

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

Romelito Regginato

**MODELAMENTO MATEMÁTICO DA TRAJETÓRIA E TEMPO DE CHEGADA  
DOS CONTAMINANTES NA ÁREA DO ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS DE CANDIOTA - RS**

Porto Alegre

2018

Romelito Regginato

**MODELAMENTO MATEMÁTICO DA TRAJETÓRIA E TEMPO DE CHEGADA  
DOS CONTAMINANTES NA ÁREA DO ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS DE CANDIOTA - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia

Orientador: Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

Porto Alegre

2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Rui Vicente Oppermann

**Vice-Reitora:** Jane Fraga Tutikian

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Regginato, Romelito

Modelamento matemático da trajetória e tempo de chegada dos contaminantes na área do aterro de resíduos sólidos urbanos de Candiota, RS. / Romelito Regginato. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2018.

[102 f.]

Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2018.

Orientadores: Antonio Pedro Viero

1. Aterro Sanitário. 2. Contaminantes 3. Modelo matemático . 4.  
Trajetória. 5. Tempo de chegada. I. Título.

CDU 55:504

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sônia Teresinha Duarte de Oliveira

CRB 10/2310

---

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil

CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-6569

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

## **AGRADECIMENTOS**

A toda a minha família em especial a minha mãe Dilema Franquini Regginato, que fez de tudo para tornar os momentos difíceis mais brandos. Também sou grato ao meu pai Vilmar Regginato pelo apoio e incentivo nos estudos.

A minha tia Geni Regginato pelo apoio e carinho. Também sou grato a minha tia Nelci Maria Regginato por me acolher em sua casa e me ajudar financeiramente nos momentos que precisei.

A minha esposa Sabrina Lidiane Soares Regginato que jamais me negou apoio, carinho e incentivo. Obrigado amor da minha vida, por aguentar comigo os momentos difíceis. Sem você do meu lado esse trabalho não seria possível.

A todos os professores em especial ao orientador professor Antonio Pedro Viero pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta monografia.

A empresa Agrosig Engenharia por disponibilizar todo o suporte necessário para conclusão do curso e realização deste trabalho, em especial ao Geólogo Evandro Gottardo que sempre foi um incentivador e exemplo de dedicação, trabalho e honestidade.

A empresa Meioeste Ambiental que disponibilizou todo o material necessário para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A contaminação por resíduos sólidos urbanos é um grande problema ambiental relacionado ao desenvolvimento das atividades humanas. Os resíduos sólidos urbanos são dispostos de três formas: (i) em lixões a céu aberto, (ii) aterros controlados e (iii) em aterros sanitários. A disposição de resíduos em aterros sanitários é a forma mais segura e que gera o menor impacto ambiental. Os aterros sanitários são obras de engenharia que seguem técnicas sanitárias de impermeabilização do solo, compactação e cobertura diária dos resíduos, tratamento do chorume e dos gases produzidos. Este estudo foi realizado na área do Aterro Sanitário Metade Sul (também denominado Aterro Sanitário Candiota) localizado no município de Candiota - RS, e teve como objetivo elaborar um modelo matemático de simulação da trajetória e do tempo de chegada dos contaminantes na condição hipotética de contaminação de chorume diretamente sobre a superfície saturada do aquífero local. A metodologia do estudo consistiu no mapeamento e caracterização geológica e hidrogeológica do local, georreferenciamento e nivelamento do nível da água dos poços de monitoramento, realização de ensaios de *Slug Test*, interpretação de perfis estratigráficos, descrição de uma lâmina petrográfica da rocha que constitui o arcabouço litológico principal do aquífero local, cálculo dos parâmetros de condutividade hidráulica e transmissividade do aquífero. A concepção do modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas permitiu a definição das condições de contorno do modelo matemático de fluxo e a simulação das trajetórias e dos tempos de chegada das partículas de contaminantes nos poços de monitoramento e na Sanga da Carvoeira. Os resultados obtidos demonstram que a área de maior vulnerabilidade para a contaminação do aquífero são as lagoas de tratamento de efluente devido à maior proximidade com o topo do aquífero, bem como do curso da Sanga da Carvoeira.

**Palavras-Chave:** Aterro Sanitário, Contaminantes, Modelo Matemático, Trajetória, Tempo de Chegada.

## ABSTRACT

Contamination by urban solid waste is a major environmental problem related to the development of human activities. Urban solid waste is disposed of in three ways: (i) in open dumps, (ii) controlled landfills and (iii) in landfills. Disposal of waste in sanitary landfills is a safer and more important means of generating environmental impact. Sanitary landfills are engineering works that are the techniques of soil sealing, compaction and coverage of waste, treatment of slurry and gases produced. This study was carried out in the area of Sanitary Urban Landfill Metade Sul (or Candiota Sanitary Urban Landfill) located in the city of Candiota - RS, and had as objective to elaborate a mathematical model of the simulation of the trajectory and arrival time of the contaminants in the hypothetical condition of leachate contamination directly on the saturated surface of the local aquifer. The methodology of the study consisted in the mapping and geological and hydrogeological characterization of the site, georeferencing and leveling of the water level of the monitoring wells, performance of Slug Test, interpretation of stratigraphic structures, description of a petrographic rock slide that composes the aquifer locality, calculation of the parameters of hydraulic conductivity and transmissivity of the aquifer. With regard to the conceptual model of groundwater flow allowed the contour forces of the blood flow model and the dosages of trajectories and particle contaminant times in the monitoring wells and the Sanga da Carvoeira. The results of the slide are an area of greater vulnerability for the contamination of the aquifer in the hypothetical scenario of lower risk of contamination and Sanga da Carvoeira.

**Key words:** Landfill, Contaminants, Mathematical Model, Trajectory, Time of Arrival.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de poluição causada em lixões. ....	16
Figura 2 - Modelo de funcionamento de um aterro controlado.....	17
Figura 3 - Modelo de funcionamento de um aterro sanitário. ....	18
Figura 4 - Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos. ....	27
Figura 5 - Os processos físicos que causam a dispersão mecânica. ....	33
Figura 6 - Situação da área do aterro sanitário de Candiota - RS.....	38
Figura 7 - Localização da área do aterro sanitário. ....	39
Figura 8 - Mapa da área da Bacia do Paraná e distribuição das supersequências no território brasileiro com destaque para a localização da área de estudo em vermelho. ....	40
Figura 9 - Carta estratigráfica simplificada da Bacia do Paraná. ....	41
Figura 10 - Mapa geológico da área de estudo, na região do Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos. ....	42
Figura 11 - Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque para a Formação Rio Bonito que ocorre na área de estudo. ....	43
Figura 12 - Modelo esquemático de coletas de dados utilizando modo de Levantamento Cinemático em Tempo Real (RTK).....	45
Figura 13 - Modelo esquemático de medição do nível da água com medidor de nível. ....	47
Figura 14 - Localização da área de disposição de resíduos antes da implantação do Aterro Sanitário. ....	52
Figura 15 - Planta da conformação dos taludes negativos do interior da célula de disposição de resíduos. ....	54
Figura 16 - Vista tridimensional do fundo da célula de disposição de resíduos, com destaque para o arranjo da drenagem coletora de chorume na base da célula. ....	55
Figura 17 - Detalhe do sistema de impermeabilização construído na base da célula de disposição de resíduos. ....	56
Figura 18 - Configuração final do fundo da célula de disposição de resíduos e lagoas de tratamento de chorume, na fase inicial de operação do aterro. ....	59
Figura 19 - Planta da conformação final dos taludes de encerramento da célula de disposição de resíduos. ....	60
Figura 20 - Localização dos poços de monitoramento em relação à área do aterro.....	61
Figura 21 - Superfície Potenciométrica com indicativo das direções preferenciais de fluxo da água subterrânea. ....	63
Figura 22 - Perfil estratigráfico do PM-01. ....	64
Figura 23 - Perfil estratigráfico do PM-02. ....	65
Figura 24 - Perfil estratigráfico do PM-03. ....	66
Figura 25 - Perfil estratigráfico do PM-04. ....	67
Figura 26 - Perfil estratigráfico do PM-05. ....	68

Figura 27 - Perfil estratigráfico do PM-06. ....	69
Figura 28 - Perfil estratigráfico do PM-07. ....	70
Figura 29 - Localização do perfil estratigráfico entre os poços de monitoramento PM 01, PM 02 e PM 03. ....	73
Figura 30 - Perfil estratigráfico construído de NE para SW entre os poços de monitoramento PM 01, PM 02 e PM 03. ....	74
Figura 31 - Localização do perfil estratigráfico entre os poços de monitoramento PM 01, PM 02, PM 05 e PM 06. ....	74
Figura 32 - Perfil estratigráfico construído de NE para SW entre os poços de monitoramento PM 01, PM 02, PM 06 e PM 06. ....	75
Figura 33 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de <i>Bower &amp; Rice</i> para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-01. ....	80
Figura 34 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de <i>Bower &amp; Rice</i> para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-03. ....	81
Figura 35 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de <i>Bower &amp; Rice</i> para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-04. ....	81
Figura 36 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de <i>Bower &amp; Rice</i> para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-05. ....	82
Figura 37 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de <i>Bower &amp; Rice</i> para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-06. ....	82
Figura 38 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de <i>Bower &amp; Rice</i> para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-07. ....	83
Figura 39 - Modelo conceitual do fluxo subterrâneo no aquífero local. ....	86
Figura 40 - Grade do modelo matemático para simulação do fluxo da água subterrânea no aquífero local. ....	87
Figura 41 - Condição de contorno do modelo matemático ....	88
Figura 42 - Superfície potenciométrica do aquífero local calculado a partir do modelo matemático. ....	90
Figura 43 - Cenário 01 trajeto e tempo de chegada dos contaminantes lançados a partir da área das lagoas de tratamento de chorume em direção aos poços de monitoramento PM-03, PM-04 e Sanga da Carvoeira. ....	92
Figura 44 - Cenário 02 trajeto e tempo de chegada dos contaminantes lançados a partir da célula de disposição de resíduos em direção ao poço do monitoramento PM-07 e Sanga da Carvoeira. ....	94
Figura 45 - Superfície com os intervalos de tempo de dispersão dos contaminantes. ....	96

## LISTA DE FOTOS

Foto 1 - Georreferenciamento e nivelamento dos poços de monitoramento.....	46
Foto 2 - Coleta da cota topográfica do nível da água na Sanga da Carvoeira.....	46
Foto 3 - Medidor de nível de interface sonora (em laranja) utilizado para medir a profundidade do nível da água nos poços de monitoramento.....	48
Foto 4 - Ensaio de condutividade hidráulica e inserção de um volume de água conhecido nos poços de monitoramento. ....	49
Foto 5 - Vista geral da área da futura célula de disposição de resíduos.....	53
Foto 6 - Acumulação de material estéril oriundo do decapeamento superficial da jazida na futura área de disposição de resíduos. ....	53
Foto 7 - Vista geral dos diferentes tipos de materiais como (restos de carvão, cinzas e argila do decapeamento superficial) dispostos de forma aleatória do interior da futura área de disposição de resíduos. ....	54
Foto 8 - Início das obras de remoção do material excedente e reconformação da base e taludes laterais no interior da célula.....	56
Foto 9 - Vista dos taludes na face norte da célula.....	57
Foto 10 - Vista da base da célula, com destaque para implantação do sistema de impermeabilização e coleta de chorume. ....	57
Foto 11 - Fase inicial de operação com a disposição da primeira camada de resíduo sobre a base da célula impermeabilizada.....	58
Foto 12 - Vista geral das lagoas de tratamento de chorume.....	58
Foto 13 - Detalhe do sistema de impermeabilização do fundo das lagoas construído a partir de uma camada de argila compactada e geomembrana com espessura de 2,0mm. ....	58
Foto 14 - Quartzo subarredondado com intercrescimento no entorno dos grãos com a ocorrência de cutícula de argila infiltrada que envolve os intercrescimentos.....	71
Foto 15 - Grão de feldspato parcialmente dissolvido, evidência que corrobora o aumento da porosidade primária. Os grãos de quartzo apresentam intercrescimento, com a ocorrência de cutícula de argila infiltrada. ....	72
Foto 16 - Grão de feldspato totalmente dissolvido com ocorrência de uma cutícula de argila infiltrada envolvendo o intercrescimento dos grãos de quartzo.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - A variação da composição do lixiviado em diferentes idades de aterros norte americanos.	24
Tabela 2 - A variação da composição do lixiviado gerado em aterros brasileiros. ....	24
Tabela 3 - Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para diferentes tipos de materiais não consolidados. ....	30
Tabela 4 - Coordenadas dos poços de monitoramento implantados na área de estudo. ....	61
Tabela 5 - Dados de nivelamento dos poços de monitoramento. ....	62
Tabela 6 - Resultado do ensaio de <i>Slug Test</i> realizado no poço PM-01. ....	75
Tabela 7 - Resultado do ensaio de <i>Slug Test</i> realizado no poço PM-03. ....	76
Tabela 8 - Resultado do ensaio de <i>Slug Test</i> realizado no poço PM-04. ....	76
Tabela 9 - Resultado do ensaio de <i>Slug Test</i> realizado no poço PM-05. ....	77
Tabela 10 - Resultado do ensaio de <i>Slug Test</i> realizado no poço PM-06. ....	78
Tabela 11 - Resultado do ensaio de <i>Slug Test</i> realizado no poço PM-07. ....	78
Tabela 12 - Resultados das condutividades hidráulicas calculadas no aquífero local. ....	83
Tabela 13 - Cota topográfica do topo e base da camada aquífera local. ....	84
Tabela 14 - Parâmetros de entrada do modelo matemático de fluxo subterrâneo. ....	89
Tabela 15 - Distância percorrida pelas dez partículas em intervalos de tempo de 30 dias até a chegada à Sanga da Carvoeira. ....	93
Tabela 16 - Distância percorrida pelas onze partículas em intervalos de tempo de 30 dias até a chegada à Sanga da Carvoeira. ....	95

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASMS - Aterro Sanitário Metade Sul  
CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
CRM - Companhia Riograndense de Mineração  
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio  
DQO - Demanda Química de Oxigênio  
GNSS - *Global Navigation Satellite System*  
GPS - *Global Positioning System*  
NBR - Norma Brasileira  
PEAD - Polietileno de Alta Densidade  
pH - Potencial Hidrogeniônico  
PM - Poço de Monitoramento  
PNSB - Plano Nacional de Saneamento Básico  
RSU - Resíduos Sólidos Urbanos  
RTK - *Real-time Kinematic*  
SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas  
UTM - Universal Transversa de Mercator

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1. Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	15
1.2. Disposição dos Resíduos Sólidos .....	15
1.2.1 Lixão.....	15
1.2.2 Aterro Controlado.....	17
1.2.3 Aterro Sanitário .....	18
1.3. A Definição de Chorume, Lixiviado e Percolado.....	19
1.4. As Fases de Formação do Lixiviado em Aterros Sanitários.....	20
1.4.1 Fase Aeróbia .....	21
1.4.2 Fase Anaeróbia Ácida.....	21
1.4.3 Fase Metanogênica Instável.....	22
1.4.4 Fase Metanogênica Estável.....	22
1.4.5 Fase de Maturação Final.....	23
1.5. A Composição do Lixiviado Gerado em Aterros Sanitários .....	23
1.6. Os Fatores que Influenciam na Geração de Lixiviado em Aterros Sanitários.....	25
1.7. As Características da Zona Saturada de um Aquífero .....	26
1.8. As Propriedades Físicas dos Aquíferos .....	27
1.8.1 Porosidade Total .....	28
1.8.2 Porosidade Efetiva.....	28
1.8.3 Lei de Darcy .....	29
1.8.4 Condutividade Hidráulica.....	30
1.8.5 Transmissividade .....	31
1.8.6 Coeficiente de Armazenamento.....	31
1.9. Os Mecanismos de Transporte dos Contaminantes em Aquíferos .....	32
1.9.1 Transporte por Advecção.....	32
1.9.2 Transporte por Dispersão Mecânica .....	33
1.9.3 Transporte por Dispersão Hidrodinâmica.....	34
1.9.4 Sorção e Retardo.....	35
<b>2. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>36</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>37</b>
<b>4. ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>37</b>
4.1. Localização da Área de Estudo.....	37

4.2. Caracterização Geológica Regional.....	39
4.2.1 Formação Rio Bonito.....	43
<b>5. HIPÓTESES .....</b>	<b>44</b>
<b>6. METODOLOGIA DE TRABALHO .....</b>	<b>44</b>
6.1. Trabalho de Campo.....	45
6.1.1 Georreferenciamento e Nivelamento dos Poços de Monitoramento e do Nível da Água do Arroio Local. ....	45
6.1.2 Profundidade do Nível da Água nos Poços de Monitoramento.....	46
6.1.3 Ensaio de <i>Slug Test</i> Realizados nos Poços de Monitoramento.....	48
6.1.4 Coleta de Amostra de Rocha para Confecção de Lâmina Petrográfica.....	49
6.2. Modelo de Fluxo das Águas Subterrâneas na Área de Influência do Aterro Sanitário	50
6.2.1 Modelo Conceitual de Fluxo das Águas Subterrâneas .....	50
6.2.2 Modelo Matemático de Fluxo das Águas Subterrâneas .....	50
<b>7. RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>51</b>
7.1. Caracterização Geomorfológica e Paisagística na Futura Área de Disposição de Resíduos.....	51
7.2. Detalhes Construtivos da Célula de Disposição de Resíduos do Aterro Sanitário Metade Sul .....	54
7.3. Projeto de Encerramento das Operações na Célula 01 .....	60
7.4. Georreferenciamento e Nivelamento dos Poços.....	60
7.5. Medição do Nível da Água nos Poços de Monitoramento .....	61
7.6. Superfície Potenciométrica do Aquífero Local .....	62
7.7. Descrição dos Perfis Estratigráficos dos Poços de Monitoramento .....	63
7.7.1 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-01 .....	63
7.7.2 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-02.....	64
7.7.3 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-03.....	65
7.7.4 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-04.....	66
7.7.5 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-05.....	67
7.7.6 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-06.....	68
7.7.7 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-07.....	69
7.8. Descrição da Lâmina Petrográfica.....	70
7.9. Perfil Estratigráfico dos Poços de Monitoramento .....	73
7.10.Resultados dos Ensaio de <i>Slug Test</i> Realizados nos Poços de Monitoramento.....	75
7.11.Determinação da Condutividade Hidráulica no Aquífero Local .....	79

7.12.Cálculo do Coeficiente de Transmissividade .....	83
7.13.Espessura da Camada de Arenito no Aquífero Local .....	84
<b>8. PRINCÍPIOS DA MODELAGEM MATEMÁTICA .....</b>	<b>85</b>
8.1. Modelo Conceitual do Fluxo Subterrâneo .....	85
8.2. Modelo Matemático do Fluxo Subterrâneo .....	86
8.2.1 Definição das Condições de Contorno do Modelo Matemático .....	87
8.2.2 Superfície Potenciométrica do Modelo Matemático .....	89
8.3. Simulação das Trajetórias Preferenciais de Fluxo e Tempo de Chegada dos Contaminantes .....	91
8.3.1 Cenário 01 - Simulação do Trajeto e Tempo de Chegada dos Contaminantes Provenientes das Lagoas de Chorume.....	91
8.3.2 Cenário 02 - Simulação do Trajeto e Tempo de Chegada dos Contaminantes Provenientes da Célula de Disposição de Resíduos .....	94
8.3.3 Interpolação dos Tempos de Chegada d dos Contaminantes na Área do Modelo Matemático.....	95
<b>9. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>97</b>
<b>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Aterros sanitários são obras de engenharia construídas para a disposição adequada de resíduos urbanos que devem atender a normas técnicas em termos de locação e construção de modo que sejam mínimos os riscos de contaminação do solo e dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Os aspectos geológicos e hidrogeológicos do local de construção do aterro são de extrema importância para garantir a estanqueidade e evitar a dispersão de contaminantes no ambiente. Embora a locação e construção de aterros sanitários busquem atender a estes dois requisitos básicos, sempre há o risco de ocorrer infiltrações de chorume e a contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas. Por isso, é necessário à realização de estudos e monitoramento das águas e do solo na área de influência dos aterros; bem como o estabelecimento de modelos matemáticos que prevejam o comportamento geoquímico e a dispersão de contaminantes associados a resíduos urbanos no caso de vazamentos de base ou de topo na célula de disposição de resíduos e das lagoas de tratamento do efluente.

Este estudo busca definir as condições geológicas e hidrogeológicas do local de construção do Aterro Sanitário Metade Sul - ASMS localizado no município de Candiota - RS, e construir um modelo matemático de simulação do trajeto e tempo de chegada dos contaminantes para a eventual contaminação do aquífero local.

O transporte convectivo é o principal mecanismo para a migração de plumas de contaminantes em águas subterrâneas. A determinação do trajeto e o tempo percorrido pelos contaminantes são calculados a partir de simulações matemáticas que utilizam como dados de entrada a porosidade efetiva, a condutividade hidráulica, o gradiente hidráulico, a velocidade e o sentido de fluxo da água subterrânea.

## **1.1. Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos**

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos sólidos são classificados como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT - NBR 10004, 2004, p.1).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal nº 12.305 (2010), qualifica resíduo sólido como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semi-sólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível; (BRASIL-Lei Federal nº 12.305, 2010).

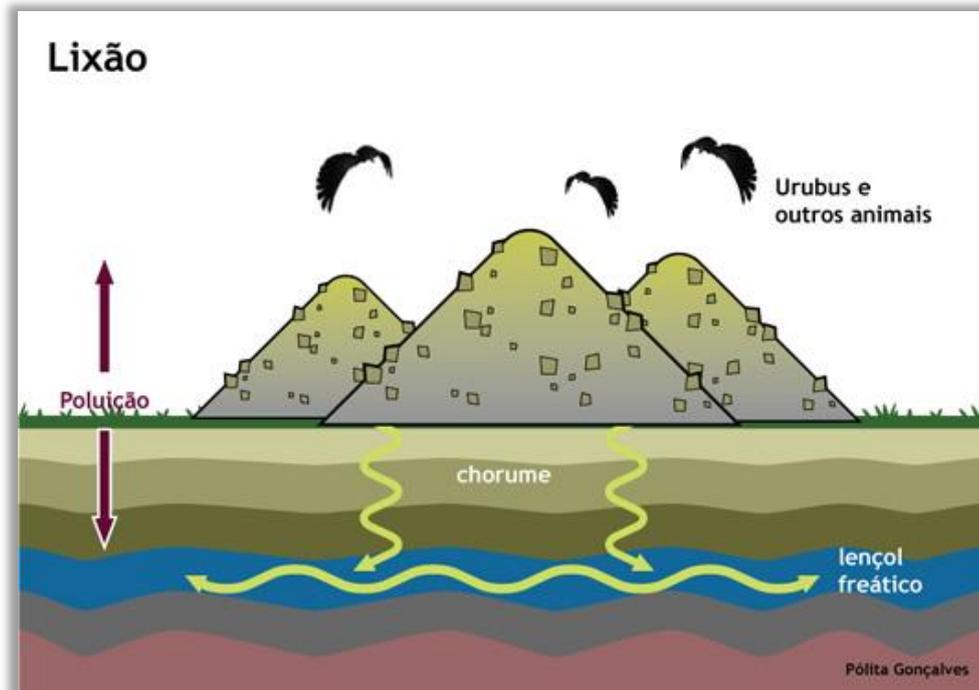
## **1.2. Disposição dos Resíduos Sólidos**

Quanto aos tipos de disposição de resíduos sólidos existem três formas que podem ser destacadas: Lixão, Aterro Controlado e Aterro Sanitário, conforme descrito em sequência.

### **1.2.1 Lixão**

Os lixões são uma forma irregular, inadequada e ilegal de disposição de resíduos sólidos, caracterizados pela simples descarga do material sobre o solo, sem quaisquer medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Nestes locais, não há a impermeabilização do solo, não há sistema de coleta de gases ou tratamento de chorume ocasionando a contaminação do solo do ar e das águas superficiais e subterrâneas, conforme pode ser observado na ilustração da Figura 1.

Figura 1 - Exemplo de poluição causada em lixões.



Fonte: <http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/>

O lixo despejado a céu aberto favorece a ocorrência de vetores como moscas, mosquitos, ratos e baratas que são responsáveis por doenças infecciosas, diarreias e leptospirose, entre outras. Segundo estudo realizado pelo PNSB no ano de 2008, a destinação de 50,5% dos resíduos gerados, foi o despejo em lixões.

Os principais danos causados ao meio ambiente pelo descarte inadequado dos resíduos são:

- **Poluição visual:** As pilhas de lixo descartadas de maneira inadequada causam a perturbação visual do local, e contribui com a perda do valor natural e econômico da área.
- **Poluição do solo:** A decomposição da fração orgânica do lixo gera o chorume. Este líquido altera as características físico-químicas do solo, por vezes tornando-o indisponível para outros fins como a agricultura.
- **Poluição da água:** A drenagem superficial do chorume pode poluir as águas superficiais e a percolação no solo pode poluir as águas subterrâneas.
- **Poluição do ar:** A decomposição dos resíduos provoca a formação de gases como dióxido de carbono, metano, e ácido sulfídrico que podem ocasionar explosões e doenças respiratórias para os moradores das áreas próximas.

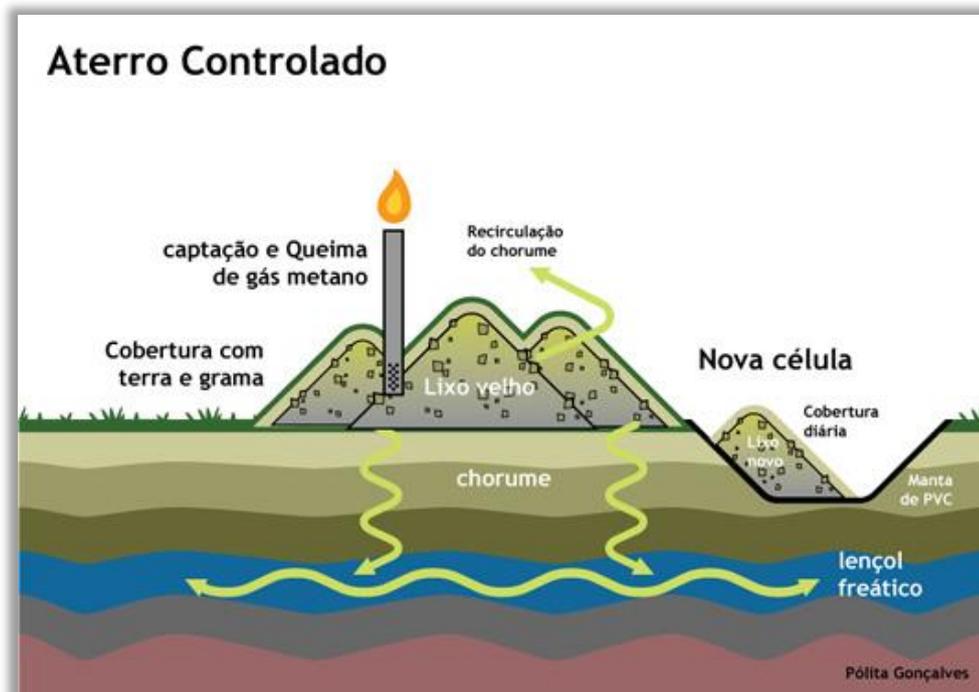
## 1.2.2 Aterro Controlado

A maioria dos municípios de pequeno porte não dispõe de tecnologia e de recursos financeiros para operar aterros sanitários. Segundo a NBR 8849 (ABNT, 1985) um aterro controlado é classificado e definido como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e a sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho. (ABNT - NBR 8849, 1985, p.2).

Esta técnica consiste em confinar adequadamente os RSU, de maneira a garantir que não ocorra poluição do ambiente externo, por meio da cobertura das células de resíduos, porém, sem promover a coleta e o tratamento dos efluentes líquidos e gases produzidos. Em muitos casos, os aterros controlados são antigos lixões remediados que recebem cobertura de argila, grama e recursos para a canalização de chorume e remoção de gases produzidos; também ocorrem melhorias na forma de recebimento de novos resíduos, com adoção de processos de compactação e recobrimento dos materiais das células expostas (Figura 2).

Figura 2 - Modelo de funcionamento de um aterro controlado.



Fonte: <http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/>

Os aterros controlados são empreendimentos adequados à legislação, porém são insuficientes do ponto de vista ambiental, visto que as técnicas para contenção e tratamento do

chorume e dos gases são insatisfatórias, podendo ocorrer à contaminação do solo e do lençol freático, devido a impermeabilização não ideal antes da deposição do lixo. A NBR 8849 (ABNT, 1985), indica que para a implantação do aterro controlado, devem ser previstos projetos de drenagem de águas pluviais e programas de inspeção da área de influência do aterro controlado, com objetivo de monitorar possíveis contaminações.

