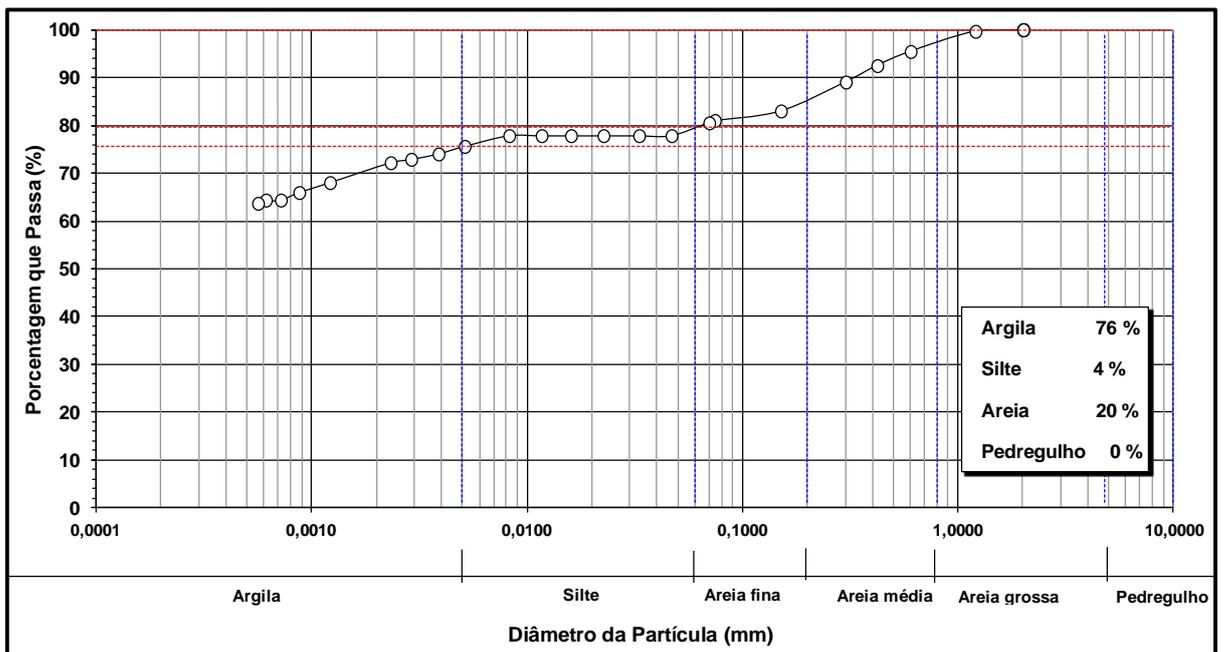


Figura 2: Curva granulométrica do solo de uma amostra do ponto S2.

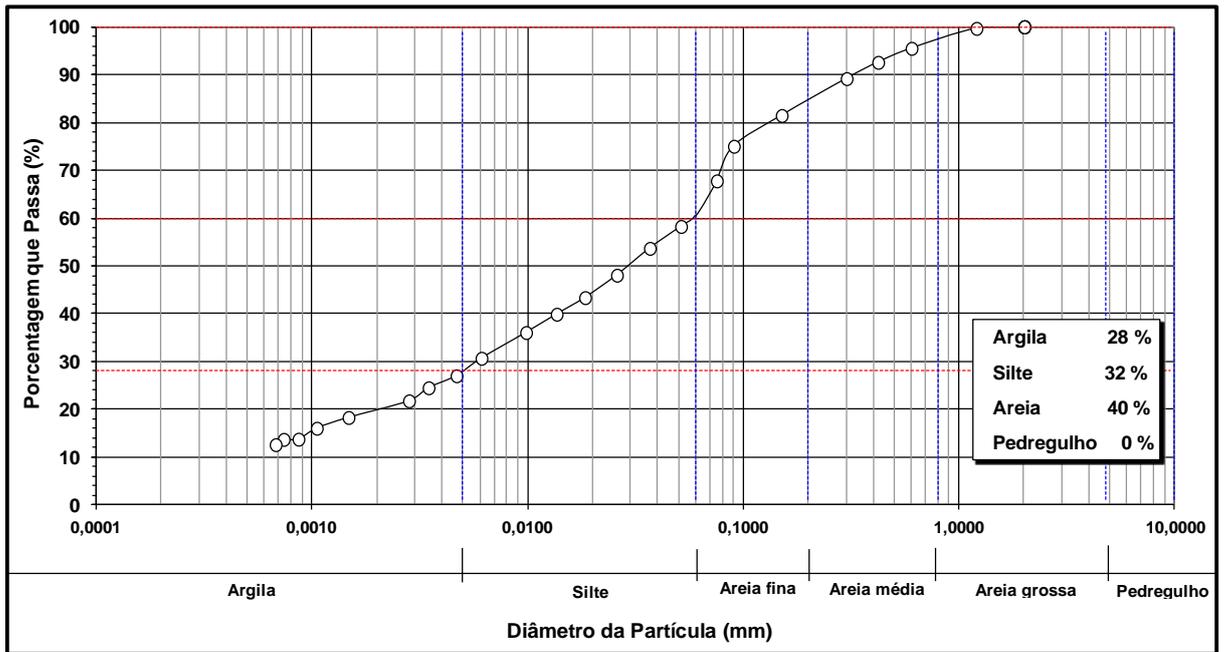


Figura 3: Curva granulométrica do solo de uma amostra do ponto S3.

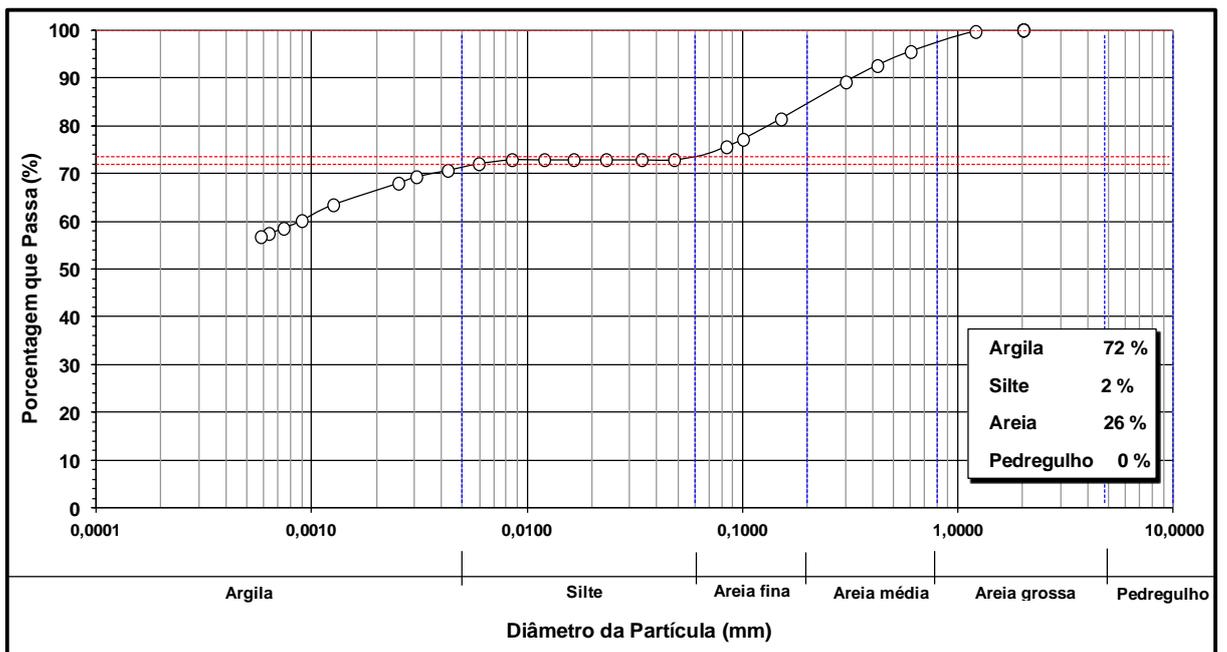


Figura 4: Curva granulométrica do solo de uma amostra do ponto S4.

