

**PRODUTO 3**

**DIAGNÓSTICO DE CONTAMINAÇÃO E PROPOSTA DE  
REMEDIAÇÃO DO ANTIGO LIXÃO DA ESTRUTURAL**

**VOLUME 1 - RELATÓRIO TÉCNICO**

**Brasília, Março de 2021.**

# SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO EXECUTIVO .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
1.1. Localização .....	4
1.2. Histórico.....	5
<b>2. TRABALHOS ANTERIORES .....</b>	<b>6</b>
2.1 Araújo (1996).....	6
2.2 Franco (1996).....	7
2.3 Santos (1996) .....	8
2.4 Pereira <i>et al.</i> (1997).....	9
2.5 Junqueira (2000) .....	9
2.6 Abreu (2001) .....	10
2.7 Carneiro (2002).....	13
2.8 Campos <i>et al.</i> (2006).....	15
2.9 Campos (2007).....	15
2.10 Holger (2011).....	16
2.11 Cavalcanti (2013).....	17
2.12 Barbosa (2014).....	19
2.13 Monteiro Filho (2018).....	20
2.14 Guedes (2019).....	21
<b>3 SÍNTESE SOBRE O MEIO FÍSICO LOCAL .....</b>	<b>23</b>
<b>4. DANOS AMBIENTAIS.....</b>	<b>26</b>
<b>5. CONTAMINAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS .....</b>	<b>33</b>
5.1 Considerações Iniciais.....	33
5.2 Estudo Geofísico .....	34
5.2.1 Método Adotado - Arcabouço Teórico .....	37
5.2.2 Aquisição dos Dados .....	39
5.2.3 Resultados .....	41
5.2.4 Interpretação dos Resultados.....	42
5.3 Poços de Monitoramento.....	45
5.3.1 Construção dos Poços de Monitoramento .....	45
5.3.2 Métodos Analíticos e Procedimentos de Coleta de Amostras .....	51
5.3.3 Resultados das Análises Químicas .....	52
5.3.4 Mapa da Extensão da Pluma de Contaminação .....	59
<b>6. MAPA POTENCIOMÉTRICO .....</b>	<b>61</b>
6.1 Método de Interpolação.....	61
6.2 Sentido do Fluxo Subterrâneo .....	67
<b>7. QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS .....</b>	<b>68</b>
7.1 Escolha dos pontos de Amostragem e Monitoramento .....	68
7.2 Métodos Analíticos .....	69
7.3 Resultados das Análises Hidroquímicas.....	69
7.4 Extensão da Contaminação das Águas Superficiais .....	70
<b>8. CONTAMINAÇÃO DOS SOLOS.....</b>	<b>72</b>

8.1 Materiais e Métodos.....	72
8.2 Resultados das Análises e Discussão .....	77
8.3 Mapa da Extensão da Contaminação dos Solos .....	85
<b>9. CONTAMINAÇÃO ATMOSFÉRICA .....</b>	<b>86</b>
<b>10. MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE RESÍDUOS.....</b>	<b>91</b>
10.1 Caracterização dos Tipos de Resíduos .....	91
<b>11. DADOS PARA ALIMENTAÇÃO DOS MODELOS DE FLUXO .....</b>	<b>95</b>
11.1 Condutividade Hidráulica da Zona Não Saturada .....	95
11.2 Condutividade Hidráulica da Zona Saturada.....	99
11.3 Geologia e Hidrogeologia .....	103
<b>12. CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....</b>	<b>106</b>
12.1 Caracterização Física dos Resíduos .....	106
12.2 Quantificação dos Resíduos Acumulados .....	117
<b>13. EXPERIÊNCIAS DE PRÁTICAS PARA REMEDIAÇÃO DE LIXÕES .....</b>	<b>122</b>
<b>14. MODELO CONCEITUAL DO FLUXO DE CONTAMINANTES .....</b>	<b>138</b>
<b>15. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DAS ÁREAS ADJACENTES À URE.....</b>	<b>148</b>
<b>16. COMENTÁRIOS SOBRE O PRIMEIRO WOKSHOP DE DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO PROJETO.....</b>	<b>153</b>
<b>17. PRINCIPAIS AÇÕES PARA REMEDIAÇÃO DOS PASSIVOS AMBIENTAIS .....</b>	<b>155</b>
<b>18. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>158</b>
<b>19. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>161</b>
<b>20. EQUIPE TÉCNICA.....</b>	<b>167</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Mapa de localização do Lixão da Estrutural (anteriormente denominado de Lixão ou Aterro Controlado do Jockey Clube).....	5
<b>Figura 2</b> - Histórico da acumulação de resíduos sólidos no Lixão da Estrutural ou Lixão do Jockey Clube (Franco, 1996).....	8
<b>Figura 3</b> - Mapa de distribuição dos poços de monitoramento instalados com auxílio de trado manual (Abreu, 2001).....	12
<b>Figura 4</b> - <i>Grid</i> de distribuição dos elementos aplicados à modelagem matemática na região do Lixão da Estrutural (Carneiro, 2002).....	13
<b>Figura 5</b> - Mapa de sentido de fluxo mostrando que a pluma se divide para leste e oeste respectivamente em direção ao Córrego do Acampamento e Córrego Cabeceira do Valo (Carneiro, 2002). Modelo previewal para o ano de 2010.....	14
<b>Figura 6</b> - Modelo previewal para o ano de 2030 (Carneiro, 2002).....	14
<b>Figura 7</b> - Exemplo de seção geofísica 7 mostrando região sem presença de pluma de chorume. Toda a área investigada apresenta alta resistividade. Seção situada no interior do Parque Nacional de Brasília em local distante dos limites do lixão (resultado obtido no Projeto IWAS/ UnB/ CAESB, Holger, 2011).....	17
<b>Figura 8</b> - Exemplo de seção geofísica 3 mostrando a região de ocorrência da pluma de chorume em profundidade. As faixas de baixa resistividade indicam a presença de íons presentes no percolado de resíduos sólidos. Seção situada no limite entre o depósito atual e o lixo antigo (resultado obtido no Projeto IWAS/ UnB/ CAESB, Holger, 2011).....	17
<b>Figura 9</b> - Exemplo de resultado obtido com uso do Radar de Penetração no Solo, com indicação de cava de resíduo (Cavalcanti, 2013).....	18

<b>Figura 10</b> - Distribuição das seções geofísicas (tomografia elétrica por eletrorresistividade) realizadas nos limites da área do Lixão da Estrutural (Cavalcanti, 2013). .....	18
<b>Figura 11</b> - Exemplos de seções geofísicas interpretadas que foram levantadas na porção sudoeste da área do Lixão da Estrutural (Cavalcanti, 2013). .....	19
<b>Figura 12</b> - A: localização das linhas com relação ao maciço de resíduos. B: Linha L3, mostrando a presença de chorume distribuído na porção superior com até 50 metros de espessura. C: Linha L4, mostrando presença de chorume a profundidades de cerca de 20 metros ao sul e até mais de 75 metros na porção norte da linha coincidente com a principal faixa de acumulação de resíduos na porção central do lixão da Estrutural. Observação: as figuras dispostas à direita e à esquerda representam diferentes métodos de inversão dos dados brutos obtidos em campo (Guedes, 2019). .....	22
<b>Figura 13</b> - Porção superior de perfil de Latossolo Vermelho de textura muito argilosa. Estrutura granular no horizonte A e AB e textura grumosa no horizonte Bw.....	24
<b>Figura 14</b> - Modelo de Superfície Potenciométrica Única sem confinamento, onde a superfície de saturação permanece no meio aquífero intergranular superior. SPMP - superfície potenciométrica do meio poroso; SPMF - superfície potenciométrica do meio fraturado (Lousada, 2005). .....	25
<b>Figura 15</b> - Divisão do Lixão da Estrutural em porções: sul, intermediária e norte (Araújo, 1996). .....	26
<b>Figura 16</b> - Modelo de manejo e descarte de resíduos sólidos em aterro. Modificado de Plano de Manejo das Áreas de Proteção da Vila Estrutural e Plano de Uso do Parque Urbano da Estrutural (IBRAM, 2019). .....	27
<b>Figura 17</b> - Exemplo de dreno de gases em funcionamento no Lixão da Estrutural. ....	27
<b>Figura 18</b> - Piscina de chorume em funcionamento no Lixão da Estrutural. À esquerda, visão geral da piscina. À direita, chegada do chorume à piscina por meio de manilha e detalhe da lona de revestimento, já com porções desgastadas pela exposição. ....	28
<b>Figura 19</b> - Mapa de distribuição da pluma de contaminação na região do Aterro do Jockey / Cidade Estrutural, para o ano de 2001 (Fonte dos dados: Araújo 1996, Franco 1996; base cartográfica Koide et al. 1999). As setas indicam o fluxo subterrâneo local preferencial da pluma. Equidistância das curvas de nível 2 metros. ....	31
<b>Figura 20</b> - Imagens do processo de montagem e execução da sondagem tipo SPT. ....	32
<b>Figura 21</b> - Cartograma dos limites do lixão retificado com uso de sondagens mecânicas e manuais (sistema de georeferenciamento Sicad) (Campos et al., 2006).....	35
<b>Figura 22</b> - Distribuição das seções geofísicas realizadas nos limites da área do Lixão da Estrutural. <b>AC</b> - área contaminada, <b>AS</b> - área levemente contaminada e <b>NA</b> - área não contaminada (imagem do Google Earth de 2012) (Cavalcanti, 2013). .....	36
<b>Figura 23</b> - Esquema da distribuição dos eletrodos no solo durante uma aquisição de eletrorresistividade. As linhas cheias indicam o fluxo de corrente no solo, ao passo que as linhas pontilhadas indicam as linhas de equipotenciais geradas pela corrente. ....	38
<b>Figura 24</b> - Esquema sequencial de aquisição de dados utilizado em caminhamentos elétricos com o arranjo dipolo-dipolo (adaptada de Elis, 1998). .....	39
<b>Figura 25</b> - Fotografias mostrando o equipamento Syscal em atividade de levantamento de campo. ....	40
<b>Figura 26</b> - Localização das seções geofísicas levantadas neste trabalho e no ano de 2013 (Cavalcanti, 2013). As linhas pontilhadas se referem a <i>buffers</i> com faixas de 200 metros a partir dos limites da área que historicamente foi local de acumulação de resíduos (imagem base obtida do Sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2019). .....	42
<b>Figura 27</b> - Mapa preliminar da pluma de contaminação por chorume do antigo Lixão da Estrutural, baseado exclusivamente nos resultados do estudo geofísico, com inserção das seções geofísicas. Para melhor avaliação das seções individuais, observar as ilustrações em maior escala apresentadas nas seções da Figura 7. Mapa produzido a partir da integração dos dados geofísicos deste projeto, dados de Cavalcanti (2013), de Guedes (2019), dados do limite da pluma apresentados por Campos <i>et al.</i> (2006), além da confirmação da contaminação no poço da rede de monitoramento da ADASA. (imagem base obtida do Sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2019).....	44
<b>Figura 28</b> - Localização geográfica dos poços de monitoramento das águas subterrâneas.....	46
<b>Figura 29</b> - Perfuração do poço LX14, mostrando a torre com sistema hidráulico, as hastes metálicas e a caixa de circulação de lama. O caminhão pipa situado ao lado da torre do sistema hidráulica fornece água para circulação no interior do conduto. ....	48
<b>Figura 30</b> - Amostra de calha coletada na entrada da caixa de lama durante a perfuração do poço LX 12. Notar que se trata de areia grossa com grãos esféricos típicos dos observados no topo da Formação Ribeirão Piçarrão do Grupo Paranoá.....	48

<b>Figura 31</b> - Detalhes dos tubos de PVC Geomecânico de 4 polegadas utilizados na coluna de revestimento e filtro nos poços de monitoramento instalados pelo presente estudo. ....	48
<b>Figura 32</b> - Detalhe do pré-filtro utilizado na maior parte dos poços. ....	49
<b>Figura 33</b> - Sistema de proteção triplo, composto por cap de PVC rosqueável, tubo de aço carbono com tampa e cadeado e manilha em concreto com tampa. ....	49
<b>Figura 34</b> - Cerca de proteção de poços instalados na área urbana da Cidade Estrutural. ....	49
<b>Figura 35</b> - Amostragem de água no poço LX3 situado no Parque Nacional de Brasília. Notar o detalhe dos pesos acoplados no corpo do bailer. A água se apresenta turva, pois a obra do poço havia sido recém-concluída. ....	52
<b>Figura 36</b> - Sonda multiparâmetro YSI Professional Plus e sonda HQ 40d da Hach Instruments, utilizadas para coleta dos parâmetros (pH, temperatura, total de sólidos dissolvidos (TDS), e condutividade elétrica (CE). ....	52
<b>Figura 37</b> - Distribuição da pluma de contaminação por choroume baseada na condutividade elétrica do fluído (medição realizada em agosto de 2020). Sistema de coordenadas plana SIRGAS 2000 Zona 23. Imagem base obtida do Sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020. ....	60
<b>Figura 38</b> - Potenciometria com base no relevo antes da acumulação dos resíduos na área. (Imagem base obtida do sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020). ....	63
<b>Figura 39</b> - Potenciometria com base no relevo atual (pós-acumulação dos resíduos na área). Medidas de níveis realizadas em agosto de 2020. (Imagem base obtida do sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020). ....	64
<b>Figura 40</b> - Espessura da zona vadosa do aquífero freático, representado por latossolos e por resíduos acumulados. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020). ....	66
<b>Figura 41</b> - Mapa do sentido de fluxo das águas subterrâneas. Este padrão de fluxo deverá controlar a migração da pluma de contaminação. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020). ....	68
<b>Figura 42</b> - Distribuição qualitativa das águas dos cursos superficiais das três bacias que drenam a partir da área do Lixão da Estrutural. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020). ....	71
<b>Figura 43</b> - Amostragem de solo superficial com uso de cavadeira articulada. ....	74
<b>Figura 44</b> - Amostragem de solo em profundidade de 60 cm com auxílio de trado manual. ....	74
<b>Figura 45</b> - Amostras em diferentes profundidades em um mesmo ponto. ....	74
<b>Figura 46</b> - Difratogramas de Raios X das amostras SO-15A e SO-15B. <b>tot</b> - representa a amostra total analisada pelo método do pó. <b>n</b> - representa a separação da fração argilosa. ....	82
<b>Figura 47</b> - Mapa da Distribuição das áreas com diferente potencial de contaminação. A confirmação da contaminação é feita por análises químicas específicas ou com base em informações qualitativas. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020). ....	87
<b>Figura 48</b> - Distribuição mensal da poluição atmosférica no ano de 2008 no Centro da cidade de Taguatinga. Fonte: IBRAM/SEDUMA, (2008). ....	89
<b>Figura 49</b> - Variação de componentes indicadores de qualidade do ar nas adjacências da fábrica de cimento Planalto (Ciplan). Fonte: IBRAM/SEDUMA, (2008). ....	90
<b>Figura 50</b> - Resíduos observados em trincheira rasa aberta na área urbana da Cidade Estrutural. Notar a ampla predominância de plástico. ....	92
<b>Figura 51</b> - Resíduos expostos em área que foi gradeada para implantação de experimento de fitorremediação. ....	92
<b>Figura 52</b> - Distribuição dos resíduos na área do Lixão, incluindo áreas de acumulação histórica e área de acumulação mais recente. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020). ....	94
<b>Figura 53</b> - Ensaio de infiltração in situ com o método dos anéis concêntricos. ....	96
<b>Figura 54</b> - Ensaio de infiltração in situ com método <i>Open End Hole</i> . ....	97
<b>Figura 55</b> - Adição de água ao poço a fim de se elevar o nível estático para averiguação das condições de recuperação. ....	99
<b>Figura 56</b> - Ilustração esquemática do teste tipo Slug com parâmetros geométricos utilizados na análise da condutividade hidráulica pelo método de Bouwer & Rice (1976). Poço parcialmente penetrante. Extraído de Pede (2004). ....	100
<b>Figura 57</b> - Geologia da área de estudo, eliminadas as coberturas de solos. Modificado de Freitas-Silva & Campos, (1998) a partir dos dados de perfurações para a instalação dos poços de monitoramento. ....	

(Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020).....	105
<b>Figura 58</b> - Localização dos pontos de amostragem para análises gravimétricas (GRA) e de observação qualitativa em taludes existentes e em área de deposição atual de resíduos (GRQ). (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020).....	107
<b>Figura 59</b> - Abertura da trincheira GRA - 06 com a retirada e homogeneização dos resíduos. Detalhe para o tecido Geotêxtil retirado.....	108
<b>Figura 60</b> - Baldes de 30 litros de capacidade utilizados nas operações de medição da massa dos rejeitos. ....	108
<b>Figura 61</b> - Detalhe de operação de pesagem com auxílio de corda e balança digital. ....	109
<b>Figura 62</b> - Exemplo de material já retirado e classificado segundo sua natureza (plástico, madeira, concreto e terra).....	109
<b>Figura 63</b> - Exemplo de terra obtida do interior da trincheira. Observar o aspecto heterogêneo e contaminado do material, que inclui pequenos fragmentos de vidro, madeira e rocha. ....	110
<b>Figura 64</b> - Madeira retirada da escavação da amostra GRA - 04. Predominância de madeira utilizada em obras (tábuas e tarugos).....	110
<b>Figura 65</b> - Exemplos de material metálico obtido da amostra GRA - 02. Presença comum de vergalhões, além de latas e outros fragmentos. ....	111
<b>Figura 66</b> - Material classificado como tecido (amostra GRA - 02). Na média esta classe de resíduos inclui pano de algodão, tecidos sintéticos e bidin. ....	111
<b>Figura 67</b> - Entulho de obra (também classificado como concreto ou escombros), composto por blocos de concreto, revestimentos de piso e paredes e fragmentos de rocha de cantaria. ....	111
<b>Figura 68</b> - Resíduos classificados como vidro, que é representado por garrafas inteiras ou fragmentos de vidros de diferentes cores. ....	112
<b>Figura 69</b> - Exemplo de plástico obtido da amostragem no ponto GRA – 02. Observar a diversidade de origem dos materiais. ....	112
<b>Figura 70</b> - Exemplo de papel obtido da escavação da amostra GRA - 02. Este tipo de material não é comum, sendo apenas encontrado em aterro recente. Nas amostras de resíduos antigos esta classe de material já foi totalmente decomposta em conjunto com a porção orgânica.....	113
<b>Figura 71</b> - Resíduo depositado entre os dias 08 e 10 de setembro de 2020. No extremo esquerdo da imagem predominam materiais plásticos, na porção central há predominância de escombros de obras e na parte esquerda ocorre exclusivamente material vegetal de podas de árvores. Pilha com média de 2 metros de elevação. ....	114
<b>Figura 72</b> - Modelo Digital de Elevação - MDE do antigo Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos da Estrutural. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema <i>Google Earth</i> , de maio de 2020). ....	119
<b>Figura 73</b> - Mecanismo de fitodegradação em espécie florestal. Em vermelho os contaminantes em solução do solo. Em verde- a quebra das estruturas moleculares do contaminante e absorção pelas estruturas orgânicas (Silva et al., 2019).....	128
<b>Figura 74</b> - Mecanismo de fitoacumulação em espécies florestais (Almeida, 2011). ....	129
<b>Figura 75</b> - Mecanismo de fitoestabilização em espécie florestal (Almeida, 2011).....	129
<b>Figura 76</b> - Instalação de muro impermeável (Fetter, 2001). ....	131
<b>Figura 77</b> - Instalação de poço de bombeamento. Com tratamento ou reinjeção (Fetter, 2001).....	131
<b>Figura 78</b> - Impermeabilização de fundo e topo do sítio de geração da pluma de contaminação (Fetter, 2001).....	132
<b>Figura 79</b> - Bombeamento a jusante e montante para estabilização da pluma de contaminação (Fetter, 2001).....	132
<b>Figura 80</b> - Injeção de nutrientes a montante com bombeamento da pluma a jusante seguido de tratamento ou reinjeção (Fetter, 2001). ....	133
<b>Figura 81</b> - Instalação de septo permeável preenchido com sistema de filtro físico (Fetter, 2001). ....	133
<b>Figura 82</b> - Fluxograma com análise de parâmetros considerados para a seleção do método apropriado para tratamento de chorume. DBO - demanda bioquímica de oxigênio; DQO - demanda química de oxigênio (Forgie, 1988 e Renou <i>et al.</i> , 2008).....	134
<b>Figura 83</b> - Destilador apresentado contendo um tanque de aço inoxidável AISI-304 de 160 cm de altura e 90 cm de diâmetro de 30 Kg de peso, um condutor de chapa galvanizada de 300 x 0,4 x 0,2 cm, termômetro, chave, duas caixas de fibra de vidro de 0,5 e 1 m <sup>3</sup> , um queimador industrial e um botijão de gás butano (Massai & Massai, 2005). ....	136

<b>Figura 84</b> - Sistema de <i>Wetland</i> na Mina de Águas Claras, MG (Vale, 2018). .....	137
<b>Figura 85</b> - Localização das seções apresentadas na Figura 55 destacada em amarelo; Figura 56 marcada em azul e Figura e 57 representada em vermelho. Base de georeferenciamento Sirgas 2000, Zona 23. ...	140
<b>Figura 86</b> - Seção Oeste – Leste contendo a representação esquemática do modelo conceitual de fluxo de contaminantes no Lixão da Estrutural. A partir da porção central do maciço de resíduos há a divisão do fluxo para o quadrante leste (em direção ao Parque Nacional de Brasília) e para oeste (em direção ao Córrego Cabeceira do Valo). Sob a pilha de rejeitos aterrada há a produção do chorume a partir do contato das águas de chuva com a matéria orgânica e demais materiais no aterro. A pluma se espalha para os dois quadrantes, em função do gradiente hidráulico (setas vermelhas). A densidade da pluma diminui progressivamente quando se distancia da zona de produção do contaminante, sendo que a diluição é associada a três controles: atenuação da carga contaminante em contato com o aquífero, mistura da pluma com águas de boa qualidade já presentes no aquífero e pela mistura com águas de recarga que se processa nas áreas marginais do antigo lixão. À oeste do Córrego Cabeceira do Valo as águas de descarga apresentam baixa mineralização natural e contribuem para a diluição da contaminação do contaminante (seta azul) .....	141
<b>Figura 87</b> - Modelo conceitual de fluxo e de transporte de contaminante representado em seção transversal do Lixão da Estrutural. A figura destaca o maior gradiente hidráulico da porção oeste, com relação ao quadrante leste, o que aumenta a velocidade de fluxo do contaminante, o que também é controlado pelo material arenoso do saprolito em profundidade que apresenta maior condutividade que o saprolito argiloso presente na porção leste. Os processos de atenuação são de migração da pluma são mais eficientes em locais em que o fluxo migra através das ardósias e seus produtos de intemperismo. ....	142
<b>Figura 88</b> - Detalhe do modelo conceitual de fluxo de contaminante, destacando a estratificação lateral e vertical da pluma de contaminação. O efluente apresenta máxima concentração sob o maciço de resíduos aterrados. A concentração diminui progressivamente com o aumento da distância. O Poço LX-13 mostra um exemplo de estratificação vertical da pluma em que as concentrações variam em função da densidade da pluma e sua relação com água de recarga natural do aquífero. A elipse em vermelho destaca a porção entre o topo da zona saturada e a zona mais concentrada da pluma que recebe a recarga e dilui a superior da pluma de contaminação. ....	145
<b>Figura 89</b> - Exemplo de perfil SPT executado em ponto adjacente à URE na cidade Estrutural.....	150

## SUMÁRIO EXECUTIVO

O presente documento técnico representa o Produto 3 no âmbito do contrato no 101/2019 celebrado entre o Global Environment Facility (GEF) “*Promovendo Cidades Sustentáveis no Brasil*”, coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), em parceria com a ONU Meio Ambiente e o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), com a Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC).