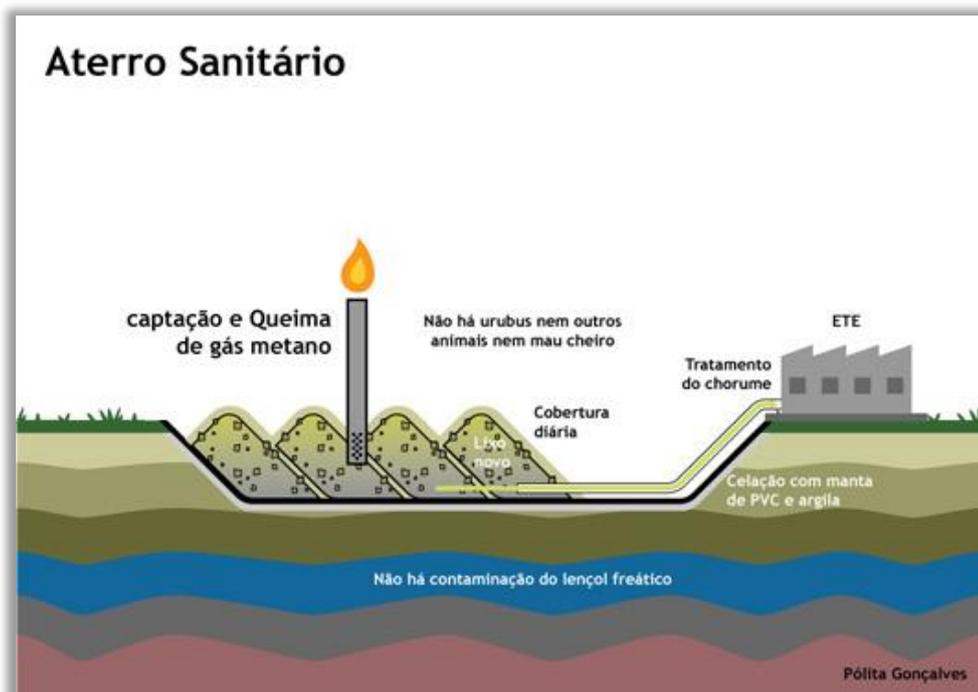
### 1.2.3 Aterro Sanitário

Segundo a NBR 8419 (ABNT, 1992), classifica e define aterro sanitário como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário. (ABNT, NBR 8419, 1992, p.1)

Trata-se de um método de disposição final de RSU, baseado em técnicas sanitárias de impermeabilização do solo, compactação e cobertura diária das células em operação, e tratamento de gases e chorume gerados (Figura 3). Segundo o PNSB os aterros sanitários são o destino de 27,68% dos resíduos produzidos no Brasil.

Figura 3 - Modelo de funcionamento de um aterro sanitário.



Fonte: <http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/>

A NBR 8419 (ABNT, 1992) também trata da apresentação de projetos técnicos para aterros sanitários de RSU, os quais devem atender no mínimo as especificações contidas nesta Norma, entre as quais estão em destaque a:

- Caracterização do local destinado ao aterro sanitário;
- Localização e caracterização topográfica;
- Caracterização geológica e geotécnica;
- Caracterização climatológica;
- Caracterização dos usos da água e do solo;
- Projeto de drenagem superficial;
- Projeto de drenagem e remoção de percolato;
- Projeto de tratamento de percolato;
- Projeto de impermeabilização inferior e superior do aterro;
- Projeto de drenagem de gás.

Um aterro sanitário é uma obra de engenharia complexa, que envolve a participação de uma equipe multidisciplinar que trabalha em conjunto com o objetivo de gerar o mínimo impacto ambiental.

### **1.3. A Definição de Chorume, Lixiviado e Percolato.**

A vasta bibliografia produzida acerca de aterros sanitários e os subprodutos gerados por vezes tratam alguns termos técnicos de forma dúbia ou equivocada, como por exemplo, os conceitos referentes à chorume, lixiviado e percolato.

Segundo Rocha (2005) o chorume é o líquido resultante da decomposição dos resíduos orgânicos biodegradáveis, enquanto o percolato ou lixiviado consiste na mistura do chorume com água, normalmente das chuvas.

A NBR 8419 (ABNT, 1992), define lixiviado utilizando o termo Sumeiro ou Chorume como:

Líquido, produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO (demanda bioquímica de oxigênio).

Para Torres *et al.* (1997) percolado é um líquido originado em locais como aterros sanitários ou lixões, provenientes da água pluvial que precipita sobre a célula de disposição de resíduos e da umidade dos resíduos que drenam e percolam pelos interstícios e pelas camadas de resíduos, o que induz uma série de reações e processos físico-químicos e biológicos de degradação.

O percolado ou lixiviado é resultado da mistura do líquido proveniente da decomposição da matéria orgânica do resíduo (chorume) acrescido da mistura de fontes externas de águas superficiais ou subterrâneas.

Conforme Gomes (2009) os lixiviados de aterros sanitários são definidos como o líquido proveniente da umidade natural, e da água presente na matéria orgânica dos resíduos, dos produtos gerados a partir da degradação biológica dos materiais orgânicos e da água pluvial que infiltra e percola pelo maciço de resíduos.

As características físicas, químicas e biológicas dos lixiviados dependem de vários fatores como:

- Tipo de resíduo aterrado;
- Grau de decomposição do resíduo;
- Clima;
- Estação do ano;
- Idade do aterro;
- Profundidade do resíduo enterrado;
- Tipo de operação do aterro, entre outros.

Com base nas inúmeras variáveis que envolvem a geração de lixiviados a composição pode variar consideravelmente de um aterro para outro, e também em um mesmo aterro em diferentes épocas do ano.

#### **1.4. As Fases de Formação do Lixiviado em Aterros Sanitários**

De acordo com Silva (2009) com base na dinâmica de evolução temporal do maciço de resíduos contido no aterro, podem ser distinguidas cinco fases: aeróbia, anaeróbia ácida, metanogênica instável, metanogênica estável e maturação final. O termo instável refere-se à possibilidade de inibições temporárias na produção de metano em função de mudanças ambientais, como chuvas ou secas excessivas.

### **1.4.1 Fase Aeróbia**

Os resíduos inicialmente aterrados contêm grande quantidade de ar, por isso, esta fase de degradação é chamada de aeróbia, e os microrganismos que decompõem a matéria orgânica a partir do consumo de oxigênio (SILVA, 2009). Em tese, o metabolismo aeróbio degradaria a matéria orgânica por completo, mas algumas reações não acontecem por completo e alguns materiais são parcialmente degradados.

A produção de gás carbônico é tão intensa que a concentração pode chegar a 90% (SILVA, 2009). Nesta fase, é raro o aparecimento de lixiviado, mas pode ocorrer caso haja entre os resíduos caminhos preferenciais ou vazios que permitam a percolação da água da chuva. Este lixiviado é normalmente composto de material particulado que é arrastado pelo líquido, como sais solúveis e pequenas quantidades de matéria orgânica solúvel. (SILVA, 2009).

A compactação dos resíduos pode expulsar matéria orgânica liquefeita não metabolizada. Nestas condições pode ser gerado o lixiviado com elevada DQO, que pode chegar a concentrações de 100.000 mg/L (SILVA, 2009).

A fase aeróbia é curta, dura em média menos de um mês, quando é consumido todo o oxigênio disponível no resíduo e este entra na fase anaeróbia ácida.

### **1.4.2 Fase Anaeróbia Ácida**

Na fase anaeróbia há grande concentração de matéria orgânica, isto ocorre pela falta de oxigênio nos resíduos compactados. Na fase ácida há ação dos microrganismos acidogênicos que convertem matéria orgânica em gás carbônico, água, amônia, hidrogênio e compostos orgânicos parcialmente degradados, tais como ácidos orgânicos, principalmente o ácido acético e calor (SILVA, 2009).

Nesta fase grandes quantidades de matéria orgânica se dissolvem na água de percolação, resultando em grandes concentrações de DBO e DQO. Os valores de DBO podem ser superiores a 10.000 mg/L. Segundo Silva (2009) os principais componentes da DBO na fase ácida são os ácidos graxos voláteis como ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico que correspondem entre 60 a 90% da DBO do lixiviado da fase ácida, que gera odor forte e desagradável.

Para Silva (2009) o grande volume de gás carbônico dissolvido e a grande quantidade de ácidos orgânicos fazem com que o pH do lixiviado diminua para valores entre 4,5 a 7,5. O

pH baixo aumenta a solubilidade de alguns metais tais como o ferro, o cálcio, o magnésio, o manganês, o zinco e o estrôncio.

A fase de produção acelerada de ácidos pode durar anos ou mesmo décadas. Em aterros localizados em regiões de clima tropical, esta fase pode ser mais curta.

### **1.4.3 Fase Metanogênica Instável**

Esta fase abrange a transição entre as fases ácida e metanogênica. A velocidade de multiplicação dos microrganismos metanogênicos é muito menor que dos microrganismos acidogênicos. Assim, é preciso certo tempo para que se atinja o equilíbrio entre as populações produtoras e consumidoras de ácidos orgânicos (SILVA, 2009).

A faixa de pH ótima para os microrganismos metanogênicos é entre 6,7 e 7,5. O tempo para o resíduo atingir a fase metanogênica pode variar de alguns anos a décadas. O início será tão rápido quanto à disponibilidade de água e a vazão do lixiviado. No entanto, instabilidades no sistema podem inibir os microrganismos metanogênicos e retardar o processo. Desse fato, resulta como consequência, o aumento da concentração de ácidos voláteis, o que ocasiona aumento nas concentrações de DQO, DBO e de Sólidos Dissolvidos Voláteis, bem como a queda do pH e da alcalinidade, de modo que o lixiviado volta a ter características da fase ácida (SILVA, 2009).

### **1.4.4 Fase Metanogênica Estável**

Conforme Silva (2009) a fase metanogênica é o período de mais intensa atividade biológica do maciço de resíduos do aterro. Todos os grupos microbianos estão atuantes e processando resíduos. Espera-se, que a maior quantidade possível de matéria orgânica seja convertida, produzindo um lixiviado composto exclusivamente de materiais recalcitrantes e restos do processo de decomposição, como a amônia.

A biomassa obtida na fase metanogênica consome os ácidos voláteis do lixiviado, isto diminui a carga orgânica e ocasiona o aumento do pH para uma faixa entre 7 e 8. O nitrogênio amoniacal continua a ser gerado pelos microrganismos acidogênicos e as concentrações aumentam no lixiviado, o que pode ser a causa do pH elevado.

Nesta fase a DBO diminui e os ácidos voláteis e outros compostos orgânicos são biodegradados e totalmente consumidos e convertidos em gases no interior do maciço de resíduos.

A DQO diminui proporcionalmente menos que a DBO, isso ocorre porque a DQO é formada pelos ácidos húmicos e fúlvicos os quais são biodegradáveis e na velocidade necessária para contribuir com a DBO.

O lixiviado gerado na fase metanogênica apresenta colocação mais escura e odor menos desagradável que na fase ácida.

#### **1.4.5 Fase de Maturação Final**

Segundo Silva (2009) depois de encerrada a operação do aterro, o lixiviado tem pH em torno de 7,0 com baixas concentrações de compostos orgânicos e inorgânicos. Ocorre a conversão lenta dos materiais orgânicos resistentes aos microrganismos em substâncias húmicas complexas com metais. As diversas fases de decomposição de resíduos ocorrem simultaneamente, mas em diferentes regiões do aterro. Os resíduos inicialmente dispostos, assim como aqueles dispostos próximos à superfície estão submetidos a processos aeróbicos. As camadas mais antigas e profundas do aterro estão na fase metanogênica estável, esta diferenciação não aparece na análise do lixiviado de uma célula de resíduos.

Além das fases de decomposição do resíduo, o tipo de material disposto no aterro influencia na composição do lixiviado, a caracterização dos resíduos recebidos no aterro ajudam no entendimento dos compostos gerados presentes no lixiviado.

#### **1.5. A Composição do Lixiviado Gerado em Aterros Sanitários**

Os lixiviados de aterros sanitários são constituídos basicamente de misturas de substâncias orgânicas e inorgânicas, compostos em solução e em estado coloidal e diversas espécies de microrganismos (GOMES, 2009).

Os aterros sanitários mais comuns recebem uma mistura de resíduos domésticos, comerciais e industriais mistos. Assim, os lixiviados podem ser caracterizados como uma solução aquosa com quatro grupos de poluentes principais:

- **Materiais orgânicos dissolvidos:** são constituídos de ácidos graxos voláteis, e compostos orgânicos mais refratários como ácidos húmicos e fúlvicos;
- **Macrocomponentes inorgânicos:** compostos pelos íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ;
- **Metais pesados:** compostos por  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ;

- **Compostos orgânicos xenobiológicos:** Originários de resíduos domésticos e químicos presentes em baixas concentrações em hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, pesticidas, entre outros.

Na Tabela 1 são apresentados os intervalos de variação da composição do lixiviado em relação à idade dos aterros sanitários norte americanos. As concentrações dos parâmetros analisados são mais elevadas na fase inicial de operação e diminuem com o tempo.

Tabela 1 - A variação da composição do lixiviado em diferentes idades de aterros norte americanos.

Variável	Unidade	Idade do Aterro (anos)			
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	>20
DBO	mg/L	10.000 - 25.000	1.000 - 4.000	50 - 1.000	< 50
DQO	mg/L	15.000 - 40.000	10.000 - 20.000	1.000 - 5.000	< 1.000
NTK	mg/L de N	1.000 - 3.000	400 - 600	75 - 300	< 50
N-NH <sub>3</sub>	mg/L	500 - 1500	300 - 500	50 - 200	< 30
SDT	mg/L	10.000 - 25.000	5.000 - 10.000	2.000 - 5.000	< 1.000
PH	-	3 - 6	6 - 7	7 - 7,5	7,5
Cálcio	mg/L	2.000 - 4.000	500 - 2.000	300 - 500	< 300
Sódio e Potássio	mg/L	2.000 - 4.000	500 - 1.500	100 - 500	< 100
Ferro e Magnésio	mg/L	500 - 1.500	500 - 1.000	100 - 500	< 100
Zinco	mg/L	100 - 200	50 - 100	10 - 50	< 10
Cloretos	mg/L	1.000 - 3.000	500 - 2.000	100 - 500	< 100
Sulfatos	mg/L	500 - 2.000	200 - 1.000	50 - 200	< 50
Fósforo	mg/L	100 - 300	10 - 100	-	<10

Fonte: (Gomes, 2009).

Em sequência, na Tabela 2 é apresentada a composição do lixiviado gerado nos principais aterros sanitários brasileiros.

Tabela 2 - A variação da composição do lixiviado gerado em aterros brasileiros.

Variável	Unidade	Faixa Máxima	Faixa mais Provável	<sup>1</sup> FVMP (%)
PH	-	5,7 - 8,6	7,2 - 8,6	78
Alcalinidade Total	mg/L de CaCO <sub>3</sub>	750 - 11.400	750 - 7.100	69
Dureza	mg/L de CaCO <sub>3</sub>	95 - 3.100	95 - 2.100	81
Condutividade	µS/cm	2950 - 2.500	2950 - 17.660	77
DBO	mg/L de O <sub>2</sub>	<20 - 30.000	<20 - 8.600	75
DQO	mg/L de O <sub>2</sub>	190 - 80.000	190 - 22.300	83
Óleos e graxas	mg/L	10 - 480	10 - 170	63
Fenóis	mg/L de C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	0,9 - 99	0,9 - 4,0	58
NTK	mg/L de N	80 - 3.100	Não há	-
N-amoniacoal	mg/L de N	0,4 - 3.000	0,4 - 1800	72

<sup>1</sup> FVMP: frequência de ocorrência dos valores mais prováveis.

Variável	Unidade	Faixa Máxima	Faixa mais Provável	<sup>1</sup> FVMP (%)
N-orgânico	mg/L de N	5 - 1.200	400 - 1.200	80
N-nitrito	mg/L de N	0 - 50	0 - 15	69
N-nitrato	mg/L de N	0 - 11	0 - 3,5	69
P-total	mg/L	0,1 - 40	0,1 - 15	63
Sulfeto	mg/L	0 - 35	0 - 10	78
Sulfato	mg/L	0 - 5.400	0 - 1.800	77
Cloreto	mg/L	500 - 5.200	500 - 3.000	72
Sólidos totais	mg/L	3.200 - 21.900	3.200 - 14.400	79
Sólidos totais fixos	mg/L	630 - 20.000	630 - 5.000	60
Sólidos totais voláteis	mg/L	2.100 - 14.500	2.100 - 8.300	74
Sólidos suspensos totais	mg/L	5 - 2.800	5 - 700	68
Sólidos suspensos voláteis	mg/L	5 - 530	5 - 200	62
Ferro	mg/L	0,01 - 260	0,01 - 65	67
Manganês	mg/L	0,04 - 2,6	0,04 - 2,0	79
Cobre	mg/L	0,005 - 0,6	0,05 - 0,15	61
Níquel	mg/L	0,03 - 1,1	0,03 - 0,5	71
Cromo	mg/L	0,003 - 0,8	0,003 - 0,5	89
Cádmio	mg/L	0 - 0,26	0 - 0,065	67
Chumbo	mg/L	0,001 - 2,8	0,01 - 0,5	64
Zinco	mg/L	0,01 - 8,0	0,01 - 1,5	70

Fonte: (Gomes, 2009).

## 1.6. Os Fatores que Influenciam na Geração de Lixiviado em Aterros Sanitários

Segundo Gomes (2009), a geração de lixiviado acontece quando o teor de umidade dos resíduos excede a capacidade de campo, definido como a máxima umidade retida em um meio poroso sem produzir percolação.

A formação de lixiviado ocorre por diferentes processos biológicos, físicos e químicos. Estes processos afetam a composição final do lixiviado e são influenciados pelos seguintes fatores:

- **Climáticos:** Precipitação, evapotranspiração e temperatura;
- **Característica das camadas de cobertura:** Umidade, vegetação e declividade;
- **Característica dos resíduos:** Composição gravimétrica, compactação, permeabilidade, granulométrica, peso específico, etc.

A estimativa da geração de chorume é de difícil determinação, pois envolve muitas variáveis como a pluviometria e a velocidade de degradação dos resíduos pela ação dos microrganismos. Muitos métodos para estimar o volume de lixiviado gerado em aterros estão em desenvolvimento, com destaque para o método suíço. Segundo Gomes (2009) o método

suíço utiliza coeficientes empíricos que dependem do grau de compactação dos resíduos ou do peso específico.

A partir da aplicação deste método estima-se que para aterros poucos compactados, com o peso específico dos resíduos que varia entre 4 a 7 kN.m<sup>3</sup> infiltre cerca de 25 a 50% da precipitação média anual que incida sobre a célula de resíduos transforme-se em lixiviados. Para aterros mais compactados e peso específico maior que 7 kN.m<sup>3</sup> estima-se que entre 15 a 25% da precipitação transforme-se em lixiviado.

### **1.7. As Características da Zona Saturada de um Aquífero**

Segundo Feitosa *et al.* (2000) para a hidrogeologia o termo água subterrânea é utilizado apenas para as águas que circulam na zona saturada, localizada abaixo da superfície freática. Ainda, segundo este autor, as definições de aquífero, aquíclode, aquícardo e aquífugo são (FEITOSA *et al.*, 2000):

Aquífero é uma formação geológica que contém água e permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior em condições naturais. As formações permeáveis, como as areias e os arenitos, são exemplos de aquíferos.

Aquíclode é uma formação que pode conter água (até mesmo em quantidades significativas), mas é incapaz de transmiti-la em condições naturais. As formações impermeáveis, como as camadas de argila, são bons exemplos de aquíclodes.

Aquícardo é uma camada ou formação semipermeável, delimitada no topo e/ou na base por camadas de permeabilidade muito maior. O aquícardo tem comportamento de uma membrana semipermeável através da qual pode ocorrer uma filtração vertical ou drenança.

Aquífugo é uma formação impermeável que não armazena e não transmite água.

Os aquíferos são classificados de acordo com a pressão e a capacidade de transmissão das águas nas superfícies de topo e base do aquífero em aquíferos confinados, livres e suspensos.

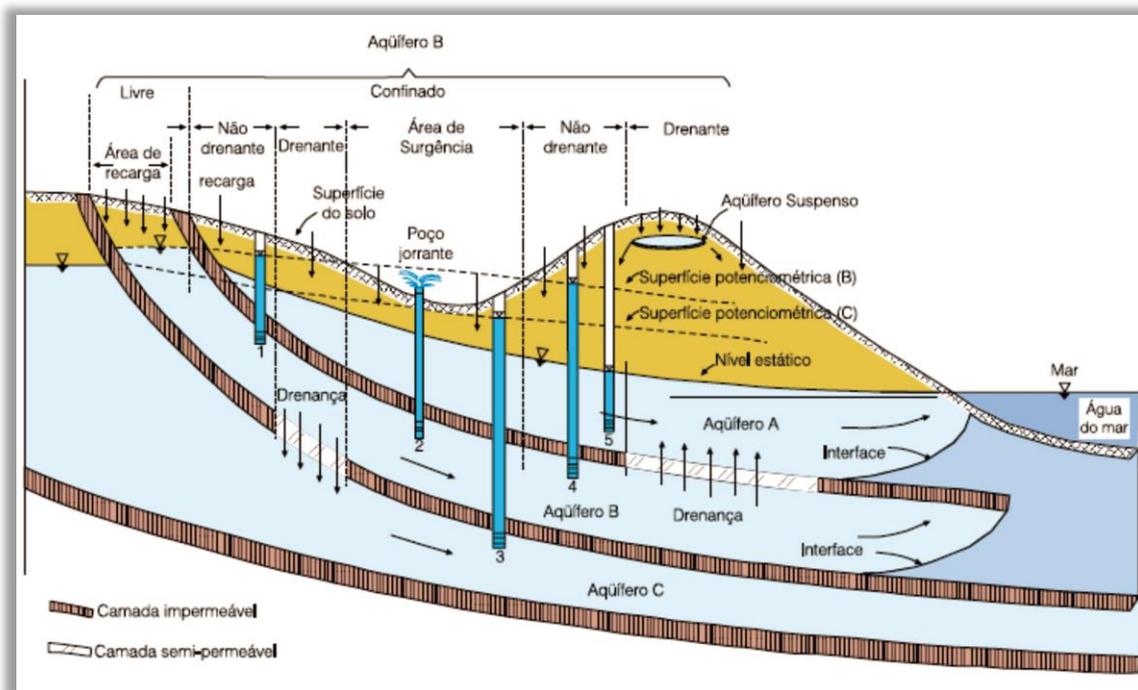
Nos aquíferos confinados a água que está na camada aquífera tem uma pressão maior que a atmosférica, neste tipo de aquífero a camada limítrofe superior e inferior são impermeáveis.

O aquífero livre é aquele cujo limite superior está em contato com a superfície freática e tem a mesma pressão que a atmosférica. Ressalta-se que as áreas de recarga dos aquíferos confinados são os aquíferos livres.

Aquífero suspenso é um aquífero livre gerado sobre uma camada impermeável ou semipermeável, geralmente com extensão limitada, situada sobre a superfície freática regional

e o nível do terreno. A representação dos diferentes tipos de aquíferos pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos.



Fonte: Modificado de (ESPINOSA, 2016).

## 1.8. As Propriedades Físicas dos Aquíferos

A água que infiltra e escoar nos aquíferos faz parte do ciclo hidrológico, sua origem em parte é da precipitação e/ou do escoamento superficial, o volume de água que percola para o interior dos aquíferos até atingir a zona saturada é a responsável pela recarga das unidades aquíferas. A percolação da água no interior das camadas aquíferas ou entre os diferentes aquíferos ocorre em tempos muito diferentes, pois dependem principalmente das características físicas de cada aquífero.

Dessa forma, os aquíferos tem a capacidade de armazenar e conduzir água, conforme as características do meio poroso e das propriedades do fluido.

A partir da Lei de Darcy diversos modelos matemáticos foram formulados para determinar o fluxo dos fluidos em meios porosos, na tentativa de interpretar e identificar o comportamento das águas subterrâneas nos aquíferos.

A seguir serão descritos os parâmetros que governam o fluxo da água subterrânea em aquíferos saturados.

### 1.8.1 Porosidade Total

A porosidade de um solo ou rocha sedimentar é definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total (FEITOSA *et al.*, 2000), conforme Equação (1).

$$\eta = \frac{V_v}{V}$$

Equação (1)

Onde:

$\eta$ : porosidade total;

$V_v$ : volume de vazios;

$V$ : volume total.

A porosidade depende principalmente do tamanho dos grãos, se os sedimentos têm grãos de tamanho variado, a porosidade tende a ser menor do que em sedimentos com graus uniformes, isso porque os sedimentos finos ocupam os espaços vazios entre os grãos maiores (FEITOSA *et al.*, 2000).

### 1.8.2 Porosidade Efetiva

A porosidade efetiva é definida como a quantidade de água que pode ser fornecida por unidade de volume no aquífero, ou seja, é a razão entre o volume de água efetivamente liberada de uma amostra de rocha porosa saturada em relação ao volume total (FEITOSA *et al.*, 2000). A Equação (2) demonstra como pode ser calculada a porosidade efetiva.

$$\eta_e = \frac{V_d}{V}$$

Equação (2)

Onde:

$\eta_e$ : porosidade efetiva;

$V_d$ : volume de água drenada por gravidade;

$V$ : volume total.

### 1.8.3 Lei de Darcy

O movimento da água subterrânea no meio poroso é muito complexo devido às irregularidades dos poros. O pioneiro em realizar estudos sobre os fatores que governam o fluxo da água subterrânea em meios porosos foi o engenheiro francês Henry Darcy, que conseguiu demonstrar a partir de uma série de experimentos a relação entre o fluxo de água e o gradiente hidráulico, assim surgiu o conceito de condutividade hidráulica (FEITOSA *et al.*, 2000). Em seu experimento Darcy verificou que a vazão específica ( $q$ ) de um meio poroso é proporcional a diferença de carga da coluna da água existente entre dois pontos ( $dh = d_{h1} - d_{h2}$ ), que é inversamente proporcional à distância entre os dois pontos ( $dl = d_{L1} - d_{L2}$ ), e proporcional a condutividade hidráulica ( $k$ ), conforme Equação (3).

$$q = -K \cdot \frac{dh}{dl}$$

Equação (3)

Onde:

$q$ : vazão específica;

$K$ : condutividade hidráulica;

$dh$ : variação de carga hidráulica entre o ponto a e b;

$dl$ : distância entre os pontos a e b.

Para fluxos em três dimensões, a definição é semelhante à equação de fluxo unidirecional conforme Equação (4), Equação (5) e Equação (6).

$$q_x = -K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial l}$$

Equação (4)

$$q_y = -K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial l}$$

Equação (5)

$$q_z = -K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial l}$$

Equação (6)

Ressalta-se que a Lei de Darcy é válida para escoamentos laminares, onde as velocidades são pequenas e a água percola suavemente pelos poros da camada aquífera (FEITOSA *et al.*, 2000).

#### 1.8.4 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica é a capacidade do meio poroso em transmitir água, é a facilidade que a água se desloca ao longo do perfil da camada aquífera; o valor da condutividade hidráulica pode ser determinado em campo ou laboratório (FEITOSA *et al.*, 2000).

De acordo com Fetter (1994) a condutividade hidráulica considera as características do meio como: porosidade, forma, tamanho e arranjo das partículas, bem como as características do fluido como viscosidade e massa específica. A condutividade hidráulica (K) pode ser expressa em m/s ou cm/s, considerando os parâmetros do meio e do fluido conforme Equação (7).

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{kg}{v}$$

Equação (7)

Onde:

K: condutividade hidráulica;

k: permeabilidade intrínseca do meio poroso;

$\rho$  e  $\mu$ : representam as características do fluido como massa específica e viscosidade;

g: aceleração da gravidade.

A permeabilidade intrínseca (k) também chamada de permeabilidade específica ocorre em função do tipo de material poroso, granulometria e disposição estrutural, expressa em (cm<sup>2</sup>), conforme consta na Tabela 3.

Tabela 3 - Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para diferentes tipos de materiais não consolidados.

Material	Permeabilidade Intrínseca (cm <sup>2</sup> )	Condutividade Hidráulica (cm/s)
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>

Material	Permeabilidade Intrínseca (cm <sup>2</sup> )	Condutividade Hidráulica (cm/s)
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: Modificado de (FEITOSA *et al.*, 2000).

### 1.8.5 Transmissividade

A transmissividade é a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura do saturada do aquífero; também expressa como a taxa de escoamento da água por uma faixa vertical do aquífero, com largura unitária e submetida a um gradiente hidráulico unitário (FEITOSA *et al.*, 2000) conforme Equação (8).

$$T = K \cdot b$$

Equação (8)

Onde:

T: transmissividade;

K: condutividade hidráulica;

b: espessura do aquífero.

### 1.8.6 Coeficiente de Armazenamento

O coeficiente de armazenamento é a capacidade que o aquífero tem de armazenar e transmitir água. Esta capacidade depende das propriedades do fluido como (densidade, viscosidade e compressibilidade) e do meio poroso (porosidade, permeabilidade intrínseca e compressibilidade), essas são as principais propriedades que regem o comportamento dos aquíferos (FEITOSA *et al.*, 2000).

O armazenamento específico de um aquífero saturado é o volume de água liberado por volume unitário conforme o decréscimo unitário da carga hidráulica.

Em aquíferos livres a água é liberada para poços ou fontes em função da drenagem dos poros, onde os vazios que inicialmente estavam saturados passam a ser ocupados pelo ar e o nível freático fica mais baixo.