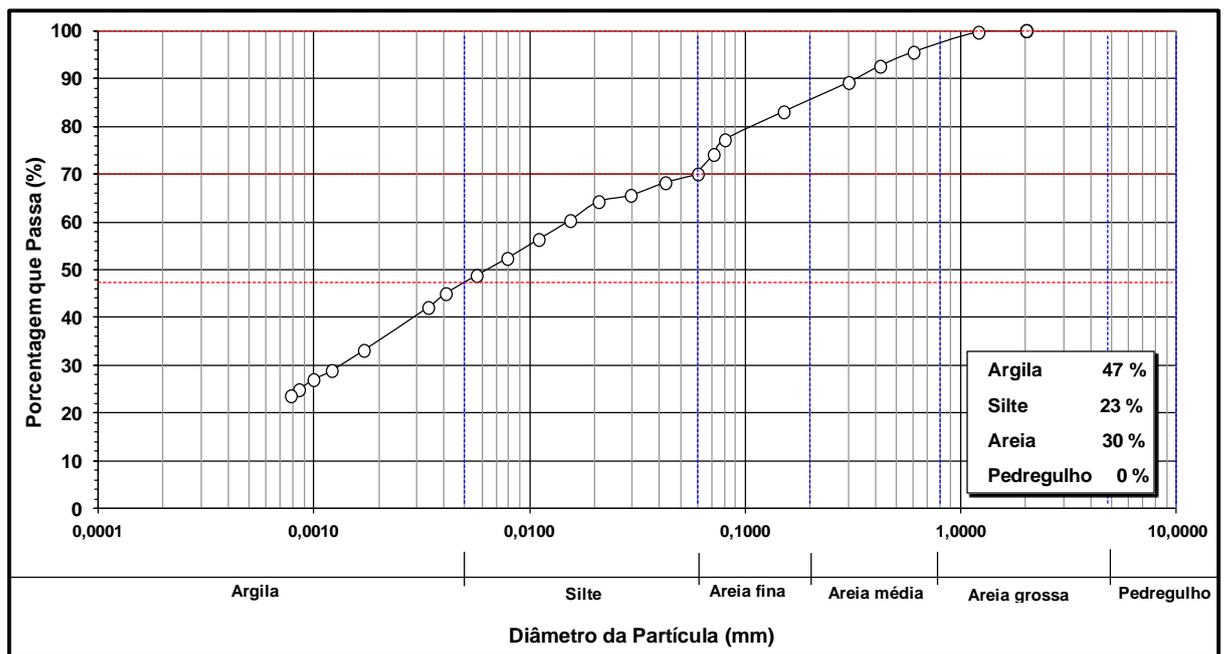


Figura 5: Curva granulométrica do solo de uma amostra do ponto S5.

Tabela 1: Resultados das análises para caracterização física dos solos estudados.

Ponto	Amostra	Porosidade (n)	Índice de vazios (e)	Umidade (w)	Peso específico natural ( $\gamma_n$ ) (KN/m <sup>3</sup> )	Peso específico seco ( $\gamma_d$ ) (KN/m <sup>3</sup> )	Peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ) (KN/m <sup>3</sup> )
S1	1	0,476	0,910	0,300	16,81	12,93	24,69
	2	0,472	0,894	0,276	16,63	13,03	
	3	0,477	0,911	0,307	16,88	12,92	
S2	1	0,556	1,250	0,308	14,67	11,22	25,24
	2	0,602	1,513	0,399	14,05	10,04	
	3	0,588	1,428	0,306	13,57	10,40	
S3	1	0,484	0,938	0,296	16,11	12,43	24,09
	2	0,493	0,974	0,311	16,00	12,20	
	3	0,500	1,000	0,329	16,01	12,05	
S4	1	0,503	1,014	0,351	16,85	12,47	25,12
	2	0,514	1,056	0,367	16,70	12,22	
	3	0,511	1,044	0,358	16,68	12,29	
S5	1	0,537	1,161	0,311	12,28	9,37	20,25
	2	0,532	1,136	0,306	12,39	9,48	
	3	0,507	1,028	0,295	12,94	9,99	

## **ANEXO II**

### **Resultados dos ensaios de permeabilidade em furos realizados em campo**

Tabela 1 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS1 (Profundidade de 0,8 a 1,3 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 1	
<b>Data</b>	14/03/2012	<b>Classe de solo</b>	Argissolo Vermelho-amarelo	
<b>Ensaio de rebaixamento (variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			88	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			80	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			193	
Profundidade ensaiada (cm)			80 - 130	
L (cm)			50	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 1</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cms}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	193,00	0,00	-
t = 15 s	0,55	192,45	0,55	1,08E-04
t = 30 s	1,10	191,9	1,10	1,08E-04
t = 1 min.	2,20	190,8	2,20	1,08E-04
t = 2 min.	4,50	188,5	4,50	1,10E-04
t = 4 min.	9,10	183,9	9,10	1,11E-04
t = 8 min.	17,80	175,2	17,80	1,09E-04
t = 15 min.	32,30	160,7	32,30	1,05E-04
t = 18 min 13 s	38,60	154,4	38,60	1,04E-04
t = 20 min.	42,10	150,9	42,10	1,03E-04
t = 24 min.	49,50	143,5	49,50	1,01E-04
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>1,06E-04</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>9,26E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		26,0

Tabela 2 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS1 (Profundidade de 1,3 a 1,8 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>					
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 1		
<b>Data</b>	14/03/2012	<b>Classe de solo</b>	Argissolo Vermelho-amarelo		
<b>Ensaio de rebaixamento (variável)</b>					
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			141,5		
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			130		
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			296,5		
Profundidade ensaiada (cm)			130 - 180		
L (cm)			50		
$D_1$ (cm)			10,06		
D (cm)			10		
<b>Ensaio n°: 2</b>					
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>	
t = 0 s	0,00	296,5	0	-	
t = 15 s	0,20	296,30	0,20	2,54E-05	
t = 30 s	0,40	296,10	0,4	2,54E-05	
t = 1 min.	0,85	295,65	0,85	2,70E-05	
t = 2 min.	1,70	294,80	1,7	2,70E-05	
t = 4 min.	3,40	293,10	3,40	2,70E-05	
t = 8 min.	6,80	289,70	6,8	2,70E-05	
t = 15 min.	12,70	283,80	12,70	2,69E-05	
t = 30 min	25,10	271,40	25,1	2,66E-05	
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>2,66E-05</b>	
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>2,31E-05</b>	
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		26,0	

Tabela 3 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS2 (Profundidade de 0,5 a 1,5 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>					
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 2		
<b>Data</b>	15/03/2012	<b>Classe de solo</b>	Latossolo Vermelho-amarelo		
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>					
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			117,5		
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			50		
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			217,5		
Profundidade ensaiada (cm)			50 - 150		
L (cm)			100		
$D_1$ (cm)			10,06		
D (cm)			10		
<b>Ensaio n°: 3</b>					
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>	
t = 0 s	0,00	217,50	0,00	-	
t = 15 s	0,10	217,40	0,10	1,23E-05	
t = 30 s	0,20	217,30	0,20	1,23E-05	
t = 1 min.	0,40	217,10	0,40	1,23E-05	
t = 2 min.	0,80	216,70	0,80	1,23E-05	
t = 4 min.	1,50	216,00	1,50	1,15E-05	
t = 8 min.	3,00	214,50	3,00	1,15E-05	
t = 15 min.	5,70	211,80	5,70	1,17E-05	
t = 30 min	11,20	206,30	11,20	1,14E-05	
t = 1 hora	22,0	195,50	22,00	1,12E-05	
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>1,18E-05</b>	
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>1,01E-05</b>	
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		27,0	