Os estudos foram desenvolvidos na poligonal do Lixão da Estrutural e adjacências incluindo faixas no interior do Parque Nacional de Brasília (situado a leste), faixas no interior da cidade Estrutural (localizada a sul e sudoeste) e áreas nas chácaras do Núcleo Rural Cabeceira do Vale (situadas a oeste). Esta área está localizada na porção centro-oeste do Distrito Federal no divisor das bacias dos ribeirões Vicente Pires e Bananal, respectivamente afluentes dos braços sul e norte do Lago Paranoá.

Os resultados do diagnóstico ambiental mostram que a contaminação das águas subterrâneas é o problema mais crítico associado à antiga operação do Lixão da Estrutural e atual operação da Unidade de Recebimento de Entulhos. Além da contaminação das águas subterrâneas, há ainda a contaminação atmosférica (por particulados e gases de efeito estufa), degradação dos solos e mudança das propriedades geotécnicas dos terrenos adjacentes.

O mapa de distribuição da pluma de contaminação das águas subterrâneas mostra que as condições críticas de contaminação são confinadas à porção centro-norte do antigo lixão, sendo que a diluição se dá por entrada de águas de recarga natural e atenuação no próprio aquífero freático. A pluma apresenta maior densidade em direção ao córrego Cabeceira do Valo, em função da presença de material arenoso em subsuperfície e do maior gradiente hidráulico para oeste/sudoeste.

A pluma de chorume migra da porção centro-norte do lixão para oeste e sudoeste (em direção ao Córrego Cabeceira do Valo) e para leste e sudeste (em direção às nascentes do Córrego Acampamento). Este padrão é obtido considerando que o aquífero freático é classificado como um sistema homogêneo e isotrópico e assim a pluma migra com o próprio fluxo advectivo do aquífero em função do gradiente hidráulico local (a pluma migra perpendicularmente às linhas equipotenciais).

Os resultados mostram que a pluma apresenta baixa concentração em direção ao Parque Nacional de Brasília e à nascente do Córrego Acampamento. Este comportamento é atribuído à maior distância entre os locais de acumulação de resíduos e à presença de materiais argilosos em subsuperfície. Neste sentido, a faixa de 300 metros de largura situada entre o limite leste do lixão e o limite do parque nacional (denominada “Área Embargada”) tem um papel fundamental na contenção da pluma em direção à unidade de conservação ambiental.

A determinação dos limites da pluma de contaminação das águas subterrâneas foi obtida pela integração de estudos geofísicos (tomografia elétrica por eletrorresistividade com aplicação do arranjo Dipolo-Dipolo) com dados de análises hidroquímicas em 26 poços de monitoramento instalados na área do lixão e adjacências.

Os resultados do presente estudo mostram que a pluma ocorre de forma estratificada até cerca de 300 metros da zona de geração do chorume. Quando se afasta do centro produtor a pluma perde sua característica de estratificação vertical e se homogeneiza compondo um corpo saturado único na porção superior da zona saturada do aquífero.

Os solos não apresentaram contaminação de acordo com os padrões de referência propostos pela CETESB. Os teores de metais de transição estão abaixo dos valores de referência em todos os pontos amostrados, os quais, inclusive, consideraram áreas no interior do lixão e suas adjacências.

Dados de ensaios de sondagens de penetração no solo (do tipo SPT, *Soil Penetration Test*) mostram que nos locais em que o chorume percola com maior concentração há mudanças nas feições geotécnicas naturais do perfil de regolítico, sendo que os índices SPT inferiores a 6 podem alcançar mais de 15 metros de profundidade. Desta forma a ocupação urbana destas áreas, principalmente com edificações de maior porte (prédios de 3 ou 4 pavimentos) deve ser precedida de estudos mais detalhados, com alternativas de fundações específicas para solos moles, argilosos e muito plásticos.

O volume de resíduos acumulados foi obtido a partir de análises gravimétricas *ex-situ* resultando em um volume de 26.904.613,05 m<sup>3</sup> com uma densidade média de 0,956 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados mostram a seguinte distribuição de resíduos: terra (~ 46%), concreto (~ 25%), madeira (~ 17%), tecido (5%), plástico (~ 4,5%), metais-vidro-papel-pneus (~ 2,5%). A matéria orgânica ocorre intensamente decomposta e integrada à porção classificada como terra.

Três fontes principais são consideradas como poluentes atmosféricos na área do Lixão e atual Unidade de Recebimento de Entulhos da Estrutural: i) particulados gerados pelo tráfego de caminhões e máquinas; ii) particulados gerados pela queima de resíduos e incêndios florestais nucleados na área e iii) gases de efeito estufa (principalmente metano - CH<sub>4</sub> e dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>) gerados pela decomposição de resíduos orgânicos em ambiente anóxico.

Como resultado integrado do diagnóstico ambiental na poligonal do Lixão da Estrutural e adjacências pode-se afirmar que, apesar da área ter sido o local de acumulação de resíduos sólidos de todo o Distrito Federal por quase 60 anos (sem os devidos cuidados protetivos), os passivos ambientais apresentam menor gravidade que o esperado no início da realização dos estudos. Este quadro mostra a resiliência do meio físico da região, além de sua ampla capacidade de atenuação de cargas contaminantes.

Como forma de subsidiar o Governo do Distrito Federal no enfrentamento do passivo ambiental vinculado ao Lixão da Estrutural, pode-se afirmar que os principais pontos a serem considerados são: i) estabilização da pluma de contaminação por chorume (com bombeamento seguido de tratamento ou recirculação do efluente no maciço de resíduos); ii) recuperação das áreas de solos degradados (por revegetação com espécies arbóreas nativas) e iii) definição da destinação adequada da área após encerramento de operação da URE (após saneamento dos passivos ambientais ainda persistentes).

## 1. INTRODUÇÃO

O presente documento técnico é parte integrante do estudo intitulado “*Elaboração do Diagnóstico da Contaminação e Proposta de Remediação do Antigo Lixão da Estrutural*” e representa o Produto 3 conforme Termo de Referência que norteia a realização dos estudos. Neste relatório técnico são apresentados resultados e avaliações que compõem o diagnóstico da contaminação das águas subterrâneas, das águas superficiais, dos solos, além da proposição do mapa potenciométrico, determinação do modelo conceitual de fluxo e caracterização dos resíduos sólidos.

Os dados utilizados para a confecção do diagnóstico ambiental da área são todos gerados no decorrer da realização dos estudos, portanto, considerados dados primários, os quais são integralmente apresentados no Volume 2 do Produto 3: Apêndices e Anexos.

Para a cartografia dos limites da pluma de contaminação das águas subterrâneas foram integrados dados de estudos geofísicos e de qualidade das águas a partir de amostragem direta em poços de monitoramento especificamente instalados para fins de avaliação potenciométrica e hidroquímica. O estudo geofísico foi realizado a partir da integração de resultados de três trabalhos prévios realizados na área, além do levantamento geofísico realizado pelo presente projeto. Os trabalhos existentes são representados pela seguinte literatura: Campos *et al.* (2006); Cavalcanti (2013) e Guedes (2019).

Para a caracterização da contaminação dos solos foram realizadas análises químicas e avaliação qualitativa dos diferentes usos das terras nas adjacências da área do Lixão da Estrutural.

O texto será organizado da seguinte forma: apresentação dos resultados da contaminação das águas subterrâneas, qualidade dos recursos hídricos superficiais, mapa potenciométrico, contaminação dos solos e caracterização dos resíduos sólidos. O estudo geofísico que foi fundamental para a determinação dos limites da pluma de contaminação de chorume será apresentado em subitem específico no início do diagnóstico da contaminação dos recursos hídricos subterrâneos. Dados obtidos de amostragens de águas nos poços de monitoramento, integrados com resultados dos estudos geofísicos deverão resultar na proposição do mapa dos limites da pluma de contaminação dos aquíferos freáticos.

O relatório é estruturado em itens sucessivos que em conjunto contemplam integralmente o Termo de Referência que norteia os estudos. Inicialmente são apresentados os resultados da contaminação das águas subterrâneas e para tanto foram integrados dados de estudos geofísicos e hidroquímicos (incluindo a instalação do spoços de monitoramento). Para a determinação do sentido de migração da pluma de contaminação foi confeccionado o mapa potenciométrico do aquífero freático nas imediações da área do Lixão da Estrutural. A partir dos dados de qualidade de hídrica nos cursos d’água superficiais que drenam área de estudo foram caracterizados e classificados os córregos Cabeceira do Valo, Acampamento e Ribeirão Bananal. A contaminação

dos solos foi estudada a partir de análises de amostras simples e compostas (em duas profundidades), em pontos no interior do lixão e em suas vizinhanças. A contaminação atmosférica foi realizada de forma qualitativa, uma vez que não existem dados quantitativos de monitoramento com relação aos poluentes do ar. A quantificação e caracterização dos resíduos foram realizadas a partir de análises gravimétricas *ex-situ* e o mapeamento de sua distribuição foi alcançado a partir do mapeamento de superfície. O modelo conceitual do fluxo de contaminantes foi estabelecido a partir de dados hidráulicos obtidos dos poços de monitoramento (Slug Test), dados de ensaios de infiltração *in situ* (anéis concêntricos e *Open end Hole*), além de dados hidroquímicos. As experiências e práticas de remediação de lixões foi elaborada com base na literatura técnica e no próximo relatório técnico (Produto 4) serão apresentadas as alternativas consideradas mais adequadas ao caso específico do Lixão da Estrutural. Por fim, a partir de dados de ensaios de penetração no solo foi apresentada a caracterização geotécnica das áreas adjacentes ao lixão.

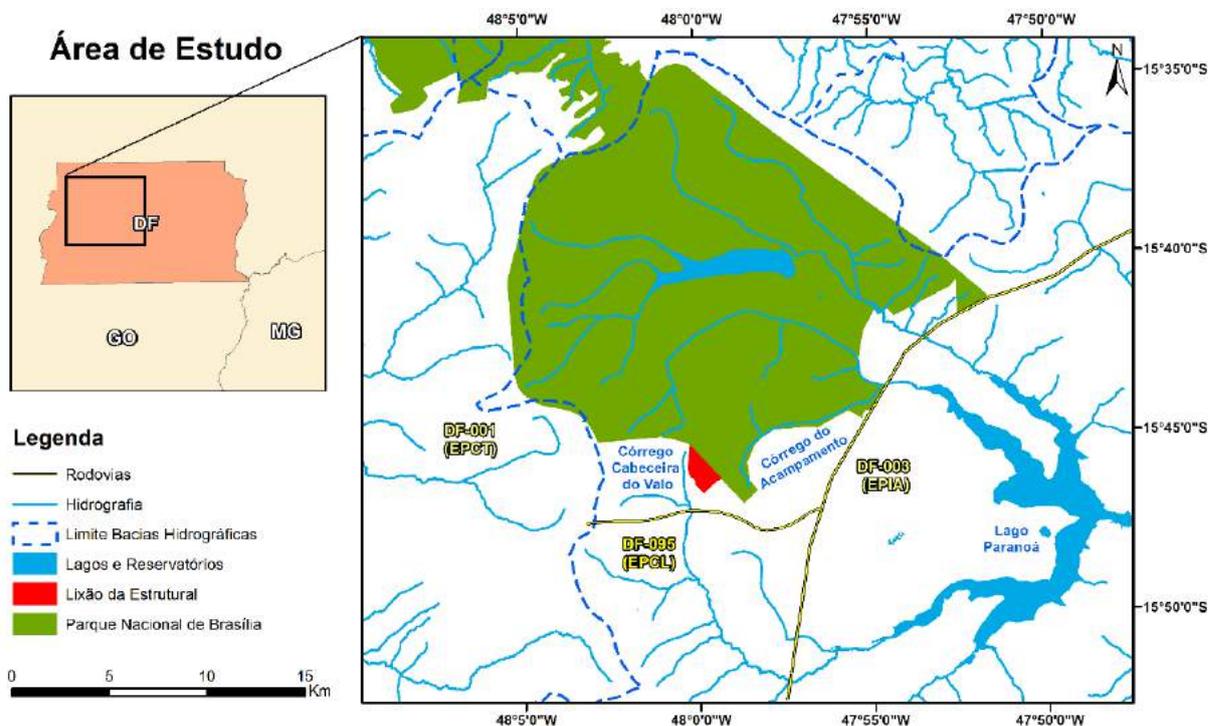
A prática de aterrar o lixo é um dos meios mais antigos de disposição de resíduos sólidos e tem sido adotada por séculos. Parte dos resíduos aterrados dá origem ao chorume, um líquido extremamente poluente com odor fétido e coloração escura, formado a partir da biodegradação da matéria orgânica. Esse efluente é uma das maiores restrições em relação ao descarte de rejeitos diretamente sobre o solo, uma vez que, durante a percolação do chorume, desde a zona vadosa até a zona saturada do aquífero, vários compostos químicos e biológicos podem ser transportados e, conseqüentemente, poluir o solo, o aquífero e as águas superficiais.

O Distrito Federal conta atualmente com 3.015.268 habitantes (IBGE, 2019), cujos resíduos sólidos foram descartados no Aterro Controlado do Jockey Club, popularmente conhecido como Lixão da Estrutural, desde o início da década de 1970 até o início de 2018. A constante atividade antrópica acarretou no aumento do volume desses resíduos, o que resultou em inúmeros problemas ambientais relacionados aos métodos inadequados de disposição e estocagem, provocando a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

À vista disso, o seguinte trabalho objetiva elaborar um diagnóstico fundamentado com testes pilotos a partir de tecnologias adequadas para o efetivo controle da contaminação e remediação dos danos causados.

## **1.1. Localização**

A área de estudo está localizada a oeste de Brasília, sendo delimitada a nordeste pelo Parque Nacional de Brasília (bacia do Córrego do Acampamento), a oeste pela cabeceira do ribeirão Vicente Pires (representada pelo Córrego Cabeceira do Valo) e a sul pela DF-095, conhecida como Via Estrutural (Figura 1).



**Figura 1** - Mapa de localização do Lixão da Estrutural (anteriormente denominado de Lixão ou Aterro Controlado do Jockey Clube).

## 1.2. Histórico

No dia 21 de abril de 1960, durante o governo do Presidente Juscelino Kubitschek, foi inaugurada a cidade de Brasília baseada no Plano Urbanístico de Lucio Costa. Um projeto arquitetônico moderno e futurista, porém, com um planejamento urbano não tão estruturado. A nova capital, como qualquer outra cidade, geraria resíduos e eles ao serem coletados deveriam ser depositados em algum local, porém a gestão dos resíduos sólidos não foi realizada de forma adequada.

Sendo assim, foi inaugurada a Usina de Tratamento de Lixo da Asa Sul (UTL), cuja função era separar o lixo que pudesse ser reaproveitado e transformar o lixo biodegradável em composto orgânico. Todavia, o que era rejeitado acabava sendo descartado no Aterro Controlado do Jockey Club (CODEPLAN, 1972). Em meados da década de 1980 o Aterro Controlado do Jockey Club passou a ser a única localidade oficial destinada ao descarte de resíduos sólidos da região.

A Política Nacional de Meio Ambiente estabelecida a partir da Lei Nº 6.938 de 31 de agosto de 1981 (Brasil, 1981) veda o descarte de resíduos sólidos em aterros. Subsequente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estipulada pela Lei Nº 12.305 de 10 de agosto de 2010 (Brasil, 2010), determinou que, a partir de agosto de 2014, os rejeitos só deveriam ser dispostos em aterros sanitários.

Posteriormente, no dia 02 de abril de 2015 foi criado o Grupo de Trabalho, com base no Decreto Nº 36.437/2015 (Distrito Federal, 2015), com o objetivo de desenvolver e implementar o Plano de Intervenção no Aterro Controlado do Jockey Club, visando dar o correto tratamento e

destinação dos resíduos sólidos urbanos, provenientes dos serviços contratados pelo Serviço de Limpeza Urbana (SLU, 2015). O Plano de Intervenção passou a ser coordenado pelo Escritório de Projetos Especiais (EPE), que foi instituído pelo governador do Distrito Federal no dia 22 de julho de 2016 (Distrito Federal, 2016).

Um dos propósitos do Plano de Intervenção foi elaborar e executar o Plano de Transição a fim de manejar os resíduos sólidos do Distrito Federal até que os centros de triagem previstos estivessem em condições de funcionamento adequadas. Outra questão ponderada foi a garantia das condições de trabalho e sustento para os catadores de matérias recicláveis durante o processo de encerramento das atividades do Aterro Controlado do Jockey Club, que teve suas atividades encerradas no dia 20 de janeiro de 2018.

Concomitantemente à instalação do aterro, algumas pessoas vislumbraram a oportunidade de sustento a partir da coleta de materiais recicláveis. Por conseguinte, a invasão das terras públicas deu origem a Vila Estrutural, hoje reconhecida como Cidade Estrutural.

Em 1º de fevereiro de 2002, foi publicada a Lei Complementar Nº 530 que declara a área da Estrutural como Zona Habitacional de Interesse Social e Público (ZHISP), estabelecendo uma faixa de tamponamento de 300 metros entre o assentamento e o Parque Nacional de Brasília (Distrito Federal, 2002).

A Cidade Estrutural somada à Cidade do Automóvel constitui o Setor Complementar de Indústria e Abastecimento (SCIA), que até então era vinculado à Região Administrativa do Guará (RA X). Só em 27 de janeiro de 2004, com a publicação da Lei Nº 3.315/2004 o SCIA passou a constituir a Região Administrativa do SCIA (RA XXV) (Distrito Federal, 2004).

## **2. TRABALHOS ANTERIORES**

Os principais trabalhos consultados como base do presente estudo incluem: Araújo (1996), Franco (1996), Santos (1996), Abreu (2001), Carneiro (2002), Campos *et al.* (2006), Campos (2007), Cavalcanti (2011), Barbosa (2014) e Guedes (2019) relacionados à geologia, à hidrogeologia, à geomorfologia, à assinatura geofísica do chorume, à caracterização química do lixiviado do lixo e à delimitação e caracterização da pluma de contaminação causada pelo aterro.

### **2.1 Araújo (1996)**

A Dissertação de Mestrado de Ricardo Natal Gonçalves de Araújo (1996) foi dedicada à caracterização química do lixiviado do lixo e apresenta os seguintes resultados principais:

- Análise da qualidade das águas a partir da amostragem de 12 poços de monitoramento e de 7 cisternas, além de coletas de amostras de águas nos córregos Cabeceira do Valo e Acampamento;

- Levantamento topográfico de poços e cisternas visando maior precisão do comportamento da pluma de contaminação;
- Monitoramento por um período de oito meses, de setembro de 1995 a abril de 1996 dos níveis e da qualidade das águas;
- Foram determinados 22 elementos, 4 compostos, além de medições de condutividade, sólidos totais dissolvidos e pH, num total de 2200 determinações;
- Foi concluído que o depósito de lixo provoca aumento da mineralização das águas subterrâneas nas vizinhanças do aterro, onde a condutividade elétrica das águas variou de 3,7 a 1.300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
- Os compostos e elementos amônia, cloreto, nitrato, fósforo, manganês, magnésio e cálcio contribuem para o aumento da condutividade das águas subterrâneas na região;
- A amônia e o cloreto são os melhores indicadores de poluição pelo lixo;
- A propagação lateral dos contaminantes é muito localizada não alcançando mais de 100 metros a partir dos centros de deposição do lixo;
- Não foi detectada contaminação dos córregos pelos componentes presentes no nível freático;
- Foi observado que a elevação da superfície freática provoca aumento da mineralização das águas, devido ao maior aporte e migração lateral de chorume.