Em aquíferos confinados os poros não são esvaziados e a pressão da água no interior do aquífero é maior que a pressão atmosférica e a retirada de água ocasiona o alívio de pressão hidrostática, aumentando o peso das camadas sobrepostas e a compactação do

aquífero. Assim, a água pode ser liberada por dois fatores: o primeiro causado pelo alívio de pressão hidrostática; o segundo pela redução dos vazios do aquífero causado pelo aumento da pressão sobre o meio poroso. O coeficiente de armazenamento específico pode ser calculado segundo a Equação (9).

$$S = p \cdot g(\alpha + n\beta)$$

Equação (9)

Onde:

S: coeficiente de armazenamento;

p: densidade do líquido;

g: aceleração da gravidade;

$\alpha$ : compressibilidade do meio poroso;

n: porosidade;

$\beta$ : compressibilidade da água;

## 1.9. Os Mecanismos de Transporte dos Contaminantes em Aquíferos

Para estimar dispersão da pluma de contaminantes na água subterrânea é importante determinar o comportamento e a interação dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no local. Segundo CORSEUIL *et al.* (2006), os principais processos de transporte e transformação do soluto de interesse na água subterrânea incluem advecção, dispersão, sorção e retardo.

### 1.9.1 Transporte por Advecção

A advecção é o processo de maior influência no transporte de contaminantes. O soluto (contaminante dissolvido) é transportado com o fluxo da água subterrânea. Segundo (DOMENICO & SHAWARTZ, 1998). A direção e a velocidade de transporte do contaminante coincidem com a velocidade intersticial do meio poroso ( $v_x$ ). A velocidade depende das propriedades do aquífero e pode ser determinada pela Lei de Darcy conforme a Equação (10).

$$v_x = \frac{K}{n_e} \cdot \left( \frac{dh}{dl} \right)$$

Equação (10)

Onde:

$v_x$ : velocidade intersticial da água subterrânea no meio poroso;

$K$ : condutividade hidráulica;

$n_e$ : porosidade efetiva do meio poroso;

$dh/dl$ : gradiente hidráulico;

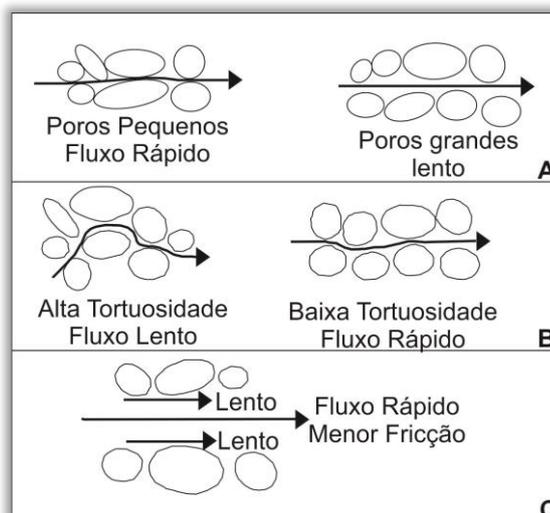
### 1.9.2 Transporte por Dispersão Mecânica

A dispersão mecânica é um mecanismo de transporte e diluição e ocorre quando o fluido contaminado escoar pelo meio poroso e mistura-se com a água não contaminada. O resultado é a diluição do contaminante Fetter (1994)

O processo de mistura é causado pela heterogeneidade do meio poroso, devido a variações nas dimensões dos poros, que cria variações na velocidade e na trajetória do fluxo subterrâneo. Este é um processo advectivo e não químico. A dispersão que ocorre na mesma direção do fluxo é denominada de dispersão longitudinal ( $D_x$ ). A dispersão que ocorre na direção perpendicular do fluxo é chamada de dispersão transversal ( $D_y$ ).

Este mecanismo de dispersão é ocasionado pelas variações locais da velocidade no meio poroso, que é influenciado por três processos (A) variação da velocidade de fluxo, (B) tortuosidade do caminho de fluxo, (C) fricção variável, conforme consta na Figura 5.

Figura 5 - Os processos físicos que causam a dispersão mecânica.



Fonte: Adaptado de Fetter (1994).

A velocidade de fluxo varia conforme o tamanho dos poros, a velocidade aumenta em poros de tamanho pequeno e diminui em poros de tamanho maior.

A tortuosidade do caminho de fluxo diminui a velocidade de fluxo da água subterrânea, quanto maior o grau de tortuosidade do caminho formado entre os poros menor é a velocidade de fluxo e quanto mais linear for o caminho formado entre os poros maior é a velocidade de fluxo.

A Fricção variável ocorre dentro do poro individual, à medida que a água subterrânea flui no interior do poro a velocidade será maior no centro e menor nas margens, devido à fricção. A variação na velocidade da água promove a diluição dos contaminantes na medida em que ocorre o distanciamento da fonte.

### 1.9.3 Transporte por Dispersão Hidrodinâmica

A dispersão hidrodinâmica é um mecanismo de transporte e diluição que compreende a dispersão mecânica mais a difusão. Para Fetter (1994) os processos de difusão molecular e dispersão mecânica não podem ser separados no fluxo da água subterrânea. Para um fluxo unidirecional a dispersão hidrodinâmica (dispersão mecânica + difusão molecular) é representada pela seguinte equação:

$$Dx = ax \cdot vx + D \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

Dx: coeficiente de dispersão hidrodinâmica longitudinal;

ax: dispersividade hidrodinâmica;

vx: velocidade linear da água subterrânea;

D: difusão molecular específica.

Os coeficientes de dispersão hidrodinâmica são difíceis de serem determinados, devido à heterogeneidade do solo. O método com maior precisão para determinar a dispersão, consiste na injeção e monitoramento de traçadores. A dispersividade longitudinal é determinada por meio de fórmulas empíricas, para estimar o comprimento de uma pluma ( $L_p$ ) em metros.

$$\alpha L = 0,83[\log(L)]^{2,414} \quad \text{Equação (12)}$$

Onde:

$\alpha L$ : dispersividade longitudinal;

L: distância do transporte.

Em modelos matemáticos tridimensionais a dispersividade é avaliada na direção longitudinal, ao longo da direção de fluxo da água subterrânea, transversalmente e verticalmente. A dispersividade transversal ( $\alpha_t$ ) e a vertical ( $\alpha_v$ ) podem ser representadas pela Equação (13) e Equação (14).

$$\alpha_t = 0,1\alpha L \quad \text{Equação (13)}$$

$$\alpha_v = 0,001L \quad \text{Equação (14)}$$

Onde:

$\alpha_t$ : dispersividade transversal;

$\alpha_v$ : dispersividade vertical;

#### 1.9.4 Sorção e Retardo

A sorção é um fenômeno no qual os contaminantes dissolvidos particionam-se da água subterrânea e aderem às partículas da matriz no aquífero. A matéria orgânica e as argilas são os componentes com maior influência no processo de sorção no aquífero. Assim, quanto maior o teor de matéria orgânica no aquífero, maior será o retardo no deslocamento dos contaminantes. Segundo Bedient *et al.* (1997) o grau de retardo está condicionado a capacidade de sorção, que é a quantidade de contaminante que é absorvida pela matéria orgânica presente no aquífero. Os cálculos para determinar os valores de sorção, retardo e velocidade de transporte de contaminantes constam na Equação (15), Equação (16) e Equação (17) respectivamente.

$$C_s = K_d \cdot C_w^n \quad \text{Equação (15)}$$

Onde:

$C_s$ : concentração do composto dissolvido;

$C_w$ : concentração do composto químico que permanece dissolvido em água;

$K_d$ : coeficiente de distribuição;

$n$ : expoente de Freundlich.

O coeficiente de retardo (R) para a sorção linear é determinado pela seguinte equação:

$$R = 1 + \frac{\rho_b \cdot K_d}{\eta_e}$$

Equação (16)

Onde:

R: coeficiente de retardo;

$\rho_b$ : densidade do aquífero;

$\eta_e$ : porosidade efetiva;

$K_d$ : coeficiente de distribuição.

A velocidade de transporte dos contaminantes é determinada pela seguinte equação:

$$v_c = \frac{v_x}{R}$$

Equação (17)

Onde:

$v_c$ : velocidade de transporte do contaminante;

$v_x$ : velocidade de fluxo da água subterrânea;

R: coeficiente de retardo;

## 2. JUSTIFICATIVA

A área do ASMS não dispõe de estudos de modelagem da trajetória e tempo de chegada de contaminantes no caso de ocorrer um vazamento de efluente da célula de disposição de resíduos ou das lagoas de tratamento de chorume.

O diagnóstico dessas características é de suma importância para um cenário de contaminação da área e para definir as direções preferenciais de fluxo das águas subterrâneas e simular a trajetória dos contaminantes e a estimativa do tempo de chegada da pluma de contaminação nos poços de monitoramento e na drenagem local.

Os modelos de dispersão de contaminantes são ferramentas importantes para a prevenção da contaminação das águas superficiais e subterrâneas em áreas de aterros sanitários, com relevante importância para a tomada de decisão caso ocorra alguma contaminação prevendo assim futuras medidas de contenção ou remoção do contaminante.

### **3. OBJETIVOS**

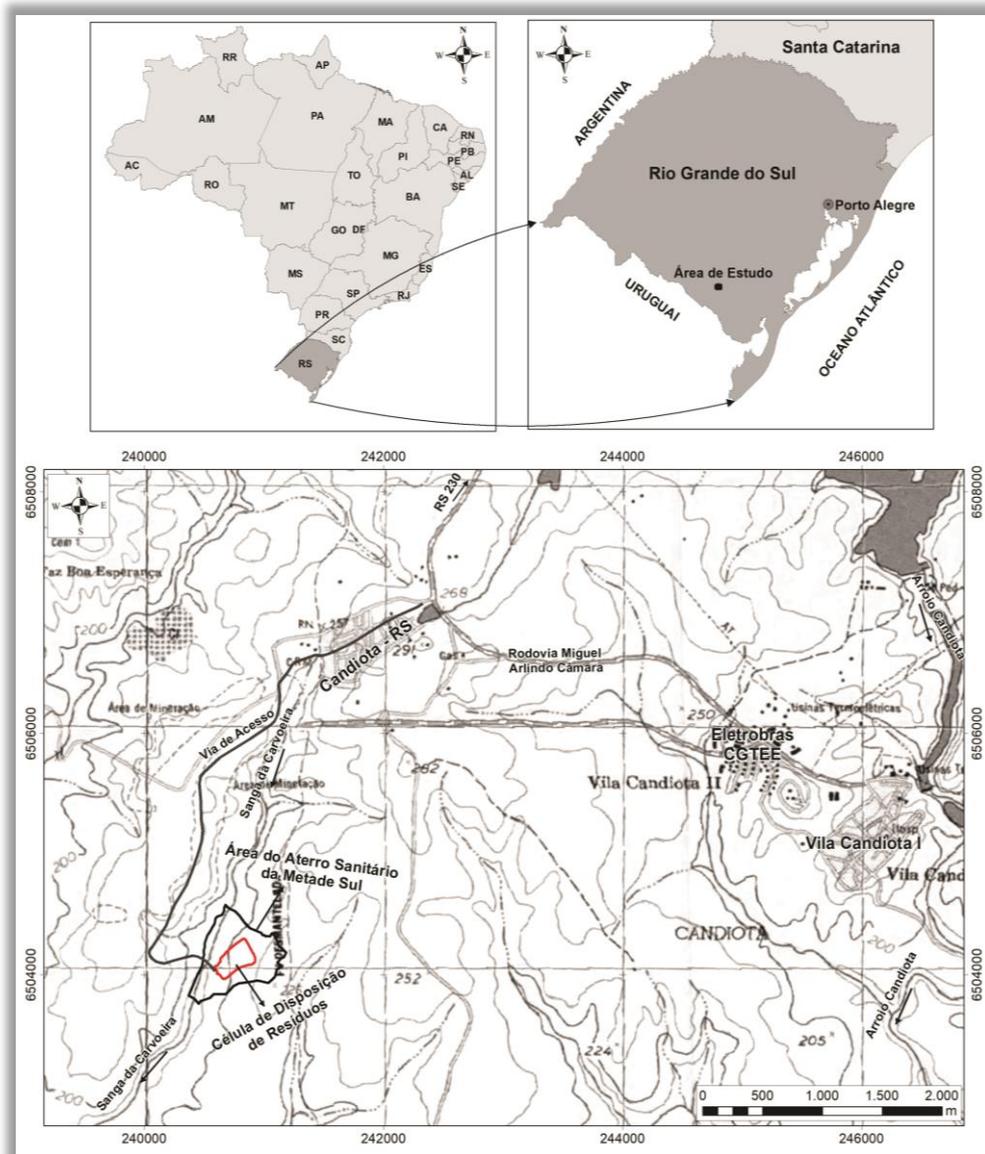
Os objetivos do presente trabalho foram determinar as direções preferenciais de fluxo das águas subterrâneas na área do ASMS e simular a trajetória e o tempo de chegada da pluma de contaminantes nos poços de monitoramento e na drenagem local.

### **4. ÁREA DE ESTUDO**

#### **4.1. Localização da Área de Estudo**

O aterro de resíduos sólidos urbanos está situado no município de Candiota - RS, na região sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul. A área aproximada é de 35 hectares e está localizada no interior da área de mineração denominada Malha II, já explorada pela Companhia Riograndense de Mineração - CRM. A distância aproximada de Porto Alegre é de 400km, nas coordenadas geográficas Latitude  $-31^{\circ}56'93,05''$  e Longitude  $-53^{\circ}73'22,33''$ . Em termos cartográficos, situa-se na porção Noroeste da Folha Pedras Altas (SH.22-Y-C-IV-2/MI- 3017/2) do Serviço Geográfico do Exército, escala 1:50.000, conforme consta na Figura 6.

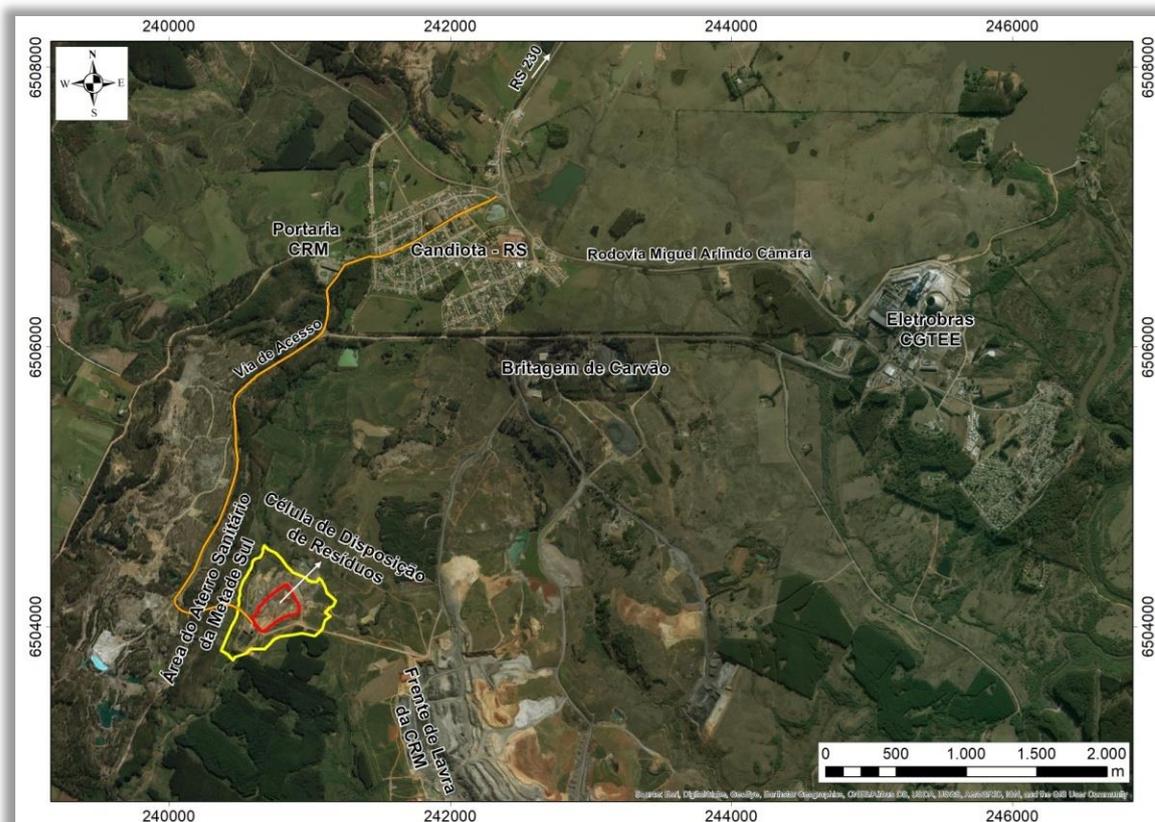
Figura 6 - Situação da área do aterro sanitário de Candiota - RS.



Fonte: Elaborado pelo autor com base na carta topográfica de Pedras Altas (SH.22-Y-C-IV-2) na escala 1:50.000.

Para acessar o local a partir de Bagé - RS, seguir pela BR 293 no sentido Candiota - RS por 50km, e seguir a direita no trevo de acesso a cidade, percorrer mais 10km pela Rodovia Miguel Arlindo Câmara até o trevo de acesso à portaria da CRM. O aterro sanitário está localizado a 3,5km no interior da antiga área de mineração, conforme consta na Figura 7.

Figura 7 - Localização da área do aterro sanitário.



Fonte: Elaborado pelo autor com base na imagem do Google Earth. Data da imagem: 14/08/2017.

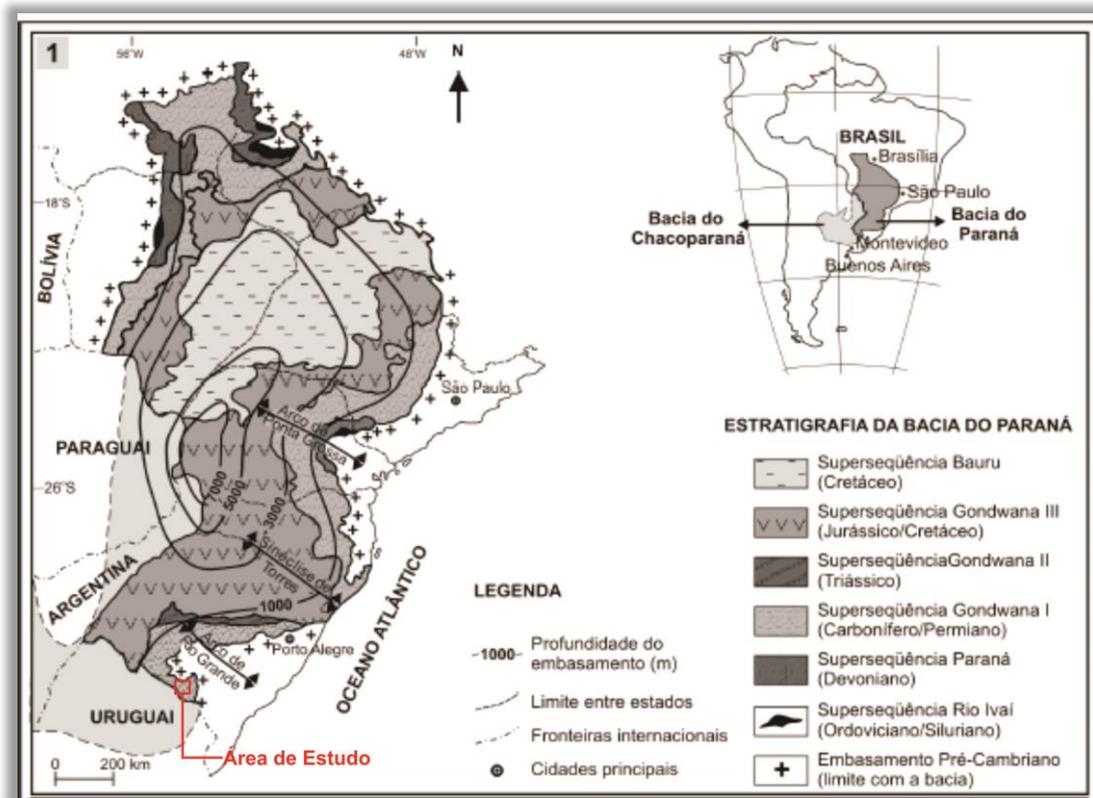
#### 4.2. Caracterização Geológica Regional

A Bacia do Paraná localiza-se na porção centro-sul do Brasil, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, abrangendo uma área (1,5 milhão de km<sup>2</sup>), a qual compreende os estados do Mato Grosso, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Cerca de 1 milhão de km<sup>2</sup> localizam-se no território brasileiro. É uma ampla bacia sedimentar intracratônica, originada em uma área em depressão de formato aproximadamente ovalado - preenchida por rochas ígneas e sedimentares - alongada no sentido N-S (MILANI *et al.*, 2007).

A maior espessura da bacia chega a 7 km de profundidade e estão preenchidos por pacotes ígneos e sedimentares, formados do Período Ordoviciano ao Cretáceo inferior (460 - 65 Ma). A coluna estratigráfica da bacia foi dividida em seis supersequências: Supersequência Rio Ivaí (Ordoviciano a Siluriano), Supersequência Paraná (Devoniano), Supersequência Gondwana II (Triássico Médio), Supersequência Gondwana III (Jurássico Superior a Cretáceo Inferior) e Supersequência Bauru (Cretáceo Médio a Cretáceo Superior). A distribuição espacial com a localização das

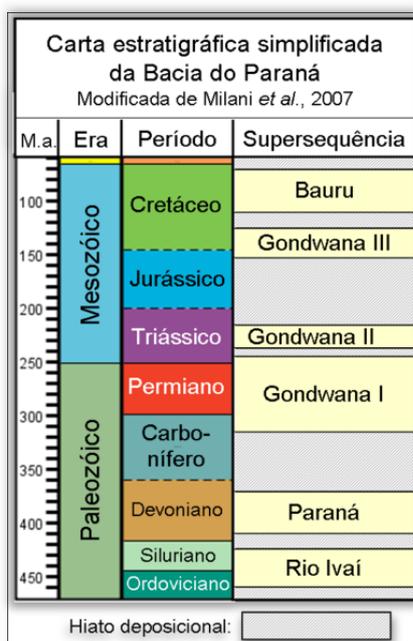
superseqüências sedimentares da bacia pode ser observada na Figura 8, e sua distribuição cronoestratigráfica consta na Figura 9. As superseqüências Rio Ivaí, Paraná e Gondwana I compreendem grandes ciclos transgressivo-regressivos paleozoicos, ao passo que as demais correspondem a depósitos continentais mesozóicos com rochas ígneas associadas (MILANI *et al.*, 2007).

Figura 8 - Mapa da área da Bacia do Paraná e distribuição das superseqüências no território brasileiro com destaque para a localização da área de estudo em vermelho.



Fonte: Adaptado de MORI *et al.* (2010).

Figura 9 - Carta estratigráfica simplificada da Bacia do Paraná.



Fonte: Modificada de Milani *et al.* (2007).

A área de estudo está inserida na Supersequência Gondwana I, que engloba o maior volume sedimentar da Bacia do Paraná, aflora em um cinturão quase contínuo ao longo do perímetro da sinéclise e exibe, em subsuperfície, uma espessura total máxima da ordem de 2.500 metros. Esta unidade encerra em seu registro com atributos sedimentares que refletem uma grande variedade de condições deposicionais que se sucedem no tempo e evoluem entre um contexto neocarbonífero de sedimentação marcada pela influência glacial até um amplo e árido deserto continental com domínio de campos e dunas eólicas já na chegada do Mesozóico (MILANI *et al.*, 2007).

Esta Supersequência Gondwana I abrange os pacotes sedimentares que caracterizam individualmente o Grupo Itararé e Formação Aquidauana, Grupo Guatá no qual está inserida a área de estudo, Grupo Passa Dois, formações Pirambóia, e Sanga do Cabral. No conjunto, esta grande unidade alostratigráfica está posicionada temporalmente entre o Neocarbonífero e o Eotriássico. (MILANI *et al.*, 2007).

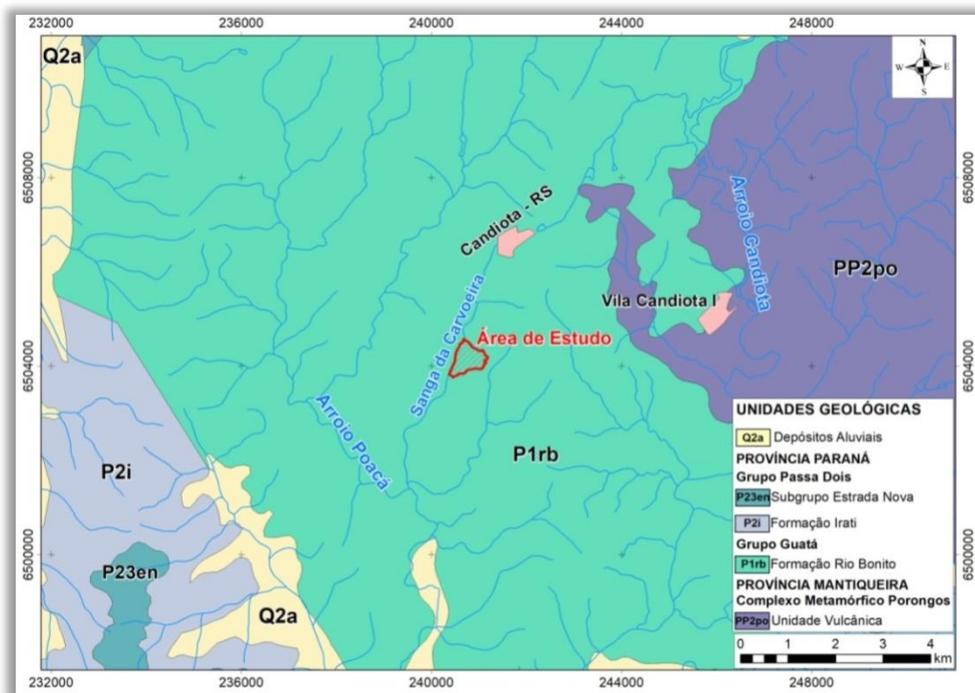
Durante parte do Eocarbonífero, o Gondwana sul-ocidental postou-se a elevadas latitudes e tornou-se um sítio de extensa glaciação continental. A existência de geleiras foi fator inibidor a uma efetiva organização de sistemas deposicionais e à acumulação sedimentar expressiva. Com a progressiva migração do paleocontinente para norte, do foco da glaciação, a sedimentação em um contexto periglacial foi retomada nessa área, no final do Moscoviano. (MILANI *et al.*, 2007).

A porção inferior da Supersequência Gondwana I é representada pelos depósitos ainda ligados de forma direta à fase de degelo dos grandes glaciares mississipianos, principalmente por meio do Grupo Itararé.

A área de estudo está inserida na Formação Rio Bonito do Grupo Guatá, conforme consta na Figura 10 que corresponde ao mapa geológico em escala regional 1:750.000 do estado do Rio Grande do Sul, executado pela CPRM (2006) para a região da cidade de Candiota - RS.

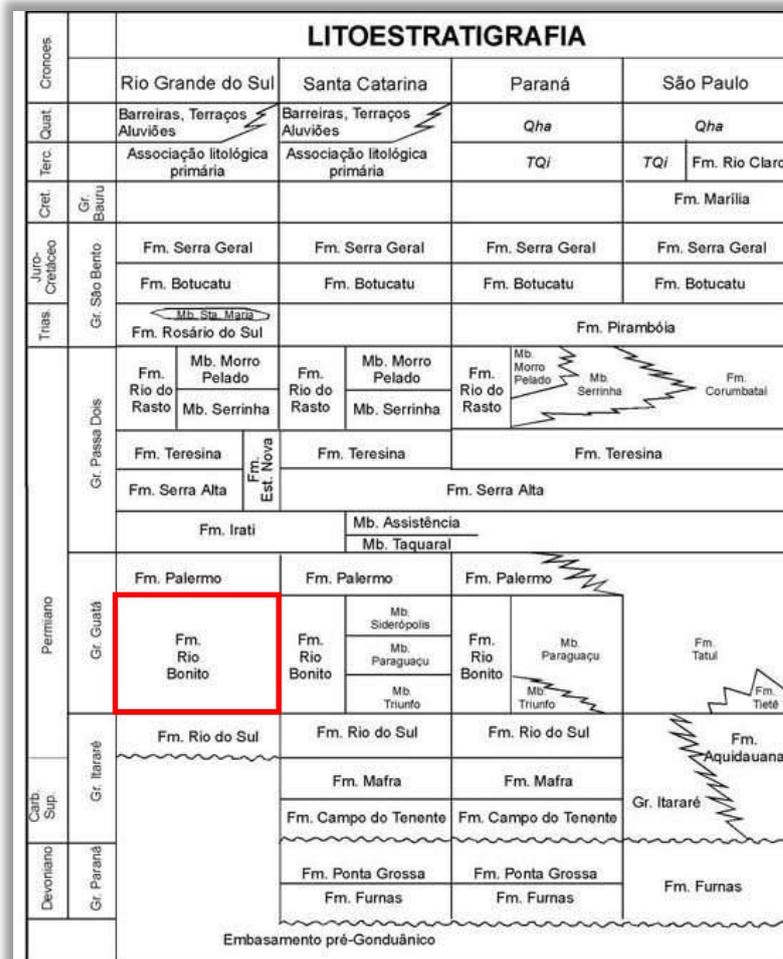
Na Figura 11 observa-se a coluna estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque para as subunidades presentes na área estudada.