Tabela 4 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS2 (Profundidade de 1,5 a 2,5 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital		<b>Nome do ponto</b>	ENS 2
<b>Data</b>	15/03/2012		<b>Classe de solo</b>	Latossolo Vermelho-amarelo
<b>Ensaio de rebaixamento (variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			119	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			150	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			319	
Profundidade ensaiada (cm)			150 - 250	
L (cm)			100	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 4</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Varição de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	319,00	0,00	-
t = 15 s	0,90	318,10	0,90	7,53E-05
t = 30 s	1,80	317,20	1,80	7,53E-05
t = 1 min.	3,60	315,40	3,60	7,53E-05
t = 2 min.	6,90	312,10	6,90	7,21E-05
t = 4 min.	13,50	305,50	13,50	7,06E-05
t = 8 min.	26,30	292,70	26,30	6,87E-05
t = 15 min.	47,40	271,60	47,40	6,61E-05
t = 17 min. 45 s	55,00	264,00	55,00	6,48E-05
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>7,10E-05</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>6,04E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		27,0

Tabela 5 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS2 (Profundidade de 2,5 a 3,5 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 2	
<b>Data</b>	16/03/2012	<b>Classe de solo</b>	Latossolo Vermelho-amarelo	
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			111	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			250	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			411	
Profundidade ensaiada (cm)			250 - 350	
L (cm)			100	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 5</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	411,00	0,00	-
t = 15 s	0,70	410,30	0,70	4,54E-05
t = 30 s	1,30	409,70	1,30	4,22E-05
t = 1 min.	2,60	408,40	2,60	4,22E-05
t = 2 min.	5,20	405,80	5,20	4,22E-05
t = 4 min.	10,30	400,70	10,30	4,18E-05
t = 8 min.	20,50	390,50	20,50	4,16E-05
t = 15 min.	37,70	373,30	37,70	4,08E-05
t = 22 min. 26 seg.	55,00	356,00	55,00	3,98E-05
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>4,20E-05</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>3,57E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		27

Tabela 6 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS2  
(Profundidade de 3,5 a 4,5 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>			
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 2
<b>Data</b>	21/03/2012	<b>Classe de solo</b>	Latossolo Vermelho-amarelo
<b>Ensaio de infiltração (carga constante)</b>			
Altura do tubo acima do solo até o nível de referência ( $\Delta h$ ) em cm			36
Profundidade do tubo abaixo do solo em cm			350
h ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + L) em cm			486
Profundidade ensaiada			350 - 450
L (cm)			100
D (cm) = 2r			10
h/r			97,2
L/h			0,206
Cu			57
<b>Ensaio n°: 6</b>			
<b>Leituras de tempo (segundos)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Q (cm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Condutividade hidráulica (cm.s<sup>-1</sup>)</b>
52	1000,00	19,231	1,39E-04
54	1000,00	18,519	1,34E-04
56	1000,00	17,857	1,29E-04
57	1000,00	17,544	1,27E-04
58	1000,00	17,241	1,24E-04
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{Q}{h} \cdot \frac{1}{Cu \cdot r}$	<b>Média</b>	<b>1,31E-04</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>	<b>1,17E-04</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>	24,5

Tabela 7 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS3 (Profundidade de 0,95 a 1,95 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 3	
<b>Data</b>	02/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Argissolo Vermelho-amarelo	
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			76	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			95	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			221	
Profundidade ensaiada (cm)			95 - 195	
L (cm)			100	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 7</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Varição de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	221	0	-
t = 15 s	0,05	220,95	0,05	6,04E-06
t = 30 s	0,10	220,90	0,1	6,04E-06
t = 1 min.	0,17	220,83	0,17	5,13E-06
t = 2 min.	0,30	220,70	0,3	4,53E-06
t = 4 min.	0,70	220,30	0,70	5,28E-06
t = 8 min.	1,40	219,60	1,4	5,28E-06
t = 15 min.	2,60	218,40	2,60	5,23E-06
t = 30 min	5,15	215,85	5,15	5,18E-06
t = 1 hora	10,15	210,85	10,15	5,11E-06
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>5,31E-06</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>4,42E-06</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		28,0

Tabela 8 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS3  
(Profundidade de 1,95 a 2,15 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 3	
<b>Data</b>	02/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Argissolo Vermelho-amarelo	
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			75	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			195	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			280	
Profundidade ensaiada (cm)			195 - 215	
L (cm)			20	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 8</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	280	0	-
t = 15 s	0,01	279,99	0,01	2,13E-06
t = 30 s	0,03	279,97	0,03	3,20E-06
t = 1 min.	0,06	279,94	0,06	3,20E-06
t = 2 min.	0,11	279,89	0,11	2,93E-06
t = 4 min.	0,23	279,77	0,23	3,06E-06
t = 8 min.	0,49	279,51	0,49	3,26E-06
t = 15 min.	0,92	279,08	0,92	3,27E-06
t = 30 min	1,85	278,15	1,85	3,28E-06
t = 1 hora	3,7	276,3	3,70	3,28E-06
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>3,07E-06</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>2,44E-06</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		30,0

Tabela 9 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS4 (Profundidade de 1,0 a 2,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>					
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital		<b>Nome do ponto</b>	ENS 4	
<b>Data</b>	02/04/2012		<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico	
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>					
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			69		
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			100		
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			219		
Profundidade ensaiada (cm)			100 -200		
L (cm)			100		
$D_1$ (cm)			10,06		
D (cm)			10		
<b>Ensaio n°: 9</b>					
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Varição de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>	
t = 0 s	0,00	219	0,00	-	
t = 15 s	0,05	218,95	0,05	6,09E-06	
t = 30 s	0,11	218,89	0,11	6,70E-06	
t = 1 min.	0,23	218,77	0,23	7,00E-06	
t = 2 min.	0,50	218,50	0,50	7,61E-06	
t = 4 min.	1,04	217,96	1,04	7,92E-06	
t = 8 min.	2,10	216,90	2,10	7,99E-06	
t = 15 min.	4,00	215,00	4,00	8,12E-06	
t = 30 min	8,00	211,00	8,00	8,12E-06	
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>7,45E-06</b>	
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>5,93E-06</b>	
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		30,0	

Tabela 10 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS4 (Profundidade de 2,0 a 3,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital		<b>Nome do ponto</b>	ENS 4
<b>Data</b>	12/04/2012		<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm				70
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)				200
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm				320
Profundidade ensaiada (cm)				200 - 300
L (cm)				100
$D_1$ (cm)				10,06
D (cm)				10
<b>Ensaio n°: 10</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	320	0	-
t = 15 s	1,60	318,40	1,60	1,33E-04
t = 30 s	3,10	316,90	3,1	1,29E-04
t = 1 min.	6,00	314,00	6,00	1,25E-04
t = 2 min.	11,90	308,10	11,9	1,24E-04
t = 4 min.	23,40	296,60	23,40	1,22E-04
t = 8 min.	44,40	275,60	44,4	1,16E-04
t = 9 min. 52 seg.	54,00	266,00	54,00	1,14E-04
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>1,23E-04</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>1,00E-04</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		29,0