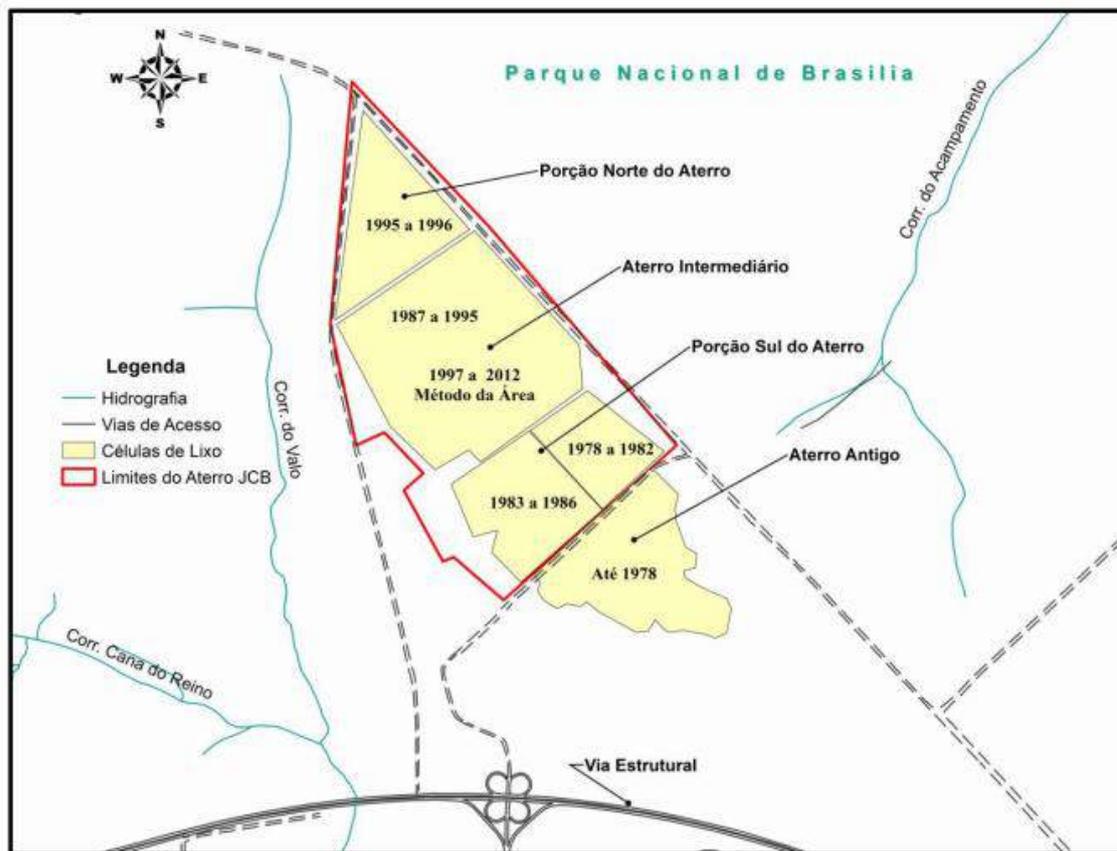
## **2.2 Franco (1996)**

A Dissertação de Mestrado de Heitor de Araújo Franco (1996) estudou a pluma de contaminação e seus limites a partir da integração de métodos geofísicos (sondagem elétrica vertical, perfilagem eletromagnética, sondagem magnetotelúrica, gradiometria magnética e sísmica de refração) e alcançou os seguintes resultados principais:

- Em função da pequena espessura da camada de lixo e do pequeno comprimento do arranjo de geofones, apenas a profundidade do nível freático pôde ser determinada pelo método sísmico;
- A análise de perfis e mapas de contorno da intensidade do campo magnético medida no sensor superior e inferior, bem com o da diferença entre eles, foi avaliada para diferenciar a área onde há lixo enterrado da área de cerrado preservado;
- A gradiometria magnética delimitou muito bem a interface aterro/cerrado, evidenciando uma grande sensibilidade do equipamento quando se transpassa de um meio para outro;
- Os dados de eletrorresistividade, perfilagem eletromagnética e química aquática revelaram que há uma pluma de contaminação rasa a partir da área do aterro em direção ao Parque Nacional de Brasília, sem, contudo definir seu limite;

- A sondagem magnetotélica constatou a possibilidade de os contaminantes atingirem as águas subterrâneas profundas caso o solo não os retenha.

O trabalho também apresentou o histórico da acumulação de resíduos a partir de informações publicadas e análises de fotografias aéreas (Figura 2).



**Figura 2** - Histórico da acumulação de resíduos sólidos no Lixão da Estrutural ou Lixão do Jockey Clube (Franco, 1996).

### 2.3 Santos (1996)

A dissertação de mestrado de Paulo César Vieira dos Santos (1996) teve como objetivo desenvolver um sistema de coleta de amostra de água na zona não saturada, monitorar a qualidade da água no aterro controlado do Jockey Club e elaborar ensaios de laboratório de amostras de solo retirados do local.

Para se coletar amostra de água na zona não saturada, foi idealizado um primeiro sistema, que se deparou com muitos problemas na prática e chegou a ser inviabilizado. Após isso, a solução definitiva foi o Sistema de Pedra Porosa, o qual utiliza uma pedra porosa que suporta pressão de bombeamento na faixa de 100 KPa acoplado a uma bomba manual de sucção, assim impedindo a passagem de resíduos sólidos pelo equipamento. A instalação do equipamento na zona não saturada foi feita a partir da perfuração a seco, ultrapassando a camada de lixo no solo. Com a aplicação de pressão na coleta de amostras, alcançou-se comumente de 20 a 200 ml de amostra em um tempo de 24 h.

Os ensaios de solo mostraram que o solo é predominantemente argiloso, e, apesar disso, a permeabilidade do solo é moderada a alta, com valores da escala de  $10^{-6}$  m/s. Isso foi explicado pela estruturação granular e grumosa do solo, que causou uma porosidade superior a 40%.

Em relação à produção de chorume, notou-se que a produção é incrementada com o aumento das chuvas, sendo comprovado que, entre os meses chuvosos de dezembro e maio, há a maior produção de chorume e, entre os meses de julho e setembro, a produção é muito menor.

As análises químicas do percolado de chorume mostraram um pH de tendência alcalina, com elevadas concentrações de amônia. Além disso, em geral, há moderadas concentrações para os elementos Cd, Fe, Mn, Ni, e P, além de concentrações baixas em Cu, Cr, Zn, Mg e Ca, e extremamente baixas em Ge, La, Mo, Ce, Y, Sr, Ti, V, Co, Ba, Be e Zr.

#### **2.4 Pereira *et al.* (1997)**

O trabalho de Pereira *et al.* (1997) apresenta vários resultados com relação a região do aterro, com destaque para a caracterização dos solos em que são definidos 4 tipos de solos:

- Solo residual laterítico representado por latossolo vermelho com textura muito argilosa, variação de espessura de 10 a 15 metros e condutividade hidráulica variável de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  m/s;
- Solo laterítico coluvionar, com textura argilosa a muito argilosa, variação de espessura de 15 a 25 metros e condutividade entre  $10^{-6}$  a  $10^{-8}$  m/s;
- Cascalho laterítico, representado por um horizonte petroplíntico de coloração marrom e aspecto concrecionário que representam zonas de antiga oscilação do nível freático;
- Solo saprolítico de ardósia e quartzito, com condutividade hidráulica respectivamente de  $10^{-8}$  m/s e  $10^{-5}$  m/s.

#### **2.5 Junqueira (2000)**

A tese de doutorado de Fernando de Faria Junqueira (2000) intitulada “*Análise do comportamento de resíduos sólidos urbanos e sistemas filtro-drenantes em diferentes escalas, com referência ao Aterro do Jôquei Clube - DF*” representa um trabalho de pesquisa com grande contribuição ao conhecimento na região do Lixão da Estrutural. O trabalho apresenta um levantamento de literatura sobre o meio físico da região, sobre as características químicas do chorume, vazões de produção de chorume, além de construir e monitorar vários experimentos de células filtrantes em diferentes escalas.

Dois experimentos são destacados, os quais são denominados de CMA: “Célula Membrana Areia” e CMG: “Célula Membrana Geocomposto”. Estas células foram diretamente preenchidas por lixo com compactação que resultou na densidade de  $0,7 \text{ t/m}^3$ . Além das células

também foram produzidas caixas experimentais de aterros, com compactação que resultou na densidade  $0,3 \text{ t/m}^3$  nestes sistemas.

O trabalho apresentou a caracterização gravimétrica dos resíduos oriundos das cidades do Gama e Sobradinho, respectivamente, com as seguintes proporções: papel 12,4 e 9,9%; papelão 12,8 e 10,1%; plástico fino 10,9 e 13,5%; plástico duro 6,7 e 7,8%; matéria orgânica 47,5 e 46,6%; latas 4,14 e 3,1% e outros 5,6 e 9,0%.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa a composição do chorume foi monitorada a partir da análise de diferentes parâmetros: pH, nitrato, amônia, demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio e cloreto.

As seguintes conclusões deste trabalho podem ser destacadas:

- A impermeabilização das células experimentais alcançaram os resultados esperados, uma vez que a decomposição dos resíduos se deu em ambiente anaeróbico, isto é, a impermeabilização restringiu a entrada de ar atmosférico para o interior das células;
- A impermeabilização do fundo das células CMA e CMG funcionou de forma satisfatória, no sentido de não permitir a infiltração do chorume para o solo subjacente;
- Os sistemas de drenos de chorume associado às células CMA e CMG funcionaram de formas distintas. O dreno sintético libera o chorume de forma imediata, enquanto no filtro de areia há um retardo na liberação do chorume;
- O resíduo depositado nas células experimentais sofre recalques sucessivos, em função da transformação da matéria orgânica em gases e líquidos;
- O volume de chorume gerado é condicionado pela sazonalidade climática, nos períodos secos do ano há redução significativa da produção do percolado de lixo e nos picos do período chuvoso há aumento. A compactação do lixo no aterro é outro fator que determina o volume de produção de chorume: quanto maior a compactação, menor a produção de chorume.
- A composição do chorume muda sensivelmente quando analisados os percolados das células CMA, CMG e caixas de aterros. A variação é decorrente do tempo de permanência do chorume em contato com o lixo e na densidade do aterro final. Independentemente do tipo de experimento, os valores das substâncias químicas eram elevados com destaque para: cloretos, nitrogênio na forma de amônia e nitrato, demanda química de oxigênio e demanda bioquímica de oxigênio.

## **2.6 Abreu (2001)**

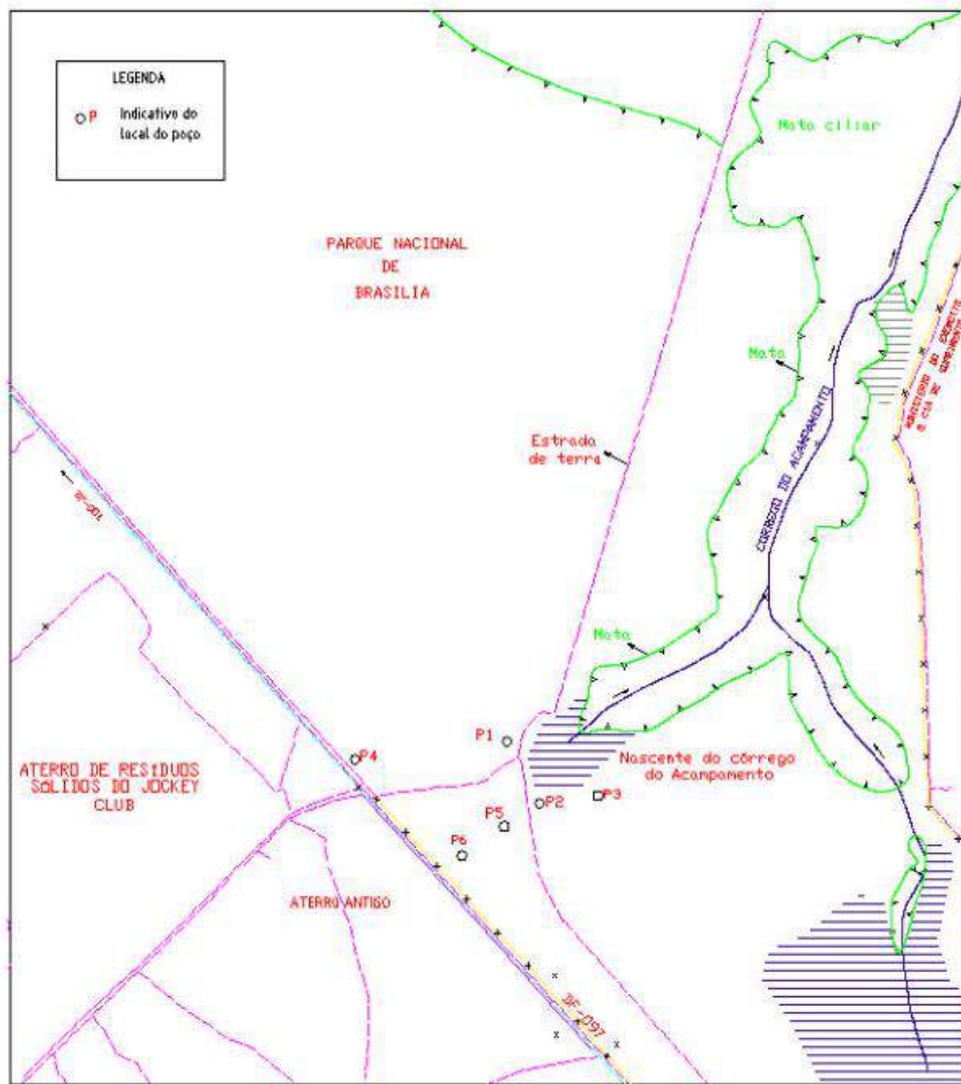
A Dissertação de Mestrado de Feliciano de Abreu (2001) objetivou definir a possível interferência da pluma de contaminação do lixão com a contaminação das piscinas do Parque

Nacional de Brasília (Água Mineral de Brasília). Os principais resultados desta pesquisa são:

- Foram realizados o acompanhamento e a avaliação da qualidade da água subterrânea junto à nascente do Córrego do Acampamento como forma de detectar uma possível contaminação provocada pelo aterro do Jockey Club;
- Para realização dos estudos, foram instalados poços de monitoramento que permitiram, também, uma melhor avaliação do perfil de solos do local;
- Foram coletadas amostras de água nas fontes, nos poços e nos cursos de água da área próxima as fontes e instalado um pluviômetro na área do Parque para o acompanhamento dos índices pluviométricos;
- Os estudos realizados indicam que a principal fonte de contaminação das águas da fonte é a infiltração das águas de escoamento superficial, que carrega os contaminantes para o aquífero;
- Devido à pequena profundidade do nível freático próximo à fonte que alimenta a piscina, o aquífero é pouco protegido e a ocorrência de eventos de contaminação das águas da fonte é observada após eventos de precipitação;
- A contaminação da nascente do Córrego do Acampamento não está vinculada à pluma de contaminação do Aterro do Jockey Club (Lixão da Estrutural).

O trabalho de Abreu (2001) foi pioneiro na instalação de poços de monitoramento. Os trabalhos anteriores utilizaram poços existentes na região (em geral cisternas para bombeamento de água utilizada em irrigação de pequenas culturas). A Figura 3 mostra a disposição dos poços instalados por ocasião do desenvolvimento deste trabalho (com profundidade máxima de 8,9 metros) e as Tabelas 1 e 2 mostram resultados analíticos como exemplo dos resultados obtidos por Abreu (2001).

Os resultados apresentados na Tabela 1 que representam valores reduzidos das substâncias avaliadas mostram que o Poço 5 apresenta profundidade insuficiente, pois como a pluma de chorume é densa esta tende a migrar verticalmente e os poços para alcançar seu topo devem ter maiores profundidades. Poços rasos permitem obtenção de amostras de águas de chuva que se infiltram para a recarga dos aquíferos intergranulares locais.



**Figura 3** - Mapa de distribuição dos poços de monitoramento instalados com auxílio de trado manual (Abreu, 2001).

Parâmetro \ Coleta	13/Set/00	02/Out/00	15/Fev/01	21/Mar/01
Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )	14,2	14,3	9,3	8,7
STD (ppm)	9,8	9,9	6,5	6,1
pH	6,17		4,87	5,41
Turbidez (uT)		0,485		0,174
Nitrogênio Amoniacal - mg N ( $\text{NH}_3$ ) / L		0,03	0	-0,01
Nitrito - mg N ( $\text{NO}_2$ ) / L				0,004
Nitrato - mg N ( $\text{NO}_3$ ) / L	0	0	0	0
Cloreto (mg/L)	0,8	0,3		0,4
Coliforme Total (NMP/100ml)		10,9	0	
Escherichia Coli (NMP/100ml)		0	0	

**Tabela 1** - Resultados analíticos de amostras de água subterrânea coletadas no Poço 5 (Abreu, 2001).

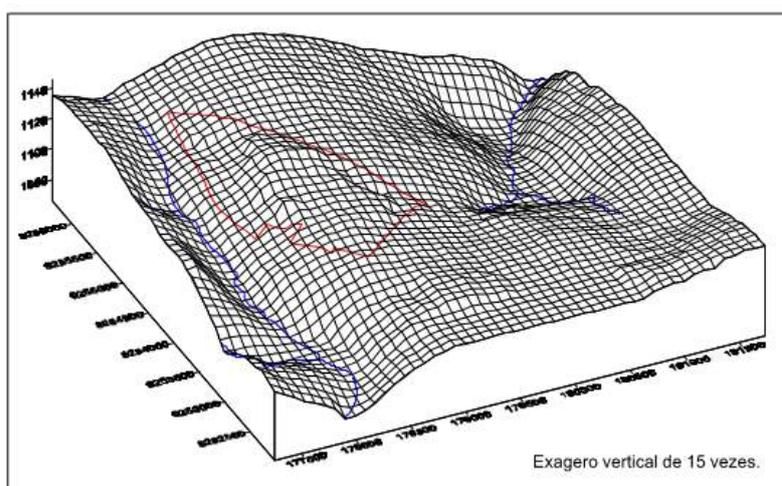
Parâmetro \ Coleta	20 /Jul/00 (Amostra 1)	20/Jul/00 (Amostra 2)
Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )	5,4	4,6
STD (ppm)	--	--
pH	4,8	5,3
Turbidez (uT)	--	--
Nitrogênio Amoniacal - mg N ( $\text{NH}_3$ ) / L	--	--
Nitrito - mg N ( $\text{NO}_2^-$ ) / L	0,004	0,003
Nitrato - mg N ( $\text{NO}_3^-$ ) / L	0 (ausente)	- 0,1
Cloreto (mg/L)	- 0,7	- 0,3
Coliforme Total (NMP/100ml)	114,5	0 (ausente)
Escherichia Coli (NMP/100ml)	53,7	4,1

**Tabela 2** - Resultados analíticos de amostras de água subterrânea coletadas na nascente do Córrego do Acampamento (Abreu, 2001).

## 2.7 Carneiro (2002)

A dissertação de mestrado de Gustavo Antônio Carneiro (2002) teve como objetivo caracterizar a situação da contaminação das águas subterrâneas na região do aterro do Jockey Club e adjacências, por meio de análises da qualidade da água. Além disso, a realização de modelagens matemáticas, que permitiram a simulação do fluxo subsuperficial e do transporte de contaminantes no meio poroso, bem como a projeção de cenários futuros.

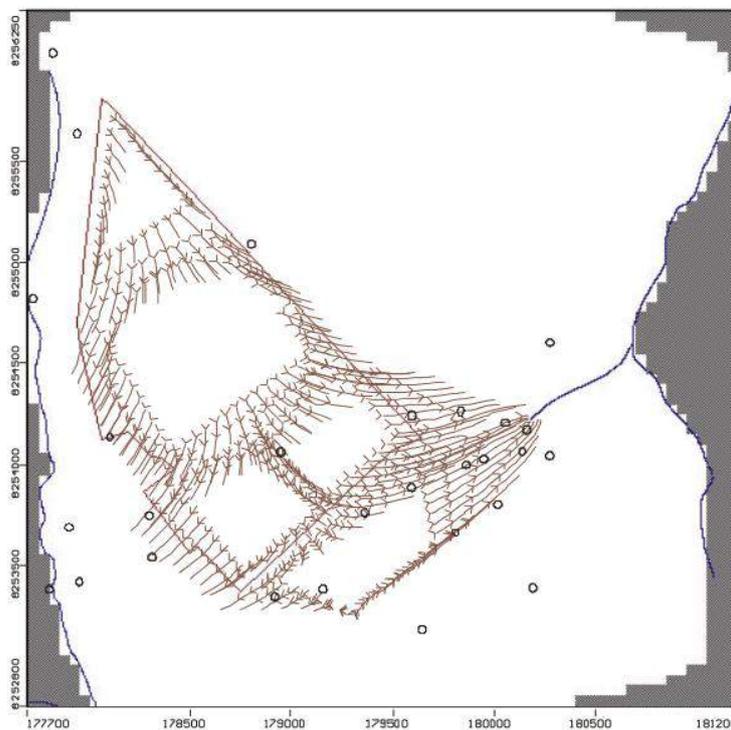
Na campanha de amostragem da pesquisa, foram utilizados 11 poços rasos de monitoramento no Parque Nacional de Brasília, 1 poço no interior do aterro e 14 cisternas nas regiões habitadas, além de 3 pontos para coleta de água no córrego Cabeceira do Valo e 1 na nascente do córrego do Acampamento. Para as modelagens, foram utilizados os *softwares* HELP, MODFLOW, MODPATH e SPRING com uso de *grid* regular mostrado na Figura 4.