Figura 10 - Mapa geológico da área de estudo, na região do Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos.



Fonte: Adaptado do mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul (CPRM, 2006).

Figura 11 - Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque para a Formação Rio Bonito que ocorre na área de estudo.



Fonte: Adaptado de (CPRM, 2000).

#### 4.2.1 Formação Rio Bonito

A Formação Rio Bonito é caracterizada pelo conjunto de rochas areníticas associadas a pelitos e camadas de carvão que foram subdivididas em três membros: Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis.

O Membro triunfo representa a porção basal da Formação Rio Bonito, construído por arenitos e conglomerados cinza-claro, sendo as principais estruturas sedimentares representadas por estratificações paralelas, cruzadas tabulares e acanaladas. Litologicamente ocorrem folhelhos, argilitos e siltitos cinza-escuro a pretos, carbonosos, leitões e camadas de carvão (KREBS, 2005).

O Membro Paraguaçu tem sedimentação pelítica, constituída pela intercalação rítmica de siltitos e folhelhos com intercalação de camadas de arenitos finos de composição quartzosa e micácea, com laminação plano-paralela ondulada com frequentes bioturbações. Esta

sedimentação é característica pelo ambiente transgressivo que caracteriza o afogamento do delta do Membro Triunfo (KREBS, 2005).

O Membro Siderópolis no qual a área de estudo está inserida é formado por um espesso pacote de arenitos com intercalações de siltitos, folhelhos carbonosos e carvão. A porção basal é formada por arenitos de cor cinza - amarelado, textura média, localmente grossa e moderadamente classificada, com grãos arredondados a subarredondados de composição quartzosa, com raros feldspatos. As camadas de arenito têm espessuras variáveis, desde centímetros até metros com geometria lenticular ou tabular e estrutura interna constituída por estratificação acanalada de média a grande porte (KREBS, 2005).

## **5. HIPÓTESES**

O aterro sanitário está assentado sobre rochas sedimentares do Membro Siderópolis pertencentes à Formação Rio Bonito. Esta unidade é de idade Permiana, composta por camadas intercaladas de siltitos e arenitos, o que determina uma condição de significativa vulnerabilidade de contaminação das águas subterrâneas e do solo.

Devido à condição geológica e hidrogeológica do local e a grande carga de contaminantes que ocorrem nos resíduos depositados no aterro, a hipótese adotada neste trabalho consiste no alto risco de ocorrência de contaminação das águas superficiais e subterrâneas em caso de vazamento/ou infiltração de chorume.

## **6. METODOLOGIA DE TRABALHO**

A empresa responsável pela operação do Aterro Sanitário Metade Sul disponibilizou um vasto acervo de materiais e estudos produzidos desde a fase inicial até a fase atual de operação. A primeira etapa foi à seleção dos dados e estudos correlatos ao tema proposto nesta monografia, entre os quais destacamos:

- Acervo fotográfico da área do aterro no período de pré - operação até a fase atual de operação;
- Projetos de implantação de célula de disposição de resíduos e lagoas de tratamento de chorume;
- Perfil estratigráfico de 07 poços de monitoramento implantados na área do aterro;

A segunda etapa foi à análise e a compilação das informações disponibilizadas com intuito conhecer o contexto operacional do aterro, como a localização das estruturas existentes, o contexto geológico, geomorfológico e hidrogeológico do local na fase de pré trabalho de campo.

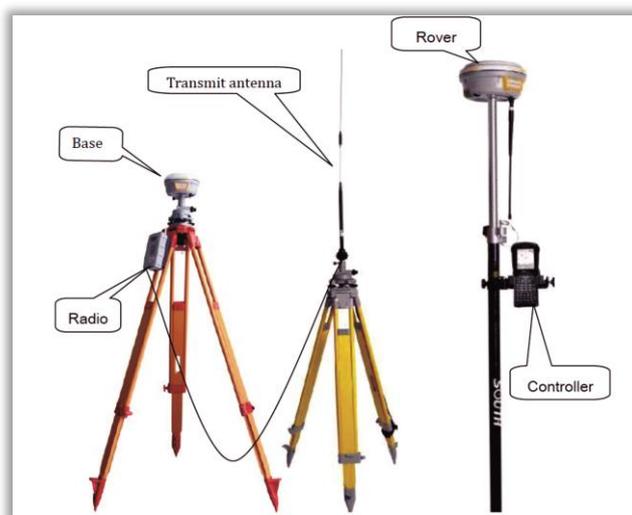
## 6.1. Trabalho de Campo

Nesta etapa foram realizadas visitas na área do aterro sanitário para verificar as condições dos poços de monitoramento e realizar os seguintes levantamentos: georreferenciamento, medição da profundidade do nível da água, execução de ensaios de *Slug Test*. Em conjunto foi realizada a coleta de uma amostra de arenito para confecção de uma lâmina delgada.

### 6.1.1 Georreferenciamento e Nivelamento dos Poços de Monitoramento e do Nível da Água do Arroio Local.

O georeferenciamento e o nivelamento dos poços de monitoramento foram realizados utilizando dois Receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) da marca SOUTH modelo S82T no modo de Levantamento Cinemático em Tempo Real (RTK), cujas principais características físicas e procedimentos de uso a campo podem ser visualizados na Figura 12.

Figura 12 - Modelo esquemático de coletas de dados utilizando modo de Levantamento Cinemático em Tempo Real (RTK).



Fonte: Manual de Operação do GPS RTK SOUTH Modelo S82T. Disponível <<https://geomatching.com/uploads/default/m/i/migration9brheg.pdf>>. Acesso em 15 nov. 2018.

As coordenadas dos poços de monitoramento foram coletadas no Sistema Universal Transversa de Mercator - UTM no Datum SIRGAS 2000 fuso 22J, conforme consta na Foto 1 e Foto 2.

Foto 1 - Georreferenciamento e nivelamento dos poços de monitoramento.



Foto 2 - Coleta da cota topográfica do nível da água na Sanga da Carvoeira.



### **6.1.2 Profundidade do Nível da Água nos Poços de Monitoramento**

A profundidade do nível da água foi realizada em 06 poços de monitoramento denominados de PM-01, PM-03, PM-04, PM-05, PM-06 e PM-07. A medição do nível da água no poço PM-02 localizado próximo à célula de disposição de resíduos não foi realizada devido ao tamponamento realizado neste poço. Para realizar a medição do nível da água foram utilizados os seguintes equipamentos:

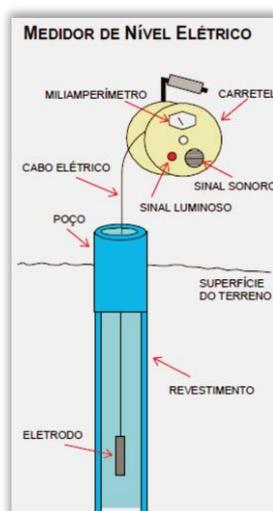
- Medidor de nível com cabo graduado e pequena sonda acoplada que quando em contato com a água ativa um alarme sonoro (Foto 3);
- Fita métrica;
- Prancheta;
- Caneta, lápis e borracha.

A medição do nível da água nos poços seguiu o seguinte procedimento:

- Abertura do cadeado da tampa externa do tubo metálico de proteção sanitária;
- Abertura da tampa do tubo geomecânico do poço;
- Com o medidor de nível ligado foi realizada a introdução da sonda no interior do poço até a profundidade de acionamento do alarme sonoro e posterior marcação com caneta no cabo elétrico a partir da boca do poço;
- Retirada do cabo elétrico e medição com trena gradua a partir da marcação do cabo até a sonda;
- Anotação do valor medido na prancheta;
- Medição da altura da boca do poço em relação ao terreno.

O modelo esquemático do procedimento de e medição do nível da água pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Modelo esquemático de medição do nível da água com medidor de nível.



Fonte: Adaptado de (FEITOSA; COSTA FILHO, 1998)

Foto 3 - Medidor de nível de interface sonora (em laranja) utilizado para medir a profundidade do nível da água nos poços de monitoramento.



### 6.1.3 Ensaios de *Slug Test* Realizados nos Poços de Monitoramento

Segundo (AZEVEDO; FILHO, 2013) o *Slug Test* é uma técnica de ensaio geralmente executada em poços de pequeno diâmetro. O ensaio consiste em realizar uma variação instantânea no nível da água no interior do poço, esta variação pode ser feita pela adição ou retirada de um volume de água conhecido.

Para este estudo os ensaios foram conduzidos a partir da adição de um volume de água conhecido, calculado a partir das dimensões internas dos poços para que ocasione uma elevação de 80cm no nível d'água, conforme pode ser visto na Equação (18) e na Foto 4.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Equação (18)

Onde:

V: Volume;

r<sup>2</sup>: raio da circunferência do tubo geomecânico;

h: altura da coluna de água.

A partir da aplicação da equação acima, o volume de água adicionado em cada ensaio para a ascensão de 80cm na coluna de água nos poços de monitoramento foi de 10 litros.

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados em 06 (seis) poços de monitoramento PM-01, PM-03, PM-04, PM-05, PM06 e PM07. O poço PM-02 localizado próximo à célula de disposição está tamponado, o que impossibilitou a realização do ensaio de *Slug Test*.

Para este realizar os ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Cronômetro;
- Medidor de nível com cabo graduado com fita métrica com pequena sonda acoplada, o qual em contato com a água ativa um alarme sonoro;
- Prancheta;
- Ficha de ensaio com tabela para registro dos dados;
- Caneta, lápis e borracha;
- Calculadora simples.

Foto 4 - Ensaio de condutividade hidráulica e inserção de um volume de água conhecido nos poços de monitoramento.



#### 6.1.4 Coleta de Amostra de Rocha para Confecção de Lâmina Petrográfica

Para realizar uma análise pormenorizada do tipo de rocha que compõem o aquífero local foi realizada a coleta de uma amostra de rocha sedimentar para confecção de uma lâmina

petrográfica no laboratório de preparação de amostras do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## **6.2. Modelo de Fluxo das Águas Subterrâneas na Área de Influência do Aterro Sanitário**

A determinação da direção preferencial de fluxo das águas subterrâneas no aquífero local é de suma importância no cenário hipotético de contaminação do aquífero local e considerando a camada aquífera como homogênea, temos um indicativo das direções preferenciais de fluxo dos contaminantes e a estimativa do tempo de chegada da pluma de contaminação.

### **6.2.1 Modelo Conceitual de Fluxo das Águas Subterrâneas**

O modelo conceitual tem por objetivo estabelecer as condições preferenciais de fluxo da água subterrânea no aquífero local. Este modelo foi concebido a partir da coleta de dados de campo como, por exemplo, o georreferenciamento, nivelamento, medição do nível da água, descrição de perfis estratigráficos dos poços de monitoramento, caracterização da camada aquífera local e determinação do nível de base do aquífero local. Também foi realizada a delimitação das possíveis fontes de contaminação, como a célula de disposição de resíduos e as lagoas de tratamento de chorume.

Concluída a etapa de coleta de campo teve início a concepção do modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas. A partir da elaboração de um mapa potenciométrico preliminar com a direção preferencial de fluxo das águas subterrâneas e a definição das áreas de recarga e descarga do aquífero local. Concomitantemente, foram utilizados os perfis estratigráficos de perfuração dos poços para caracterizar a camada aquífera local e determinar a profundidade e espessura.

### **6.2.2 Modelo Matemático de Fluxo das Águas Subterrâneas**

Os modelos computacionais são amplamente utilizados para subsidiar a gestão dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, principalmente para avaliar as demandas de uso e as contaminações dos recursos hídricos.

Para conceber o modelo de fluxo da água subterrânea e os processos de transporte dos contaminantes no aquífero local foi utilizado o aplicativo computacional MODFLOW para Windows versão 5.3, disponibilizado gratuitamente.

O MODFLOW versão 5.3 é um dos mais completos sistemas de simulação de fluxo de águas subterrâneas e processos de transporte e dispersão de contaminantes.

A concepção do modelo matemático de fluxo subterrâneo foi realizada a partir da definição área a ser modelada e da resolução das células que compõem a grade do modelo. A próxima etapa foi determinar as condições de contorno do modelo, que é a área ou conjunto de células ativas que serão utilizadas para o cálculo do modelo. Também foram inseridas no modelo as áreas da célula de disposição de resíduos, lagoas de tratamento de chorume, poços de monitoramento e o nível de base local.

Criada a grade do modelo, inseridas as estruturas existentes e definidas as condições de contorno, foi necessário informar os dados de entrada modelo, tais como as cotas de topo e base da camada aquífera, a carga hidráulica, a condutividade hidráulica, a transmissividade e a porosidade específica.

De maneira conjugada neste processo, foi utilizado o MODPATH, programa de pós - processamento concebido para trabalhar com o MODFLOW para calcular o rastreamento das partículas e o tempo de chegada dos contaminantes, com o qual foram extraídos os resultados de saída do modelo matemático.

## **7. RESULTADOS OBTIDOS**

Os resultados obtidos neste trabalho são oriundos da análise e interpretação de dados secundários disponibilizados pela empresa que opera o aterro e dos dados primários coletados em campo, conforme será pormenorizado em continuidade.

### **7.1. Caracterização Geomorfológica e Paisagística na Futura Área de Disposição de Resíduos.**

A área de disposição de resíduos está localizada no interior de uma antiga cava de carvão mineral explorada pela CRM. O processo de mineração causou acentuadas modificações no contexto geomorfológico local.

Cabe ressaltar que os depósitos de carvão mineral de Candiota - RS têm elevado volume de estéreis e assim é necessária uma grande movimentação de materiais para consecução do processo de extração, o que, conseqüentemente, causa uma acentuada dinâmica na geomorfologia local.

Na imagem de satélite histórica que consta na Figura 14, obtida em 09/08/2010, aproximadamente um ano antes do início das obras de implantação do aterro sanitário verifica-se o contexto geomorfológico pré-operação.

Figura 14 - Localização da área de disposição de resíduos antes da implantação do Aterro Sanitário.



Fonte: Imagem histórica obtida no aplicativo GOOGLE EARTH PRO datada de 09/08/2010.

O processo inicial para extração do minério ocorre com o decapeamento, escavação do terreno, formação de taludes e bancadas, para então realizar a retirada do minério. Deste processo de mineração resultam diversas feições geomorfológicas de origem antrópica, as quais podem ser destacadas como: (I) Morrotes ou cones de rejeito: são áreas de acumulação de material estéril, com formas sub-arredondada a cônicas, com elevada inclinação e alto risco de escorregamento dos materiais menos consolidados. (II) Platô de cinzas: são formados pela disposição de grandes volumes de cinzas resultantes da queima do minério carbonífero.

Normalmente a disposição ocorre em antigas cavas que são plenamente preenchidas com cinzas, até formar uma superfície de topo aproximadamente na cota do terreno do entorno. Devido à forma plana, assumem uma geometria de platôs. (III) Taludes de embasamento ou do terreno natural: São feições correspondem aos taludes formados pelo terreno natural (embasamento local). Ocorrem principalmente nas porções de bordo da área de

mineração, onde ainda não foram efetuadas escavações de blocos de minério. Estas feições geomorfológicas são de origem antrópica e ocorrem na área de estudo, como pode ser visto nos registos fotográficos a seguir: Foto 5, Foto 6 e Foto 7.

Foto 5 - Vista geral da área da futura célula de disposição de resíduos.



Fonte: Meioeste Ambiental.

Foto 6 - Acumulação de material estéril oriundo do decapeamento superficial da jazida na futura área de disposição de resíduos.



Fonte: Meioeste Ambiental.

Foto 7 - Vista geral dos diferentes tipos de materiais como (restos de carvão, cinzas e argila do decapeamento superficial) dispostos de forma aleatória do interior da futura área de disposição de resíduos.

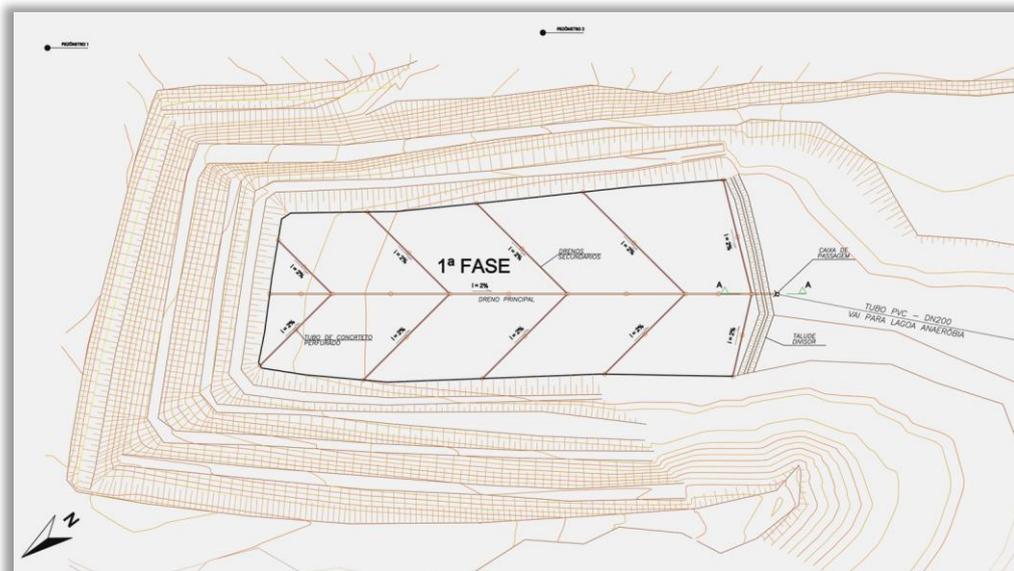


Fonte: Meioeste Ambiental.

## 7.2. Detalhes Construtivos da Célula de Disposição de Resíduos do Aterro Sanitário Metade Sul

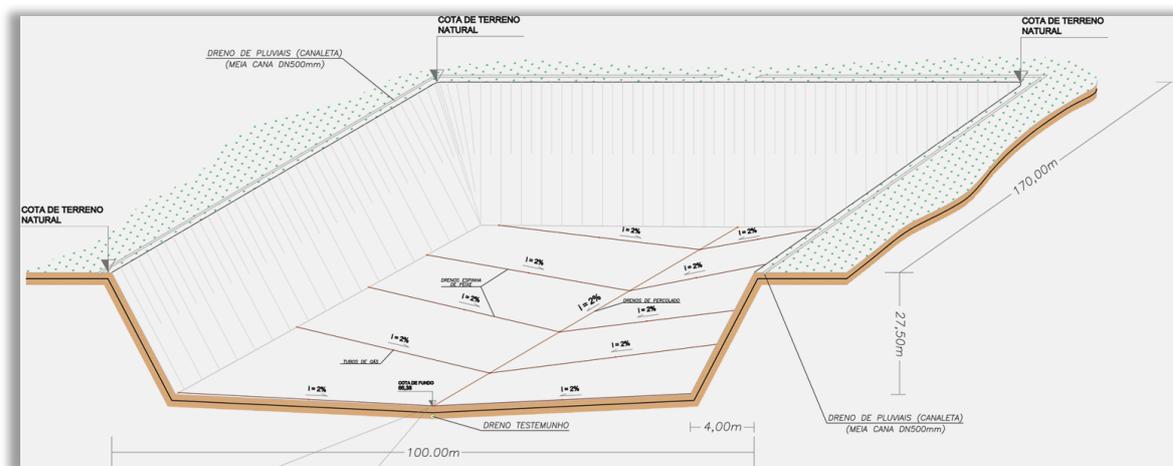
No ano de 2010 foram iniciadas as obras de implantação do Aterro Sanitário Metade Sul. A primeira etapa foi a reconformação dos taludes laterais e retirada do material no interior da futura área de disposição final de resíduos denominada de célula 01, conforme consta na Figura 15 e Figura 16.

Figura 15 - Planta da conformação dos taludes negativos do interior da célula de disposição de resíduos.



Fonte: Meioeste Ambiental.

Figura 16 - Vista tridimensional do fundo da célula de disposição de resíduos, com destaque para o arranjo da drenagem coletora de chorume na base da célula.



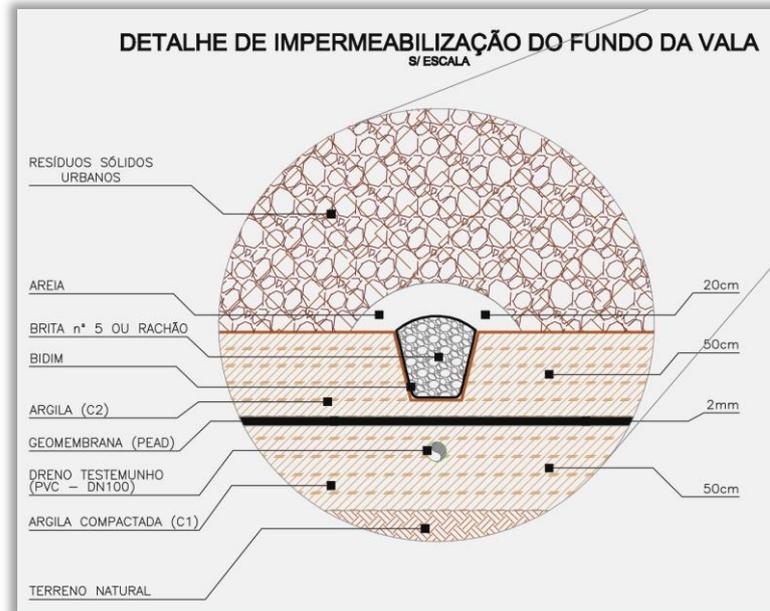
Fonte: Meioeste Ambiental.

As dimensões da célula 01 são 100,00 metros de largura, 170,00 metros de comprimento e 27,50 metros de profundidade, considerando o preenchimento desta cava até a cota do terreno natural, estima-se um volume estimado de 467 mil/m<sup>3</sup> de volume disponível para acumular de resíduo.

O sistema de impermeabilização da base da célula foi construído acima do terreno natural por uma camada de argila compactada com espessura de 0,5m. Sobre esta camada de argila foi instalada a geomembrana de PEAD com espessura de 2,0mm, e sobre a geomembrana foi adicionada mais uma camada de 0,5m de argila compactada.

Os drenos de chorume foram construídos sobre a segunda camada de argila, revestidos lateralmente por material geotêxtil de bidim. O interior da vala de drenagem foi preenchido com brita nº 5, no topo da vala foi adicionada uma camada de areia, estes materiais têm a função de atuar como filtros para evitar a passagem de materiais finos e não ocorrer a colmatagem da vala de drenagem. O detalhe do sistema de impermeabilização da base da célula pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 - Detalhe do sistema de impermeabilização construído na base da célula de disposição de resíduos.



Fonte: Meioeste Ambiental.

O período de preparação da área para o recebimento dos resíduos durou aproximadamente 02 anos, as principais atividades executadas foram a remoção e a reconformação do fundo e dos taludes laterais da célula, construção do sistema de impermeabilização da base da célula, construção sistema de drenagem de chorume para as lagoas de tratamento, construção sistema de drenagem de gás e implantação da estrutura administrativa e operacional, composta por escritório, balança, oficina e área de abastecimento, como pode ser visualizado na Foto 8 até a Foto 13.

Foto 8 - Início das obras de remoção do material excedente e reconformação da base e taludes laterais no interior da célula.



Fonte: Meioeste Ambiental.

Foto 9 - Vista dos taludes na face norte da célula.



Fonte: Meioeste Ambiental.

Foto 10 - Vista da base da célula, com destaque para implantação do sistema de impermeabilização e coleta de chorume.



Fonte: Meioeste Ambiental.

Foto 11 - Fase inicial de operação com a disposição da primeira camada de resíduo sobre a base da célula impermeabilizada.



Fonte: Meioeste Ambiental.

Foto 12 - Vista geral das lagoas de tratamento de chorume.



Fonte: Meioeste Ambiental.

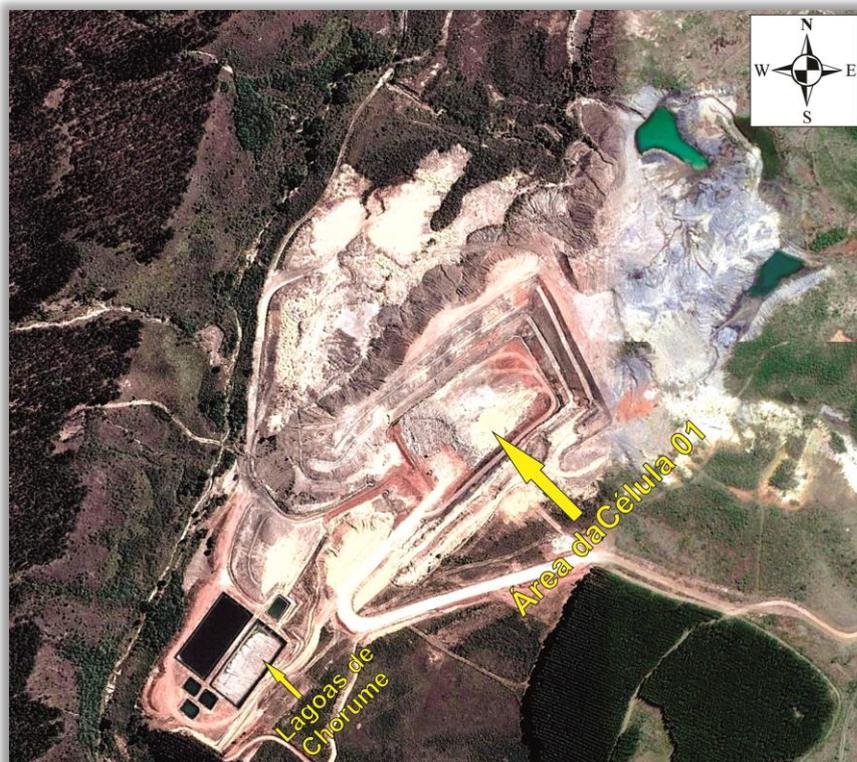
Foto 13 - Detalhe do sistema de impermeabilização do fundo das lagoas construído a partir de uma camada de

argila compactada e geomembrana com espessura de 2,0mm.



Fonte: Meioeste Ambiental.

Figura 18 - Configuração final do fundo da célula de disposição de resíduos e lagoas de tratamento de chorume, na fase inicial de operação do aterro.

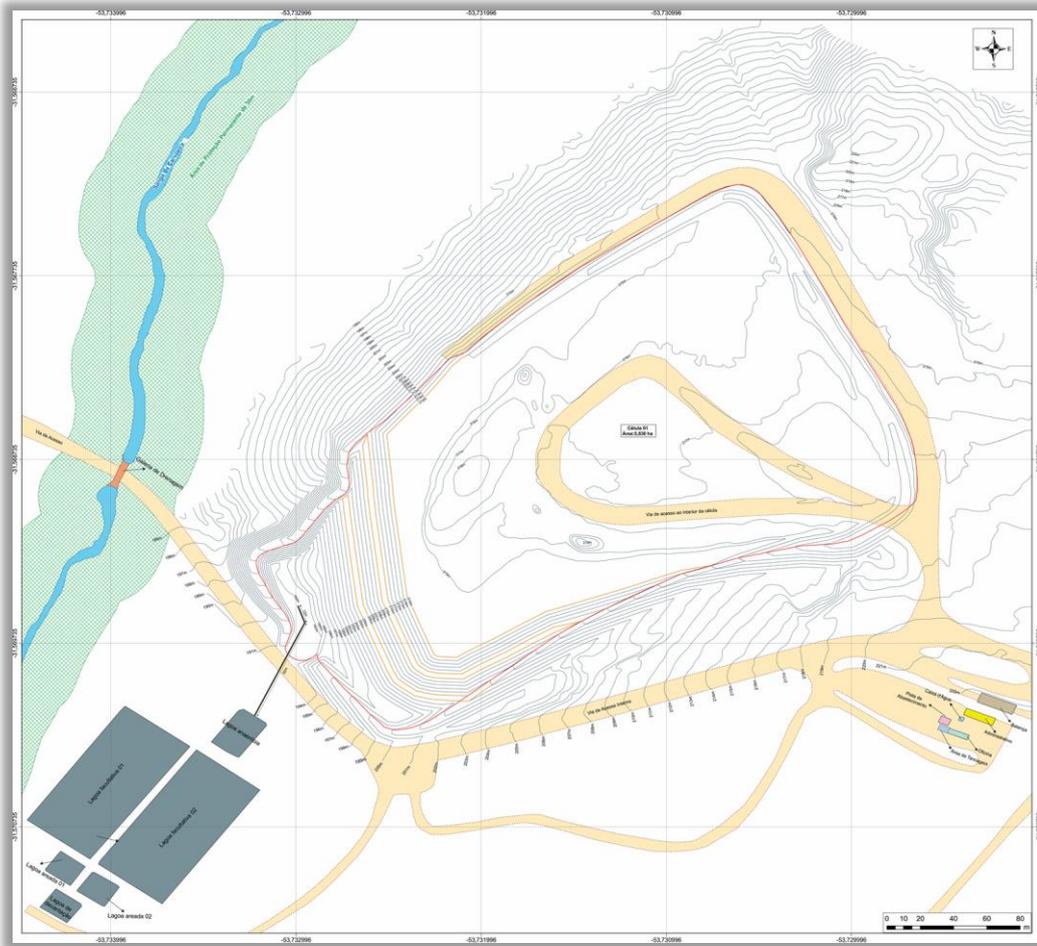


Fonte: Imagem histórica obtida no aplicativo GOOGLE EARTH PRO datada de 20/01/2012.