Tabela 11 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS4 (Profundidade de 3,0 a 4,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 4	
<b>Data</b>	12/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico	
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			62	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			300	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			420	
Profundidade ensaiada (cm)			300 - 400	
L (cm)			100	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 11</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	420,00	0,00	-
t = 15 s	0,06	419,94	0,06	3,81E-06
t = 30 s	0,12	419,88	0,12	3,81E-06
t = 1 min.	0,27	419,73	0,27	4,29E-06
t = 2 min.	0,52	419,48	0,52	4,13E-06
t = 4 min.	1,02	418,98	1,02	4,05E-06
t = 8 min.	2,08	417,92	2,08	4,13E-06
t = 15 min.	3,82	416,18	3,82	4,04E-06
t = 30 min	8,10	411,90	8,10	4,29E-06
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>4,07E-06</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>3,70E-06</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		24,0

Tabela 12 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS4 (Profundidade de 4,0 a 5,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital		<b>Nome do ponto</b>	ENS 4
<b>Data</b>	13/04/2012		<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm				48
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)				400
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm				498
Profundidade ensaiada (cm)				400 - 500
L (cm)				100
$D_1$ (cm)				10,06
D (cm)				10
<b>Ensaio n°: 12</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Varição de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	498,00	0,00	-
t = 15 s	0,95	497,05	0,95	5,09E-05
t = 30 s	1,90	496,10	1,90	5,09E-05
t = 1 min.	3,80	494,20	3,80	5,09E-05
t = 2 min.	7,80	490,20	7,80	5,22E-05
t = 4 min.	15,40	482,60	15,40	5,16E-05
t = 8 min.	30,40	467,60	30,40	5,09E-05
t = 14 min. 31 seg.	54,00	444,00	54,00	4,98E-05
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>5,10E-05</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>4,44E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		26,0

Tabela 13 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS4 (Profundidade de 5,0 a 6,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital		<b>Nome do ponto</b>	ENS 4
<b>Data</b>	13/04/2012		<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			52	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			500	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			602	
Profundidade ensaiada (cm)			500 - 600	
L (cm)			100	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 13</b>				
Tempos de leituras	Leituras em cm	Alturas ( $h_t$ ) em cm	Variação de altura ( $\Delta h = h_{t0} - h_t$ )	Condutividade hidráulica ( $\text{cm.s}^{-1}$ )
t = 0 s	0,00	602,00	0,00	-
t = 15 s	0,18	601,82	0,18	7,98E-06
t = 30 s	0,38	601,62	0,38	8,42E-06
t = 1 min.	0,80	601,20	0,80	8,86E-06
t = 2 min.	1,60	600,40	1,6	8,86E-06
t = 4 min.	3,20	598,80	3,20	8,86E-06
t = 8 min.	6,30	595,70	6,3	8,72E-06
t = 15 min.	11,60	590,40	11,60	8,57E-06
t = 30 min	21,70	580,30	21,7	8,01E-06
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>8,54E-06</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>8,14E-06</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		22,5

Tabela 14 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS4 (Profundidade de 6,0 a 7,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 4	
<b>Data</b>	18/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico	
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			132	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			600	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			782	
Profundidade ensaiada (cm)			600 - 700	
L (cm)			100	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 14</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	782,00	0,00	-
t = 15 s	0,50	781,50	0,50	1,71E-05
t = 30 s	1,00	781,00	1,00	1,71E-05
t = 1 min.	2,00	780,00	2,00	1,71E-05
t = 2 min.	3,90	778,10	3,90	1,66E-05
t = 4 min.	7,70	774,30	7,70	1,64E-05
t = 8 min.	14,65	767,35	14,65	1,56E-05
t = 15 min.	28,30	753,70	28,30	1,61E-05
t = 27 min. 15 s.	50,00	732,00	50,00	1,56E-05
t = 29 min. 33 s.	54,00	728,00	54,00	1,56E-05
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>1,64E-05</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>1,39E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		27,0

Tabela 15 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS4 (Profundidade de 6,0 a 8,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 4	
<b>Data</b>	19/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico	
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			136	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			600	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			836	
Profundidade ensaiada (cm)			600 - 800	
L (cm)			200	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 15</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	836,00	0,00	-
t = 15 s	1,00	835,00	1,00	2,26E-05
t = 30 s	2,00	834,00	2,00	2,26E-05
t = 1 min.	3,90	832,10	3,90	2,20E-05
t = 2 min.	7,80	828,20	7,80	2,20E-05
t = 4 min.	15,50	820,50	15,50	2,19E-05
t = 8 min.	30,50	805,50	30,50	2,15E-05
t = 13 min. 23 s.	50,00	786,00	50,00	1,94E-05
t = 14 min. 34 s.	54,00	782,00	54,00	2,28E-05
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>2,18E-05</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>1,99E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		24

Tabela 16 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS5 (Profundidade de 1,0 a 2,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 5	
<b>Data</b>	19/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico	
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			69	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			100	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			224	
Profundidade ensaiada (cm)			100 - 200	
L (cm)			110	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 16</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	224,00	0,00	-
t = 15 s	0,40	223,60	0,40	4,54E-05
t = 30 s	0,80	223,20	0,80	4,54E-05
t = 1 min.	1,60	222,40	1,60	4,54E-05
t = 2 min.	3,30	220,70	3,30	4,68E-05
t = 4 min.	6,65	217,35	6,65	4,72E-05
t = 8 min.	13,10	210,90	13,10	4,65E-05
t = 15 min.	23,90	200,10	23,90	4,52E-05
t = 30 min	47,00	177,00	47,00	4,45E-05
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>4,58E-05</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>3,90E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		27,0

Tabela 17 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS5 (Profundidade de 2,0 a 3,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 5	
<b>Data</b>	20/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico	
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			70,5	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			200	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			320,5	
Profundidade ensaiada (cm)			200 - 300	
L (cm)			100	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 17</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	320,50	0,00	-
t = 15 s	1,00	319,50	1,00	8,32E-05
t = 30 s	2,00	318,50	2,00	8,32E-05
t = 1 min.	4,00	316,50	4,00	8,32E-05
t = 2 min.	7,90	312,60	7,90	8,22E-05
t = 4 min.	15,50	305,00	15,50	8,06E-05
t = 8 min.	30,20	290,30	30,20	7,86E-05
t = 15 min.	54,00	266,50	54,00	7,49E-05
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>8,09E-05</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>7,36E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		24,0

Tabela 18 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS5  
(Profundidade de 3,0 a 4,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>			
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 5
<b>Data</b>	20/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico
<b>Ensaio de infiltração (carga constante)</b>			
Altura do tubo acima do solo até o nível de referência ( $\Delta h$ ) em cm			0
Profundidade do tubo abaixo do solo em cm			300
$h$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + L) em cm			391,5
Profundidade ensaiada			300 - 400
L (cm)			100
$D$ (cm) = 2r			10
h/r			78,300
L/h			0,255
Cu			56
<b>Ensaio n°: 18</b>			
<b>Leituras de tempo (segundos)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Q (cm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Condutividade hidráulica (cm.s<sup>-1</sup>)</b>
143,66	2000,00	13,92	1,27E-04
143,12	2000,00	13,97	1,27E-04
147	2000,00	13,61	1,24E-04
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{Q}{h} \cdot \frac{1}{Cu \cdot r}$	<b>Média</b>	<b>1,26E-04</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>	<b>1,18E-04</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>	23,0