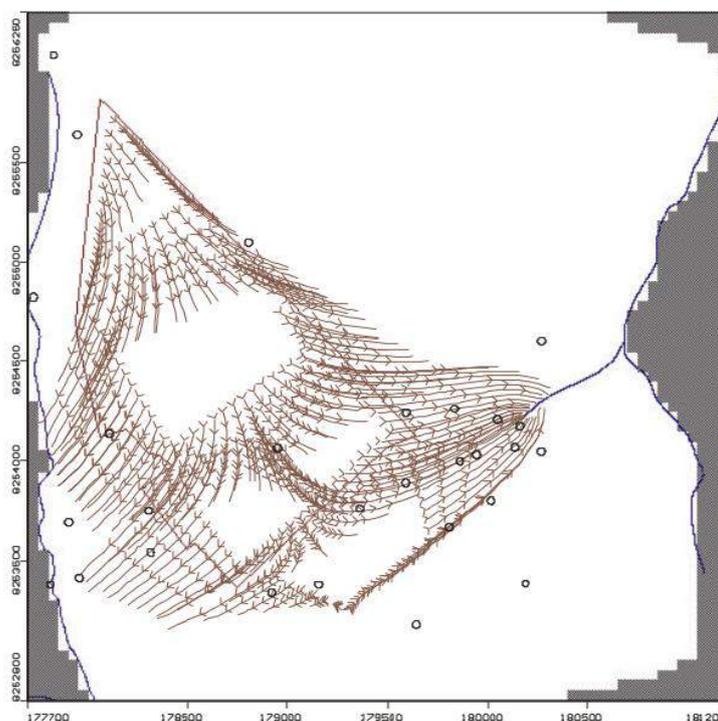
**Figura 4** - Grid de distribuição dos elementos aplicados à modelagem matemática na região do Lixão da Estrutural (Carneiro, 2002).

Como resultado da campanha de qualidade da água e das modelagens matemáticas, foram observadas duas frentes de contaminação das águas subterrâneas: uma em direção à nascente do córrego do Acampamento e outra em direção ao córrego Cabeceira do Valo (Figura 5). Dentre os

parâmetros analisados, a amônia, o cloreto, a DQO e a condutividade elétrica se mostraram bons indicadores de contaminação, exibindo mais altas respostas no poço localizado no interior do aterro. As simulações de cenários futuros para os anos de 2010 (Figura 5), 2030 (Figura 6) e 2050 apontam à seriedade do problema, que tende a se agravar com o passar dos anos.



**Figura 5** - Mapa de sentido de fluxo mostrando que a pluma se divide para leste e oeste respectivamente em direção ao Córrego do Acampamento e Córrego Cabeceira do Valo (Carneiro, 2002). Modelo previewal para o ano de 2010.



**Figura 6** - Modelo previewal para o ano de 2030 (Carneiro, 2002).

## **2.8 Campos *et al.* (2006)**

O relatório do estudo desenvolvido por José Eloi Guimarães Campos e colaboradores definiu uma delimitação com precisão dos limites do Aterro do Jockey e, de forma preliminar, os aspectos geotécnicos locais, sendo que a área do estudo corresponde ao antigo aterro, com deposição de lixo anterior a 1992. Na época da deposição desse lixo, não houve controle algum em relação à delimitação de áreas de acumulação de resíduos, tampouco foram feitos mapas de controle.

Os métodos de perfuração utilizados no trabalho foram: sondagem com ensaio SPT, sondagem mecânica helicoidal e sondagem manual a trado. No ensaio SPT, são utilizados tubos cravados no solo a partir de quedas sucessivas de martelo, inferindo a resistência geotécnica. Na sondagem mecânica helicoidal, é utilizado um caminhão perfuratriz rotativo autopropulsionado para atravessar o solo. A sondagem manual a trado era utilizada em locais inacessíveis aos outros equipamentos.

Com base nos dados das sondagens, um novo limite do aterro foi definido, a partir da junção de áreas com presença de lixo no solo. O limite do aterro foi sensivelmente inferior ao inferido por Franco (1996), passando de 4638 ha para 3749 ha.

A observação do material retirado a partir das sondagens levou à divisão dos resíduos em quatro tipos: lixo orgânico, lixo inorgânico, lixo composto e restos de obra (aterro). Foram feitos 109 furos mecânicos e 16 furos manuais.

A partir das sondagens, foi possível concluir que a porção do solo com presença de lixo possui alta penetrabilidade e heterogeneidade, podendo gerar risco geotécnico a obras civis instaladas na região. A instabilidade causada pode ser contornada se as fundações de futuras obras de habitação coletiva forem profundas, atravessando todo o limite do lixo. Além disso, as fundações devem ser impermeabilizadas, a fim de evitar a corrosão causada pela água subterrânea, devido à mistura com o chorume.

Já a porção externa do aterro apresenta condições geotécnicas semelhantes ao resto do Distrito Federal, com pouco risco geotécnico.

## **2.9 Campos (2007)**

O relatório de José Eloi Guimarães Campos (2007) delimitou e caracterizou a pluma de contaminação de chorume produzida pelo lixo doméstico despejado no Aterro do Jockey Club, além de representar um laudo técnico para o licenciamento ambiental, de forma a se definir a possibilidade de ocupação urbana de parte da área.

Há uma ampla variedade composicional do chorume na área, e a concentração também varia. Porém, os locais de maior contaminação são as zonas de acumulação de lixo, com diminuição progressiva das substâncias dissolvidas com a sua migração para áreas distantes no

núcleo de acumulação de resíduos.

A água subterrânea contaminada sofre aumento significativo no seu pH e nos teores de elementos e substâncias dissolvidas. Os principais elementos e substâncias responsáveis pela mineralização do chorume são: potássio, cloreto, cálcio, magnésio e nitrato.

A partir dos furos das sondagens geotécnicas, foram coletadas amostras de água de maiores profundidades, que mostraram que, enquanto em profundidades rasas, o chorume se apresentava alcalino, em maiores profundidades, ele se apresenta fortemente ácido. Além disso, a pluma de contaminação aumenta em maiores profundidades, provavelmente por causa da alta densidade do chorume.

Utilizando-se de informações hidrodinâmicas dos aquíferos locais, foi realizado um cálculo preliminar estimando-se a velocidade média do fluxo da contaminação da pluma em 22 metros por ano. A relativa contenção da pluma é causada pela baixa condutividade hidráulica local de seus solos com textura muito argilosa, além do pequeno gradiente hidráulico e a retenção de parte da carga contaminante.

Outro resultado do trabalho afirma que para minimizar ao máximo os riscos de contaminação para as populações assentadas, os aquíferos locais não devem ser utilizados para nenhuma atividade.

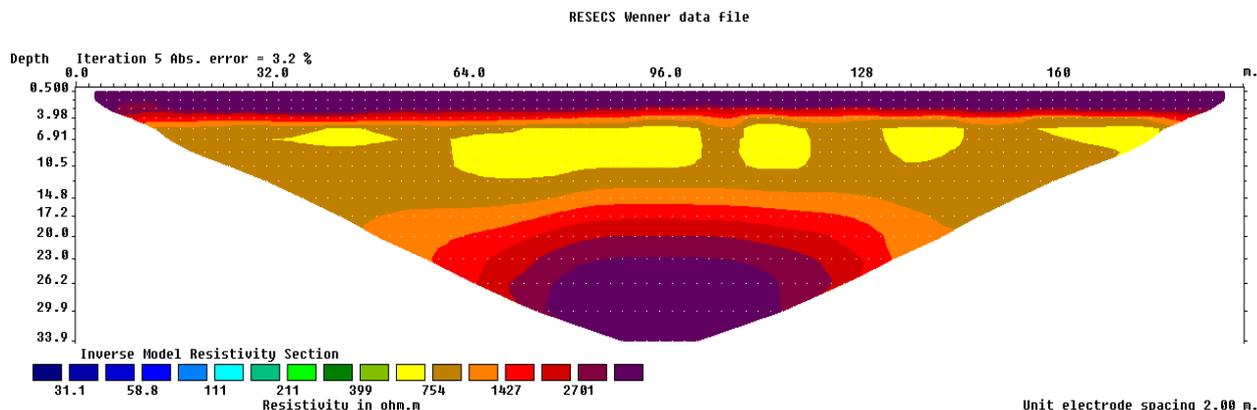
A pluma de contaminação tem maior expansão em direção ao Parque Nacional de Brasília. Para a minimização da expansão da pluma, devem-se impermeabilizar áreas do aterro antigo, intermediário e recente, e as águas acumuladas nesse processo devem ser infiltradas em trincheiras de recarga para diluir a pluma. Além disso, deve-se paralisar a acumulação de lixo e fechar a área.

## **2.10 Holger (2011)**

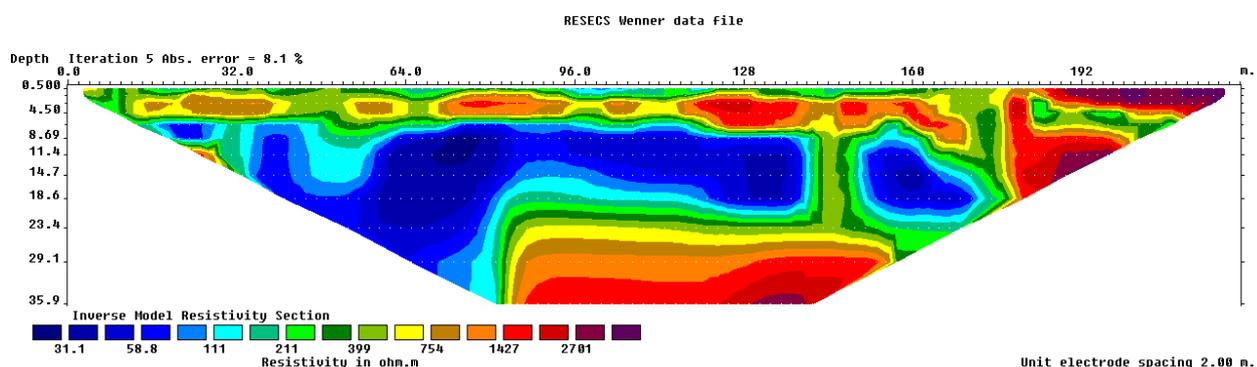
O trabalho de Reiner Stollberg Holger (2011) intitulado “*Municipal waste disposal Lixão do Jóquei, Brasília, Distrito Federal do Brasil: site investigation, groundwater monitoring and hydrochemical analysis*” objetivou determinar os limites da pluma de contaminação baseado em estudos geofísicos, com auxílio do método de eletrorresistividade com arranjo dipolo-dipolo.

Foram realizadas sete linhas de geofísica sendo duas no interior da área do Parque Nacional de Brasília (em áreas reconhecidamente sem presença de chorume) e cinco nas adjacências do aterro. As Figuras 7 e 8 mostram exemplos de resultados obtidos.

Como não foi possível realizar aquisição de dados nas áreas externas, não foi possível determinar a projeção da pluma de chorume, principalmente para o interior do Parque Nacional de Brasília.



**Figura 7** - Exemplo de seção geofísica 7 mostrando região sem presença de pluma de chorume. Toda a área investigada apresenta alta resistividade. Seção situada no interior do Parque Nacional de Brasília em local distante dos limites do lixão (resultado obtido no Projeto IWAS/ UnB/ CAESB, Holger, 2011).



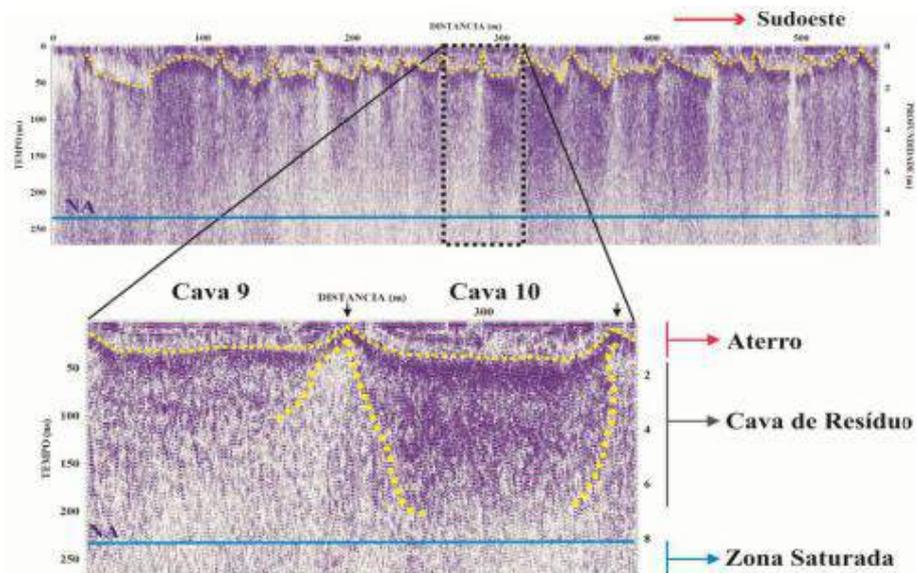
**Figura 8** - Exemplo de seção geofísica 3 mostrando a região de ocorrência da pluma de chorume em profundidade. As faixas de baixa resistividade indicam a presença de íons presentes no percolado de resíduos sólidos. Seção situada no limite entre o depósito atual e o lixo antigo (resultado obtido no Projeto IWAS/ UnB/ CAESB, Holger, 2011).

## 2.11 Cavalcanti (2013)

A Dissertação de Mestrado de Márcio Maciel Cavalcanti (2013) investigou a evolução da pluma de contaminação causada pelo Aterro Controlado do Jockey Club, além de delimitá-la a partir de métodos geofísicos elétricos do tipo *Ground Penetrating Radar* (GPR) e Eletrorresistividade 2D.

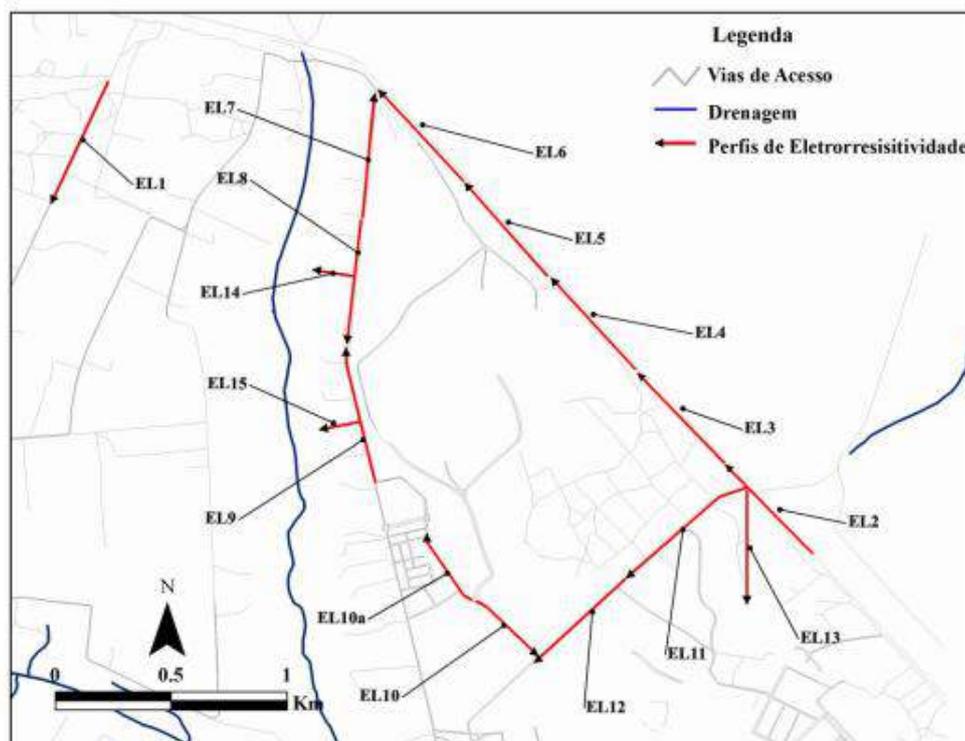
Os métodos geoeletricos têm forte aplicação em casos de contaminação de chorume devido ao forte contraste de resistividade e condutividade causado pela presença do lixiviado. O chorume exibe características de baixa resistividade e alta condutividade no local de sua contaminação.

O primeiro método empregado no estudo foi o GPR, com uma antena blindada de 200 MHz. A velocidade média de propagação da onda eletromagnética foi de 0,07 m/ns e foi possível atingir uma profundidade de 9,45 metros. O GPR mostrou uma forte atenuação do sinal eletromagnético na presença de contaminação pelo chorume e grande ocorrência de refletores descontínuos de alta amplitude por conta de resíduos sólidos enterrados, que estão relacionados a lixo e entulho descarregados no local. O GPR também pôde mostrar com maior clareza os locais de antigas cavas onde se depositava e enterrava o lixo (Figura 9).

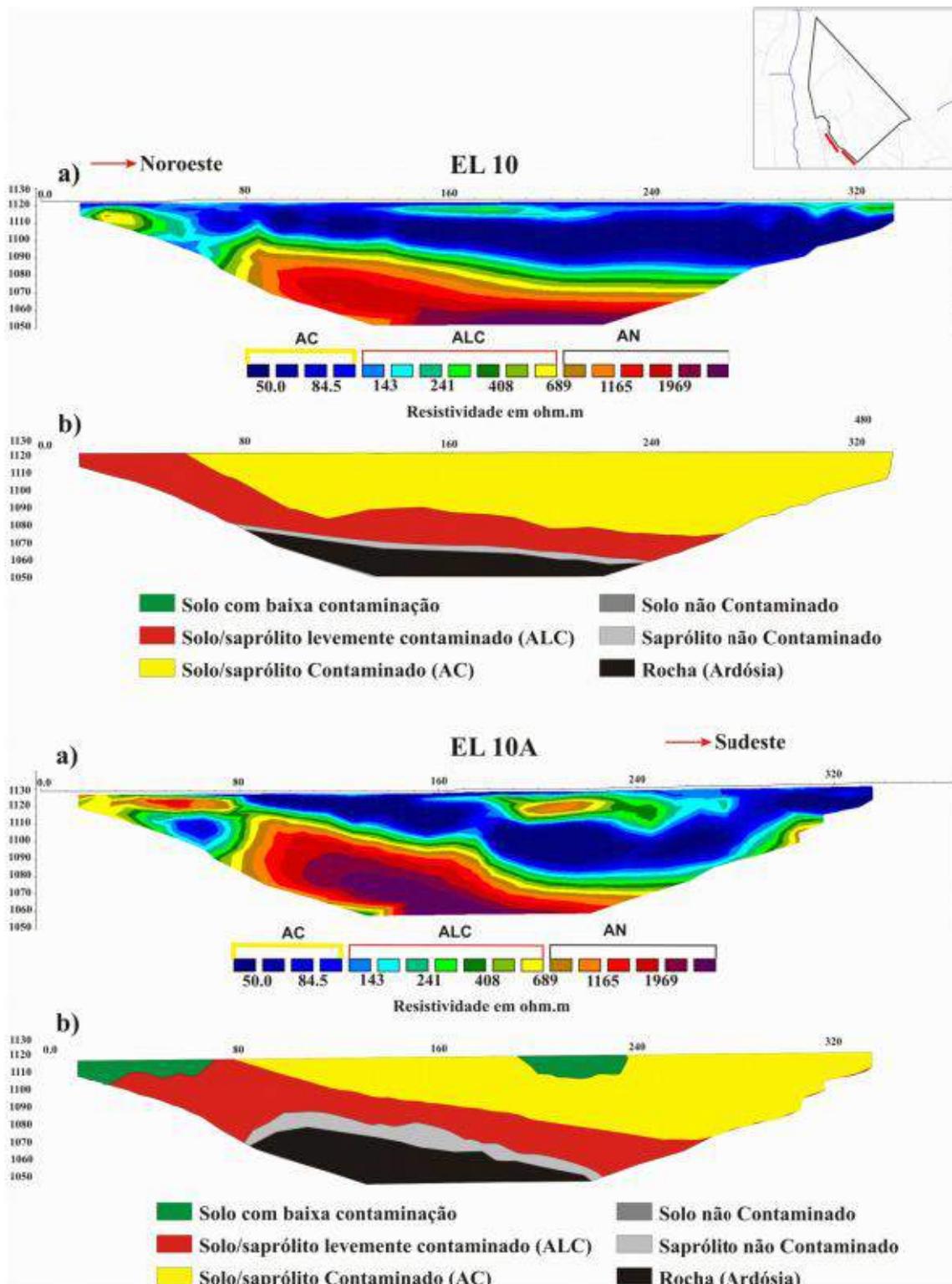


**Figura 9** - Exemplo de resultado obtido com uso do Radar de Penetração no Solo, com indicação de cava de resíduo (Cavalcanti, 2013).

Quinze seções de aquisições de eletrorresistividade foram levantadas nos limites externos do aterro, a partir das técnicas de caminhamento elétrico e arranjo dipolo-dipolo (Figura 10). As seções de eletrorresistividade mostraram contaminação em todo o limite do aterro, de acordo com a baixa resistividade exibida, com grandes zonas de solo/saprólito contaminado a levemente contaminado (Figura 11).



**Figura 10** - Distribuição das seções geofísicas (tomografia elétrica por eletrorresistividade) realizadas nos limites da área do Lixão da Estrutural (Cavalcanti, 2013).



**Figura 11** - Exemplos de seções geofísicas interpretadas que foram levantadas na porção sudoeste da área do Lixão da Estrutural (Cavalcanti, 2013).

## 2.12 Barbosa (2014)

O trabalho de Monografia de Graduação apresentado por Laila Queiroz Barbosa (2014) intitulado “Remediação de área degradada por resíduos sólidos urbanos: estudo de caso Jockey Club de Brasília - DF”, teve como alvo a proposição de ações para a remediação da área degradada pelo Lixão da Estrutural.

A poligonal do Lixão da Estrutural foi classificada como área contaminada sob intervenção, uma vez que a contaminação com concentrações de substâncias químicas no solo e nas águas subterrâneas acima dos valores de referência já foi previamente determinada, sendo necessárias intervenções para remediação.

O trabalho mostra que a área de disposição de resíduos é um divisor hidrográfico, de forma que os efluentes migram para leste (em direção às nascentes do Córrego do Acampamento) e para oeste (em direção ao curso do Córrego Cabeceira do Valo) afluente direto do Ribeirão Vicente Pires.