### 7.3. Projeto de Encerramento das Operações na Célula 01

A célula continua em operação, e segundo estudos disponibilizados pela Meioeste Ambiental a previsão de vida útil é até 2020, considerando a cota 230m como a de encerramento do topo da célula (Figura 19).

Figura 19 - Planta da conformação final dos taludes de encerramento da célula de disposição de resíduos.



Fonte: Meioeste Ambiental.

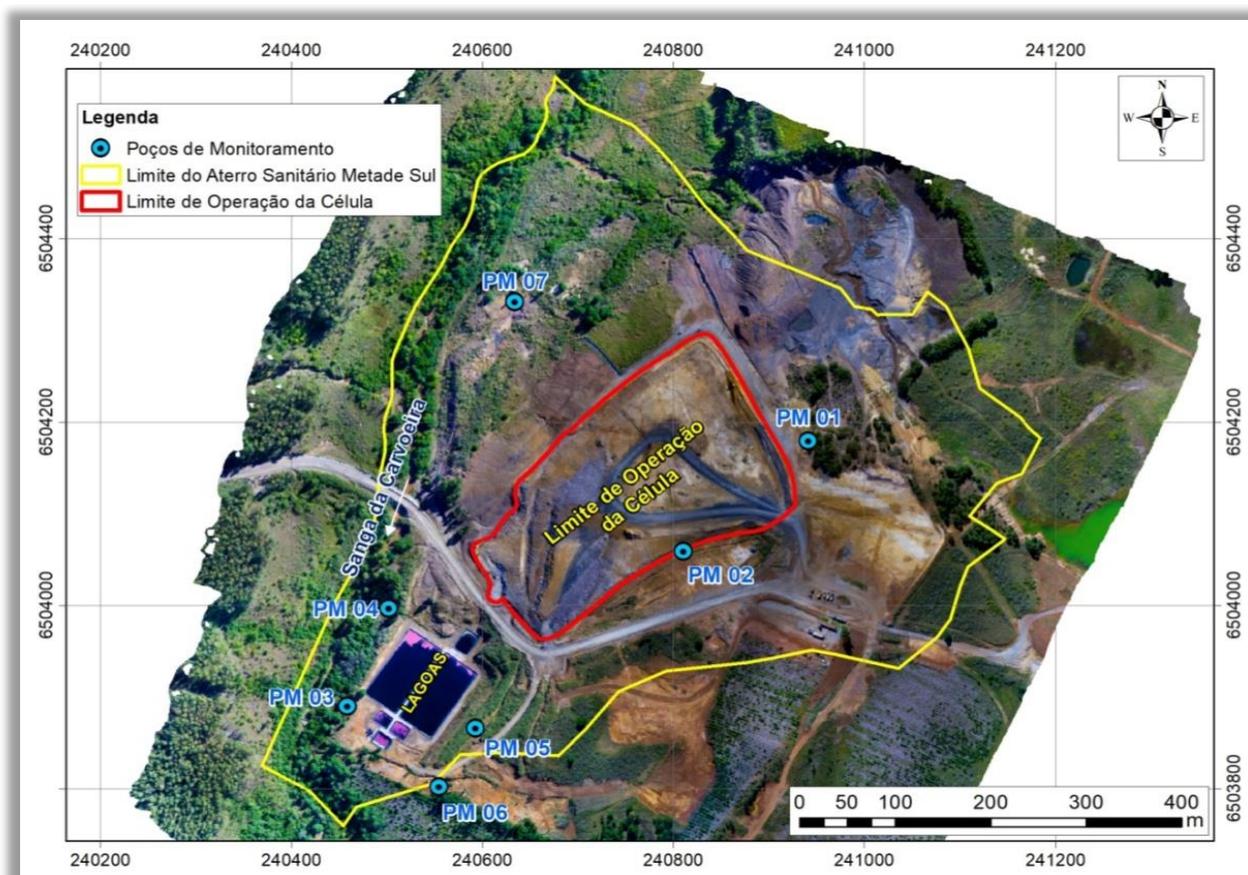
### 7.4. Georreferenciamento e Nivelamento dos Poços

O resultado do georreferenciamento dos poços de monitoramento consta na Tabela 4. A partir das coordenadas foi possível determinar a correta localização e a cota topográfica dos poços em relação à célula de disposição de resíduos e as lagoas de tratamento de chorume. Na Figura 20 consta a espacialização dos poços em relação à área do aterro.

Tabela 4 - Coordenadas dos poços de monitoramento implantados na área de estudo.

Poço de Monitoramento	Coordenadas		Cota do Terreno no Local de Perfuração do Poço (m)
	UTM N	UTM E	
PM-01	240941	6504179	215
PM-02	240810	6504058	210
PM-03	240458	6503889	182
PM-04	240502	6503996	181
PM-05	240593	6503865	191
PM-06	240554	6503801	194
PM-07	240634	6504330	191

Figura 20 - Localização dos poços de monitoramento em relação à área do aterro.



### 7.5. Medição do Nível da Água nos Poços de Monitoramento

Para a correta medição do nível da água medido nos poços de monitoramento e posterior determinação do gradiente hidráulico local, foram realizadas as seguintes medidas em campo e definição dos seguintes referenciais:

- Profundidade do nível da água em relação à boca do poço;
- Altura da boca do poço em relação ao terreno natural;

- Profundidade do nível da água em relação ao terreno natural;
- Cota do terreno natural no local de perfuração do poço;
- Cota do nível da água do poço em relação ao terreno natural.

Os resultados dos parâmetros medidos em campo constam na Tabela 5.

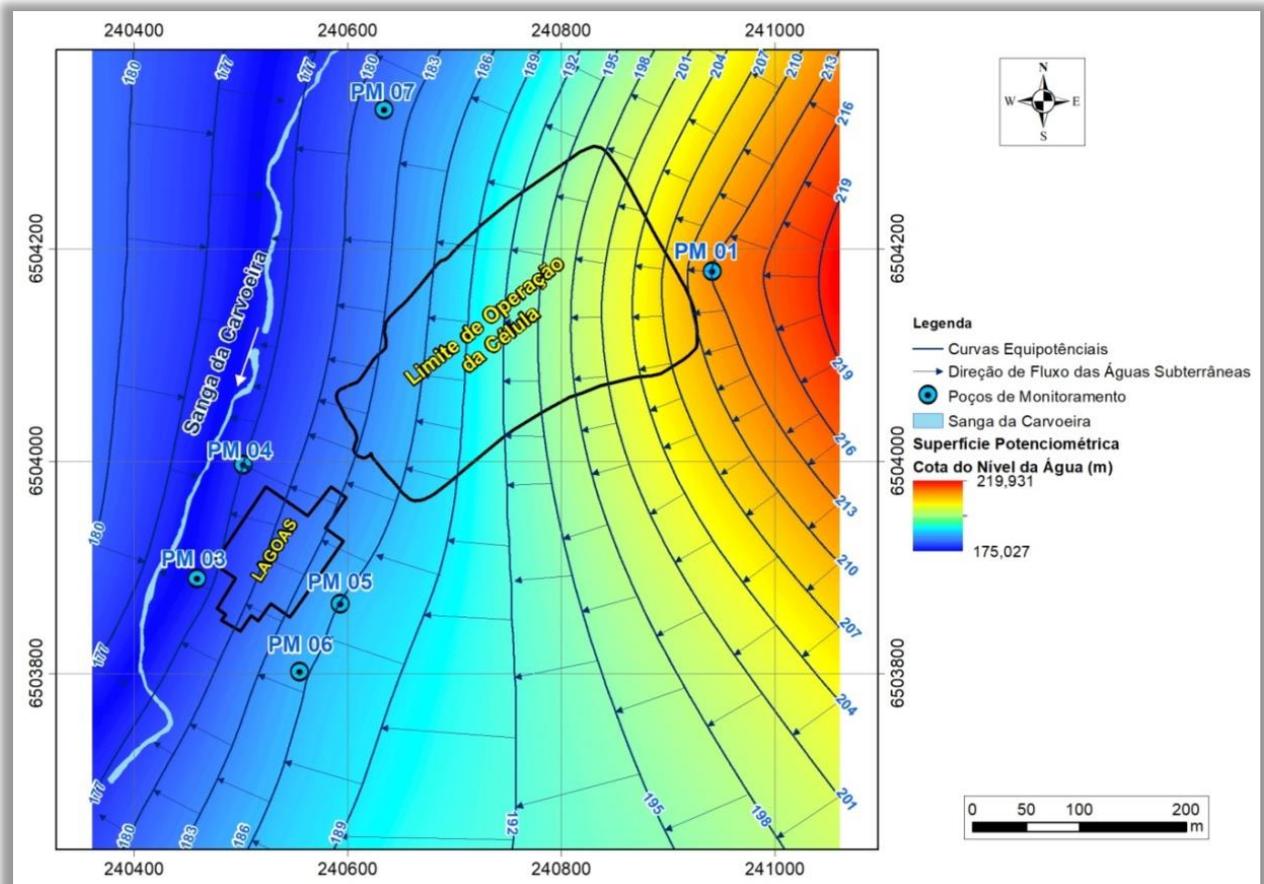
Tabela 5 - Dados de nivelamento dos poços de monitoramento.

Poço de Monitoramento	Profº do Nível da Água em Relação a boca do poço (m)	Altura da Boca do Poço em Relação ao Terreno Natural (m)	Profº do Nível da Água em Relação ao Terreno Natural (m)	Cota do Terreno Natural no Local de Perfuração do Poço (m)	Cota do Nível da Água do Poço em Relação ao Terreno Natural (m)
PM-01	2,26	0,90	1,36	215	213,64
PM-03	6,59	0,43	6,16	182	175,84
PM-04	4,92	0,94	3,98	181	177,02
PM-05	5,19	0,30	4,89	191	186,11
PM-06	9,33	0,90	8,43	194	185,57
PM-07	9,97	0,63	9,34	191	181,66

## 7.6. Superfície Potenciométrica do Aquífero Local

O mapa da superfície potenciométrica do aquífero local foi elaborado a partir da interpolação pelo método do inverso do quadrado da distância utilizando os valores da cota do nível da água dos poços em relação ao terreno natural. Na Figura 21 pode ser verificada a variação da superfície potenciométrica e as setas que indicam as direções preferenciais de fluxo da água subterrânea no aquífero local em direção ao nível de base local que é a Sanga da Carvoeira.

Figura 21 - Superfície Potenciométrica com indicativo das direções preferenciais de fluxo da água subterrânea.



## 7.7. Descrição dos Perfis Estratigráficos dos Poços de Monitoramento

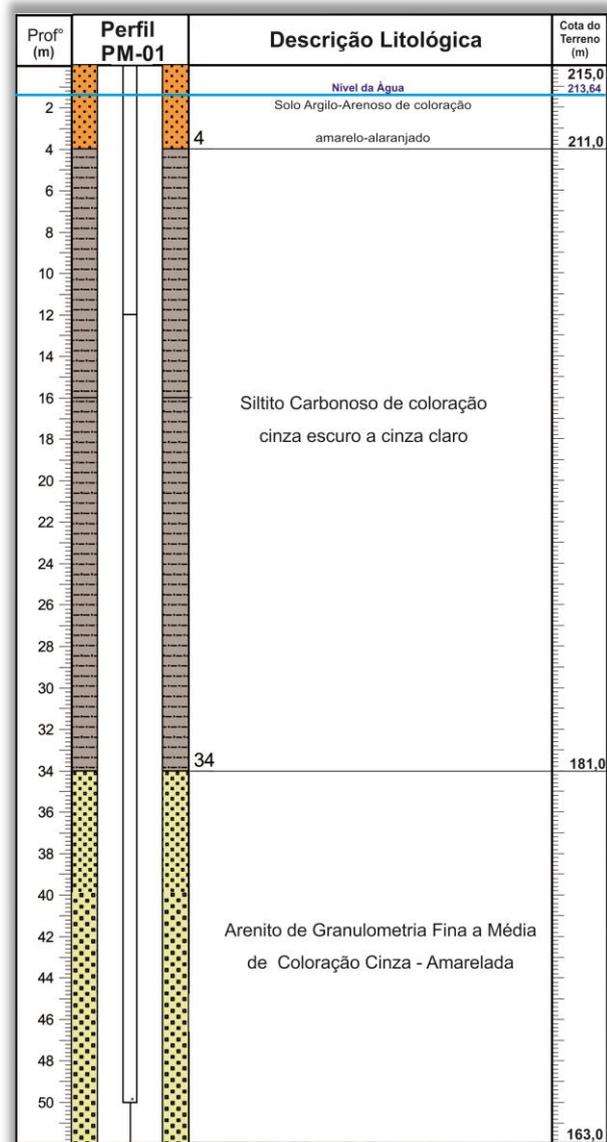
A descrição litológica a seguir foi realizada a partir dos perfis estratigráficos gerados nas sondagens de implantação dos piezômetros na área de estudo. Em continuidade consta a descrição litológica sucinta de cada perfuração na seguinte ordem PM-01, PM-02, PM-03, PM-04, PM-05, PM-06 e PM-07.

### 7.7.1 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-01

A sondagem realizada no PM-01 tem 52,00m de profundidade, o nível da água está a 1,36m. A camada de topo tem 4,00m de espessura, composta de solo argilo-arenoso de coloração amarelo-alaranjado. Sotoposta a esta camada com entre 4,00 a 34,00m de profundidade ocorre um siltito carbonoso de coloração que varia de cinza claro a cinza escuro.

A camada de base da sondagem tem espessura de 18,00m é formada de um arenito de granulometria fina a média de coloração cinza - amarelada, como consta no perfil estratigráfico da Figura 22.

Figura 22 - Perfil estratigráfico do PM-01.

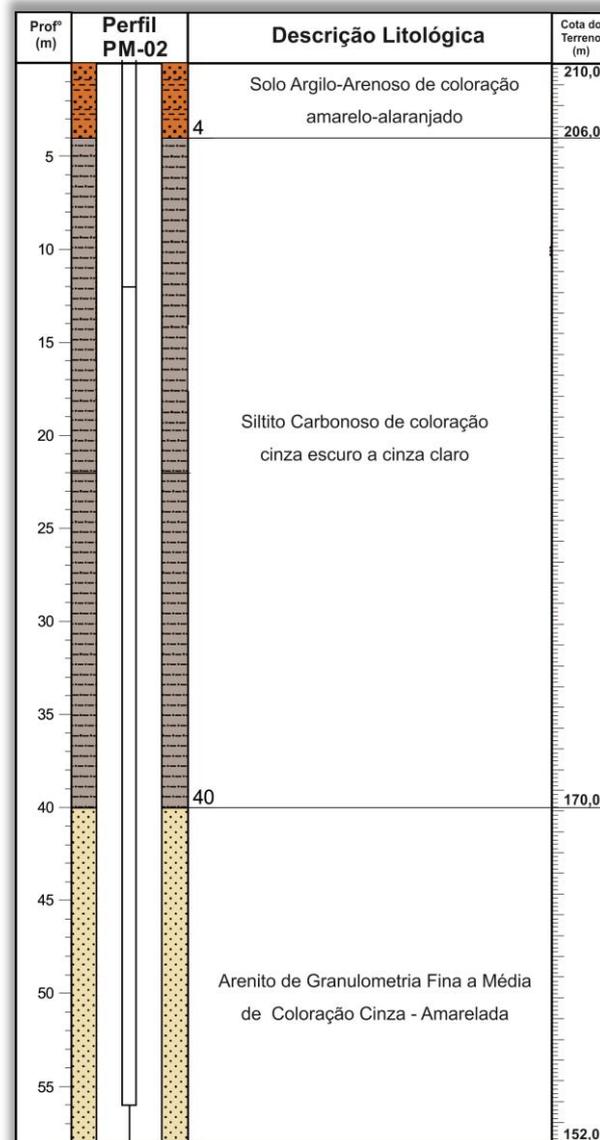


Fonte: Meioeste Ambiental.

### 7.7.2 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-02

A sondagem realizada no PM-02 tem 56,00m. A camada de topo tem 4,00m de espessura é composta de solo argiloso de coloração avermelhada. Sotoposta a esta camada entre 4,00 a 40,00m de profundidade ocorre uma camada de siltito carbonoso de coloração cinza claro a cinza escuro. A camada base da sondagem entre a profundidade tem espessura de 16,00m é formada de um arenito de granulometria fina a média de coloração cinza - amarelada, como consta no perfil estratigráfico da Figura 23.

Figura 23 - Perfil estratigráfico do PM-02.

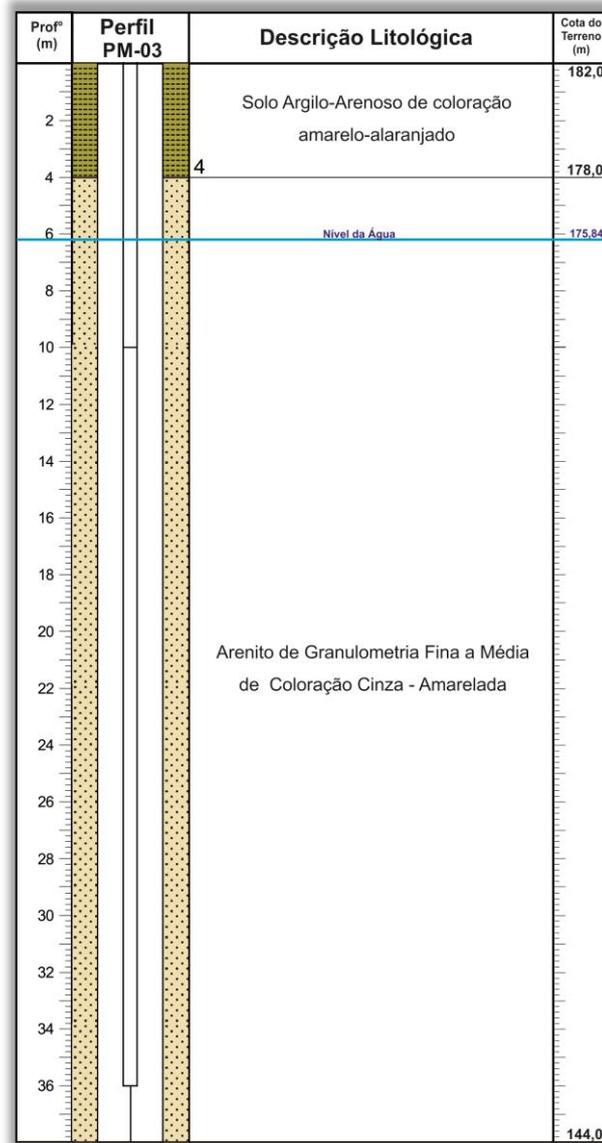


Fonte: Meioeste Ambiental.

### 7.7.3 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-03

A sondagem realizada no PM-03 tem 38,00m de profundidade, e o nível da água está a 6,16m. A camada de topo tem 4,00m de espessura, composta de solo argiloso de coloração avermelhada. Sotoposta a esta camada entre 4,00 a 38,00m de profundidade ocorre uma camada de arenito com granulometria fina a média de coloração cinza-amarelada, como consta no perfil estratigráfico da Figura 24.

Figura 24 - Perfil estratigráfico do PM-03.

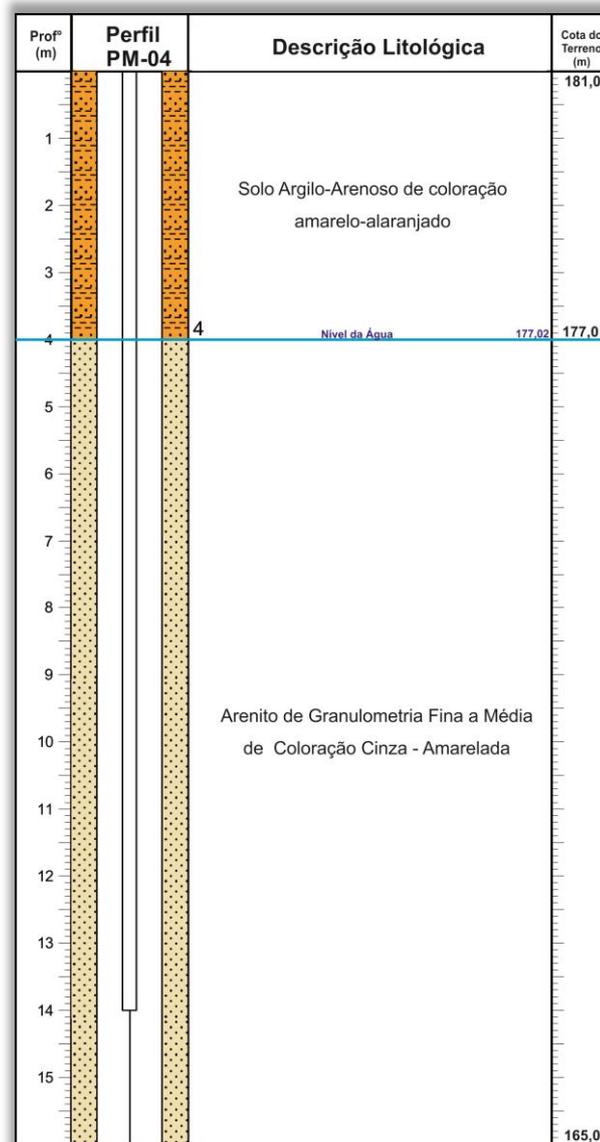


Fonte: Meioeste Ambiental.

#### 7.7.4 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-04

A sondagem realizada no PM-04 tem 17,00m de profundidade, o nível da água está a 3,98m. A camada de topo tem 4,00m de espessura, formada de solo argiloso de coloração avermelhada. Sotoposta a esta camada ocorre outra camada entre 4,00 a 17,00 m de profundidade composta de um arenito de granulometria fina a média de coloração cinza - amarelada, como consta no perfil estratigráfico da Figura 25.

Figura 25 - Perfil estratigráfico do PM-04.



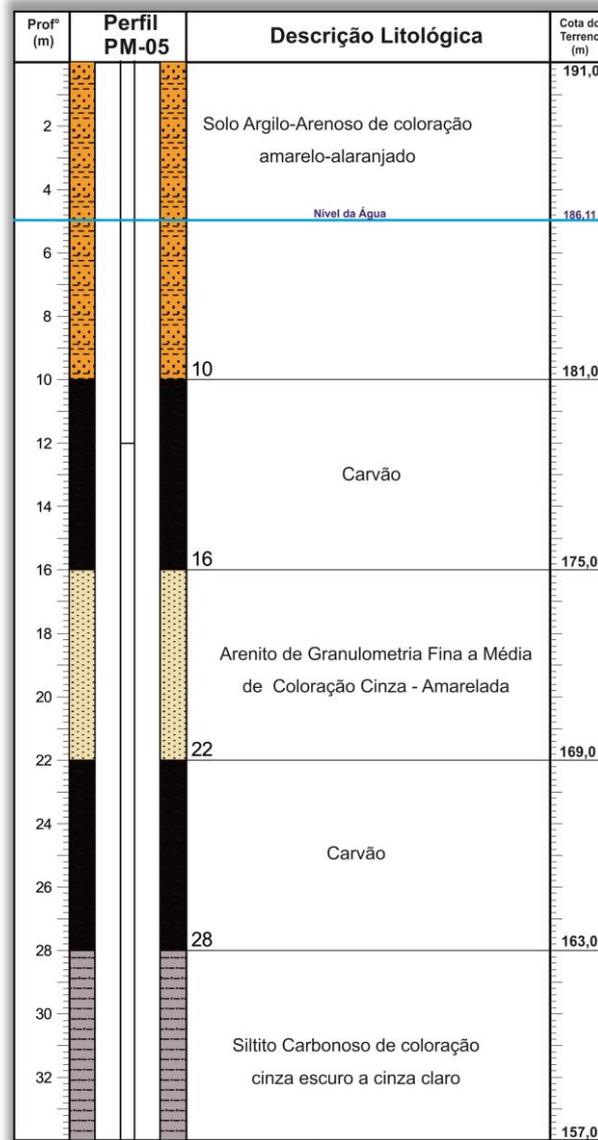
Fonte: Meioeste Ambiental.

### 7.7.5 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-05

A sondagem realizada no PM-05 tem 34,00m de profundidade, o nível da água está a 4,89m. A camada de topo tem espessura de 10,00m, composta de solo argiloso de coloração avermelhada. Sotoposta a esta camada de solo ocorre uma camada de carvão entre 10,00 a 16,00m de profundidade. Sotoposta à camada de carvão, entre 16,00 a 22,00m de profundidade é registrada uma camada de arenito com granulometria fina a média e coloração cinza - amarelada. Sotoposta ao arenito ocorre outra camada de carvão entre 22,00 a 28,00m de profundidade. A camada de base da sondagem tem 6,00m de profundidade, composta de

um siltito carbonoso de coloração cinza claro a cinza escuro, como consta no perfil estratigráfico da Figura 26.

Figura 26 - Perfil estratigráfico do PM-05.



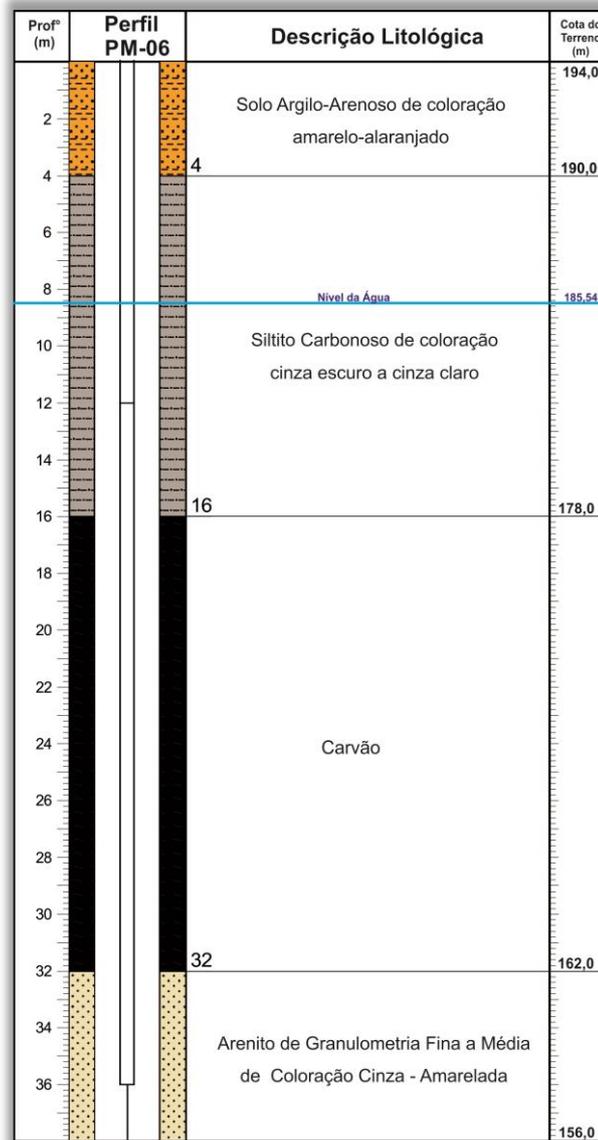
Fonte: Meioeste Ambiental.

### 7.7.6 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-06

A sondagem realizada no PM-06 tem 38,00m de profundidade, o nível da água está a 8,43m. A camada de topo tem 4,00m de espessura, composta de solo argiloso de coloração avermelhada. Sotoposta a esta camada entre 4,00 a 16,00m de profundidade ocorre uma camada de siltito carbonoso de cinza claro a cinza escuro. Sotoposta a camada de folhelho entre 16,00 a 32,00m de profundidade de ocorre uma camada de carvão. A camada base da

sondagem tem 6,00m de espessura é composta de um arenito de granulometria fina a média de coloração cinza - amarelada, como consta no perfil estratigráfico da Figura 27.

Figura 27 - Perfil estratigráfico do PM-06.



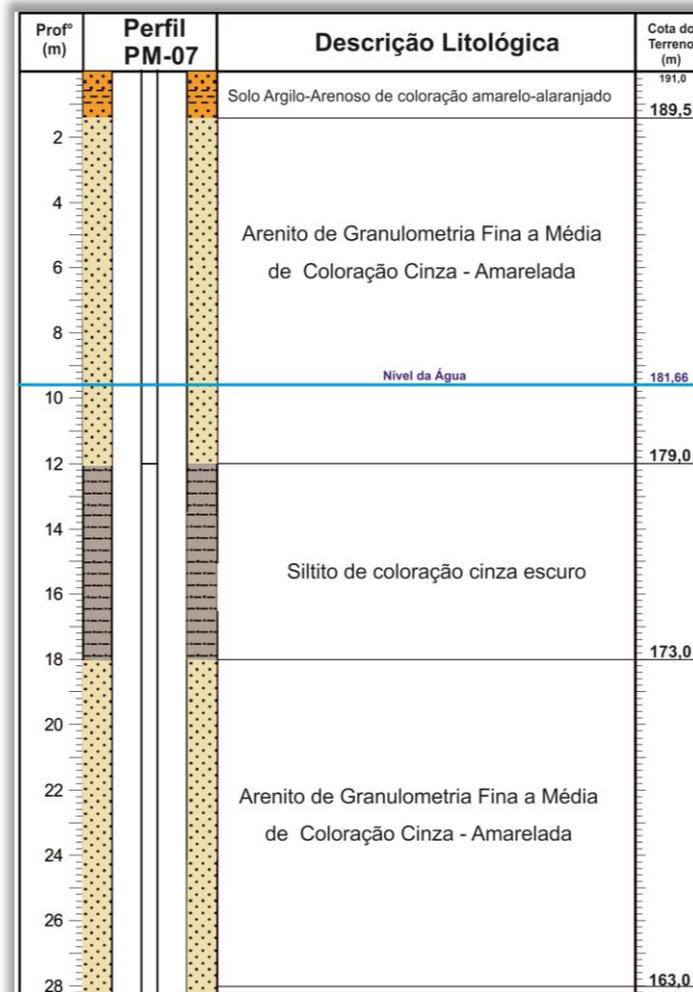
Fonte: Meioeste Ambiental.