Tabela 19 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS5 (Profundidade de 4,0 a 5,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 5	
<b>Data</b>	20/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Hápico	
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			62	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			400	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			512	
Profundidade ensaiada (cm)			400 - 500	
L (cm)			100	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 19</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Variação de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	512,00	0,00	-
t = 15 s	1,30	510,70	1,30	6,77E-05
t = 30 s	2,60	509,40	2,60	6,77E-05
t = 1 min.	5,20	506,80	5,20	6,77E-05
t = 2 min.	10,20	501,80	10,20	6,64E-05
t = 4 min.	20,30	491,70	20,30	6,61E-05
t = 8 min.	39,90	472,10	39,90	6,50E-05
t = 10 min.	49,50	462,50	49,50	6,45E-05
t = 10 min. 54 s	54,00	458,00	54,00	6,45E-05
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>6,62E-05</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>6,02E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		23,5

Tabela 20 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS5 (Profundidade de 5,0 a 6,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>				
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital		<b>Nome do ponto</b>	ENS 5
<b>Data</b>	23/04/2012		<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico
<b>Ensaio de rebaixamento (carga variável)</b>				
Altura do tubo acima do solo (de $h_{t0}$ à superfície do solo) em cm			54	
Profundidade do tubo abaixo do solo (cm)			500	
$h_0$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + $L/2$ ) em cm			604	
Profundidade ensaiada (cm)			500 - 600	
L (cm)			100	
$D_1$ (cm)			10,06	
D (cm)			10	
<b>Ensaio n°: 20</b>				
<b>Tempos de leituras</b>	<b>Leituras em cm</b>	<b>Alturas (<math>h_t</math>) em cm</b>	<b>Varição de altura (<math>\Delta h = h_{t0} - h_t</math>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (<math>\text{cm.s}^{-1}</math>)</b>
t = 0 s	0,00	500,00	0,00	-
t = 15 s	1,30	498,70	1,30	6,94E-05
t = 30 s	2,70	497,30	2,70	7,20E-05
t = 1 min.	5,40	494,60	5,40	7,20E-05
t = 2 min.	10,70	489,30	10,70	7,14E-05
t = 4 min.	20,80	479,20	20,80	6,94E-05
t = 6 min.	30,50	469,50	30,50	6,78E-05
t = 8 min.	39,70	460,30	39,70	6,62E-05
t = 11 min. 19 s.	54,00	446,00	54,00	6,37E-05
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{D_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{D \cdot L}}$	<b>Média</b>		<b>6,90E-05</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>		<b>6,73E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>		21,0

Tabela 21 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS5  
(Profundidade de 6,0 a 7,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>			
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 5
<b>Data</b>	25/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico
<b>Ensaio de infiltração (carga constante)</b>			
Altura do tubo acima do solo até o nível de referência ( $\Delta h$ ) em cm			-8
Profundidade do tubo abaixo do solo em cm			600
$h$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + L) em cm			683,5
Profundidade ensaiada			600 - 700
L (cm)			100
$D$ (cm) = 2r			10
h/r			136,700
L/h			0,146
Cu			59
<b>Ensaio n°: 21</b>			
<b>Leituras de tempo (segundos)</b>	<b>Volume (cm³)</b>	<b>Q (cm³/s)</b>	<b>Condutividade hidráulica (cm.s<sup>-1</sup>)</b>
80,74	2000,00	24,77	1,23E-04
81,16	2000,00	24,64	1,22E-04
81,51	2000,00	24,54	1,22E-04
80,92	2000,00	24,72	1,23E-04
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{Q}{h} \cdot \frac{1}{Cu \cdot r}$	<b>Média</b>	<b>1,22E-04</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>	<b>1,14E-04</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>	23,0

Tabela 22 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em campo no ponto ENS5 (Profundidade de 6,0 a 8,0 m).

<b>Determinação do coeficiente de permeabilidade em furos de sondagem - Acima do nível d'água</b>			
<b>Local</b>	Sub-bacia do Córrego Palmital	<b>Nome do ponto</b>	ENS 5
<b>Data</b>	25/04/2012	<b>Classe de solo</b>	Cambissolo Háplico
<b>Ensaio de infiltração (carga constante)</b>			
Altura do tubo acima do solo até o nível de referência ( $\Delta h$ ) em cm			-9
Profundidade do tubo abaixo do solo em cm			600
$h$ ( $\Delta h$ + Profundidade do tubo abaixo do solo + L) em cm			782,5
Profundidade ensaiada			600 - 800
L (cm)			200
$D$ (cm) = 2r			10
h/r			156,500
L/h			0,256
Cu			95
<b>Ensaio n°: 22</b>			
<b>Leituras de tempo (segundos)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Q (cm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Condutividade hidráulica (cm.s<sup>-1</sup>)</b>
55,51	2000,00	36,03	9,69E-05
54,57	2000,00	36,65	9,86E-05
55,44	2000,00	36,08	9,71E-05
56,20	2000,00	35,59	9,57E-05
Equação utilizada no cálculo da condutividade hidráulica	$K = \frac{Q}{h} \cdot \frac{1}{Cu \cdot r}$	<b>Média</b>	<b>9,71E-05</b>
		<b>Média corrigida (20 °C)</b>	<b>8,63E-05</b>
		<b>Temperatura média do ensaio (°C)</b>	25,0

### **ANEXO III**

**Resultados dos ensaios de permeabilidade com carga variável  
realizados em laboratório com água**

Tabela 1 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S1 (1).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S1 (1)			
A (cm <sup>2</sup> )	78,658			
a (cm <sup>2</sup> )	5,301			
H (cm)	12,231			
Gradiente hidráulico	11,3			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	138,5	138,5	138,5	138,5
Leitura inicial (mm)	800	800	800	800
Leitura final (mm)	188	188	188	202
Δh (cm)	61,2	61,2	61,2	59,8
h <sub>2</sub> (cm)	77,3	77,3	77,3	78,7
Δt (s)	600	600	600	600
T (°C)	19,5	19,5	19,5	20
K (cm.s <sup>-1</sup> )	8,01E-04	8,01E-04	8,01E-04	7,77E-04
Fator de correção	1,012388	1,012388	1,012388	1,000000
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	8,11E-04	8,11E-04	8,11E-04	7,77E-04
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	8,03E-04			

Tabela 2 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S1 (2).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S1 (2)			
A (cm <sup>2</sup> )	71,193			
a (cm <sup>2</sup> )	5,343			
H (cm)	12,154			
Gradiente hidráulico	11,3			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	137,3	137,3	137,3	137,3
Leitura inicial (mm)	800	800	800	800
Leitura final (mm)	701	698	700	703
Δh (cm)	9,9	10,2	10	9,7
h <sub>2</sub> (cm)	127,4	127,1	127,3	127,6
Δt (s)	900	900	900	900
T (°C)	20	20	20	20
K (cm.s <sup>-1</sup> )	7,58E-05	7,82E-05	7,66E-05	7,42E-05
Fator de correção	1	1	1	1
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	7,58E-05	7,82E-05	7,66E-05	7,42E-05
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	7,62E-05			

Tabela 3 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S1 (3).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S1(3)			
A (cm <sup>2</sup> )	77,094			
a (cm <sup>2</sup> )	0,389			
H (cm)	12,316			
Gradiente Hidráulico	9,8			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	120,5	120,5	120,5	120,5
Leitura inicial (mm)	1000	1000	1000	1000
Leitura final (mm)	475	474	474	472
Δh (cm)	52,5	52,6	52,6	52,8
h <sub>2</sub> (cm)	68	67,9	67,9	67,7
Δt (s)	300	300	300	300
T (°C)	22	22	22	22
K (cm.s <sup>-1</sup> )	1,19E-04	1,19E-04	1,19E-04	1,19E-04
Fator de correção	0,95313	0,95313	0,95313	0,95313
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,13E-04	1,13E-04	1,13E-04	1,14E-04
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,13E-04			