Dentre as ações de intervenção o trabalho enumera as seguintes técnicas que podem ser aplicadas para a mitigação do impacto ambiental na região:

- Barreiras verticais do tipo parede diafragma plástica, com intuito de conter a propagação da pluma aos corpos hídricos e evitar a contaminação das águas subterrâneas, por meio do impedimento de fluxos horizontais de água contaminada do material isolado para o solo adjacente;
- Células impermeáveis na porção norte e sul (nas células mais antigas do lixão) - consiste na impermeabilização das células com o uso de geomembranas - no eixo horizontal ao fundo, com o intuito de homogeneizar a topografia, através do processo de codisposição, intercalando os resíduos velhos e os resíduos novos, criando células com mesma altura observada no alto topográfico, causado pela disposição na região intermediária, dando continuidade da área para disposição de resíduos;
- Barreira hidráulica constituída por poços verticais de bombeamento e ponteiros filtrantes, que são instalados ao longo de uma linha, geralmente no limite da pluma de contaminação ou dentro da própria pluma, alterando seu fluxo e tratando o líquido bombeado;
- Atenuação natural monitorada, que consiste na resposta natural de sistemas hidrológicos à contaminação, envolvendo processos físicos, químicos e biológicos que, sob condições favoráveis, agem sem intervenção humana, reduzindo massa, toxicidade, mobilidade, volume ou concentração de contaminantes no solo ou nas águas subterrâneas com o tempo ou distância da fonte.

### **2.13 Monteiro Filho (2018)**

A dissertação de Arthur Monteiro Filho (2018) foi intitulada “Hibridização de gás confinado em depósitos de resíduo sólido urbano com heliotérmica para geração de energia - o caso do Lixão da Estrutural no DF”.

O trabalho apresenta os seguintes resultados com relação ao Lixão da Estrutural:

- A geração de energia elétrica de forma consorciada entre a tecnologia solar térmica com o uso do gás gerado pela decomposição dos resíduos pode ser vantajosa do ponto de vista ambiental;
- O campo solar pode aumentar a eficiência da geração térmica pela queima do gás de forma a se minimizar os efeitos da liberação do metano produzido. Mesmo com a produção de CO<sub>2</sub> pela queima do hidrocarboneto ainda há vantagem, pois o CO<sub>2</sub> menos nocivo à atmosfera que o metano;
- O trabalho ainda mostra que é necessário melhor conhecer o maciço de resíduos sólidos para que se possa prever a produção dos gases;
- Devem-se testar diferentes configurações de usinas heliotérmicas para se verificar a eficiência da hibridização entre energia solar e energia produzida pela combustão do gás produzido pelo aterro.

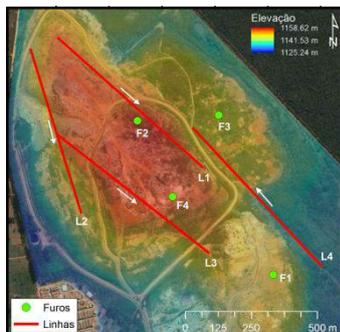
#### **2.14 Guedes (2019)**

O trabalho de conclusão do curso de geofísica, realizado na Universidade de Brasília por Victor José Cavalcanti Bezerra Guedes intitulado “Caracterização da assinatura sísmica e geoeétrica do Aterro Jockey Clube de Brasília” propôs aplicar a integração de métodos geofísicos para a determinação de parâmetros no maciço de resíduos sólidos. Os resultados de tomografias elétricas obtidas a partir de diferentes arranjos de eletrodos são mostrados na Figura 12.

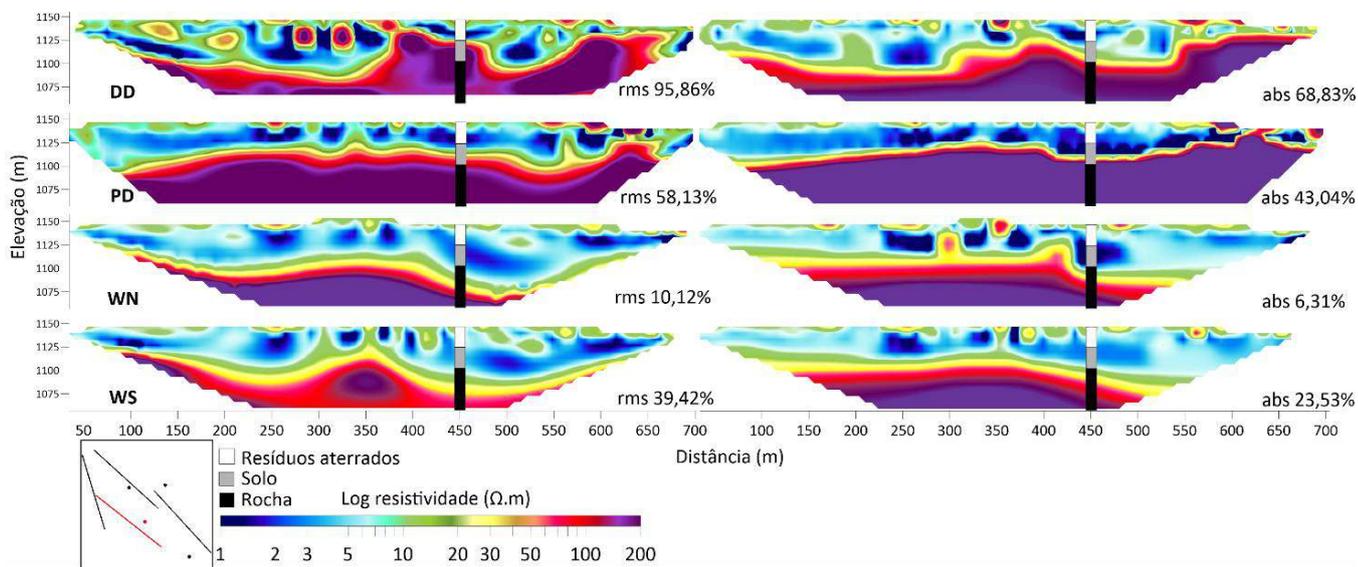
Este estudo foi focado apenas na porção de acumulação de resíduos não tendo se preocupado com as áreas adjacentes de migração da pluma de contaminação.

Dentre os principais resultados podem ser enumerados:

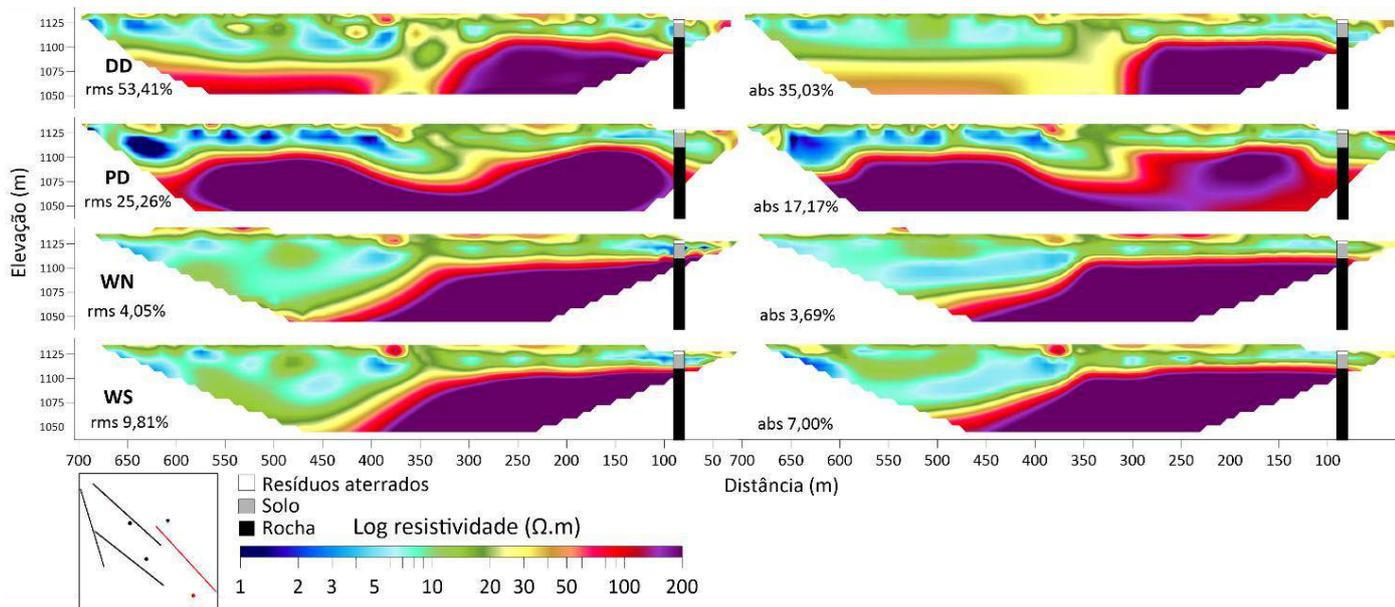
- Dentre os diferentes arranjos eletródicos avaliados dipolo-dipolo, polo-dipolo, Wenner e Wenner- Schlumberger o que apresentou a melhor solução para determinar o limite resíduo-rocha foi o caminhamento polo-dipolo;
- A profundidade do limite resíduo-rocha varia de 25 a 45 metros, a qual foi determinada pela combinação do método elétrico em associação com o método de sísmica de refração;
- O trabalho conclui que a associação dos dois métodos é interessante para estudar aterros de resíduos sólidos, entretanto para que a sísmica funcione de forma mais eficiente nas áreas com maiores espessuras de resíduos, é necessário que a fonte de energia tenha maior potência, como queda de peso ou explosivos;
- Os resultados indicam que a rocha abaixo do maciço de resíduos apresenta suas características geotécnicas modificadas, provavelmente, em função da presença de chorume.



A



B



C

**Figura 12** - A: localização das linhas com relação ao maciço de resíduos. B: Linha L3, mostrando a presença de choroço distribuído na porção superior com até 50 metros de espessura. C: Linha L4, mostrando presença de choroço a profundidades de cerca de 20 metros ao sul e até mais de 75 metros na porção norte da linha coincidente com a principal faixa de acumulação de resíduos na porção central do lixão da Estrutural. Observação: as figuras dispostas à direita e à esquerda representam diferentes métodos de inversão dos dados brutos obtidos em campo (Guedes, 2019).

### 3 SÍNTESE SOBRE O MEIO FÍSICO LOCAL

#### *Geologia*

A geologia da área de estudo é representada por ardósias da Formação Ribeirão do Torto do Grupo Paranoá. A determinação do contexto geológico foi feita com base nos estudos regionais de Freitas Silva & Campos (1998) e a partir das informações de subsuperfície obtidas no estudo de Campos *et al.* (2006). Na região predominam amplamente ardósias roxas, friáveis, com duas clivagens bem definidas, além de restritas camadas e lentes arenosas, e apenas na porção mais rebaixada, ao longo do vale do córrego do Cabeceira do Valo, ocorrem metarritmitos intemperizados, com camadas arenosas intercaladas com camadas argilosas.

O trabalho de Junqueira (2000), a partir de dados de sondagens realizadas na área do lixão, admite a presença de materiais arenosos em profundidade. Entretanto esta informação não foi confirmada por nenhum trabalho realizado posteriormente na região. Caso realmente ocorram camadas arenosas duas hipóteses podem ser avaliadas para sua explicação: presença de lentes arenosas que esporadicamente ocorrem na Formação Ribeirão do Torto, ou exposição da porção superior da Formação Ribeirão Piçarrão do Grupo Paranoá (que é exposta em zonas axiais de dobras anticlinais na região da Depressão do Paranoá).

#### *Solos*

O conjunto rochoso de ardósia se encontra sobreposto por espessa camada de latossolo vermelho e latossolo vermelho-amarelo, com espessura mínima de 5 metros que pode alcançar até mais de 30 metros na porção elevada da área (Embrapa, 1978). Os solos apresentam textura muito argilosa a argilosa e são muito ricos em óxidos e hidróxidos de ferro e pobres em argilominerais. Os solos são estruturados, sendo a estrutura grumosa a mais comum em profundidade e a estrutura granular, pequena observada nos horizontes superficiais.

Parte dos solos está contaminada com metais e outros materiais derivados da decomposição do lixo, entretanto na maior parte da área os espessos latossolos apresentam suas feições naturais preservadas.

Na região ocorrem áreas com movimentação de solos que permitem a observação da porção superior dos perfis de latossolos. Nestes perfis é possível observar aterros de materiais alóctones e remoção de horizontes superficiais.

A Figura 13 mostra um perfil aberto na área do Lixão.



**Figura 13** - Porção superior de perfil de Latossolo Vermelho de textura muito argilosa. Estrutura granular no horizonte A e AB e textura grumosa no horizonte Bw.

### *Hidrogeologia*

Na área de propagação da pluma de contaminação ocorre o Sistema **P<sub>1</sub>** no contexto das águas rasas (Domínio Intergranular) e o Subsistema **A** (do Sistema Paranoá) relacionado às águas profundas no domínio dos reservatórios fraturados (Barros, 1987 e 1994; Amore, 1994; Campos & Freitas-Silva, 1998, Campos & Freitas-Silva, 1999; Campos & Tröger 2000 e Campos 2004).

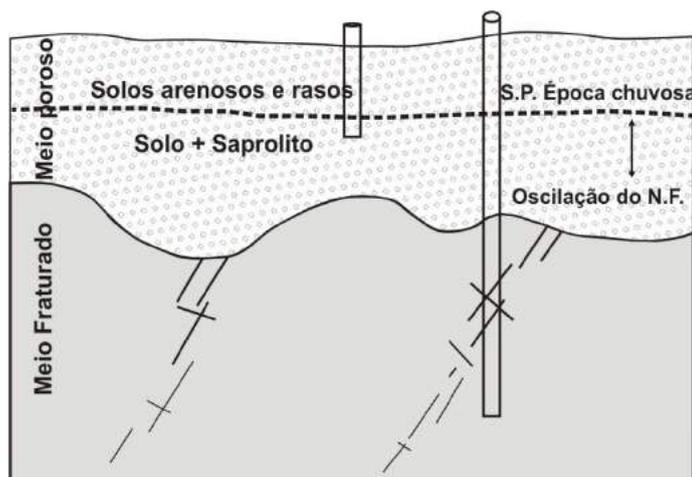
O Sistema **P<sub>1</sub>** na área em estudo apresenta as seguintes características: é definido como um sistema heterogêneo e anisotrópico; apresenta espessura saturada da ordem de 30 metros; tem zona não saturada variando de 3 metros (período chuvoso) até mais de 10 metros (meses mais secos do ano), condutividade hidráulica variando da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  m/s e apresenta elevada vulnerabilidade em decorrência da restrita espessura da zona vadosa.

O subsistema **A** é definido como fortemente anisotrópico e heterogêneo, com condutividade hidráulica média da ordem de  $10^{-7}$  m/s, com vazões médias de 4.500 L/h (com alta incidência de poços secos), restrita continuidade lateral, é considerado como de reduzida vocação hidrogeológica e apresenta vulnerabilidade baixa a muito baixa.

Um aspecto importante na hidrogeologia da região é associado ao restrito gradiente hidráulico observado no divisor hidrográfico. Este dado associado à baixa condutividade hidráulica e restrita porosidade efetiva resulta em baixa velocidade linear média do fluxo subterrâneo.

Os dados existentes indicam que os dois domínios hidrogeológicos locais estejam contaminados pelo choro produzido pelo lixão. Atualmente a pluma deve migrar na porosidade intergranular de latossolos e na porosidade matricial e secundária planar de ardósias.

Segundo as informações de solos, relevo e geologia a região do Lixão da Estrutural é considerada como associada ao modelo de superfícies potenciométrica única sem confinamento segundo as diretrizes de Lousada (2005) e Lousada & Campos (2005) (Figura 14).



**Figura 14** - Modelo de Superfície Potenciométrica Única sem confinamento, onde a superfície de saturação permanece no meio aquífero intergranular superior. SPMP - superfície potenciométrica do meio poroso; SPMF - superfície potenciométrica do meio fraturado (Lousada, 2005).

### *Clima*

Os dados expressos na Tabela 3 mostram que a distribuição pluviométrica no ciclo hídrico apresenta o padrão típico da região centro-oeste do Brasil e do domínio morfoclimático dos cerrados. O regime de chuvas caracteriza a forte sazonalidade e apresenta duas estações bem definidas: um verão chuvoso e inverno seco. Durante os meses de novembro, dezembro e janeiro são precipitados, em média, 47% do volume total das chuvas.

A partir do mês de janeiro é iniciada a diminuição gradual das chuvas, sendo que nesse mês ocorrem, com grande frequência, os veranicos quinzenais, os quais são distribuídos na primeira ou segunda quinzena.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Total	241.4	214.7	188.9	123.8	39.3	8.8	11.8	12.8	51.9	172.1	238.0	248.6

**Tabela 3** - Totais mensais de precipitação pluviométrica da estação do INMET em milímetros.

Na área em estudo os valores médios totais de longo período ficam entre 1.450 e 1.500 mm, sendo considerada como uma região de elevada taxa de precipitação média. Esta expressiva altura anual de chuvas causa a proliferação de grande volume de chorume forçando sua migração para áreas em direção aos exutórios naturais.

### *Geomorfologia e Hidrografia*

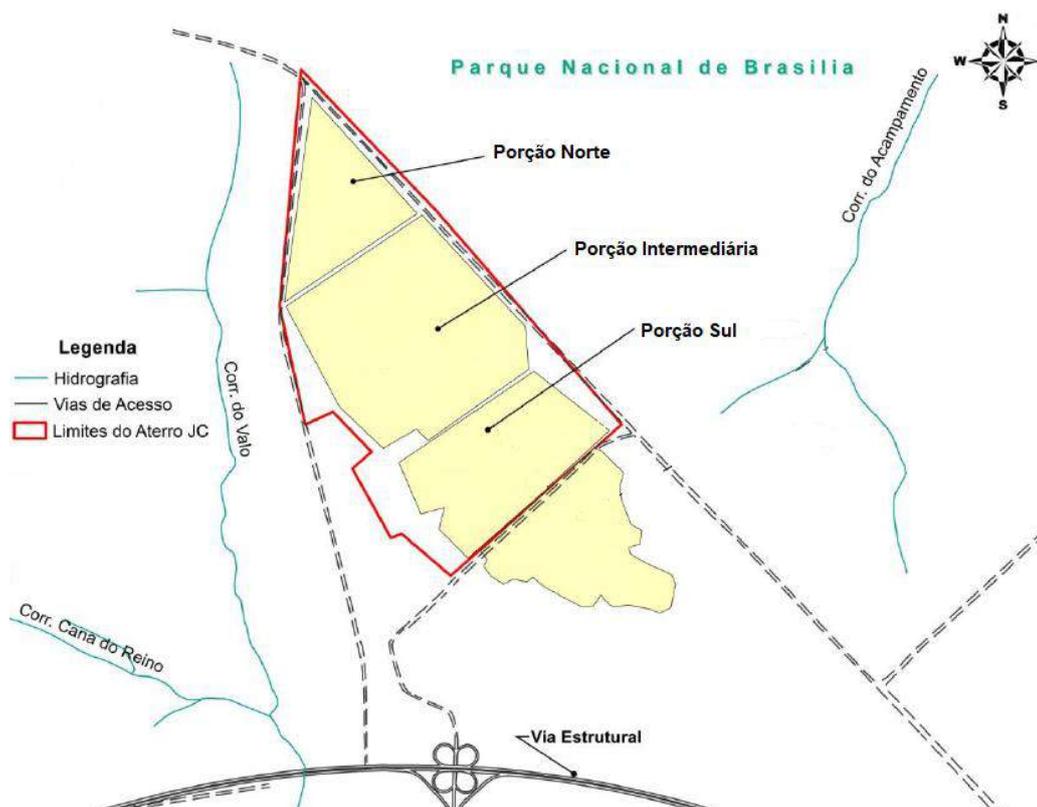
A geomorfologia local é associada à Depressão do Paranoá (segundo Novas Pinto & Carneiro, 1984; Novaes Pinto, 1986; Novaes-Pinto, 1994a; Novaes-Pinto, 1994b), sendo caracterizada por um relevo suave ondulado com declividade menor que 10%, restrita amplitude

topográfica, presença de rampas longas e predominância de pedogênese sobre o transporte e deposição.

A área representa um divisor de hidrográfico que delimita a bacia do córrego Cabeceira do Vale (um dos formadores do Ribeirão Vicente Pires) que drena suas águas em direção a oeste/sudoeste com a bacia do Córrego do Acampamento que drena para oeste/nordeste. A área apresenta padrão de relevo plano a suave ondulado, com cotas entre 1130 e 1070 metros.

#### 4. DANOS AMBIENTAIS

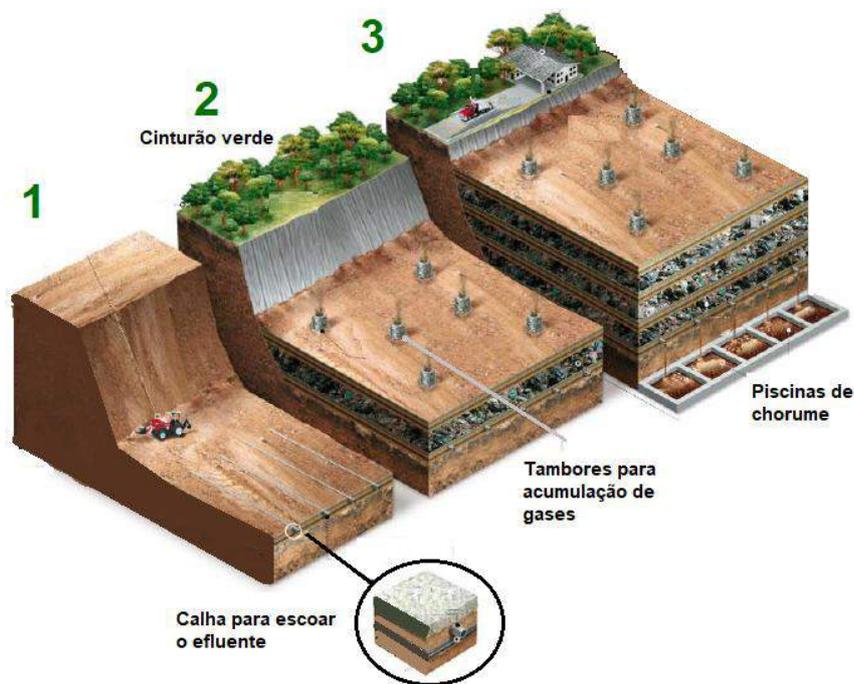
Segundo Araújo (1996) o aterro é dividido em três porções: sul, intermediária e norte. A porção sul é a mais antiga e parte dela está fora dos limites do aterro. Contém o lixo aterrado desde o início de sua operação até o ano de 1977. Atualmente, essa área encontra-se invadida e habitada. De 1977 a 1993 a deposição do lixo ocorreu na porção intermediária, próxima ao vale do córrego Cabeceira do Vale. De 1993 em diante a porção norte foi sendo coberta pelo depósito de lixo (Figura 15).