### 7.7.7 Perfil Estratigráfico do Poço de Monitoramento PM-07

A sondagem realizada no PM-07 tem 28,00m de profundidade, o nível da água está a 9,34m. A camada de topo tem 1,50m de espessura, composta de solo argilo-arenoso de coloração amarelo-alaranjado. Sotoposta a esta camada entre 1,50 a 12,00m de profundidade ocorre uma camada composta de um arenito de granulometria fina a média de coloração cinza-amarelada. Sotoposta a camada de arenito entre 12,00 a 18,00m de profundidade de ocorre uma camada de siltito de coloração cinza escuro. A camada base da sondagem tem

10m de espessura, composta de uma camada de arenito de granulometria fina a média de coloração cinza-amarelada, como consta no perfil estratigráfico da Figura 28.

Figura 28 - Perfil estratigráfico do PM-07.



Fonte: Meioeste Ambiental.

## 7.8. Descrição da Lâmina Petrográfica

Foi confeccionada uma lâmina delgada a partir da rocha que compõem o aquífero local, que foi descrita quantitativamente com o uso de um microscópio de luz polarizada. Para facilitar a preparação da lâmina petrográfica e observação da porosidade foi realizada a impregnação da lâmina com resina *epoxy* de coloração azul.

A granulometria da amostra de arenito é heterogênia variando entre areia média a grânulo, com predomínio de areia grossa. A amostra apresenta estrutura maciça e o grau de seleção moderado. A fábrica é sustentada pelos grãos de quartzo com orientação caótica e grau de empacotamento normal.

A composição detrítica essencial predominante é de quartzo ígneo e litocláastos metamórficos e de quartzito. A forma geral predominante dos grãos é arredondada. Na amostra estudada ocorreram processos diagenéticos, destacando-se a Eodiagênese devido à presença de franjas e cutículas de crescimento ao redor dos grãos de quartzo. Também ocorrem cutículas de argila infiltrada preenchendo parte da porosidade primária. Outro processo importante é a dissolução de feldspatos que aumenta a porosidade total da rocha, que foi estimada em 20%

Para a melhor visualização das principais feições texturais, composicionais e diagenéticas foram realizadas a captura de três registros fotomicrográficos da lâmina em questão. Todas as fotomicrografias foram obtidas utilizando o software ZEN<sup>TM</sup> 2011 da Zeiss, já com escalas adequadas para cada lente utilizada no microscópio, conforme pode ser visualizado na Foto 14, Foto 15 e Foto 16.

Foto 14 - Quartzo subarredondado com intercrescimento no entorno dos grãos com a ocorrência de cutícula de argila infiltrada que envolve os intercrescimentos.



Foto 15 - Grão de feldspato parcialmente dissolvido, evidência que corrobora o aumento da porosidade primária. Os grãos de quartzo apresentam intercrescimento, com a ocorrência de cutícula de argila infiltrada.

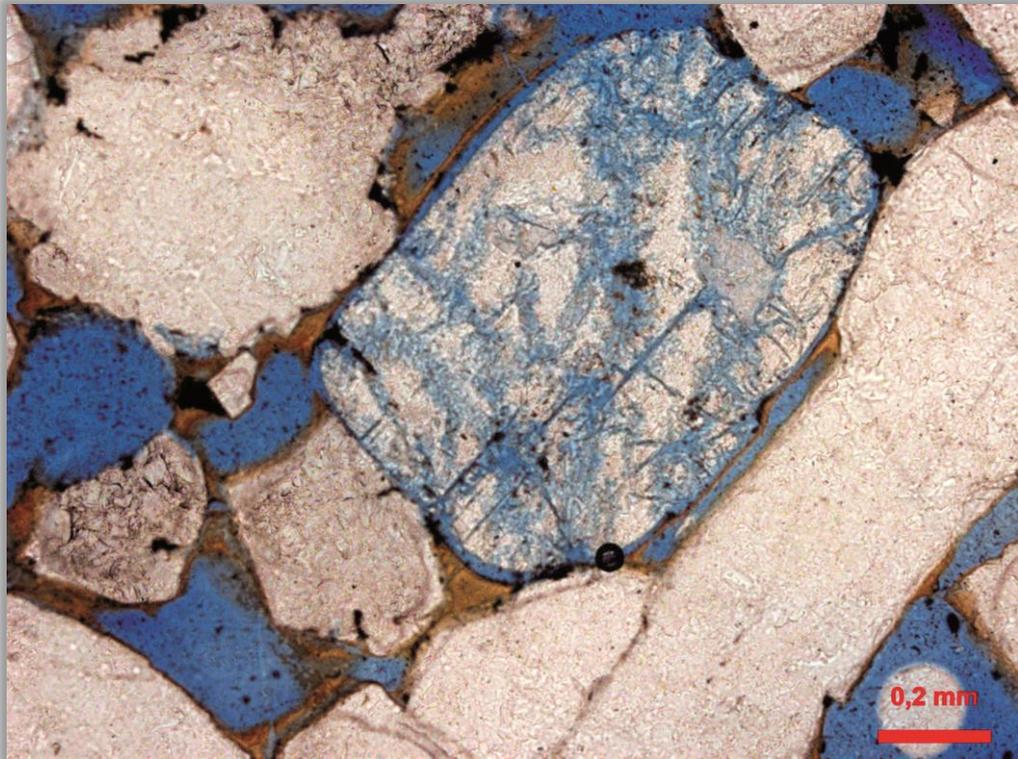


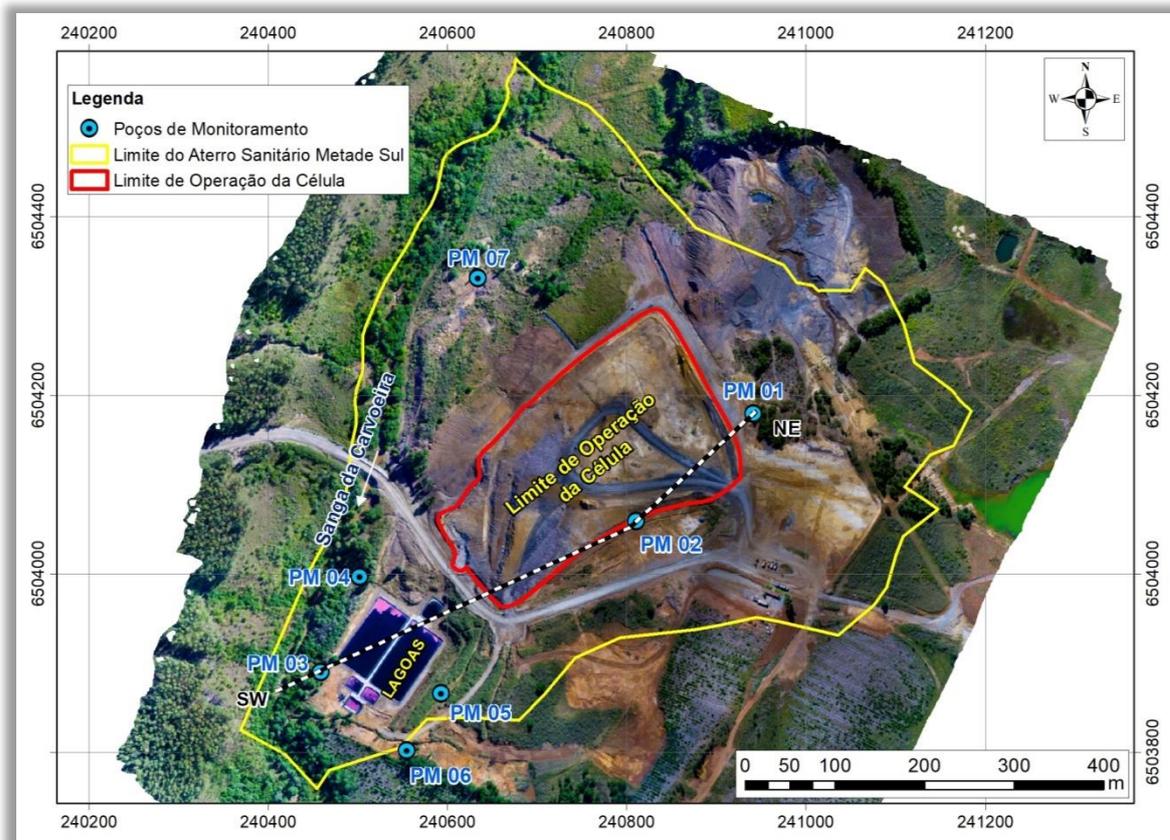
Foto 16 - Grão de feldspato totalmente dissolvido com ocorrência de uma cutícula de argila infiltrada envolvendo o intercrescimento dos grãos de quartzo.



## 7.9. Perfil Estratigráfico dos Poços de Monitoramento

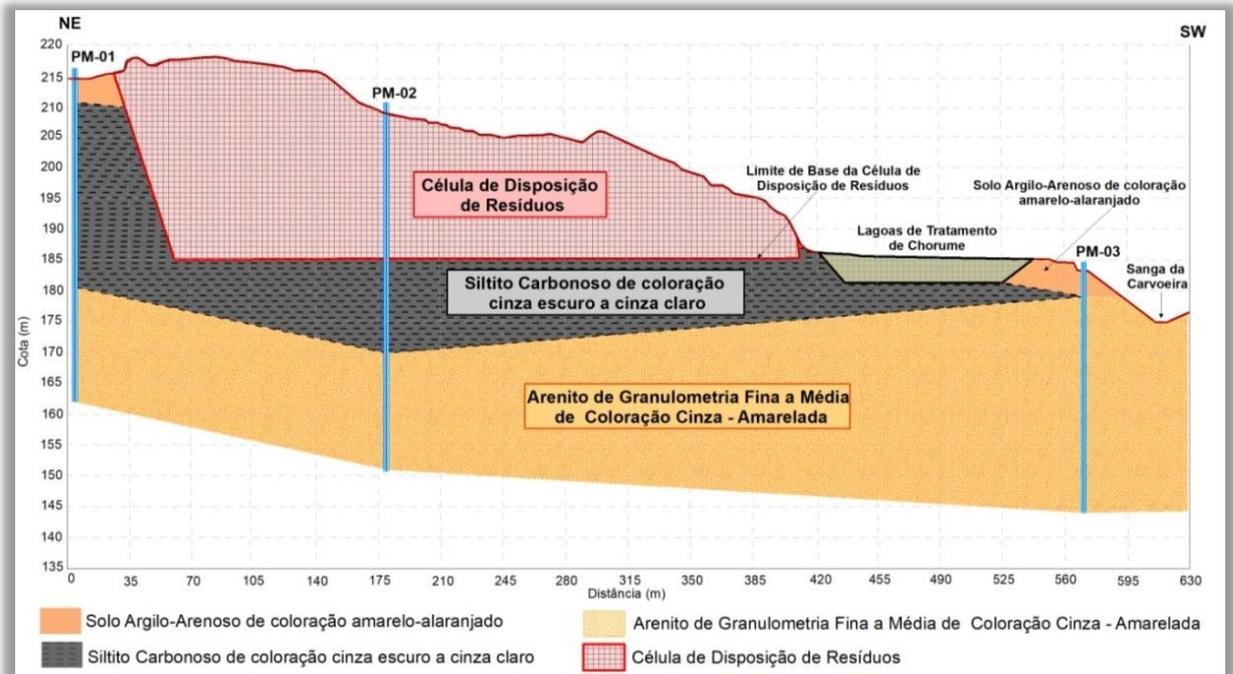
Para posicionar de maneira adequada a área da célula de disposição de resíduos em relação às camadas sedimentares acima descritas foram construídos dois perfis estratigráficos. O primeiro perfil foi realizado de nordeste para sudoeste com 630 metros de extensão e intercepta os poços de monitoramento PM 01, PM 02, PM 03 até o talvegue da Sanga da Carvoeira, conforme Figura 29.

Figura 29 - Localização do perfil estratigráfico entre os poços de monitoramento PM 01, PM 02 e PM 03.



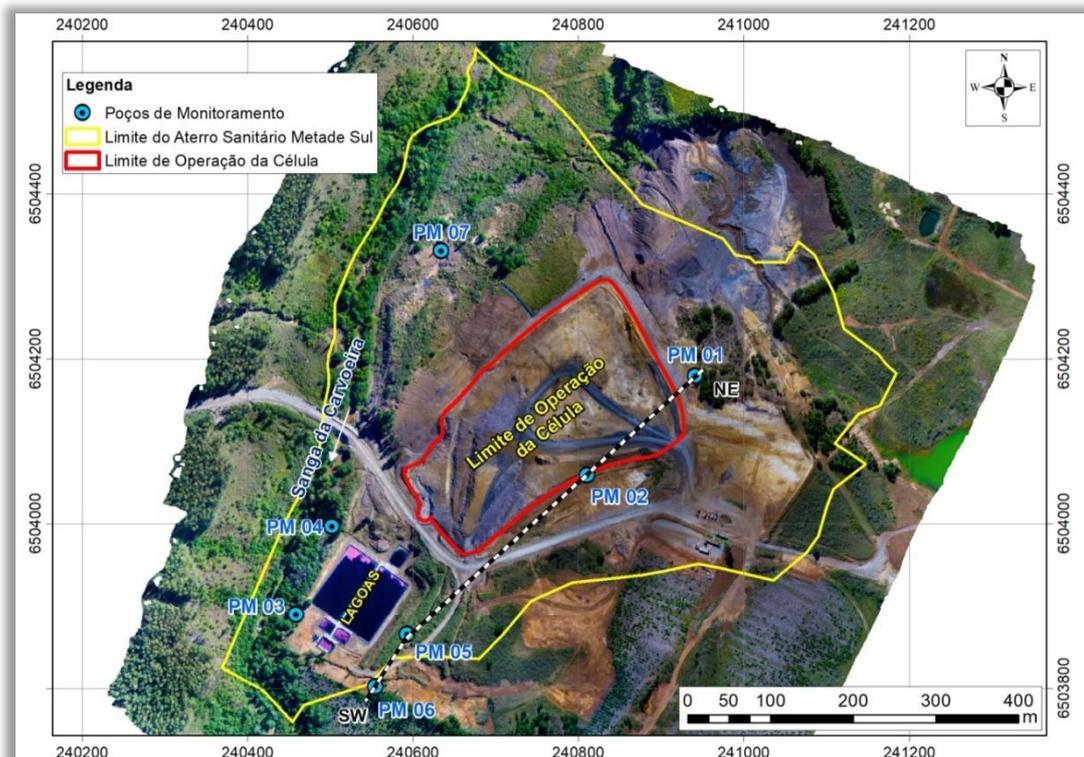
A partir do perfil estratigráfico construído entre os poços PM 01, PM 02 e PM 03 observa-se que a base da célula de resíduos está assentada sobre uma espessa camada de siltito carbonoso com espessura que varia entre 5 a 15m, assim como a base das lagoas de acúmulo de chorume que está sobre uma camada de siltito com espessura que varia de 2 a 4m. Sotoposta a camada de siltito ocorre uma espessa camada de arenito de granulação que varia de fina média; que é a camada aquífera local que aflora no leito da Sanga da Carvoeira, como consta na Figura 30.

Figura 30 - Perfil estratigráfico construído de NE para SW entre os poços de monitoramento PM 01, PM 02 e PM 03.



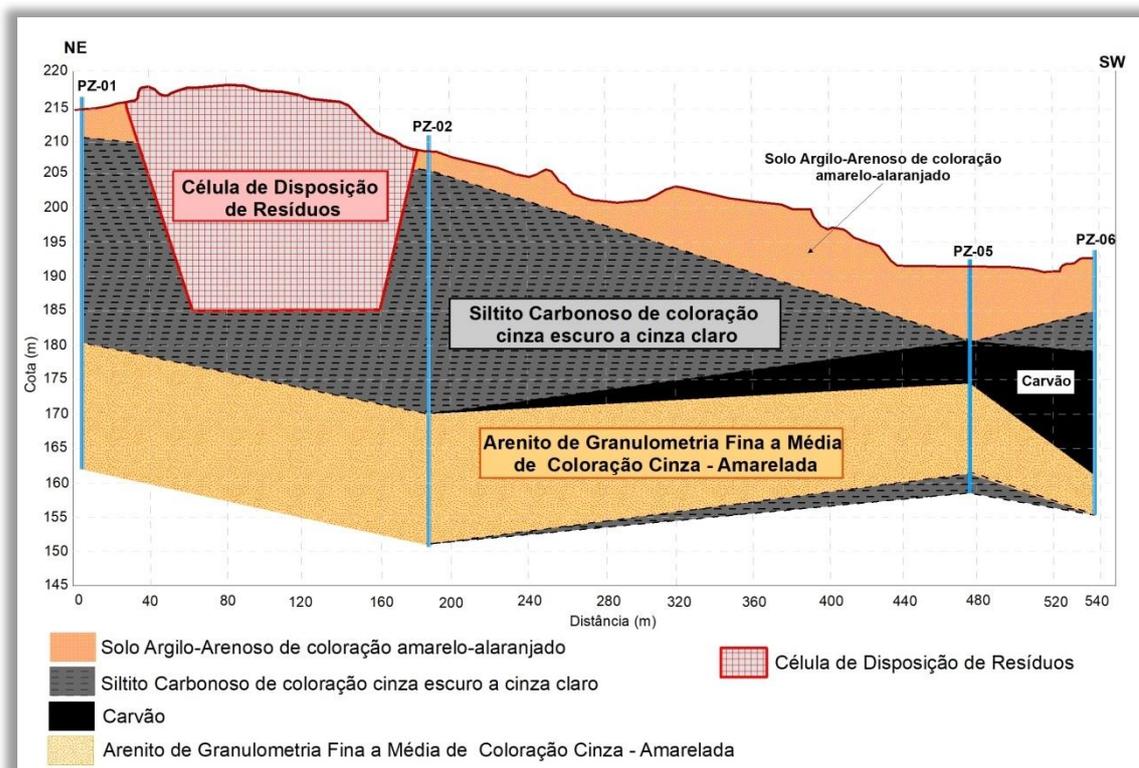
O segundo perfil também foi construído de nordeste para sudoeste com 540m de extensão e intercepta os poços de monitoramento PM 01 PM 02 PM 05 e PM 06 conforme pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 - Localização do perfil estratigráfico entre os poços de monitoramento PM 01, PM 02, PM 05 e PM 06.



A partir do perfil construído entre os poços PM 01, PM02, PM 05 e PM 06 observa-se que a base da célula de resíduos também está assentada sobre uma espessa camada de siltito carbonoso com espessura de aproximada de 5,0m. Sotoposta a camada de siltito ocorre uma espessa camada de arenito de granulação que varia de fina média caracterizada como a camada aquífera local (Figura 32).

Figura 32 - Perfil estratigráfico construído de NE para SW entre os poços de monitoramento PM 01, PM 02, PM 05 e PM 06.



### 7.10. Resultados dos Ensaios de *Slug Test* Realizados nos Poços de Monitoramento

Os resultados dos ensaios *Slug Test* realizados em 06 (seis) poços de monitoramento PM-01, PM-03, PM-04, PM-05, PM06 e PM07, constam a seguir na Tabela 6 a Tabela 11.

Tabela 6 - Resultado do ensaio de *Slug Test* realizado no poço PM-01.

Tempo (s)	Profundidade do Nível da Água em Relação à Boca do Poço (m)	$\Delta h$ (cm)
0	1,46	0
30	1,84	38
60	1,99	15
90	2,08	9
120	2,14	6
180	2,20	6

<b>Tempo (s)</b>	<b>Profundidade do Nível da Água em Relação à Boca do Poço (m)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>
240	2,23	3
300	2,25	2
420	2,26	1

A profundidade do nível da água medido em relação à boca do poço PM-01 previamente a realização do ensaio é de 2,26m. Após a adição instantânea de 10 litros de água, o nível da água subiu 80cm alcançando a cota 1,46m no tempo zero ( $t=0s$ ). A estabilização ocorreu no tempo de 420 segundos, quando atingiu o mesmo nível da água medido antes da realização do ensaio.

Tabela 7 - Resultado do ensaio de *Slug Test* realizado no poço PM-03.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Profundidade do Nível da Água em Relação à Boca do Poço (m)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>
0	5,79	0
30	6,22	42
60	6,33	11
90	6,41	8
120	6,47	6
180	6,53	6
240	6,56	3
300	6,58	2
420	6,59	2

A profundidade do nível da água medido em relação à boca do poço PM-03 previamente a realização do ensaio é de 6,59m. Após a adição instantânea de 10 litros de água, o nível da água subiu 80cm alcançando a cota 5,79m no tempo zero ( $t=0s$ ). A estabilização ocorreu no tempo de 420 segundos, quando atingiu o mesmo nível da água medido antes da realização do ensaio.

Tabela 8 - Resultado do ensaio de *Slug Test* realizado no poço PM-04.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Profundidade do Nível da Água em Relação à Boca do Poço (m)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>
0	4,12	0
30	4,62	50
60	4,70	8
90	4,73	3
120	4,77	4
180	4,81	4
240	4,83	2

<b>Tempo (s)</b>	<b>Profundidade do Nível da Água em Relação à Boca do Poço (m)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>
300	4,88	5
420	4,89	1
600	4,91	2
900	4,92	1

A profundidade do nível da água medido em relação à boca do poço PM-04 previamente a realização do ensaio é de 4,92m. Após a adição instantânea de 10 litros de água, o nível da água subiu 80cm alcançando a cota 4,12m no tempo zero ( $t=0s$ ). A estabilização ocorreu no tempo de 900 segundos, quando atingiu o mesmo nível da água medido antes da realização do ensaio.

Tabela 9 - Resultado do ensaio de *Slug Test* realizado no poço PM-05.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Profundidade do Nível da Água em Relação à Boca do Poço (m)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>
0	4,39	0
30	4,72	33
60	4,83	11
90	4,91	8
120	4,96	5
180	5,01	5
240	5,05	4
300	5,08	3
420	5,11	3
600	5,13	2
900	5,15	2
1200	5,17	2
1500	5,18	1
1800	5,19	1

A profundidade do nível da água medida em relação à boca do poço PM-05 previamente a realização do ensaio é de 5,19m. Após a adição instantânea de 10 litros de água, o nível da água subiu 80cm alcançando a cota 4,39m no tempo zero ( $t=0s$ ). A estabilização ocorreu no tempo de 1800 segundos, quando atingiu o mesmo nível da água medido antes da realização do ensaio.

Tabela 10 - Resultado do ensaio de *Slug Test* realizado no poço PM-06.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Profundidade do Nível da Água em Relação à Boca do Poço (m)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>
0	8,53	0
30	8,83	30
60	8,96	13
90	9,02	6
120	9,05	3
180	9,10	5
240	9,14	4
300	9,16	2
420	9,19	3
600	9,22	3
900	9,25	3
1200	9,27	2
1500	9,29	2
1800	9,30	1
2100	9,31	1
2400	9,33	2

A profundidade do nível da água medida em relação à boca do poço PM-06 previamente a realização do ensaio é de 9,33m. Após a adição instantânea de 10 litros de água, o nível da água subiu 80cm alcançando a cota 8,53m no tempo zero ( $t=0s$ ). A estabilização ocorreu no tempo de 2400 segundos, quando atingiu o mesmo nível da água medido antes da realização do ensaio.

Tabela 11 - Resultado do ensaio de *Slug Test* realizado no poço PM-07.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Profundidade do Nível da Água em Relação à Boca do Poço (m)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>
0	9,17	0
30	9,57	40
60	9,66	9
90	9,72	6
120	9,78	6
180	9,82	4
240	9,84	2
300	9,86	2
420	9,90	4
600	9,95	5
900	9,97	2

A profundidade do nível da água medida em relação à boca do poço PM-07 previamente a realização do ensaio é de 9,97m. Após a adição instantânea de 10 litros de água, o nível da água subiu 80cm alcançando a cota 9,17m no tempo zero ( $t=0s$ ). A estabilização ocorreu no tempo de 900 segundos, quando atingiu o mesmo nível da água medido antes da realização do ensaio.

### 7.11. Determinação da Condutividade Hidráulica no Aquífero Local

A condutividade hidráulica ( $K$ ) do aquífero foi calculada nos poço de monitoramento utilizando os métodos de *BOWER & RICE* Equação (19) e *HVORSLEV* na Equação (20), a partir do software *AQUIFER TEST* (versão 7.0).

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{R_e}{R_w}\right)}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{t} \ln(H_0 - H_t)$$

Equação (19)

Onde:

$K$ : Condutividade hidráulica;

$r^2$ : Raio do Poço;

$R_e$ : Raio de influência do ensaio;

$R_w$ : Raio efetivo do poço;

$\ln$ : Logaritmo natural;

$L$ : Comprimento do filtro;

$H_0$ : Nível potenciométrico inicial;

$H_t$ : Nível potenciométrico no tempo  $t$ ;

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L}{R}\right)}{2 \cdot LT}$$

Equação (20)

Onde:

K: Condutividade hidráulica;

r<sup>2</sup>: Raio do tubo;

R: Raio da perfuração;

L: Comprimento do filtro;

T<sub>0</sub>: Tempo transcorrido para o rebaixamento de 37% de H<sub>0</sub>.

Os resultados obtidos são apresentados pelo software em um gráfico onde a inclinação da reta equivale à condutividade hidráulica (K), os gráficos estão apresentados abaixo na Figura 33 a Figura 38.

Figura 33 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de *Bower & Rice* para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-01.

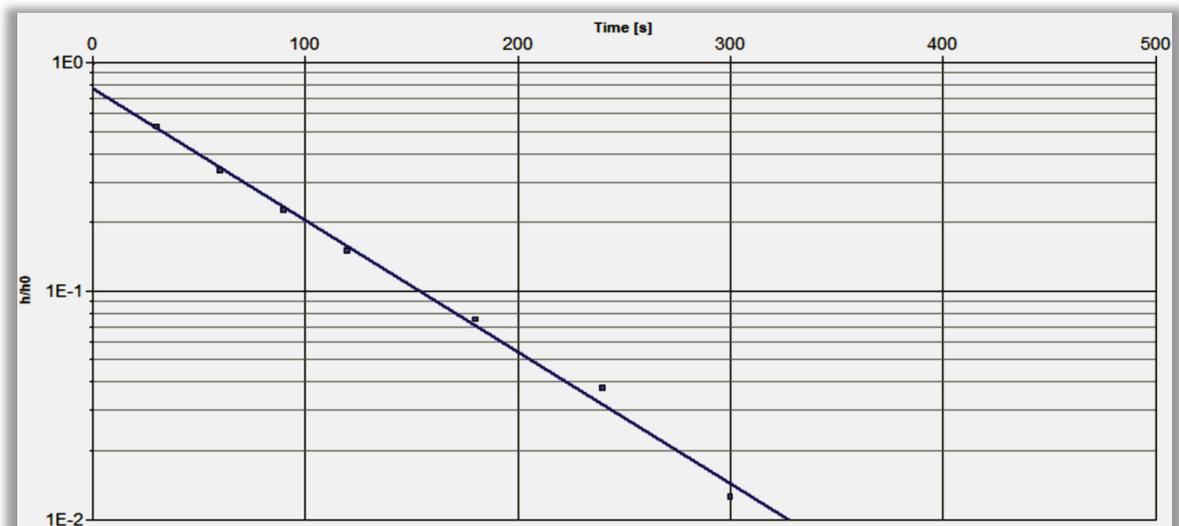


Figura 34 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de *Bower & Rice* para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-03.

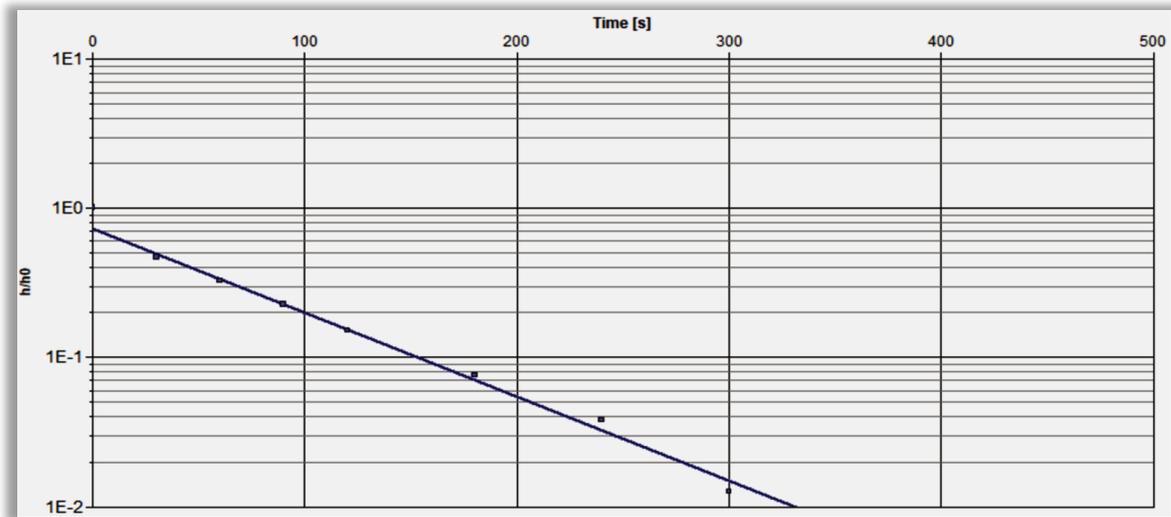


Figura 35 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de *Bower & Rice* para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-04.