Tabela 4 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S2 (1).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S2(1)			
A (cm <sup>2</sup> )	76,472			
a (cm <sup>2</sup> )	5,301			
H (cm)	12,229			
Gradiente hidráulico	11,2			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	136,8	136,8	136,8	136,8
Leitura inicial (mm)	800	800	800	800
Leitura final (mm)	367	371	369	368
Δh (cm)	43,3	42,9	43,1	43,2
h <sub>2</sub> (cm)	93,5	93,9	93,7	93,6
Δt (s)	300	300	300	300
T (°C)	20	20	20	20
K (cm.s <sup>-1</sup> )	1,08E-03	1,06E-03	1,07E-03	1,07E-03
Fator de correção	1	1	1	1
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,08E-03	1,06E-03	1,07E-03	1,07E-03
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,07E-03			

Tabela 5 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S2 (2).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S2(2)			
A (cm <sup>2</sup> )	42,863			
a (cm <sup>2</sup> )	0,389			
H (cm)	11,916			
Gradiente hidráulico	10,1			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	120	120	120	120
Leitura inicial (mm)	1000	1000	1000	1000
Leitura final (mm)	333	330	338	326
Δh (cm)	66,7	67	66,2	67,4
h <sub>2</sub> (cm)	53,3	53	53,8	52,6
Δt (s)	300	300	300	300
T (°C)	24	24	23	22,5
K (cm.s <sup>-1</sup> )	3,66E-03	3,68E-03	3,77E-03	3,97E-03
Fator de correção	0,909652	0,909652	0,931144	0,942139
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	3,33E-03	3,35E-03	3,51E-03	3,74E-03
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	3,48E-03			

Tabela 6 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S2 (3).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S2(3)			
A (cm <sup>2</sup> )	44,132			
a (cm <sup>2</sup> )	0,389			
H (cm)	9,702			
Gradiente hidráulico	12,3			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	119,6	119,6	119,6	119,6
Leitura inicial (mm)	1000	1000	1000	1000
Leitura final (mm)	200	202	198	200
Δh (cm)	80	79,8	80,2	80
h <sub>2</sub> (cm)	39,6	39,8	39,4	39,6
Δt (s)	300	300	300	300
T (°C)	23	23	23	23
K (cm.s <sup>-1</sup> )	3,15E-04	3,14E-04	3,17E-04	3,15E-04
Fator de correção	0,931144	0,931144	0,931144	0,931144
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	2,94E-04	2,92E-04	2,95E-04	2,94E-04
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	2,94E-04			

Tabela 7 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S3 (1).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S3(1)			
A (cm <sup>2</sup> )	42,199			
a (cm <sup>2</sup> )	0,389			
H (cm)	10,589			
Gradiente hidráulico	11,3			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	119,6	119,6	119,6	119,6
Leitura inicial (mm)	1000	1000	1000	1000
Leitura final (mm)	678	680	678	678
Δh (cm)	32,2	32	32,2	32,2
h <sub>2</sub> (cm)	87,4	87,6	87,4	87,4
Δt (s)	600	600	600	600
T (°C)	23	23	23,5	23
K (cm.s <sup>-1</sup> )	5,11E-05	5,07E-05	5,11E-05	5,11E-05
Fator de correção	0,931144	0,931144	0,920398	0,931144
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	4,75E-05	4,72E-05	4,70E-05	4,75E-05
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	4,73E-05			

Tabela 8 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S3 (2).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S3(2)			
A (cm <sup>2</sup> )	77,496			
a (cm <sup>2</sup> )	0,389			
H (cm)	12,194			
Gradiente hidráulico	9,7			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	118,3	118,3	118,3	118,3
Leitura inicial (mm)	1000	1000	1000	1000
Leitura final (mm)	431	428	431	431
Δh (cm)	56,9	57,2	56,9	56,9
h <sub>2</sub> (cm)	61,4	61,1	61,4	61,4
Δt (s)	480	480	480	480
T (°C)	22	22	22,5	22,5
K (cm.s <sup>-1</sup> )	8,37E-05	8,43E-05	8,37E-05	8,37E-05
Fator de correção	0,953134	0,953134	0,942139	0,942139
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	7,97E-05	8,03E-05	7,88E-05	7,88E-05
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	7,94E-05			

Tabela 9 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S3 (3).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S3(3)			
A (cm <sup>2</sup> )	75,635			
a (cm <sup>2</sup> )	0,389			
H (cm)	12,149			
Gradiente hidráulico	9,8			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	119,6	119,6	119,6	119,6
Leitura inicial (mm)	1000	1000	1000	1000
Leitura final (mm)	468	474	468	470
Δh (cm)	53,2	52,6	53,2	53
h <sub>2</sub> (cm)	66,4	67	66,4	66,6
Δt (s)	420	420	420	420
T (°C)	23	23	23	23
K (cm.s <sup>-1</sup> )	8,76E-05	8,62E-05	8,76E-05	8,71E-05
Fator de correção	0,931144	0,931144	0,931144	0,931144
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	8,16E-05	8,03E-05	8,16E-05	8,11E-05
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	8,11E-05			

Tabela 10 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S4 (1).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S4(1)			
A (cm <sup>2</sup> )	77,691			
a (cm <sup>2</sup> )	5,301			
H (cm)	12,179			
Gradiente hidráulico	11,6			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	140,7	140,7	140,7	140,7
Leitura inicial (mm)	800	800	800	800
Leitura final (mm)	612	610	604	605
Δh (cm)	18,8	19	19,6	19,5
h <sub>2</sub> (cm)	121,9	121,7	121,1	121,2
Δt (s)	900	900	900	900
T (°C)	24	24	25	25
K (cm.s <sup>-1</sup> )	1,32E-04	1,34E-04	1,39E-04	1,38E-04
Fator de correção	0,909652	0,909652	0,889254	0,889254
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,20E-04	1,22E-04	1,23E-04	1,22E-04
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,22E-04			

Tabela 11 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S4 (2).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S4(2)			
A (cm <sup>2</sup> )	77,379			
a (cm <sup>2</sup> )	5,343			
H (cm)	12,056			
Gradiente hidráulico	11,5			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	139	139	139	139
Leitura inicial (mm)	800	800	800	800
Leitura final (mm)	620	616	607	611
Δh (cm)	18	18,4	19,3	18,9
h <sub>2</sub> (cm)	121	120,6	119,7	120,1
Δt (s)	480	480	480	480
T (°C)	24,5	24,5	24,5	24,5
K (cm.s <sup>-1</sup> )	2,41E-04	2,46E-04	2,59E-04	2,53E-04
Fator de correção	0,899453	0,899453	0,899453	0,899453
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	2,16E-04	2,21E-04	2,33E-04	2,28E-04
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	2,25E-04			

Tabela 12 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S4 (3).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S4(3)			
A (cm <sup>2</sup> )	78,226			
a (cm <sup>2</sup> )	5,343			
H (cm)	11,980			
Gradiente hidráulico	11,5			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	137,3	137,3	137,3	137,3
Leitura inicial (mm)	800	800	800	800
Leitura final (mm)	149	145	149	153
Δh (cm)	65,1	65,5	65,1	64,7
h <sub>2</sub> (cm)	72,2	71,8	72,2	72,6
Δt (s)	480	480	480	480
T (°C)	23	23	23	23
K (cm.s <sup>-1</sup> )	1,10E-03	1,11E-03	1,10E-03	1,09E-03
Fator de correção	0,931144	0,931144	0,931144	0,931144
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,02E-03	1,03E-03	1,02E-03	1,01E-03
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,02E-03			