**Figura 15** - Divisão do Lixão da Estrutural em porções: sul, intermediária e norte (Araújo, 1996).

A Figura 16 exemplifica o método de descarte utilizado na fase em que o Lixão da Estrutural foi considerado “Aterro Controlado” do Jockey Club. A disposição do lixo ocorria com a escavação prévia do solo e a implantação de drenos de gases (Figura 17), a fim de neutralizar a produção de gases gerada a partir da decomposição da matéria orgânica encontrada

no substrato do aterro. Esses drenos são construídos com manilhas de concreto preenchidas por matacões de calcário, nos quais, à medida que o nível topográfico do lixo se eleva, são colocadas novas manilhas para dar continuidade à canalização. O lixo, então, era depositado nas valas e posteriormente compactado e recoberto por solo inerte para que pudesse receber outra camada de lixo.



**Figura 16** - Modelo de manejo e descarte de resíduos sólidos em aterro. Modificado de Plano de Manejo das Áreas de Proteção da Vila Estrutural e Plano de Uso do Parque Urbano da Estrutural (IBRAM, 2019).



**Figura 17** - Exemplo de dreno de gases em funcionamento no Lixão da Estrutural.

Segundo o CEMPRE (2010), é necessário o plantio de árvores e arbustos de pequeno e médio porte, preferencialmente com espécies nativas da região, a fim de se evitar impactos visuais negativos à população, assim como a dispersão horizontal do biogás ocasionada pelos ventos, reduzindo assim a propagação de maus odores para a vizinhança do aterro.

A piscina de chorume (Figura 18) é representada por uma escavação de aproximadamente 3,2 metros de profundidade, que é impermeabilizada com uma lona resistente que recebe o efluente. O chorume, por sua vez, chega à piscina por meio de manilhas, e então, é acumulado no local, até ser reinjetado no aterro com auxílio de caminhões-pipa. A reinjeção é um método de tratamento do chorume que propicia a atenuação dos constituintes pela atividade biológica e por reações físico-químicas que ocorrem no interior do aterro (Pires, 2002).



**Figura 18** - Piscina de chorume em funcionamento no Lixão da Estrutural. À esquerda, visão geral da piscina. À direita, chegada do chorume à piscina por meio de manilha e detalhe da lona de revestimento, já com porções desgastadas pela exposição.

Medidas de proteção ambiental, tais como coleta e tratamento de chorume e biogás são sistemas recentemente implementados, e uma impermeabilização dos solos nunca foi feita.

Assim sendo, o funcionamento do lixão gerou, e ainda gera sérios danos ambientais, apresentando contaminação de solos, mas principalmente, de águas subterrâneas da região. Um agravante disso é a proximidade do aterro com o Parque Nacional de Brasília, uma importante unidade de conservação que, surgiu da necessidade de se proteger os rios fornecedores de água potável à capital federal.

Estudos realizados na área, tanto de química aquática, quanto de geofísica, indicam a presença de uma pluma de contaminação proveniente do aterro, em direção às suas adjacências.

#### *Caracterização Química da Pluma de Contaminação*

A pluma de contaminação por chorume apresenta composição variável dentro de sua área de expansão. A maior concentração é observada sob a zona de acumulação do lixo e sua migração segundo os gradientes hidráulicos locais tende a uma diminuição progressiva das

substâncias dissolvidas. A redução da concentração está relacionada ao afastamento da fonte com ampliação da área da pluma e diluição a partir da mistura com águas não contaminadas. A entrada de águas não contaminadas se dá por aporte subterrâneo e pela infiltração de águas de precipitação pluvial.

Como há variação composicional do chorume, a melhor forma de se apresentar os teores das diversas substâncias dissolvidas e os parâmetros físico-químicos é a partir da média, valores máximos e comparação com valores de referência (Tabela 4).

Para efeito de comparação com um padrão foram utilizados resultados de análises de amostras oriundas da nascente denominada “Peito de Moça” situada em contexto hidrogeológico similar, contudo, fora do alcance e da influência da pluma de contaminação do aterro em estudo.

<b>Parâmetro</b>	<b>Média</b>	<b>Máximo</b>	<b>Background</b>
<b>pH</b>	6,0	7,6	4,9
<b>CE</b>	93,1	1220,0	2,6
<b>TSD</b>	68,2	620,0	1,2
<b>Dureza</b>	10,1	46,1	0,03
<b>Nitrato</b>	1,0	2,9	0,0
<b>Nitrito</b>	0,02	0,2	0,0
<b>Amônia</b>	0,24	1,34	0,0
<b>Cloro Total</b>	0,1	0,76	0,0
<b>Alcalinidade</b>	32,3	452,0	0,3
<b>O<sub>2</sub> Consumido</b>	9,9	56,1	0,0
<b>O<sub>2</sub> Dissolvido</b>	27,8	136,2	28,6
<b>Sulfato</b>	5,0	21,0	0,0
<b>Fosfato</b>	0,35	2,5	0,01
<b>Potássio</b>	7,73	44,0	0,56
<b>Ferro</b>	0,15	0,62	0,28
<b>Manganês</b>	0,036	0,366	0,01
<b>Alumínio</b>	32,3	452,0	4,28
<b>Cálcio</b>	6,40	49,1	2,54
<b>Magnésio</b>	1,3	17,86	3,69

**Tabela 4** - Composição média e máxima do chorume do Aterro do Jockey. Os valores de background são relacionados a amostras retiradas da nascente “Peito de Moça” situada no Parque Nacional de Brasília em área fora da influência da Pluma de contaminação. Todas as unidades em mg/L, com exceção da CE (condutividade elétrica) medida em  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e pH adimensional. (TSD significa total de sólidos dissolvidos). Fonte: Franco (1996) e Araújo (1996).

De forma geral há o aumento dos teores dos diversos elementos e substâncias dissolvidas na água subterrânea, com exceção do pH que sofre significativo aumento, mostrando que o chorume apresenta características alcalinas.

Os trabalhos de hidroquímica detalhados realizados no aterro indicam que os principais elementos e substâncias responsáveis pela mineralização do chorume são: potássio, cloreto, cálcio, magnésio e nitrato.

Araújo (1996) e Santos (1997) mostram que há uma tendência de aumento da

concentração dos íons dissolvidos quando se amostra águas a partir de maiores profundidades. Esses autores consideram que a condutividade elétrica das águas é o principal parâmetro analítico para a caracterização da composição do chorume.

#### *Distribuição da Pluma de Contaminação*

Para a determinação dos limites atuais da pluma foram aplicados os dados de migração sobre os modelos reais realizados nos anos 1996 e 2001. Para a projeção da migração foram utilizados dados de velocidade média do fluxo a partir das informações hidrodinâmicas dos aquíferos do domínio intergranular, incluindo: porosidade eficaz, condutividade hidráulica e gradiente hidráulico.

A velocidade linear média pode ser obtida a partir da seguinte fórmula:  $V = (K \cdot \eta_e \cdot H) / L$ , onde  $V$  = velocidade linear média do fluxo,  $K$  = condutividade hidráulica;  $\eta_e$  = porosidade eficaz;  $H$  = diferença de carga hidráulica e  $L$  = distância entre ponto de recarga e ponto considerado.

Os seguintes valores são considerados como parâmetros de entrada:  $K$  variando entre  $5 \times 10^{-6}$  e  $6 \times 10^{-5}$  m/s;  $\eta_e$  variando entre 10 e 15%; gradiente hidráulico  $H/L$  com variação entre 0,004 e 0,01 (0,4% a 1%). Nessas condições pode-se calcular as velocidades de fluxo em dois cenários considerados como velocidade máxima e velocidade mínima do fluxo ( $V_{MAX} = K_{MAX} \times \eta_{eMAX} \times Grad_{MAX}$ ) e ( $V_{MIN} = K_{MIN} \times \eta_{eMIN} \times Grad_{MIN}$ ).

Os valores de condutividade hidráulica da ordem de grandeza de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$  m/s representam os valores modais obtidos em ensaios de infiltração *in situ* realizados em todo o território do Distrito Federal. São considerados compatíveis com os solos locais em que mesmo com textura argilosa a muito argilosa, apresentam estruturação granular e grumosa modificando o comportamento do funcionamento hídrico dos latossolos.

Os valores de porosidade eficaz entre 10 e 15% também são considerados coerentes com os materiais em estudo. Mesmo com valores de porosidade total que devem ser superiores a 30%, a porosidade efetiva não deverá superar 15% em virtude da grande retenção de água na forma de umidade (por tensão superficial e forças de atração moleculares) que é observada nesses materiais.

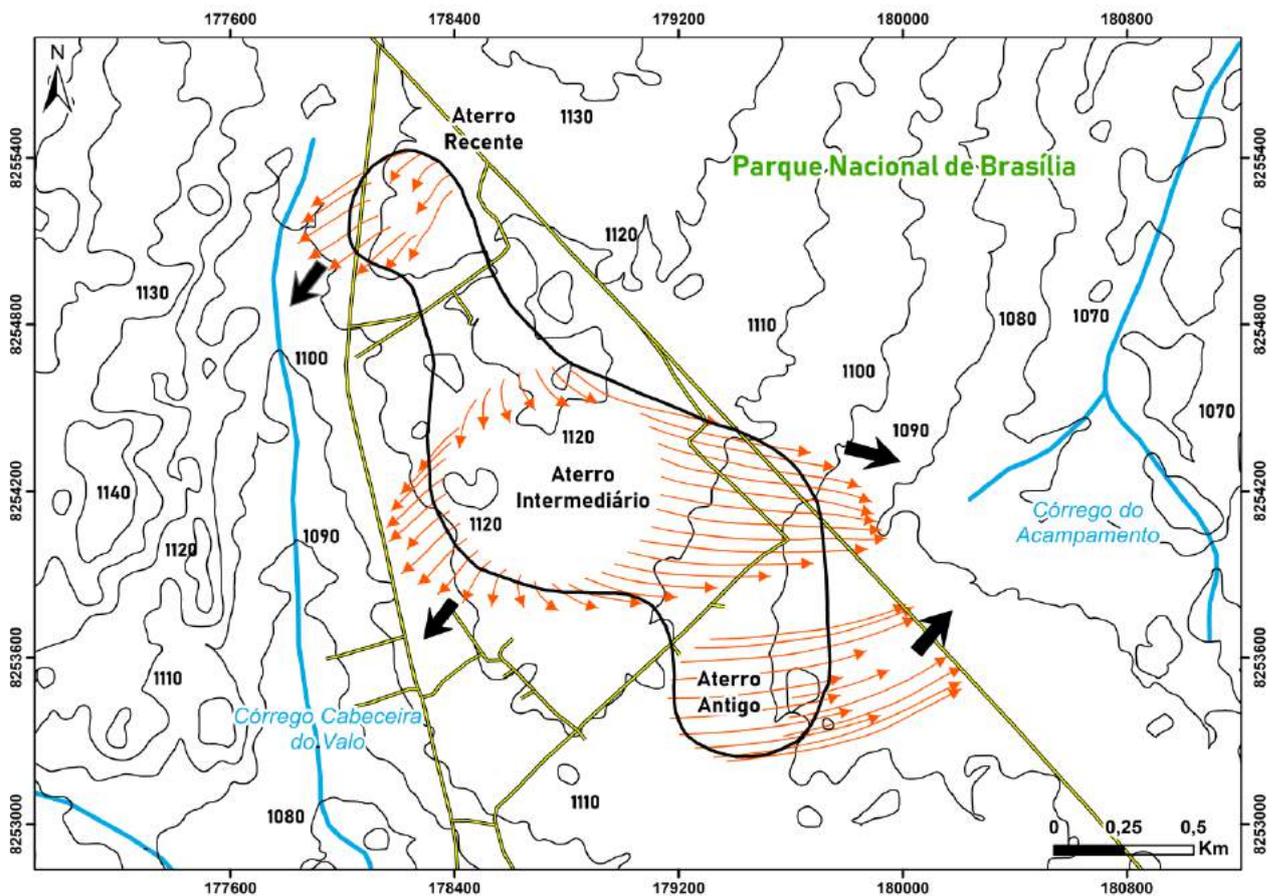
Os valores de gradiente hidráulico local foram obtidos diretamente a partir do mapa potenciométrico produzido por Araújo (1996). Neste caso, foram considerados: gradiente mínimo de 2 metros de diferença de carga hidráulica em 500 m de extensão lateral do aquífero e gradiente máximo de 2 metros de variação de carga hidráulica em 195 metros do aquífero.

Considerando um cenário simplista de propagação da pluma pode-se afirmar que com a condição mais rápida do fluxo ( $V_{MAX} = 6 \times 10^{-4}$  m/s  $\times$  0,15  $\times$  0,01 =  $9 \times 10^{-7}$  m/s = 28,38 m/ano) a pluma deve migrar cerca de 30 metros por ano. Na condição mais lenta ( $V_{MIN} = 5 \times 10^{-5}$  m/s  $\times$

$0,1 \times 0,004 = 2 \times 10^{-8} \text{ m/s} = 0,63 \text{ m/ano}$ ) a migração seria em torno de 65 cm por ano. O cenário é considerado simplista, pois a determinação de fluxo de uma pluma de contaminação deve levar ainda em consideração vários outros parâmetros como: densidade da solução, advecção, retenção, dispersão lateral, dispersão longitudinal, possíveis anisotropias e heterogeneidade do aquífero e outros fatores.

A partir dos cálculos teóricos e dos dados de hidroquímica obtidos desde 1996 foram confeccionados o mapas da distribuição da pluma de contaminação para os anos de 1996, 2001 e 2007, exemplificado pela Figura 19.

O incremento da pluma observada nos dois intervalos de tempo analisados é coerente com os cálculos e estimativas de migração, com ampliação de cerca de 20 metros por ano em direção à nascente do córrego do Acampamento (no interior do Parque Nacional de Brasília). O valor de cerca de 20 metros ao ano é coerente com todo o modelo de fluxo e condição real de migração da pluma, o que envolve retenção pela função filtrante do aquífero e migração vertical descendente que também minimiza a magnitude do vetor resultante.



**Figura 19** - Mapa de distribuição da pluma de contaminação na região do Aterro do Jockey / Cidade Estrutural, para o ano de 2001 (Fonte dos dados: Araújo 1996, Franco 1996; base cartográfica Koide *et al.* 1999). As setas indicam o fluxo subterrâneo local preferencial da pluma. Equidistância das curvas de nível 2 metros.

A partir das considerações e análises realizadas pode-se afirmar com ampla margem de

segurança que a pluma alcançará a nascente do córrego do Acampamento nos próximos cinco anos.

A análise do comportamento da pluma atual indica que são restritas as áreas ocupadas por edificações urbanas da Cidade Estrutural que apresentam interferência com a pluma de contaminação. De forma mais ampla essas áreas correspondem às porções do extremo NW e SE da atual poligonal da área urbana.

### *Caracterização Geotécnica dos Terrenos Adjacentes*

A metodologia objetivou caracterizar os terrenos afetados pela pluma de contaminação. A perfuração foi iniciada com o trado /cavadeira até a profundidade de 1 m, instalando-se o primeiro segmento do tubo de revestimento, segundo as normas ABNT (NBR 6484/96, MB-3 e NB 617/80) (Figura 20).

Durante as operações de perfuração, nos casos em que a parede do poço se mostrou instável, procedeu-se à descida de revestimento até a profundidade necessária, alternadamente com a operação de perfuração/ensaio. O tubo de revestimento ficou a uma profundidade máxima de 3,5 m, sendo que a partir dessa profundidade a parede se comportava de forma autossustentável.

Durante a operação de perfuração também foram anotadas as profundidades das transições de camadas detectadas por exame táctil-visual e da mudança de coloração dos materiais trazidos à boca do furo pelo trado espiral. Adicionalmente, o nível de água, quando existente no interior do furo, manteve-se em cota igual durante toda atividade de sondagem realizada.



**Figura 20** - Imagens do processo de montagem e execução da sondagem tipo SPT.

As principais características observadas estão listadas a seguir:

- O lixo representa material com alta penetrabilidade e muito heterogêneo;
- A maior parte da seção dos espessos latossolos argilosos da área apresentam alta penetrabilidade, em geral até espessuras maiores que 30 m;
- A seção com baixa penetrabilidade/impenetrável se dá de forma abrupta, em geral já em material saprolítico;
- A área do aterro não apresenta grau de compactação elevado, a penetrabilidade é extremamente alta o que indica um solo pouco resistente à carga, ou colapsível na parte superior;
- A resistência do solo começa a ocorrer em profundidades médias de 15 a 20 metros tanto pra a área do aterro como para as áreas externas;
- É possível inferir que o horizonte de alteração, que gera o solo, não é homogêneo apresentando níveis mais arenosos com uma resistência a penetração de 60/15 (60 pancadas para uma penetração de 15 cm) ou superior a 440.000 N (Força de cada pancada  $F = ma$ , onde  $a$  é a aceleração da gravidade vezes 0,75, pois o peso é lançado dessa altura;  $m$  a massa do peso em gramas, que é de 65.000 vezes o número de pancadas);
- O horizonte mais resistente é o horizonte C1, que apresenta uma resistência de 60-70/45 devida, provavelmente, à presença de pequenos aglomerados de argila dura ou material inconsolidado proveniente da alteração da ardósia;
- É possível verificar que o modifica de forma acentuada a característica natural do material, sendo observado que a até mais de 25 metros o maciço é considerado de má qualidade para suportar fundações de obras civis.

Os resultados dos ensaios SPT mostraram que profundidades entre 34 a 37 metros a ardósia sotoposta aos resíduos sólidos (que foi atacada pelo chorume) se apresenta com aspecto plástico e sem condições para suportar fundação de obras (Figuras 22 e 23).

## **5. CONTAMINAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS**

### **5.1 Considerações Iniciais**

A contaminação dos aquíferos situados em área sob influência do Lixão da Estrutural é considerado o principal impacto ambiental decorrente da disposição sem controle dos resíduos do Distrito Federal por décadas, sem a devida aplicação de medidas mitigadoras.

Para a determinação da contaminação pela migração da pluma de chorume e para a delimitação de seus limites e concentrações dos efluentes em profundidades serão integrados dados de dois estudos interdependentes. O primeiro se refere ao Estudo Geofísico representado

por pesquisa indireta com medições da resistividade do fluido abaixo da superfície do terreno. O segundo se refere à locação e construção de poços de monitoramento, além da avaliação da composição química de amostras de águas destes poços.

A integração dos resultados do estudo geofísico e do monitoramento das amostras de águas subterrâneas possibilitará a determinação dos limites da pluma de contaminação de chorume, bem como confeccionar mapa de isoconcentração de substâncias ou parâmetros consideradas melhores indicadores da presença do extrato dos resíduos na água subterrânea.

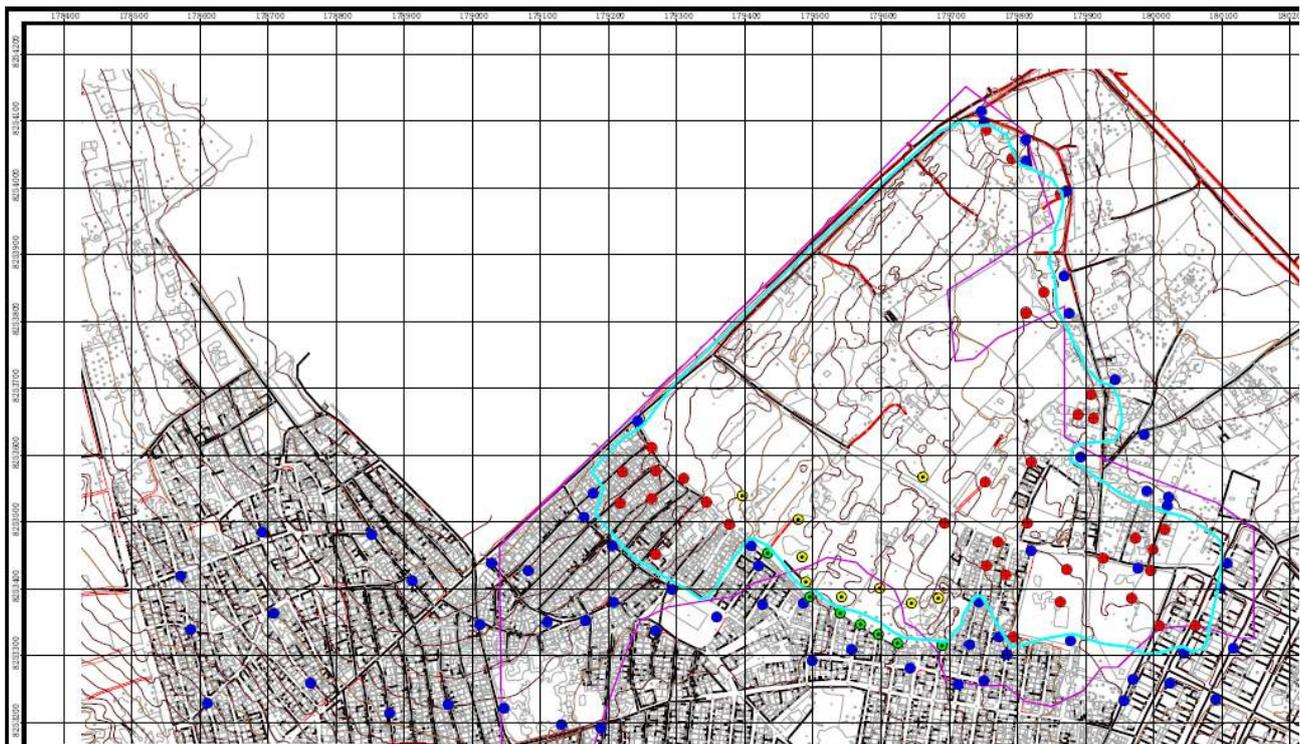
## **5.2 Estudo Geofísico**

Além dos dados obtidos no presente estudo, outros estudos realizados na região serão integrados para se alcançar o objetivo de determinação dos prováveis limites da pluma de contaminação, incluindo os trabalhos de Campos *et al.* (2006); Cavalcanti (2013) e Guedes (2019).