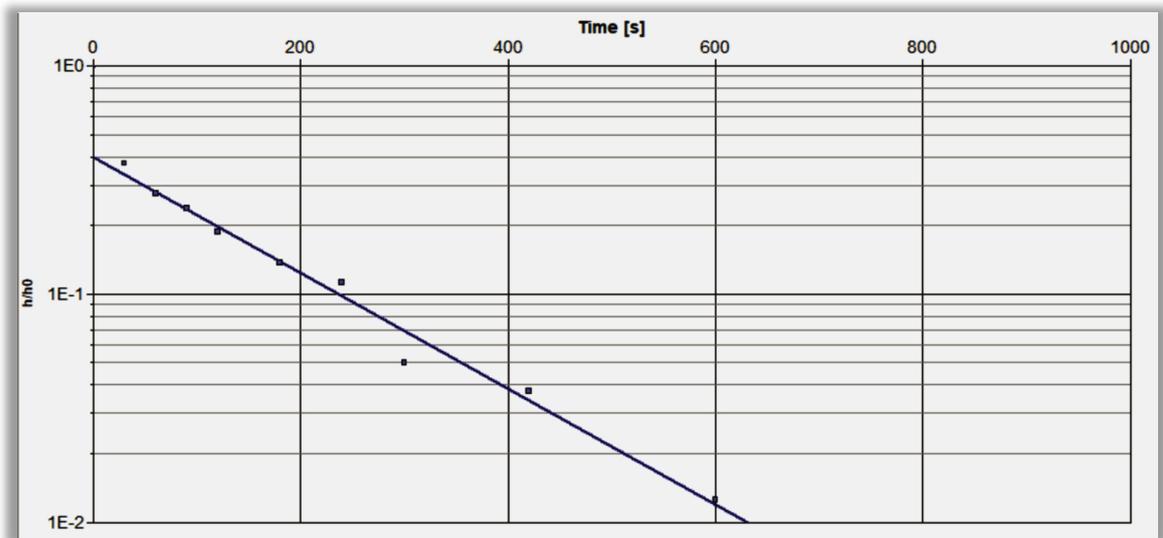


Figura 36 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de *Bower & Rice* para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-05.

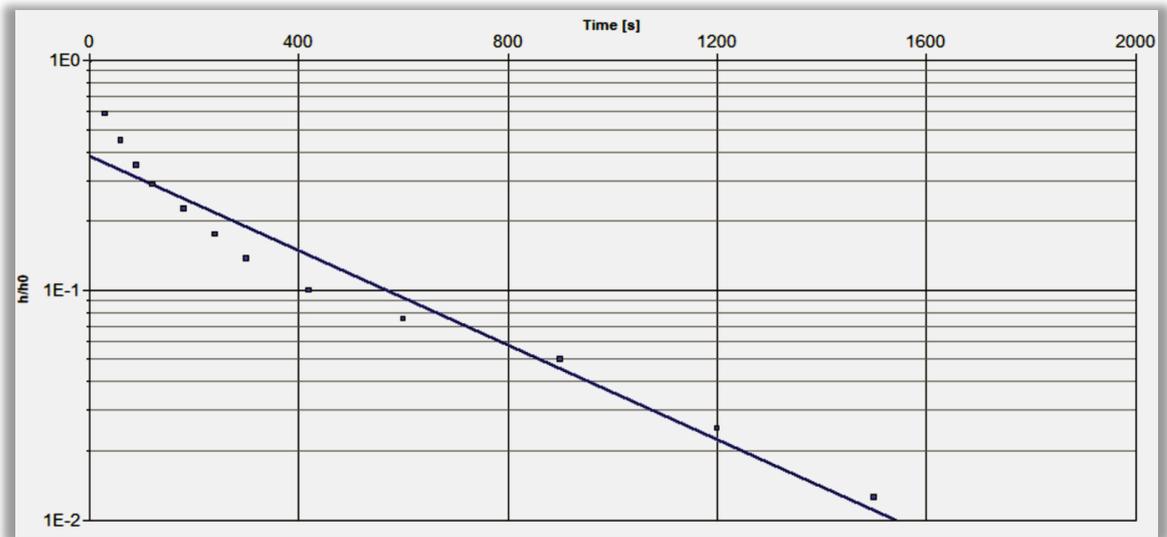
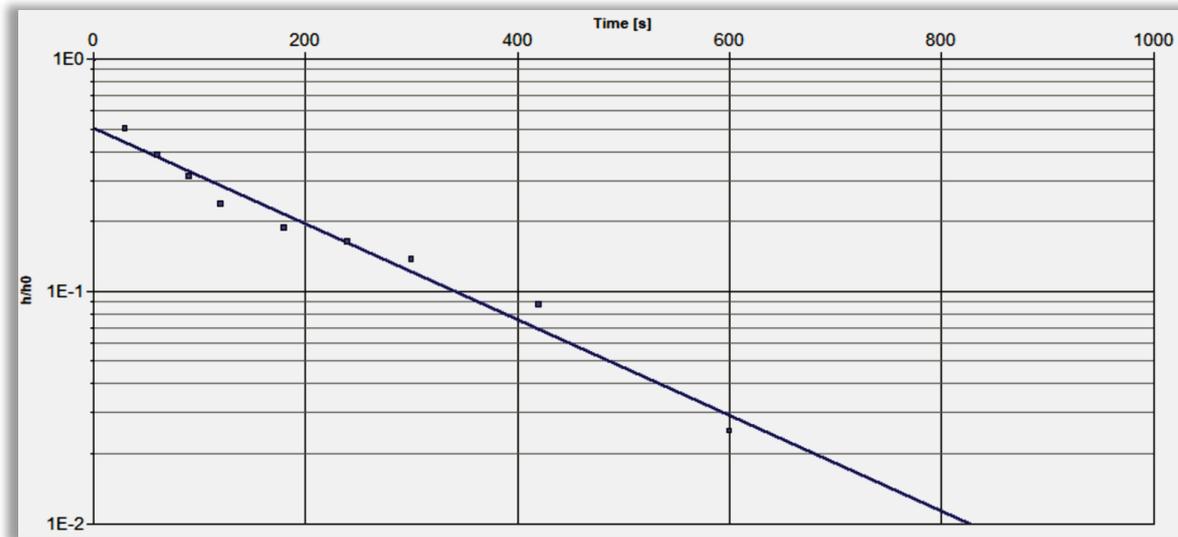


Figura 37 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de *Bower & Rice* para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-06.



Figura 38 - Gráfico com a inclinação da reta ajustada pelo método de *Bower & Rice* para os intervalos de rebaixamento dos níveis da água medidos em campo no poço PM-07.



Os resultados são valores de condutividade hidráulica médios que variam entre  $K = 1,02 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  a  $K = 6,98 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  (Quadro 4) o que apresenta compatibilidade com materiais sedimentares de composição areno-siltosa.

Tabela 12 - Resultados das condutividades hidráulicas calculadas no aquífero local.

Poço de Monitoramento	Condutividade Hidráulica			
	Método de Bouwer & Rice (K) (cm/s)	Método de Hvorslev (K) (cm/s)	Média (K) (cm/s)	Média (K) (m/dia)
PM-01	$5,15 \times 10^{-3}$	$6,45 \times 10^{-3}$	$5,80 \times 10^{-3}$	$5,01 \times 10^{-1}$
PM-03	$6,16 \times 10^{-3}$	$7,80 \times 10^{-3}$	$6,98 \times 10^{-3}$	$6,03 \times 10^{-1}$
PM-04	$1,69 \times 10^{-3}$	$2,08 \times 10^{-3}$	$1,88 \times 10^{-3}$	$1,62 \times 10^{-1}$
PM-05	$2,54 \times 10^{-3}$	$3,30 \times 10^{-3}$	$2,92 \times 10^{-3}$	$2,52 \times 10^{-1}$
PM-06	$1,02 \times 10^{-3}$	$1,33 \times 10^{-3}$	$1,17 \times 10^{-3}$	$1,01 \times 10^{-1}$
PM-07	$3,42 \times 10^{-3}$	$4,39 \times 10^{-3}$	$1,02 \times 10^{-3}$	$0,88 \times 10^{-1}$
<b>Média</b>			<b><math>3,29 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>2,84 \times 10^{-1}</math></b>

## 7.12. Cálculo do Coeficiente de Transmissividade

O coeficiente de transmissibilidade é um parâmetro que indica a capacidade do aquífero de transmitir água em toda a espessura saturada; é também conhecida como a vazão do aquífero por unidade de largura (perpendicular ao fluxo) em função de um gradiente hidráulico unitário, em uma base de área unitária, conforme consta na Equação (21).

$$T = K.B$$

Equação (21)

Onde:

T: Coeficiente de Transmissibilidade;

K: Condutividade Hidráulica;

B: Espessura do Aquífero.

No cálculo foi considerada uma espessura média de 15m da camada aquífera no aquífero local e a condutividade hidráulica média calculada nos poços de monitoramento, com base estes critérios o valor de transmissividade obtido foi de  $4,94 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ .

### 7.13. Espessura da Camada de Arenito no Aquífero Local

A cota de topo e base da camada de arenito foi obtida a partir do nivelamento topográfico das camadas sedimentares descritas nos perfis estratigráficos dos 07 poços de monitoramento existentes na área de estudo.

Na Tabela 13 consta a diferença entre as cotas de topo e base da camada de arenito e a respectiva espessura da camada aquífera nos poços de monitoramento da área de estudo.

Tabela 13 - Cota topográfica do topo e base da camada aquífera local.

Poço de Monitoramento	Cota de Topo da Camada de Arenito (m)	Cota de Base da Camada de Arenito (m)	Espessura Média da Camada de Arenito (m)
PM-01	181	163	18
PM-02	170	152	18
PZ-03	178	144	34
PM-04	177	165	12
PM-05	175	169	6
PM-06	162	156	6
PM-07	189	179	10
<b>MÉDIA</b>	<b>174,57</b>	<b>161,14</b>	<b>14,85</b>

A cota topográfica média do topo da camada de arenito é 174,57m e cota média da base da camada de arenito é 161,14m, com espessura média de 14,85m. Ressalta-se que a base da camada de arenito foi estimada a partir da profundidade final de cada sondagem, e a espessura pode ser maior que os 14,85m descritos, contudo para simulação do modelo matemático será utilizado o valor da profundidade média da camada.

## **8. PRINCÍPIOS DA MODELAGEM MATEMÁTICA**

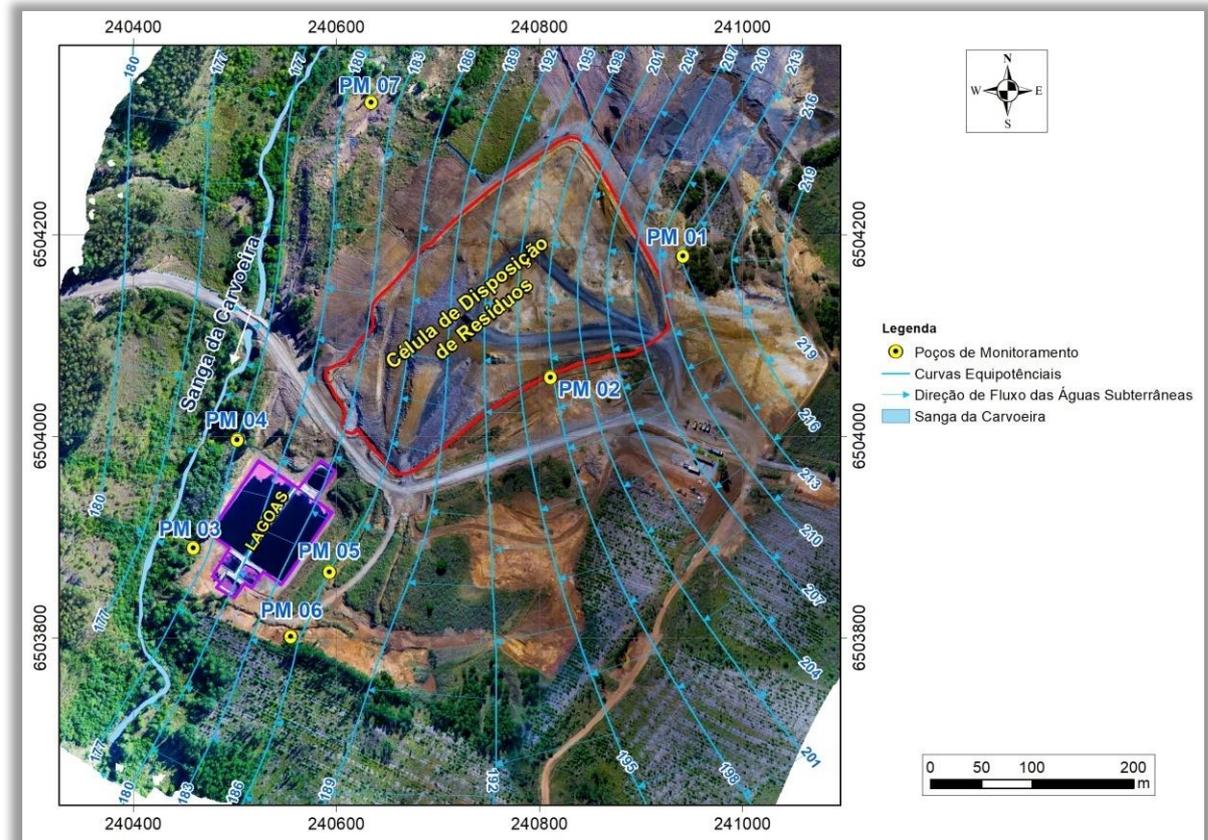
### **8.1. Modelo Conceitual do Fluxo Subterrâneo**

O modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas no aquífero local foi determinado a partir integração de dados obtidos nas campanhas de campo e compilação de informações disponibilizadas pela empresa responsável pela operação do aterro, considerando os seguintes pressupostos:

- a) Cota do nível da água subterrânea nos poços de monitoramento;
- b) Cota a montante e a jusante da Sanga da Carvoeira no trecho localizado no interior da área de estudo;
- c) Espessura da camada aquífera local;
- d) Tipo de rocha que constitui o aquífero local a partir da descrição de lâminas petrográficas;
- e) Foi considerado para fins do modelo que o aquífero apresenta homogeneidade textural, mineralógica e hidrogeológica e caráter isotrópico em toda a extensão modelada;
- f) A célula de disposição de resíduos e as lagoas de tratamento de chorume estão assentadas sobre siltitos carbonosos de coloração cinza sobrepostos à camada de arenito;
- g) O arenito que constitui o aquífero local está sotoposto entre 5 a 15 metros de profundidade em relação à célula de disposição de resíduos e as lagoas de tratamento de chorume;
- h) A água subterrânea apresenta densidade e viscosidade homogêneas;
- i) A área de recarga do aquífero local ocorre a sudeste da célula de resíduos e lagoas de tratamento;
- j) A área de descarga local ocorre ao longo da calha da Sanga Carvoeira;

O mapa da superfície potenciométrica da Figura 39 foi elaborado considerando as informações acima descritas e a interpolação da cota do nível da água dos poços de monitoramento conforme consta na Tabela 5.

Figura 39 - Modelo conceitual do fluxo subterrâneo no aquífero local.

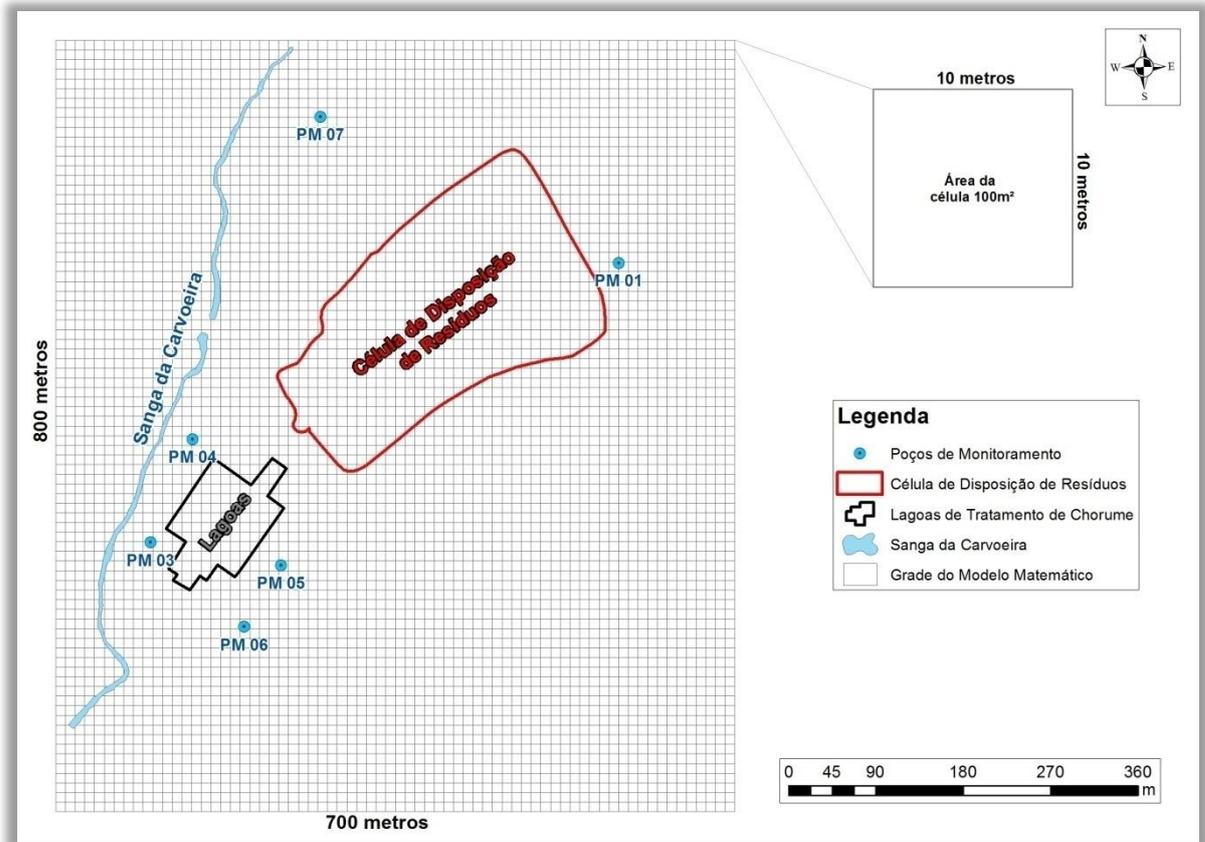


A superfície potenciométrica do modelo conceitual de fluxo tem amplitude topográfica que varia da cota 219m (topo), e a cota 175m como a (base) da superfície potenciométrica do aquífero local, as direções preferenciais de fluxo das águas subterrâneas ocorrem de nordeste para sudeste em direção ao nível de base local que é a drenagem denominada de Sanga da Carvoeira.

## 8.2. Modelo Matemático do Fluxo Subterrâneo

O modelo matemático de simulação do fluxo subterrâneo foi executado utilizando o aplicativo computacional MODFLOW para Windows versão 5.3. Os limites da área modelada foram definidos a partir do modelo conceitual de fluxo e área do modelo matemático foi discretizada em células com resolução espacial de 10 metros de lado e área unitária de 100m<sup>2</sup> cada célula. A malha do modelo matemático é constituída de uma matriz com 80 x 70 células com área total de 560.000m<sup>2</sup>, conforme consta na Figura 40.

Figura 40 - Grade do modelo matemático para simulação do fluxo da água subterrânea no aquífero local.



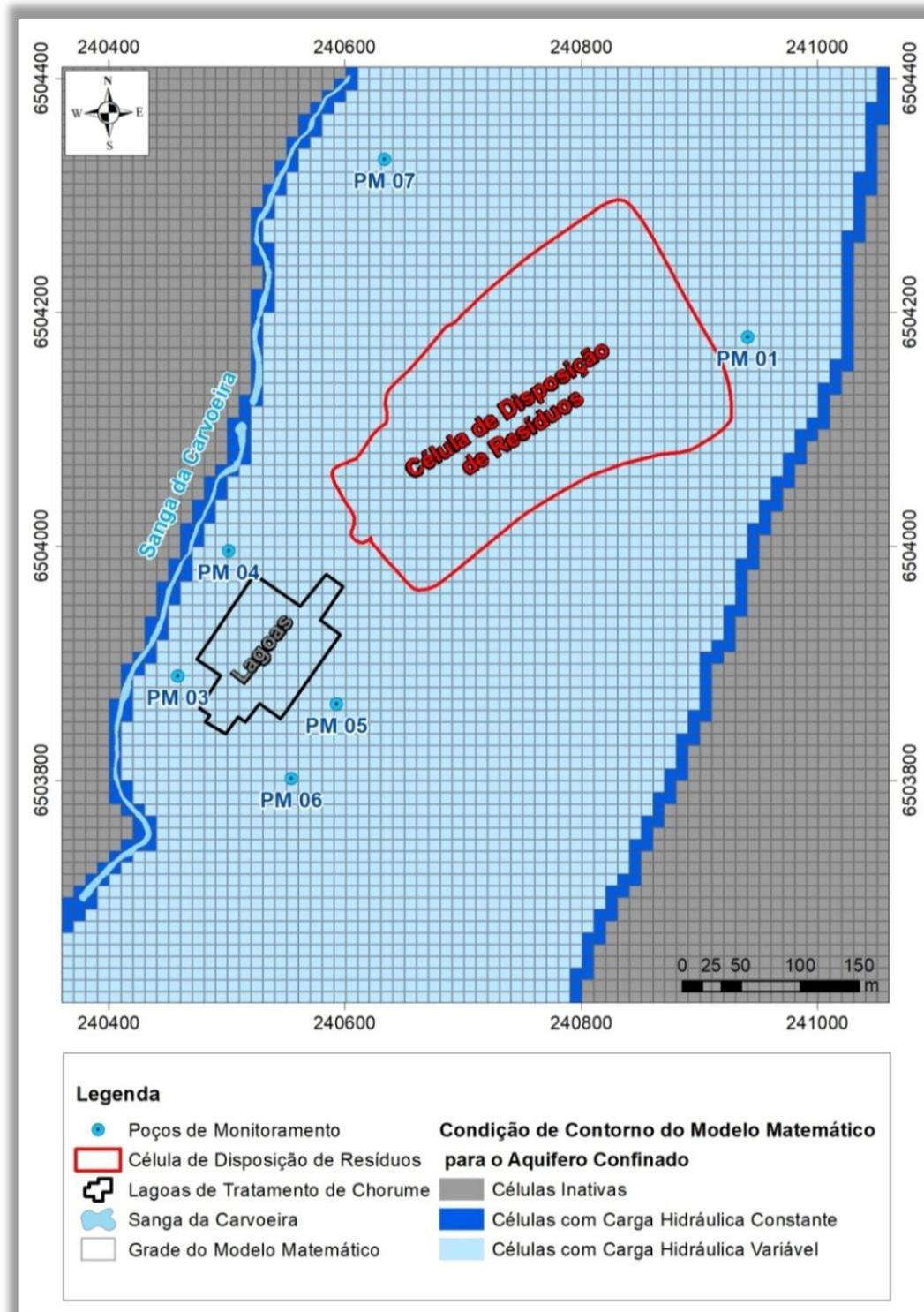
### 8.2.1 Definição das Condições de Contorno do Modelo Matemático

Após a concepção da grade do modelo matemático, foram determinadas as condições de contorno do modelo por meio da atribuição de diferentes valores para cada célula do modelo. As células com valor (0) zero são inativas e não fazem parte da modelagem matemática. As células com valor (-1) possuem carga hidráulica constante e são utilizadas para a definição de contorno do modelo. As células com valor (1) são ativas e recebem os valores de entrada do modelo.

Para o modelo em tela foi determinado que a condição de contorno a sudoeste da área de estudo é o trecho de montante para jusante da Sanga da Carvoeira que é o nível de base do aquífero local. Para estas células foi atribuído o valor de (-1). A condição de contorno no limite nordeste da área foi determinada a partir da cota do nível da água do poço de monitoramento localizado mais a montante da área de estudo onde também foram atribuídos valores de (-1). Na Figura 41 consta a localização da condição de contorno do modelo, para as

células de coloração azul forte foi atribuído o valor de (-1), as células inativas de coloração cinza escuro com valor (0) e as células ativas de coloração azul claro valor (1).

Figura 41 - Condição de contorno do modelo matemático



## 8.2.2 Superfície Potenciométrica do Modelo Matemático

A partir da definição das condições de contorno do modelo matemático foi calculada a superfície potenciométrica do aquífero local, considerando os seguintes parâmetros de entrada do modelo que constam na Tabela 14.

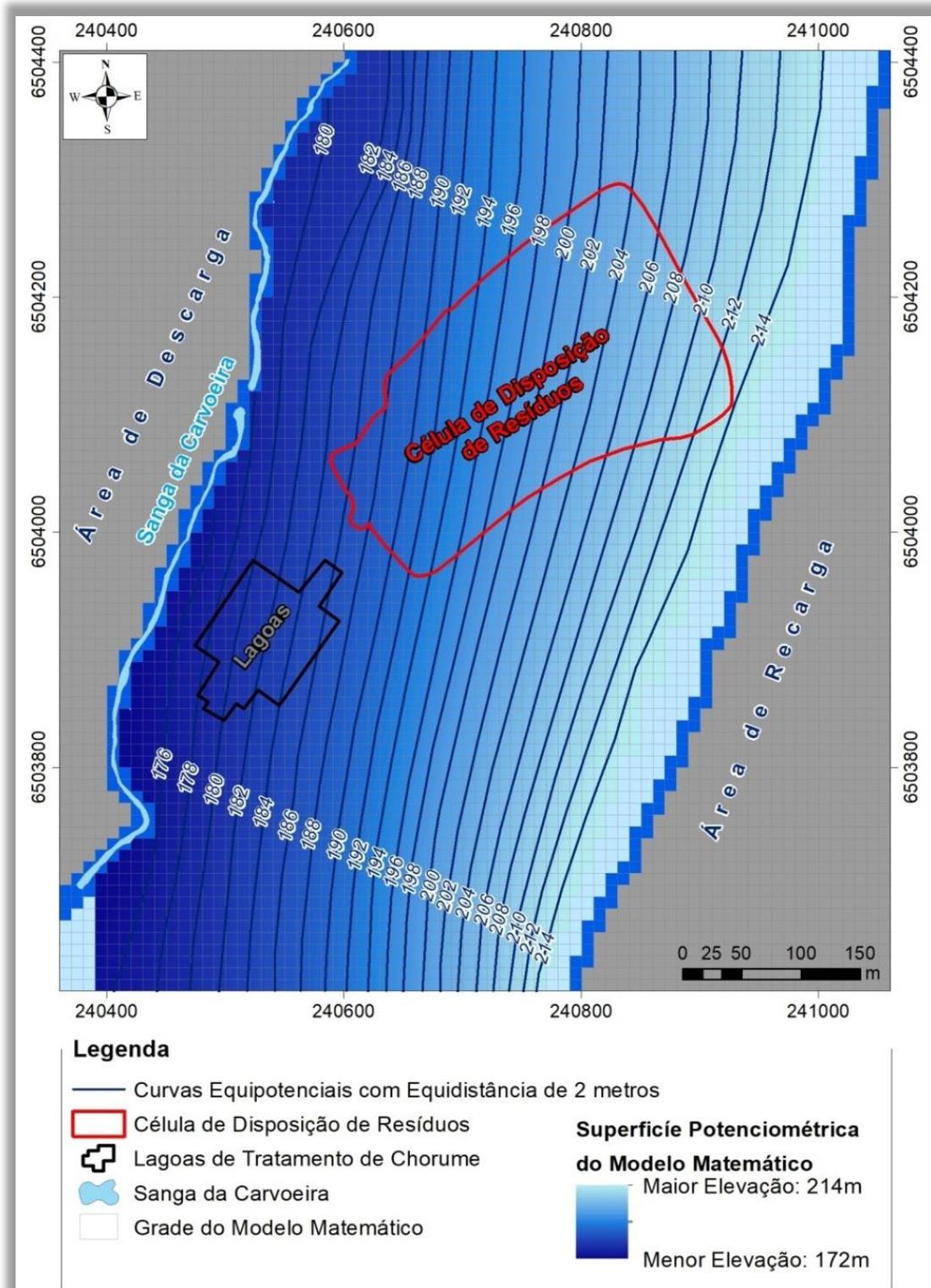
Tabela 14 - Parâmetros de entrada do modelo matemático de fluxo subterrâneo.