Tabela 13 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S5 (1).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S5(1)			
A (cm <sup>2</sup> )	75,918			
a (cm <sup>2</sup> )	5,301			
H (cm)	12,164			
Gradiente hidráulico	11,4			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	138,6	138,6	138,6	138,6
Leitura inicial (mm)	800	800	800	800
Leitura final (mm)	396	396	397	396
Δh (cm)	40,4	40,4	40,3	40,4
h <sub>2</sub> (cm)	98,2	98,2	98,3	98,2
Δt (s)	120	120	120	120
T (°C)	23,5	23,5	23,5	23,5
K (cm.s <sup>-1</sup> )	2,44E-03	2,44E-03	2,43E-03	2,44E-03
Fator de correção	0,920398	0,920398	0,920398	0,920398
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	2,24E-03	2,24E-03	2,24E-03	2,24E-03
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	2,24E-03			

Tabela 14 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S5 (2).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S5(2)			
A (cm <sup>2</sup> )	76,098			
a (cm <sup>2</sup> )	5,343			
H (cm)	12,130			
Gradiente hidráulico	11,5			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	139,5	139,5	139,5	139,5
Leitura inicial (mm)	800	800	800	800
Leitura final (mm)	498	501	494	499
Δh (cm)	30,2	29,9	30,6	30,1
h <sub>2</sub> (cm)	109,3	109,6	108,9	109,4
Δt (s)	600	600	600	600
T (°C)	24	24	24	24
K (cm.s <sup>-1</sup> )	3,46E-04	3,42E-04	3,51E-04	3,45E-04
Fator de correção	0,909652	0,909652	0,909652	0,909652
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	3,15E-04	3,11E-04	3,20E-04	3,14E-04
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	3,15E-04			

Tabela 15 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S5 (3).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S5(3)			
A (cm <sup>2</sup> )	77,236			
a (cm <sup>2</sup> )	5,301			
H (cm)	12,204			
Gradiente hidráulico	11,3			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	138,5	138,5	138,5	138,5
Leitura inicial (mm)	800	800	800	800
Leitura final (mm)	93	98	98	103
Δh (cm)	70,7	70,2	70,2	69,7
h <sub>2</sub> (cm)	67,8	68,3	68,3	68,8
Δt (s)	420	420	420	420
T (°C)	22	22	22	22
K (cm.s <sup>-1</sup> )	1,42E-03	1,41E-03	1,41E-03	1,40E-03
Fator de correção	0,953134	0,953134	0,953134	0,953134
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,36E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,33E-03
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,34E-03			

## **ANEXO IV**

**Resultados dos ensaios de permeabilidade com carga variável realizados em laboratório com percolado de aterro sanitário**

Tabela 1 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S1 (1).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S1 (1)			
A (cm <sup>2</sup> )	70,907			
a (cm <sup>2</sup> )	0,993			
H (cm)	11,581			
Gradiente hidráulico	9,4			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	18,3	108,3	108,3	108,3
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	11,0	13,3	11,5	11,0
Δh (cm)	1,10	1,33	1,15	1,10
h <sub>2</sub> (cm)	107,2	106,97	107,15	107,2
Δt (s)	1200	1200	1200	1200
T (°C)	20,0	19,0	20,0	19,0
K (cm.s <sup>-1</sup> )	1,38E-06	1,67E-06	1,44E-06	1,38E-06
Fator de correção	1,00000	1,02478	1,00000	1,02478
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,38E-06	1,71E-06	1,44E-06	1,41E-06
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,49E-06			

Tabela 2 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S1 (2).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S1 (2)			
A (cm <sup>2</sup> )	76,847			
a (cm <sup>2</sup> )	0,945			
H (cm)	12,297			
Gradiente hidráulico	9,1			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	111,5	111,5	111,5	111,5
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	35,0	37,5	38,8	37,5
Δh (cm)	3,50	3,75	3,88	3,75
h <sub>2</sub> (cm)	108	107,75	107,62	107,75
Δt (s)	1800	1800	1800	1800
T (°C)	20,5	21,0	21,0	21,0
K (cm.s <sup>-1</sup> )	2,68E-06	2,87E-06	2,98E-06	2,87E-06
Fator de correção	0,98806	0,97612	0,97612	0,97612
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	2,65E-06	2,81E-06	2,90E-06	2,81E-06
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	2,79E-06			

Tabela 3 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S1 (3).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S1 (3)			
A (cm <sup>2</sup> )	78,736			
a (cm <sup>2</sup> )	0,945			
H (cm)	12,292			
Gradiente hidráulico	9,1			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	111,4	111,4	111,4	111,4
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	39,0	38,0	40,0	37,0
Δh (cm)	3,90	3,80	4,00	3,70
h <sub>2</sub> (cm)	107,5	107,6	107,4	107,7
Δt (s)	1200	1200	1200	1200
T (°C)	20	21	21,5	21
K (cm.s <sup>-1</sup> )	4,38E-06	4,27E-06	4,50E-06	4,15E-06
Fator de correção	1,00000	0,97612	0,96463	0,97612
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	4,38E-06	4,17E-06	4,34E-06	4,05E-06
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	4,23E-06			

Tabela 4 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S2 (1).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S2 (1)			
A (cm <sup>2</sup> )	78,474			
a (cm <sup>2</sup> )	3,771			
H (cm)	12,247			
Gradiente hidráulico	9,8			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	119,5	119,5	119,5	119,5
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	17,6	17	16	18
Δh (cm)	1,76	1,70	1,60	1,80
h <sub>2</sub> (cm)	117,74	117,8	117,9	117,7
Δt (s)	1200	1200	1200	1200
T (°C)	20,0	19,0	19,5	21,5
K (cm.s <sup>-1</sup> )	7,28E-06	7,03E-06	6,61E-06	7,44E-06
Fator de correção	1,00000	1,02478	1,01239	0,96463
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	7,28E-06	7,20E-06	6,69E-06	7,18E-06
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	7,09E-06			

Tabela 5 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S2 (2).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S2 (2)			
A (cm <sup>2</sup> )	76,964			
a (cm <sup>2</sup> )	3,799			
H (cm)	12,119			
Gradiente hidráulico	10,1			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	122,1	122,1	122,1	122,1
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	65	65	66	65
Δh (cm)	6,50	6,50	6,60	6,50
h <sub>2</sub> (cm)	115,6	115,6	115,5	115,6
Δt (s)	600	600	600	600
T (°C)	20,0	20,0	20,0	20,0
K (cm.s <sup>-1</sup> )	5,45E-05	5,45E-05	5,54E-05	5,45E-05
Fator de correção	1	1	1	1
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	5,45E-05	5,45E-05	5,54E-05	5,45E-05
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	5,48E-05			

Tabela 6 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S2 (3).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S2 (3)			
A (cm <sup>2</sup> )	78,828			
a (cm <sup>2</sup> )	3,771			
H (cm)	12,160			
Gradiente hidráulico	10,0			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	122,1	122,1	122,1	122,1
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	20,0	19,5	19,1	19,5
Δh (cm)	2,00	1,95	1,91	1,95
h <sub>2</sub> (cm)	120,1	120,15	120,19	120,15
Δt (s)	600	600	600	600
T (°C)	21,0	21,0	20,0	20,0
K (cm.s <sup>-1</sup> )	1,60E-05	1,56E-05	1,53E-05	1,56E-05
Fator de correção	0,97612	0,97612	1,00000	1,00000
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,56E-05	1,52E-05	1,53E-05	1,56E-05
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,54E-05			