O relatório de Campos *et al.* (2006) é utilizado, uma vez que traz o limite da antiga área de aterro de resíduos com relativa precisão. Os trabalhos de Cavalcanti (2013) e Guedes (2019) são importantes, pois utilizaram o mesmo método geofísico e o mesmo arranjo eletródico aplicado no presente trabalho. A integração dos trabalhos anteriores com a pesquisa atual foi realizada por interpolação em ambiente de Sistema de Informação Geográfica e checagem visual das diferentes fontes de informações.

O trabalho de Campos *et al.* (2006) teve como objetivo determinar os limites da poligonal de acumulação de resíduos durante os anos 1970, uma vez que não existiam mapas de localização ou de progressão de avanço das áreas de aterros. Naquela época o aterro era operado de forma tradicional com trincheiras de 4 a 5 metros de profundidade, preenchidas com resíduos e com posterior aterramento e compactação.

A Figura 21 mostra o principal resultado do estudo, que foi realizado a partir de sucessivas sondagens mecânicas e manuais, de forma a se determinar com precisão os limites do antigo aterro.



Legendas

- |  |   |
|--|---|
|  Nova Poligonal do Aterro Antigo  |  Vias Não Pavimentadas         |
|  Limite do Aterro Antigo         |  Hidrografia                  |
|  Malha Urbana                   |  Furos a Trado Negativos     |
|  Curvas de Nível Mestras        |  Furos a Trado Positivos     |
|  Curvas de Nível Intermediárias |  Furos de Sondagem Negativos |
|  Vias Pavimentadas              |  Furos de Sondagem Positivos |

**Figura 21** - Cartograma dos limites do lixão retificado com uso de sondagens mecânicas e manuais (sistema de georeferenciamento Sicad) (Campos *et al.*, 2006).

A tentativa de se aplicar métodos geofísicos foi infrutífera, uma vez que por se tratar de área urbana densamente ocupada não foi viável o uso de métodos elétricos que são os mais adequados para o objetivo.

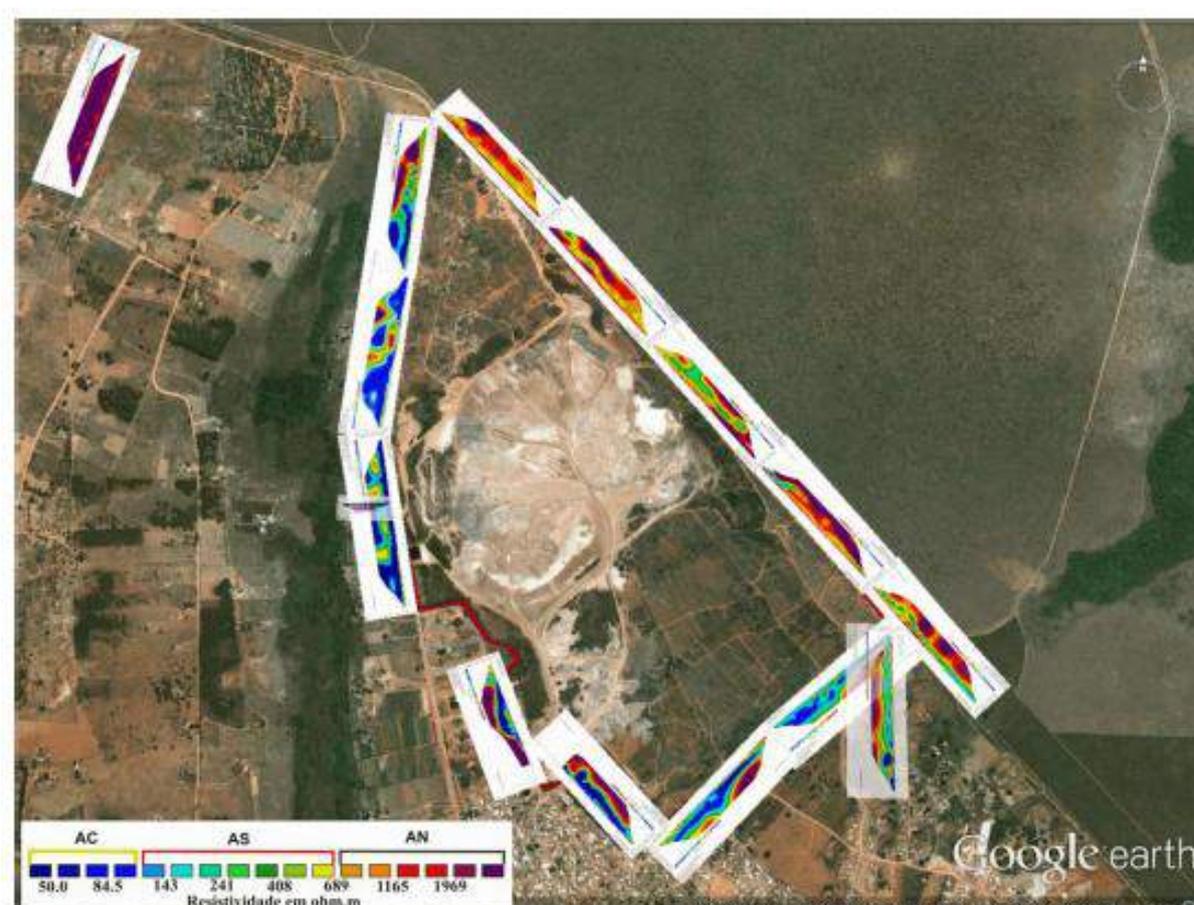
Este resultado é importante, pois a área de acumulação de resíduos é a fonte a partir da qual o chorume deverá se espalhar segundo o gradiente hidráulico local. Outro aspecto importante é a definição dos volumes aterrados. No início da operação do lixão, o sistema utilizado era a partir de células relativamente rasas (~5 metros de profundidade) em que os resíduos eram compactados e em seguida aterrados com solos estocados das próprias células. Posteriormente em função da restrição das áreas disponíveis para o acúmulo dos resíduos, se optou por um sistema de empilhamento compondo uma espessa massa de resíduos com acumulação de volumes de milhares de metros cúbicos. Assim pode-se prever que o chorume oriundo do “lixo antigo” deverá apresentar menor densidade e menor volume quando comparado aos efluentes gerados no lixo “mais recente” com empilhamento vertical.

O estudo de Cavalcanti (2013) determinou a migração da pluma de contaminação nos limites externos da área do aterro que operou desde os anos 1990 até o ano de 2018. Neste período o sistema de aterro utilizado foi no sentido de verticalização do maciço de resíduos, o qual alcançou mais de 35 metros nos pontos mais elevados. Com esta opção de operação do aterro foi criado um gradiente hidráulico artificial que deve ter acelerado a migração da pluma, principalmente para as direções oeste, sudoeste, sudeste e nordeste.

A Figura 22 mostra a síntese deste trabalho com o posicionamento das seções de eletrorresistividade levantadas em todo o limite da área de acumulação de resíduos.

Neste trabalho não foram instalados poços de monitoramento e os resultados são considerados apenas qualitativos.

O trabalho de Guedes (2019) focou a área do maciço de resíduos no interior da poligonal da área do lixão. Os resultados mostram que nestas condições proximais às áreas de geração dos efluentes o chorume pode alcançar profundidades maiores que 45 metros com as máximas concentrações, equivalentes a resistividades menores que  $10 \Omega/m$ .



**Figura 22** - Distribuição das seções geofísicas realizadas nos limites da área do Lixão da Estrutural. **AC** - área contaminada, **AS** - área levemente contaminada e **NA** - área não contaminada (imagem do *Google Earth* de 2012) (Cavalcanti, 2013).

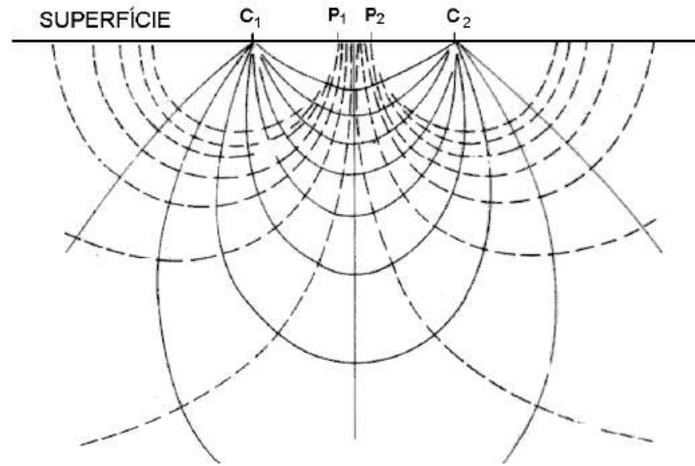
Dentre os principais resultados destacam-se:

- Dentre os diferentes arranjos eletródicos avaliados Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Wenner e Wenner- Schlumberger o que apresentou a melhor solução para determinar o limite resíduo-rocha foi o caminhamento Dipolo-Dipolo (Figura 3);
- A profundidade do limite resíduo-rocha varia de 25 a 45 metros, a qual foi determinada pela combinação do método elétrico em associação com o método de sísmica de refração;
- O trabalho conclui que a associação dos dois métodos é interessante para estudar aterros de resíduos sólidos, entretanto para que a sísmica funcione de forma mais eficiente nas áreas com maiores espessuras de resíduos, é necessário que a fonte de energia tenha maior potência, como queda de peso ou explosivos;
- Os resultados indicam que a rocha abaixo do maciço de resíduos apresenta suas características geotécnicas modificadas, provavelmente, em função da presença de chorume.

### **5.2.1 Método Adotado - Arcabouço Teórico**

Neste projeto foi utilizado o método geofísico de eletrorresistividade, que representa um procedimento relativamente rápido, de fácil aplicação e normalmente, proporciona resultados satisfatórios para diferentes objetivos. A medida da resistividade elétrica do solo, empregando diferentes arranjos de eletrodos, tem sido utilizada, para identificar variações estratigráficas ou para localizar objetos cujas dimensões e profundidades oscilem entre metros até alguns quilômetros. O inconveniente deste método aparece quando se necessita de uma exploração detalhada, com grande resolução espacial. Em casos como este se faz necessária a aquisição de uma grande quantidade de dados que pode ter sua viabilidade determinada por questões de tempo, de custo ou por alternativas técnicas. Recentemente, têm surgido sistemas automáticos de coleta de dados que podem acelerar os processos de medida e interpretação. Paralelamente, a maior capacidade de cálculos pelos computadores tem permitido a obtenção de imagens em duas ou três dimensões da distribuição real de resistividade do subsolo.

Os dispositivos para medidas de resistividade elétrica consistem, comumente, de um sistema de quatro eletrodos, sendo dois deles usados para enviar uma corrente elétrica ( $I$ ) no solo (eletrodos C1 e C2, Figura 23), e os outros dois (eletrodos P1 e P2, Figura 23) usados para medir a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre eles.



**Figura 23** - Esquema da distribuição dos eletrodos no solo durante uma aquisição de eletrorresistividade. As linhas cheias indicam o fluxo de corrente no solo, ao passo que as linhas pontilhadas indicam as linhas de equipotenciais geradas pela corrente.

Obtendo-se a diferença de potencial e a corrente que flui no meio, a resistividade elétrica aparente do meio (Eq. 1) dependerá somente do fator geométrico ( $K$ ). Este último é função da configuração dos eletrodos no terreno (Eq. 2).

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (\text{Eq. 1})$$

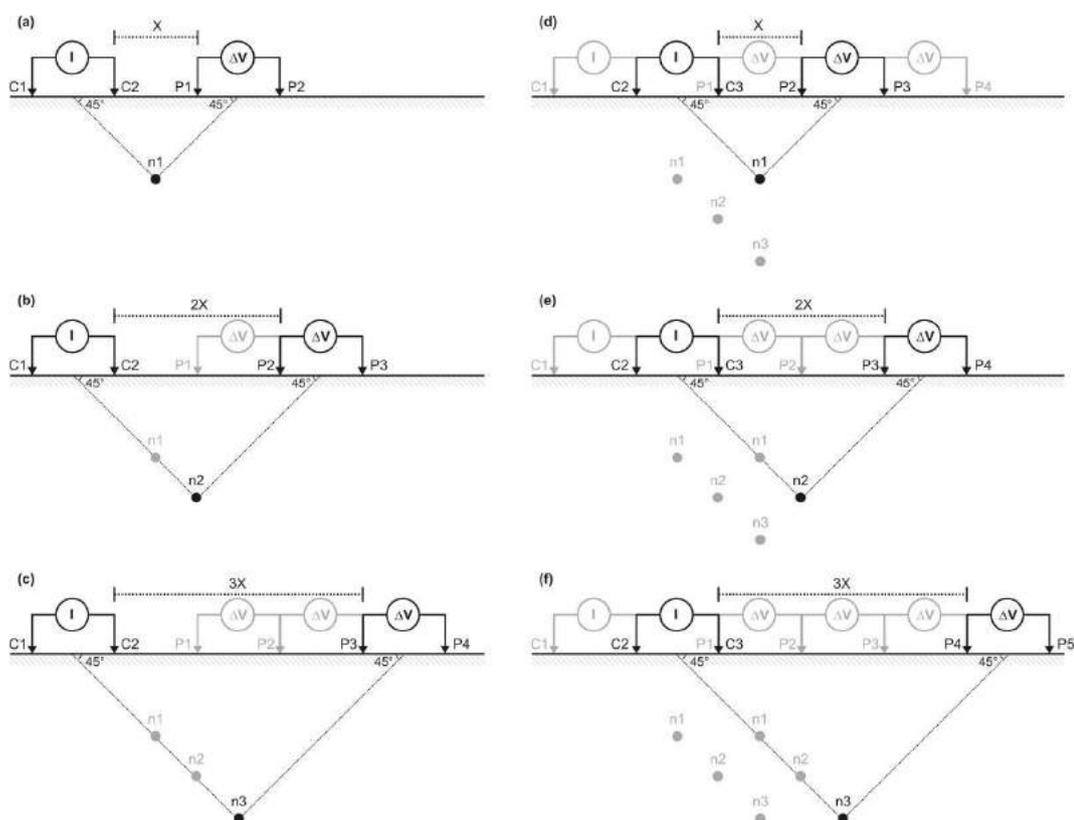
$$K = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right)} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde,  $\rho_a$  é a resistividade elétrica aparente do meio;  $r_{C1P1}$ ,  $r_{C2P1}$ ,  $r_{C1P2}$  e  $r_{C2P2}$  são as distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial.

No método da eletrorresistividade existem várias técnicas de levantamentos de campo, divididas basicamente em sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico, dentro das quais existe uma variedade de configurações possíveis de eletrodos que confere a técnica uma grande versatilidade (Loke, 2004; Gallas, 2000). Normalmente, os ensaios de SEV são realizados quando se deseja uma informação pontual da resistividade em profundidade, ao passo que no caminhamento elétrico o objetivo é o estudo da variação lateral da resistividade (Telford *et al.*, 1990).

O caminhamento elétrico possibilita o mapeamento lateral de resistividade elétrica, nesta técnica, o posicionamento dos eletrodos (potencial e corrente) pode ser realizado de diversas maneiras (arranjos Wenner, polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger e gradiente), dependendo do objetivo da investigação (Ward, 1990). Cada arranjo possui uma característica comum como resolução (dipolo-dipolo e polo-dipolo), profundidade de investigação (polo-polo) e razão sinal/ruído (Wenner e Wenner-Schlumberger).

Em aplicações para pesquisa ambiental, o arranjo dipolo-dipolo mostra-se mais efetivo entre os demais (Elis, 1998; Gallas, 2000). Neste arranjo, as fontes de corrente (transmissores) são distanciadas dos receptores em uma distância fixa para cada nível de investigação. Para aumentar a profundidade e o nível investigado, aumenta-se a distância ( $X$ ) entre o transmissor e os receptores. As medidas são efetuadas em vários níveis de investigação ( $n$ ), isto é,  $n = 1, 2, 3, 4, 3, \dots$  é o ponto de intersecção entre uma linha que parte do centro dos eletrodos de corrente e outra que parte do centro dos eletrodos de potencial, com ângulos de  $45^\circ$  (Figura 24).



**Figura 24** - Esquema sequencial de aquisição de dados utilizado em caminhamentos elétricos com o arranjo dipolo-dipolo (adaptada de Elis, 1998).

O resultado da aquisição é um conjunto de dados de resistividade elétrica obtido em  $n$  profundidades que formam uma pseudosseção (Elis, 1998). Esta por sua vez, reflete o comportamento do subsolo em resposta à passagem de correntes elétricas. Cada material geológico mostra um intervalo bem amplo de resistividade, que depende principalmente da composição mineralógica do meio, da quantidade de fluídos presentes nos poros dos materiais, e da salinidade destes fluídos.

### 5.2.2 Aquisição dos Dados

Os dados das seções geofísicas foram coletados a partir dos limites do lixão, uma vez que o trabalho de Cavalcanti (2013) já havia comprovado a presença da pluma até esta faixa. Linhas

perpendiculares ao limite do Parque Nacional de Brasília (em direção a nordeste) foram levantadas com o propósito de se determinar os limites da pluma em direção a esta unidade de conservação ambiental. Outras seções foram realizadas no interior do Parque Nacional, em locais em que existem estradas de acesso. Uma linha, no interior do Parque Nacional, foi levantada de forma a se obter os valores de *background* em latossolos em faixa remota à influência do Lixão. Na porção a oeste foram realizados levantamentos em locais com viabilidade logística. Uma linha foi levantada na margem direita do Córrego Cabeceira do Valo, para obtenção de uma seção de *background* em gleissolo fora da influência do lixão.

Durante a execução dos levantamentos foi utilizado o equipamento Eletroresistivímetro SYSCAL Pro 72 (*fabricado pela Iris Instruments*) que consiste em um módulo de aquisição interligado em cabos multieletródos. Foram utilizados eletrodos metálicos para injetar corrente e medir o potencial elétrico gerado pelo fluxo de corrente no subsolo (Figura 25). O equipamento apresenta a melhor acurácia disponível igual a 0.2% e resolução de 1 microV, intervalo de temperatura entre -20°C e +70°C.



**Figura 25** - Fotografias mostrando o equipamento Syscal em atividade de levantamento de campo.

Na Tabela 5 estão listadas as coordenadas do início e do fim de cada seção levantada na área do Lixão e adjacências, onde foram executados 28 perfis de levantamentos geofísicos (sendo 15 de 240 metros de extensão e 13 de 360 metros, totalizando 8280 metros lineares de seções de tomografia elétrica).

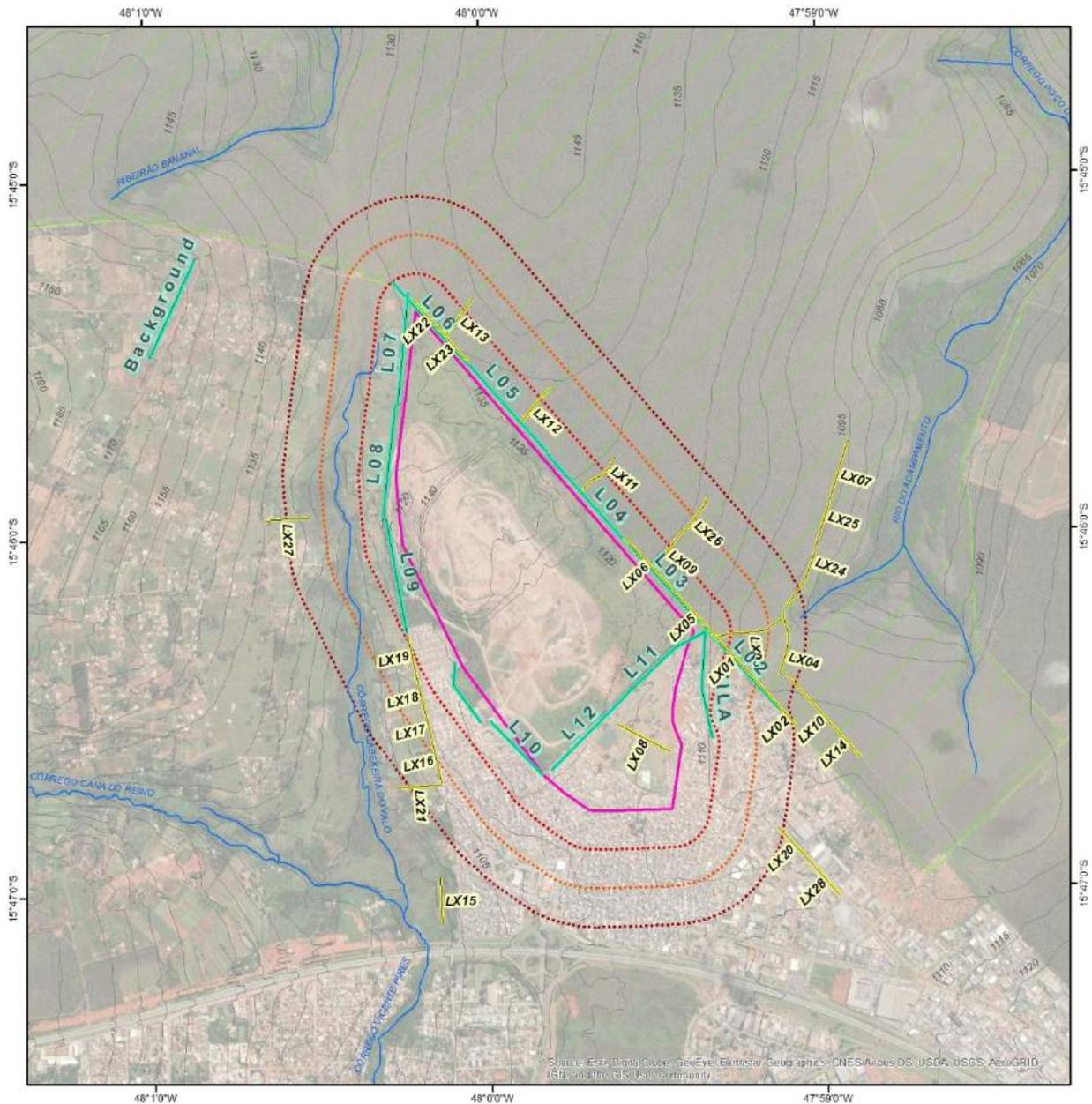
Para a seleção do comprimento das seções foram consideradas as profundidades mínimas de investigação (pelo menos 50 metros) e questões logísticas como disponibilidade de área livre e superfícies não pavimentadas. Os arranjos de 240 e 360 metros permitiram investigar, respectivamente, 60 e 70 metros de profundidade.