<b>Parâmetro de Entrada do Modelo Matemático de Fluxo Subterrâneo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Espessura média da camada de arenito	15	m
Carga hidráulica do topo do aquífero	214	m
Cota de montante da área de descarga da drenagem local	182	m
Cota de jusante da área de descarga da drenagem local	172	m
Porosidade efetiva de camada aquífera	20	%
Condutividade Hidráulica Horizontal Média	$3,29 \times 10^{-3}$	cm/s
Transmissividade	$4,94 \times 10^{-4}$	m <sup>2</sup> /s
Fator de Retardo	1	adimensional

A superfície potenciométrica que consta na Figura 42 é resultado da execução do modelo matemático de fluxo subterrâneo considerando como parâmetros de entrada os dados acima descritos.

A área de recarga do aquífero localiza-se a sudeste da área modelada e foi atribuída como carga hidráulica constante com cota de 214m. A área de descarga está localizada no limite sudoeste do modelo e tem carga hidráulica variável de 182m a montante e 172m a jusante conforme variação do gradiente hidráulico da drenagem local.

Figura 42 - Superfície potenciométrica do aquífero local calculado a partir do modelo matemático.



### **8.3. Simulação das Trajetórias Preferenciais de Fluxo e Tempo de Chegada dos Contaminantes**

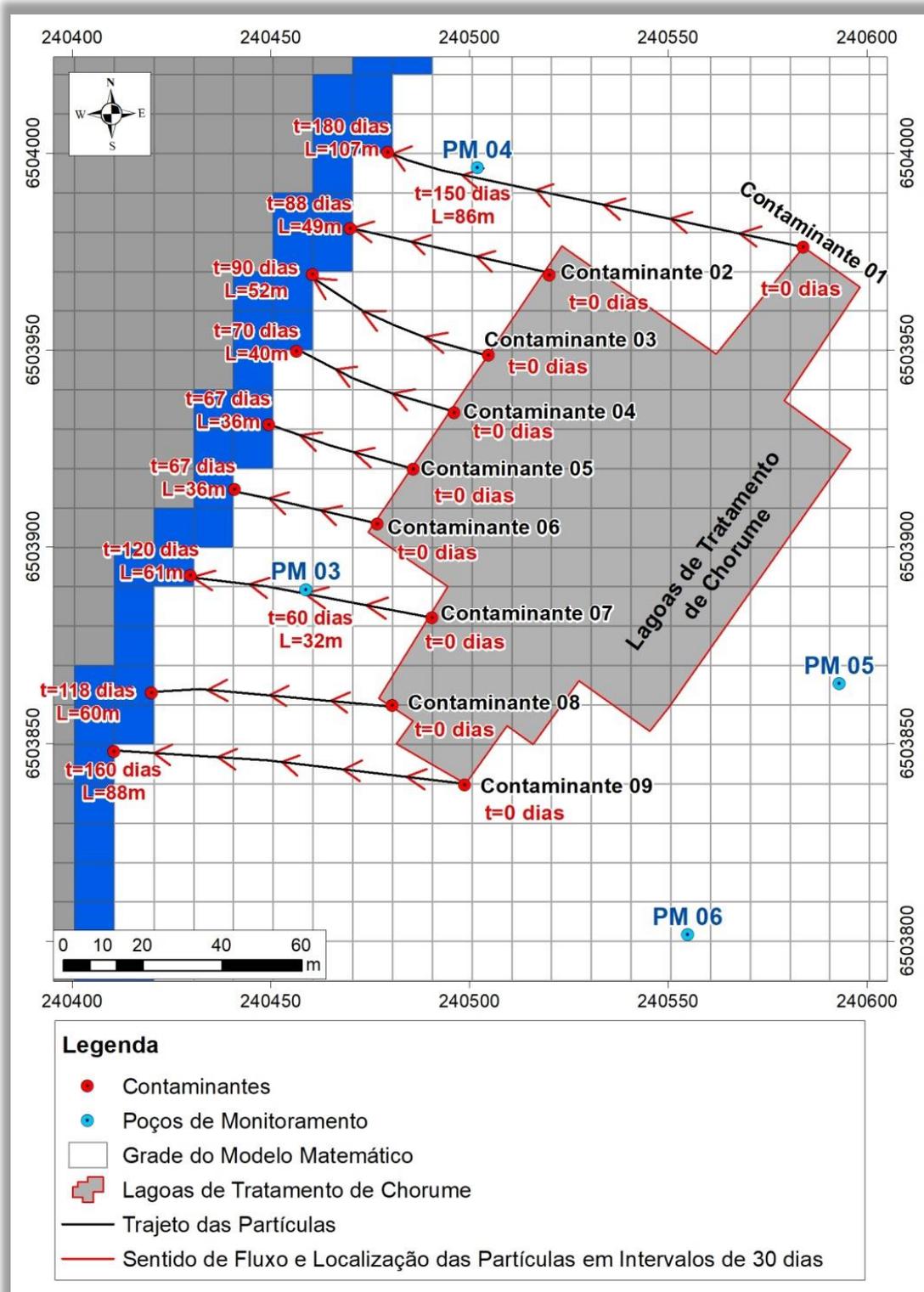
A simulação permite identificar o caminho preferencial que os contaminantes dissolvidos nas águas subterrâneas percorrem e o tempo requerido para o deslocamento desde o local de aporte até um ponto qualquer de chegada. As simulações foram feitas para a situação atual do aterro, considerando a área da célula disposição de resíduos e a área de tratamento de chorume na direção dos poços de monitoramento PM-03, PM-04, PM-07 e Sanga da Carvoeira.

Para a melhor representação os dados de saída das simulações foram criados dois cenários. No cenário 01 são apresentados os resultados do trajeto e tempo de chegada dos contaminantes provenientes das lagoas de tratamento de chorume. No cenário 02 são apresentados os resultados da trajetória e tempo de chegada de contaminantes oriundos da célula de disposição de resíduos. Ambos os cenários foram simulados em intervalos de tempo 30 dias, este modelo de transporte convectivo não considera a concentração ou a dispersão de um contaminante específico, infere-se que o contaminante é lançado diretamente na zona saturada do aquífero.

#### **8.3.1 Cenário 01 - Simulação do Trajeto e Tempo de Chegada dos Contaminantes Provenientes das Lagoas de Chorume.**

No cenário 01 foram simuladas as trajetórias e os tempos de chegada de contaminantes com aporte a partir de todo o limite noroeste área das lagoas de tratamento de chorume em direção dos poços de monitoramento PM-03, PM-04 e Sanga da Carvoeira conforme pode ser visto na Figura 43.

Figura 43 - Cenário 01 trajeto e tempo de chegada dos contaminantes lançados a partir da área das lagoas de tratamento de chorume em direção aos poços de monitoramento PM-03, PM-04 e Sanga da Carvoeira.



A linha de cor preta representa a trajetória preferencial de fluxos dos contaminantes lançados diretamente no aquífero e as setas vermelhas marcam a localização intervalo de tempo de 30 dias.

O contaminante 01 foi lançado no limite nordeste da área das lagoas e percorreu um trajeto de 86m em 150 dias até chegar ao poço PM-04. Para chegar até a Sanga da Carvoeira o contaminante percorreu 107m em 180 dias.

O contaminante 07 foi lançado no limite sudeste da área das lagoas e percorreu um trajeto de 32m em 60 dias para até chegar ao PM-03. Para chegar até a Sanga da Carvoeira o contaminante percorreu 61m em 120 dias.

Os contaminantes 05 e 06 são os que percorrem a menor distância até a Sanga da Carvoeira com 36m no tempo de 67 dias, na hipótese de ocorrer uma contaminação neste local estes contaminantes serão os primeiros a chegarem à Sanga da Carvoeira.

A velocidade média de fluxo do contaminante até chegar ao poço PM-03 é de 0,57m/dia e até o poço PM-04 é de 0,53m/dia. Considerando todos os contaminantes simulados a partir da área das lagoas de tratamento de chorume a velocidade média de fluxo é de 0,54m/dia. Ressalta-se que este valor de velocidade pode ser modificado nas diferentes distâncias percorridas pelos contaminantes e pelas variações no gradiente hidráulico local.. As distâncias e os tempos de chegada dos contaminantes simulados constam na Tabela 15.

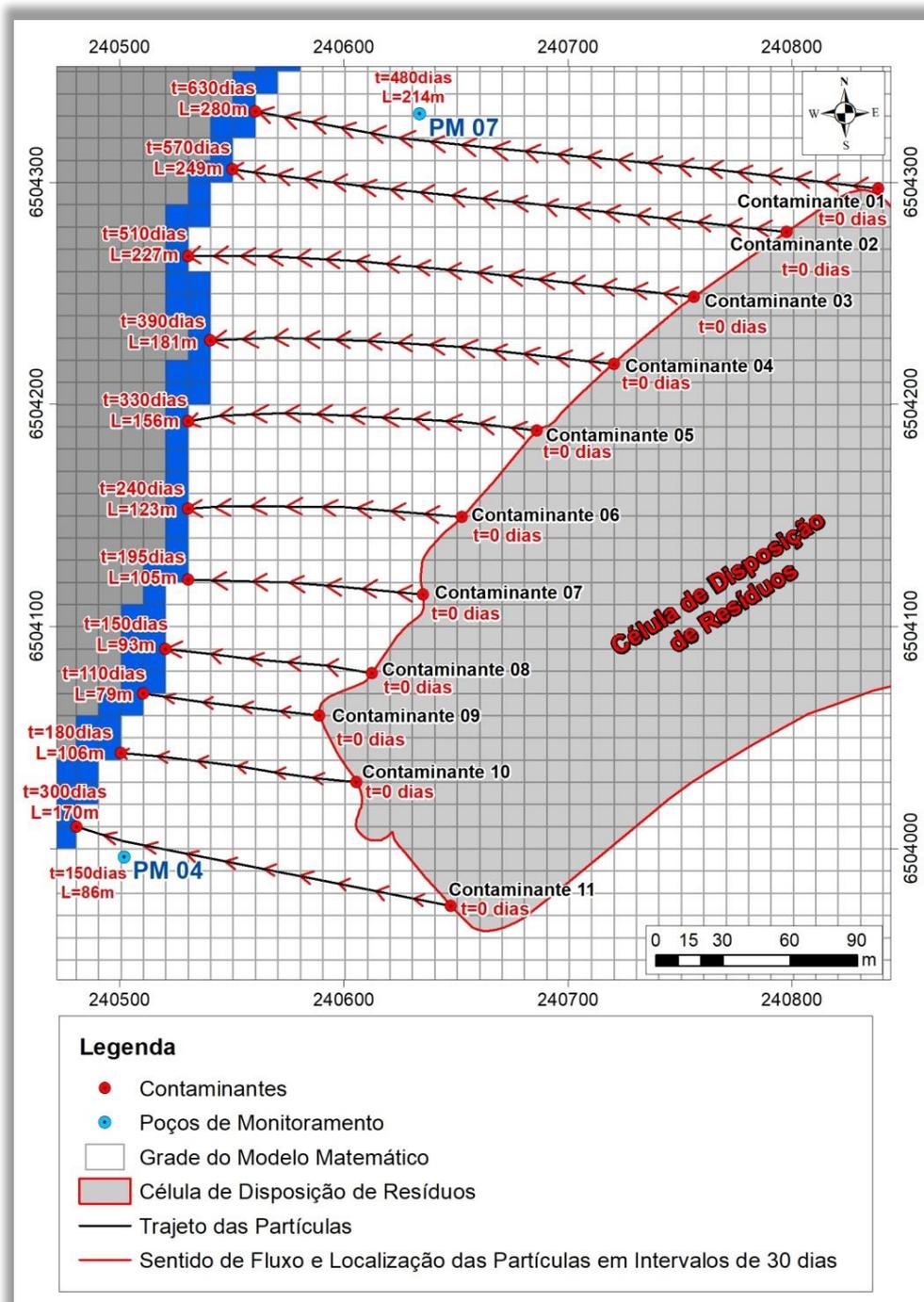
Tabela 15 - Distância percorrida pelas dez partículas em intervalos de tempo de 30 dias até a chegada à Sanga da Carvoeira.

<b>Contaminante</b>	<b>Tempo (dias)</b>	<b>Distância Percorrida (m)</b>
01	180	107
02	88	49
03	90	52
04	70	40
05	67	36
06	67	36
07	120	61
08	122	62
09	118	60
10	160	88

### 8.3.2 Cenário 02 - Simulação do Trajeto e Tempo de Chegada dos Contaminantes Provenientes da Célula de Disposição de Resíduos

No cenário 02 foram simuladas as trajetórias e os tempos de chegada de contaminantes com aporte a partir de todo o limite noroeste célula de disposição de resíduos em direção ao poço de monitoramento PM-07 e Sanga da Carvoeira conforme pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 - Cenário 02 trajeto e tempo de chegada dos contaminantes lançados a partir da célula de disposição de resíduos em direção ao poço do monitoramento PM-07 e Sanga da Carvoeira.



O contaminante 01 foi lançado no limite norte da célula de resinosos e percorreu um trajeto de 214m em 480 dias até chegar ao poço PM-07. Para chegar até a Sanga da Carvoeira o contaminante percorreu 280m em 630 dias.

O contaminante 09 percorre a menor distância até a Sanga da Carvoeira com 79m no tempo de 110 dias, na hipótese de ocorrer uma contaminação neste local estes contaminantes serão os primeiros a chegarem à Sanga da Carvoeira.

A velocidade média de fluxo do contaminante nesta região é de 0,49m/dia ressalta-se que este é um valor médio de velocidade que pode ser alterado pela diferentes distâncias percorridas pelas partículas e variações no gradiente hidráulico.

A velocidade média de fluxo do contaminante até chegar ao poço PM-04 é de 0,44m/dia. Considerando todos os contaminantes simulados a partir da área da célula de disposição de resíduos a velocidade média de fluxo é de 0,49m/dia. Ressalta-se que este valor de velocidade pode ser modificado nas diferentes distâncias percorridas pelos contaminantes e pelas variações no gradiente hidráulico local. As distâncias e os tempos de chegada dos contaminantes simulados constam na Tabela 16.

Tabela 16 - Distância percorrida pelas onze partículas em intervalos de tempo de 30 dias até a chegada à Sanga da Carvoeira.

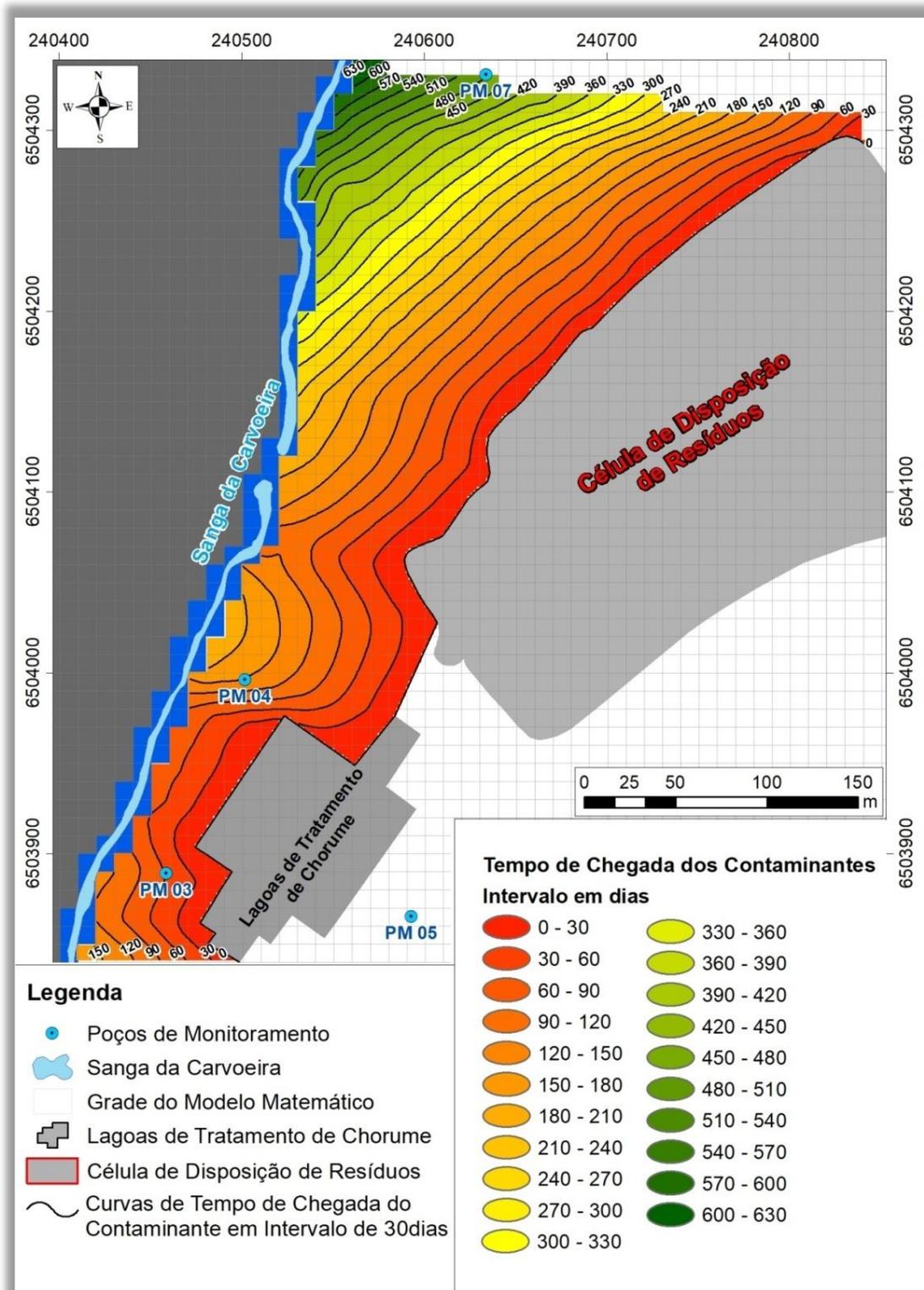
Contaminante	Tempo (dias)	Distância Percorrida (m)
01	630	280
02	570	249
03	510	227
04	390	181
05	330	156
06	240	123
07	195	105
08	150	93
09	110	79
10	180	106
11	300	170

### 8.3.3 Interpolação dos Tempos de Chegada dos Contaminantes na Área do Modelo Matemático

A partir dos tempos de chegada dos contaminantes calculados pelo modelo matemático nos cenários 01 e 02 foi realizada a interpolação dos intervalos de tempo de 30 dias de todos os contaminantes lançados a partir da lagoa de tratamento de chorume e da

célula de resíduos até a Sanga da Carvoeira. Na Figura 45 pode ser visualizada a superfície com os intervalos de tempo de dispersão dos contaminantes.

Figura 45 - Superfície com os intervalos de tempo de dispersão dos contaminantes.



Na área de um aterro sanitário os locais com maior vulnerabilidade para contaminação são a célula de disposição de resíduos e a área de tratamento dos efluentes, caso ocorra um vazamento de efluente nestes locais a probabilidade de contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas é elevado.

Neste estudo foi considerada uma situação hipotética de contaminação específica das águas subterrâneas, onde os contaminantes foram lançados diretamente na zona saturada da camada aquífera. Diante desta condição a área com maior vulnerabilidade para contaminação do aquífero caso ocorra um vazamento de efluente é a área das lagoas de tratamento de chorume, por estar localizada mais próxima da Sanga da Carvoeira e apresentar elevado gradiente hidráulico, somados a litologia de um aquífero sedimentar poroso a chegada do contaminante é mais rápida na média 60 dias.

## **9. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A partir dos resultados obtidos nos estudos de caracterização do meio físico, medições realizadas nos poços de monitoramento e modelagem matemática do aquífero são apresentadas as seguintes considerações:

- O aterro sanitário está assentado sobre litologias sedimentares da Formação Rio Bonito. Localmente afloram rochas do Membro Siderópolis que constituem pacotes de arenitos intercalados com siltitos, folhelhos carbonosos e carvão;
- O aterro foi construído em área de antiga cava de mineração de carvão da CRM, está condição causou acentuadas modificações à geomorfologia local dificultando a descrição de afloramentos devido ao aplainamento das superfícies mais elevadas e recobrimento das áreas de extração por material estéril como cinzas oriundas da queima do carvão;
- A construção do aterro seguiu rigorosamente os projetos de impermeabilização da base da célula de disposição de resíduos e lagoas de tratamento de chorume com a adição de uma camada de 50cm argila compactada e a instalação de uma geomembrana de PEAD com espessura de 2,0mm e posterior recobrimento com outra camada de argila de 50cm de espessura;
- Os sistemas de coleta de chorume na base da célula e tubulação para conduzir até as lagoas tratamento também foram devidamente instalados;
- A atual célula de disposição de resíduos iniciou as operações em 2011 com encerramento previsto para o ano de 2020;

- O mapa potenciométrico indica que as direções de fluxo da água subterrânea no aquífero local ocorrem de forma preferencial de nordeste para sudoeste em direção à drenagem que é o nível de base local denominada de Sanga da Carvoeira;
- A rocha que compõe o aquífero local é um quartzito arenoso de granulometria média a grossa;
- A porosidade efetiva do arenito que compõe a camada aquífera local é de 15%;
- A base da célula de disposição de resíduos está assentada sobre espessa camada de siltito-carbonoso. O topo do aquífero está entre 5 e 15m de profundidade em relação a base da célula;
- A área das lagoas de tratamento de chorume está assentada sobre uma camada de siltito carbonoso. O topo do aquífero está entre 2 a 4m de profundidade em relação à base das lagoas;
- O valor médio de condutividade hidráulica medidos nos poços é de  $3,29 \times 10^{-3}$  cm/s. Este resultado tem compatibilidade com materiais de composição areno-siltosa quando comparados com valores de bibliografia estão coerentes com a tipologia litológica do aquífero;
- O coeficiente de transmissividade foi calculado considerando uma espessura média do aquífero de 15m, que resultou em  $4,94 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s;
- O modelo conceitual de fluxo subterrâneo permitiu a delimitação das condições de contorno do modelo matemático;
- A superfície potenciométrica calculada a partir do modelo matemático de fluxo subterrâneo permitiu definir precisamente as áreas de recarga e descarga do aquífero local;
- Os contaminantes provenientes do limite nordeste das lagoas de tratamento de chorume percorrem 86m até a chegar ao poço PM-04 no tempo de 150 dias;
- Os contaminantes provenientes do limite sudeste das lagoas de tratamento de chorume percorrem 32m até a chegar ao poço PM-03 no tempo de 60 dias;
- A velocidade média de fluxo de todos os contaminantes provenientes das lagoas de tratamento de chorume é de 0,54m/dia;
- No caso hipotético de infiltração em toda a área das lagoas diretamente sobre a superfície do aquífero o tempo de chegada do primeiro contaminante a Sanga da Carvoeira é de 67 dias;

- Os contaminantes provenientes do limite sudeste da célula de disposição de resíduos percorrem 140m até a chegar ao poço PM-04 no tempo de 300 dias;
- Os contaminantes provenientes do limite nordeste da célula de disposição de resíduos percorrem 214m em 480 dias até a chegada ao poço PM-07;
- No caso hipotético de vazamento em toda a área da base da célula de disposição de resíduos diretamente sobre a superfície do aquífero o tempo de chegada do primeiro contaminante a Sanga da Carvoeira é de 110 dias;
- A velocidade média de fluxo de todos os contaminantes provenientes da célula de disposição de resíduos é de 0,49m/dia;
- A área do aterro com a maior vulnerabilidade para contaminação das águas superficiais e subterrâneas é a área das lagoas de tratamento de chorume por estar próxima a Sanga da Carvoeira e apresentar menor espessura entre a base das lagoas e a camada de siltito (impermeável) em relação ao topo do aquífero que é de composição arenítica porosa e permeável;
- O estudo do traçado e o tempo de chegada dos contaminantes em aterros sanitários são muito importantes, pois é uma informação que permite o operador prever e planejar de medidas de contenção ou mitigação do impacto ambiental;
- Em muitos casos não é possível a realização desse tipo de estudo, primeiro pela falta de dados confiável para a entrada no modelo, segundo pela falta de profissionais com conhecimento técnico suficiente para realizar o tratamento os dados, desenvolver os modelos e analisar os resultados.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Referências. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Referências. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8849**: Referências. Rio de Janeiro, 1985.

AZEVEDO, ADALBERTO A.; FILHO, JOSÉ LUIZ AFILHO (Org.). **Ensaio de Permeabilidade em Solo: Orientação para sua Execução no Campo**. 4. ed. São Paulo: ABG, 2013. 75 p. v. 1.

BEDIENT, P.B.; RIFAI, H.S.; NEWELL, C.J. **Ground Water Contamination: Transport and Remediation**. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1997. 604 p.

BRASIL, Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**.

**BRASIL. MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO**. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Plano Nacional de Saneamento Básico - 2008. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>>. Acesso em 25 nov. 2018.

CORSEUIL, H. X. *et al.* **Solução corretiva baseada no risco (SCBR): modelo matemático de tomada de decisão para o gerenciamento ambiental de águas subterrâneas contaminadas**. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 14., 2006, Curitiba. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2006. p. 1-14.

**CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS**. 2000. Roteiro Geológico Sobre a Coluna White. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/coluna/coluna.htm>>. Acesso em 05/05/2015.

DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F. W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. 2nd ed, New York: Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1998. 506 p.e Bioquímicos. Universidade Federal do Rio de Janeiro -UFRJ, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2009.

ESPINOSA, M. B. **Estudo Comparativo da Aplicação dos Modelos Matemáticos SCRB e MODFLOW na Simulação de Fluxo Subterrâneo, Transporte e Remediação de Contaminantes em Água Subterrânea**. Trabalho de conclusão de curso de graduação em engenharia sanitária e ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis - SC, 2016.

FEITOSA, F. A. C. & COSTA FILHO, W. D.. **EXECUÇÃO DE TESTES DE BOMBEAMENTO EM POÇOS TUBULARES: MANUAL PRÁTICO DE ORIENTAÇÃO**. Agosto. ed. [S.l.: s.n.], 1998. 24 p. v. 1.

FEITOSA, Fernando *et al.* (Org.). **HIDROGEOLOGIA: Conceitos e Aplicações**. 2. ed. Fortaleza: CPRM, 2000. 391 p. v. 2.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 3th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1994. 691 p.

GOMES, L. P. **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/produtos.htm>>. Acesso em 15 abr.2018.

GONÇALVES, Pólita. **Lixão x Aterro**. Disponível na Internet via <<http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/>>. Acesso em 22 out.2018.

GORDON Jr., M. **Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Notas Preliminares e Estudos, DNPM/DGM, Rio de Janeiro nº 38, p.1-20, 1947.

GUERRA, T. & FERRARO, L. W. 2004a. **Caracterização geral da região de Candiota**. In: **Estudos Ambientais em Candiota: Carvão e seus impactos**. FINEP/PADCT/CIAMB/FAPERGS/FEPAM, Cadernos de Planejamento e Gestão Ambiental, V. 4. Porto Alegre, p. 17 a 27.

KERBS, A. S. J; LOPES, R. S; POSSA, M. V; SCHNEIDER, C. H; DALMINA, L. B; SOUZA, V. P. **Meta Física 1 - Estudo Geológico - Hidrogeológico da Lavra Subterrânea. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM**. Dezembro, 2005.  
Manual de Operação do GPS RTK SOUHT Modelo S82T. Disponível <<https://geomatching.com/uploads/default/m/i/migration9brheg.pdf>>. Acesso em 15 nov. 2018.

**MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**. Escala: 1:750.000. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Porto Alegre, 2006.

**MEIOESTE AMBIENTAL LTDA**. Estudos Para Licenciamento Ambiental e Projetos de Engenharia da Área do Aterro Metade Sul em Candiota. Empresa Responsável Pela Atividade Operacional do Aterro Sanitário Metade Sul. Candiota - RS.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G., SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A. e FRANÇA, A. B. (2007) **Bacia do Paraná**. In: Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, mai/nov. 2007.

MORI, A. L. O.; SOUZA, Paulo A. **Palinologia das formações Rio Bonito e Palermo (Permiano Inferior, Bacia do Paraná) em Candiota, Rio Grande do Sul, Brasil: novos dados e implicações bioestratigráficas**. Ameghiniana, Buenos Aires, v. 47, n. 1, março de 2010. Disponível em <<http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci>>. Acesso 23 set.2018.

**Processing Modflow for Windows (PMWIN)** Versão 5.3 está incluído no livro "3D-Waterwater Modeling with PMWIN" publicado pela Springer-Verlag (ISBN 3-540-67744-5, SPIN 10774334; Springer-Verlag Berlin Heidelberg Nova Iorque). Disponível em <<https://www.pmwin.net/pmwin5.htm>>. Acesso em 01 ago.2018.

ROCHA, E. M. R. **Desempenho de um sistema de lagoas de estabilização na redução da carga orgânica do percolado gerado no aterro da Muribeca -PE.** 2005. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SILVA, F. B.. **Tratamento Combinado de Lixiviados de Aterros Sanitários.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2009.

TORRES, P.; Borba, L. E.; RIASCOS, J.; VIDAL, J. C. (1997), **Tratabilidade biológica de chorume produzido em aterro não controlado. Engenharia Sanitária e Ambiental.** Rio de Janeiro -Brasil. Vol. 2 -n° 2 -ABR/JUN 1997.