Tabela 7 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S3 (1).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S3 (1)			
A (cm <sup>2</sup> )	77,145			
a (cm <sup>2</sup> )	3,799			
H (cm)	12,061			
Gradiente hidráulico	10,1			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	122,4	122,4	122,4	122,4
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	8,5	8	8,2	8,5
Δh (cm)	0,85	0,80	0,82	0,85
h <sub>2</sub> (cm)	121,55	121,6	121,58	121,55
Δt (s)	2400	2400	2400	2400
T (°C)	20,0	19,5	19,5	19,5
K (cm.s <sup>-1</sup> )	1,72E-06	1,62E-06	1,66E-06	1,72E-06
Fator de correção	1,00000	1,01239	1,01239	1,01239
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,72E-06	1,64E-06	1,68E-06	1,75E-06
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,70E-06			

Tabela 8 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S3 (2).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S3 (2)			
A (cm <sup>2</sup> )	78,849			
a (cm <sup>2</sup> )	3,799			
H (cm)	12,316			
Gradiente hidráulico	9,9			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	122,5	122,5	122,5	122,5
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	485	485	493	490
Δh (cm)	48,50	48,50	49,30	49,00
h <sub>2</sub> (cm)	74	74	73,2	73,5
Δt (s)	600	600	600	600
T (°C)	20,0	20,0	20,0	20,0
K (cm.s <sup>-1</sup> )	4,99E-04	4,99E-04	5,09E-04	5,05E-04
Fator de correção	1	1	1	1
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	4,99E-04	4,99E-04	5,09E-04	5,05E-04
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	5,03E-04			

Tabela 9 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S3 (3).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S3 (3)			
A (cm <sup>2</sup> )	77,861			
a (cm <sup>2</sup> )	0,993			
H (cm)	12,153			
Gradiente hidráulico	8,9			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	108,4	108,4	108,4	108,4
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	39	36	39	37,5
Δh (cm)	3,90	3,60	3,90	3,75
h <sub>2</sub> (cm)	104,5	104,8	104,5	104,65
Δt (s)	1800	1800	1800	1800
T (°C)	18,5	19,0	18,5	18,5
K (cm.s <sup>-1</sup> )	3,16E-06	2,91E-06	3,16E-06	3,03E-06
Fator de correção	1,03771	1,02478	1,03771	1,03771
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	3,27E-06	2,98E-06	3,27E-06	3,15E-06
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	3,17E-06			

Tabela 10 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S4 (1).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S4 (1)			
A (cm <sup>2</sup> )	76,688			
a (cm <sup>2</sup> )	0,993			
H (cm)	12,133			
Gradiente hidráulico	8,9			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	108,3	108,3	108,3	108,3
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	75,0	75,5	74,0	75,0
Δh (cm)	7,50	7,55	7,40	7,50
h <sub>2</sub> (cm)	100,8	100,75	100,9	100,8
Δt (s)	300	300	300	300
T (°C)	19,0	19,0	19,0	19,0
K (cm.s <sup>-1</sup> )	3,76E-05	3,79E-05	3,71E-05	3,76E-05
Fator de correção	1,02478	1,02478	1,02478	1,02478
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	3,85E-05	3,88E-05	3,80E-05	3,85E-05
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	3,85E-05			

Tabela 11 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S4 (2).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S4 (2)			
A (cm <sup>2</sup> )	78,265			
a (cm <sup>2</sup> )	0,945			
H (cm)	12,164			
Gradiente hidráulico	9,2			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	111,5	111,5	111,5	111,5
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	124,0	127,0	127,0	127,0
Δh (cm)	12,40	12,70	12,70	12,70
h <sub>2</sub> (cm)	99,1	98,8	98,8	98,8
Δt (s)	1200	1200	1200	1200
T (°C)	20,0	20,0	20,0	20,0
K (cm.s <sup>-1</sup> )	1,44E-05	1,48E-05	1,48E-05	1,48E-05
Fator de correção	1	1	1	1
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,44E-05	1,48E-05	1,48E-05	1,48E-05
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,47E-05			

Tabela 12 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S4 (3).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S4 (3)			
A (cm <sup>2</sup> )	78,618			
a (cm <sup>2</sup> )	0,993			
H (cm)	12,163			
Gradiente hidráulico	8,9			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	108,4	108,4	108,4	108,4
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	33,0	31,0	35,0	32,0
Δh (cm)	3,30	3,10	3,50	3,20
h <sub>2</sub> (cm)	105,1	105,3	104,9	105,2
Δt (s)	600	600	600	600
T (°C)	19,0	19,0	19,5	19,0
K (cm.s <sup>-1</sup> )	7,92E-06	7,43E-06	8,41E-06	7,67E-06
Fator de correção	1,02478	1,02478	1,01239	1,02478
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	8,11E-06	7,61E-06	8,51E-06	7,86E-06
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	8,03E-06			

Tabela 13 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S5 (1).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S5 (1)			
A (cm <sup>2</sup> )	68,564			
a (cm <sup>2</sup> )	0,945			
H (cm)	12,233			
Gradiente hidráulico	9,1			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	111,4	111,4	111,4	111,4
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	25,5	24,0	28,0	25,0
Δh (cm)	2,55	2,40	2,80	2,50
h <sub>2</sub> (cm)	108,85	109	108,6	108,9
Δt (s)	3600	3600	3600	3600
T (°C)	20	20	20	19,5
K (cm.s <sup>-1</sup> )	1,08E-06	1,02E-06	1,19E-06	1,06E-06
Fator de correção	1,00000	1,00000	1,00000	1,01239
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,08E-06	1,02E-06	1,19E-06	1,08E-06
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1,09E-06			

Tabela 14 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S5 (2).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S5 (2)			
A (cm <sup>2</sup> )	76,718			
a (cm <sup>2</sup> )	0,945			
H (cm)	12,170			
Gradiente hidráulico	9,2			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	111,4	111,4	111,4	111,4
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	43,0	37,5	43,0	41,0
Δh (cm)	4,30	3,75	4,30	4,10
h <sub>2</sub> (cm)	107,1	107,65	107,1	107,3
Δt (s)	900	900	900	900
T (°C)	21	19,5	20	20
K (cm.s <sup>-1</sup> )	6,56E-06	5,70E-06	6,56E-06	6,25E-06
Fator de correção	0,97612	1,01239	1,00000	1,00000
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	6,40E-06	5,78E-06	6,56E-06	6,25E-06
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	6,25E-06			

Tabela 15 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório - Amostra S5 (3).

<b>Condutividade hidráulica - Carga variável</b>				
Amostra	S5 (3)			
A (cm <sup>2</sup> )	75,879			
a (cm <sup>2</sup> )	0,945			
H (cm)	12,121			
Gradiente hidráulico	9,2			
Determinação	1	2	3	4
h <sub>1</sub> (cm)	111,4	111,4	111,4	111,4
Leitura inicial (mm)	0	0	0	0
Leitura final (mm)	11,0	10,0	11,0	11,0
Δh (cm)	1,10	1,00	1,10	1,10
h <sub>2</sub> (cm)	110,3	110,4	110,3	110,3
Δt (s)	4800	4800	4800	4800
T (°C)	19,5	19,5	19,5	19,5
K (cm.s <sup>-1</sup> )	3,12E-07	2,84E-07	3,12E-07	3,12E-07
Fator de correção	1,01239	1,01239	1,01239	1,01239
K <sub>20</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	3,16E-07	2,87E-07	3,16E-07	3,16E-07
K <sub>médio</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	3,09E-07			