NOME	UTM_X	UTM_Y	UTM_X	UTM_Y	Observação
	INÍCIO DA LINHA		FINAL DA LINHA		
LX-01	179973	8253845	179756	8254070	Perfis para verificar a compatibilidade dos resultados do levantamento de 2013 e a pertinência de utilizá-los para o mapeamento da pluma.
LX-02	180185	8253611	179959	8253855	
LX-03	180120	8254153	179768	8254061	Perfis para verificar o prolongamento da pluma para o interior do Parque Nacional de Brasília.
LX-04	180097	8253851	180130	8254196	
LX-05	179538	8254310	179777	8254050	Perfis para verificar a compatibilidade dos resultados do levantamento de 2013.
LX-06	179293	8254565	179573	8254268	
LX-07	180466	8255079	180366	8254733	Perfil para definição de <i>background</i> em Latossolo.
LX-08	179521	8253470	179246	8253609	Perfil para detectar contaminação em área urbana.
LX-09	179585	8254607	179443	8254414	Perfis para verificar a presença da pluma de chorume no interior do Parque Nacional de Brasília.
LX-10	180369	8253620	180144	8253864	
LX-11	179233	8254988	179063	8254821	
LX-12	178894	8255351	178737	8255176	
LX-13	821451	8255811	821303	8255627	
LX-14	180540	8253438	180375	8253615	
LX-15	821196	8252823	821199	8252578	Perfis para verificação do deslocamento da pluma em direção ao córrego Cabeceira do Valo
LX-16	821167	8253548	821217	8253308	
LX-17	821133	8253724	821179	8253487	
LX-18	821090	8253890	821147	8253665	
LX-19	821058	8254071	821104	8253838	
LX-20	180264	8252902	180099	8253074	Perfil para verificar a extensão da pluma ao sul da área.
LX-21	820973	8253289	821216	8253302	Verificação da pluma para sudoeste
LX-22	821271	8255654	821137	8255809	Perfis para verificação de eventual aumento da contaminação no extremo norte da área do lixão.
LX-23	821411	8255493	821281	8255645	
LX-24	180297	8254516	180138	8254214	Verificação do extremo nordeste da pluma no interior do Parque Nacional de Brasília
LX-25	180401	8254865	180298	8254521	
LX-26	179739	8254794	179591	8254592	
LX-27	820554	8254700	820320	8254696	Perfil para definição de <i>background</i> em Gleissolo.
LX-28	180433	8252721	180267	8252900	Perfil para verificar a extensão da pluma ao sul da área.

**Tabela 5** - Localização dos perfis geofísicos realizados com o reposicionamento das coordenadas das zonas anômalas em função dos resultados obtidos. As coordenadas são obtidas diretamente do GPS portátil para facilitar a verificação em campo.

### 5.2.3 Resultados

A Figura 26 mostra a localização das seções realizadas neste trabalho e nos principais trabalhos anteriores. No Apêndice 1 estão mostrados todos os resultados obtidos por inversão dos dados de resistividade aparente em cada pseudosseção, mostrando a variação da resistividade com a profundidade. As cores foram fixadas para facilitar a comparação direta de seção a seção.



**Linhas de Geofísica**  
 — 2020  
 — 2013

Limite da URE - Unidade de Recebimento de Entulhos + Limites históricos do aterro  
 Parque Nacional de Brasília

**Distância do limite da URE - Unidade de Recebimento de Entulhos**  
 - - - 600 metros  
 - - - 400 metros  
 - - - 200 metros

**Figura 26** - Localização das seções geofísicas levantadas neste trabalho e no ano de 2013 (Cavalcanti, 2013). As linhas pontilhadas se referem a *buffers* com faixas de 200 metros a partir dos limites da área que historicamente foi local de acumulação de resíduos (imagem base obtida do Sistema *Google Earth*, de maio de 2019).

## 2.2.4 Interpretação dos Resultados

Para a interpretação das seções geofísicas visando à determinação da presença de chorume em profundidade foram utilizados os seguintes critérios:

- Detecção de contaminação em poços de monitoramento anteriormente instalados (Stollberg & Weib, 2011 e Campos *et al.*, 2006);
- Valores de *background* de resistividade elétrica em locais reconhecidamente sem influência de

nenhum tipo de contaminação em profundidade (perfil “*background*” de Cavalcanti, 2013 e perfis 07 e 27 deste trabalho);

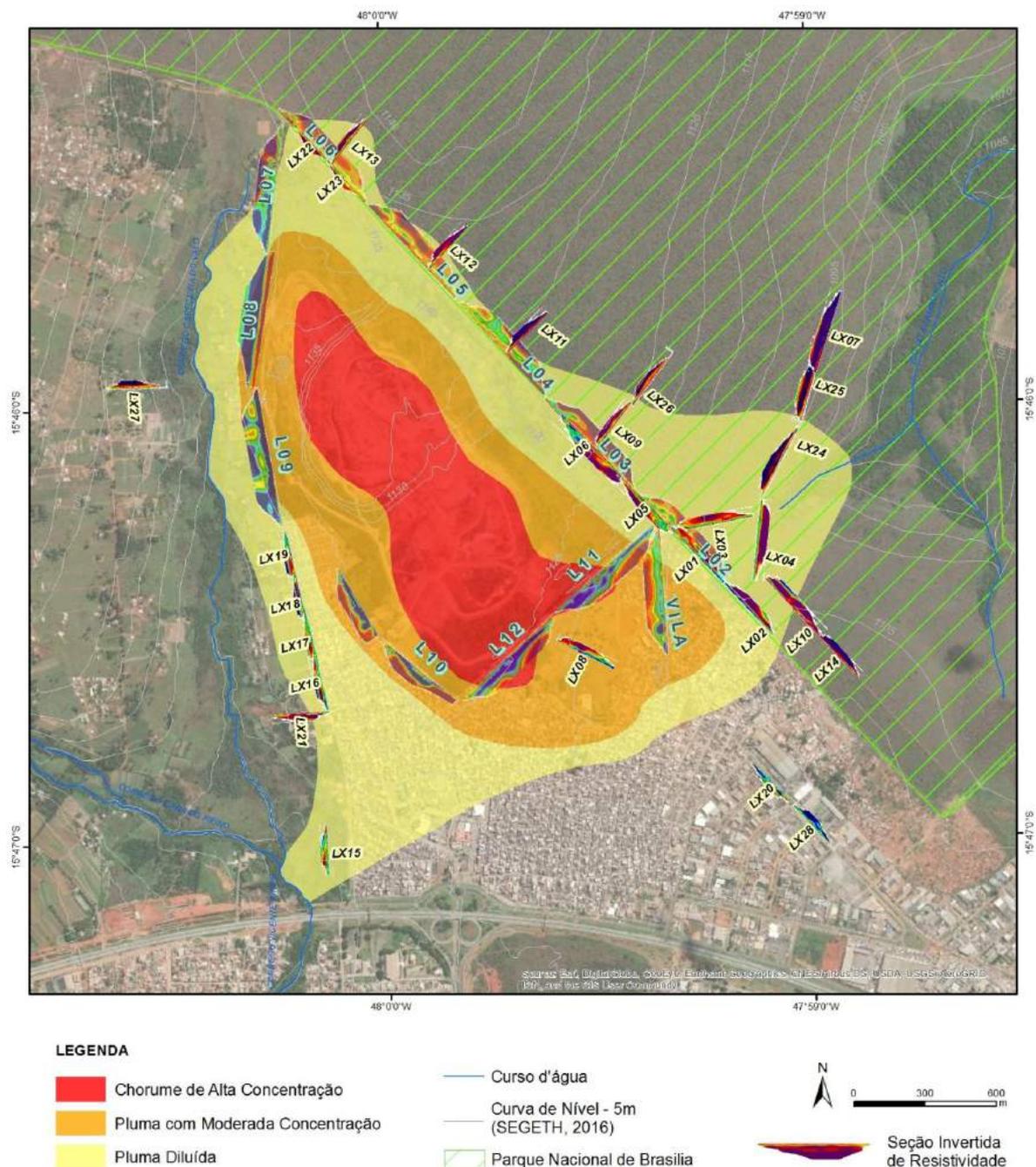
- Caminho do fluxo subterrâneo determinado pela rede de fluxo proposta por Carneiro (2002) e
- Premissa de que o chorume por ser rico em íons e outras substâncias dissolvidas deve modificar a resistividade da água nos poros dos materiais geológicos em que ocorre (rochas, saprolitos e solos).

A partir destes parâmetros foram aplicadas as seguintes diretrizes para a interpretação das linhas geofísicas:

- Áreas com valores de resistividades menores que 150  $\Omega/m$  representam locais com contaminação de elevada concentração (em geral em locais proximais ao aterro ou ao longo de canais de fluxo);
- Valores de resistividades entre 151 e 500  $\Omega/m$  representam áreas em que a contaminação ocorre com concentração moderada;
- Valores de resistividade entre 501 e 750  $\Omega/m$  indicam presença de contaminação de baixa concentração (chorume diluído);
- Valores de resistividade até 1000  $\Omega/m$  indicam algum tipo de contaminação, mesmo que de concentração extremamente baixa (mas ainda acima dos valores naturais de *background*);
- Para locais com a presença de Gleissolo com horizonte superficial rico em matéria orgânica admite-se que valores entre 500 e 700  $\Omega/m$  representam área não contaminadas. Os valores de resistividades mais reduzidas são vinculados à presença de matéria orgânica nos horizontes superficiais e à maior umidade em subsuperfície.

As linhas LX20 e LX28 apresentaram valores anômalos baixos de resistividade que podem representar contaminação por chorume. Entretanto, a observação do local mostra a presença de uma galeria de águas pluviais com lançamento clandestino de esgoto doméstico, o que levou a uma interpretação alternativa de que o aquífero esteja contaminado pelo efluente doméstico e não por chorume produzido por antigos aterros de resíduos sólidos. Esta interpretação é corroborada pela conformação do relevo local que não é favorável à infiltração de efluentes no sentido de NE para SW (nordeste para sudoeste). A confirmação desta interpretação foi possível após a construção dos poços de monitoramento, sendo que nesta área foi instalado o Poço LX19.

A Figura 27 traz o mapa dos limites da pluma de contaminação baseada exclusivamente nos resultados do estudo geofísico de superfície. Este mapa é considerado preliminar, pois se trata de uma interpretação apenas baseada em dados geofísicos, sem nenhum acesso direto à zona saturada do aquífero. Para a determinação de um mapa com maior segurança na interpretação e por consequência mais realista é necessário analisar os dados oriundos dos poços de monitoramento na região.



**Figura 27** - Mapa preliminar da pluma de contaminação por chorume do antigo Lixão da Estrutural, baseado exclusivamente nos resultados do estudo geofísico, com inserção das seções geofísicas. Para melhor avaliação das seções individuais, observar as ilustrações em maior escala apresentadas nas seções da Figura 7. Mapa produzido a partir da integração dos dados geofísicos deste projeto, dados de Cavalcanti (2013), de Guedes (2019), dados do limite da pluma apresentados por Campos *et al.* (2006), além da confirmação da contaminação no poço da rede de monitoramento da ADASA. (imagem base obtida do Sistema Google Earth, de maio de 2019).

Os resultados do estudo geofísico foram integralmente corroborados pelos dados hidroquímicos, mostrando que a resistividade de subsuperfície é modificada sob qualquer presença de elementos não naturais na água subterrânea. Entretanto, não é possível determinar os valores de concentração da pluma, pois a resolução da tomografia elétrica não permite tal precisão.

Valores inferiores a 50  $\Omega/m$  localizam as faixas com maior concentração da pluma de contaminação, indicando valores de condutividade elétrica da água subterrânea que variam desde 800 até 15.000  $\mu S/cm$ . Por outro lado, locais em que as resistividades são superiores a 1.000  $\Omega/m$  (em latossolos) mostram áreas sem contaminação das águas subterrâneas.

Um aspecto que deve ser considerado na avaliação dos resultados da tomografia elétrica é que as medidas são obtidas em diferentes profundidades e os resultados representam a média de inúmeras interações. Assim, pode haver pequenos deslocamentos dos resultados em função dos contrastes em profundidade.

## **5.3 Poços de Monitoramento**

### ***5.3.1 Construção dos Poços de Monitoramento***

A locação dos pontos em que os poços de monitoramento foram instalados foi feita sobre uma base contendo os limites da pluma determinada pelo estudo geofísico, de forma a se confirmar os resultados deste estudo e para possibilitar a determinação da densidade, do conteúdo de substâncias dissolvidas, além das diferentes zonas de concentração da pluma. A imagem da Figura 28 traz a localização dos poços de monitoramento instalados.

É importante salientar que a locação dos poços teve limitações logísticas que incluíram:

- i) impossibilidade de instalação de poços em áreas de cerrado preservado no interior do parque Nacional. Naquela unidade de conservação ambiental os poços foram exclusivamente instalados às margens de estrada existentes;
- ii) impossibilidade de instalação de poços na área urbana da cidade Estrutural, por se tratar de uma cidade muito densa com ruas estreitas;
- iii) impossibilidade de instalação de poços nas chácaras do Núcleo Rural Cabeceira do Valo, por se tratar de áreas privadas com produção agrícola.



**Figura 28** - Localização geográfica dos poços de monitoramento das águas subterrâneas.

A proposta inicial previa a perfuração dos poços com uso do método roto-pneumático com uso de compressor e martelo hidráulico, uma vez que este método é mais rápido. Entretanto, no início da operação de perfuração do conduto do Poço 1 verificou-se que este método, apesar de rápido e eficiente em locais com solos rasos e rochas resistentes, não poderia ser aplicado ao terreno composto majoritariamente por ardósias alteradas recobertas por solos espessos. Desta forma, o método de perfuração foi alternado para o rotativo com circulação de lama (Figura 29). Neste caso, a retirada do material triturado do poço é feita por circulação reversa, isto é, a água entra pelo interior da seção hastes + broca e sai pelo espaço anelar entre as hastes + broca e a parede do poço, podendo ser recirculada ou descartada de acordo com sua densidade e a decisão do sondador. Para a descrição do material interceptado durante a perfuração, o Geólogo que acompanha a obra coleta amostras de calha (Figura 30) diretamente na entrada da caixa de lama.

Para a construção dos poços LX11, LX12, LX13 e LX14 foi necessário o uso do sistema roto-pneumático, pois a perfuração alcançou rocha classificada como quartzito grosso, coeso e silicificado (não passível de ser perfurada pelo método rotativo com circulação de lama).

A sequência construtiva dos poços de monitoramento seguiu o seguinte procedimento geral: perfuração do canal cilíndrico com a profundidade previamente determinada, instalação da seção revestimento-filtro (Figura 31), posicionamento do pré-filtro (Figura 32), posicionamento de eventuais seções de selos de bentonita, concretagem da porção superior do poço e instalação do sistema de acabamento e proteção. Os poços foram perfurados com diâmetro de 6 a 7 polegadas e revestidos com PVC Geomecânico ranhurado. Na base da seção dos tubos de revestimento-filtro foi utilizado um *cap* rosqueável.

O acabamento e sistema de proteção do poço contam com: um *cap* rosqueável diretamente no tubo de PVC de 4 polegadas, um tubo de aço carbono de seis polegadas em sua parte externa (dotado de um cadeado de 40 mm protegido por chapa de aço galvanizado), além de uma manilha de concreto com 60 cm de diâmetro dotada de tampa, também em concreto (Figura 33). Os poços situados em área urbana ainda contam com uma cerca de arame farpado com 7 fios e cadeado de proteção (Figura 34).

Os poços tiveram profundidades variáveis de 14, 24, 30, 50 ou 70 metros em função da sua localização, objetivo de instalação e da profundidade do nível freático local. A Tabela 6 traz as principais características dos poços de monitoramento instalados no âmbito do presente trabalho e o Apêndice 2 traz os detalhes construtivos, incluindo descrição da seção pedológica / litológica, seção de instalação dos filtros, acabamento e demais aspectos construtivos dos poços.

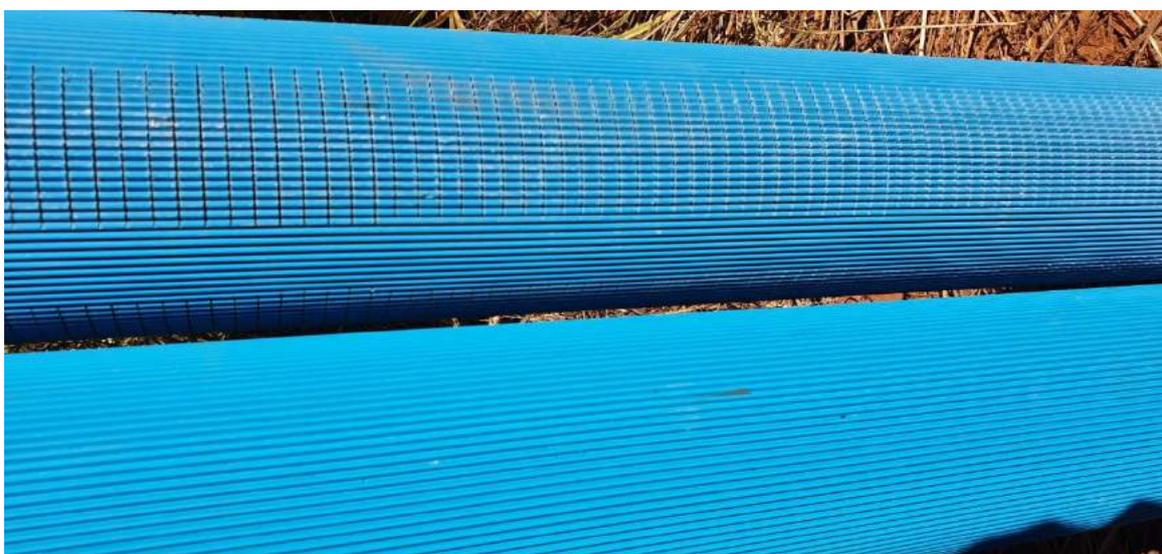
O isolamento sanitário da porção rasa dos poços varia de 4 a 6 metros de concreto no espaço anelar entre o revestimento e o conduto. Este selo tem como objetivo evitar a contaminação direta pelo escoamento superficial de efluentes.



**Figura 29** - Perfuração do poço LX14, mostrando a torre com sistema hidráulico, as hastas metálicas e a caixa de circulação de lama. O caminhão pipa situado ao lado da torre do sistema hidráulica fornece água para circulação no interior do conduto.



**Figura 30** - Amostra de calha coletada na entrada da caixa de lama durante a perfuração do poço LX 12. Notar que se trata de areia grossa com grãos esféricos típicos dos observados no topo da Formação Ribeirão Piçarrão do Grupo Paranoá.



**Figura 31** - Detalhes dos tubos de PVC Geomecânico de 4 polegadas utilizados na coluna de revestimento e filtro nos poços de monitoramento instalados pelo presente estudo.



**Figura 32** - Detalhe do pré-filtro utilizado na maior parte dos poços.



**Figura 33** - Sistema de proteção triplo, composto por *cap* de PVC rosqueável, tubo de aço carbono com tampa e cadeado e manilha em concreto com tampa.



**Figura 34** - Cerca de proteção de poços instalados na área urbana da Cidade Estrutural.

Poço	Coordenadas		Zona	Prof. (m)	NE (m)	Seção de filtros (intervalos)	Formação Geológica
	UTME	UTMN					
LX-1	180389	8253605	23L	24,0	5,11	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-2	180141	8253872	23L	24,0	3,07	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-3	180386	8254801	23L	24,0	8,38	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-3A	180457	8255053	23L	14,0	8,15	4,0 (10 a 6)	Ribeirão do Torto
LX-4	180163	8254225	23L	24,0	1,77	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-4A	180138	8254152	23L	14,0	1,16	4,0 (10 a 6)	Ribeirão do Torto
LX-5	180011	8254147	23L	24,0	3,65	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-6	179728	8254098	23L	60,0	6,17	14,0 (42 a 38, 30 a 24 e 16 a 12)	Ribeirão do Torto
LX-7	179498	8254300	23L	30,0	12,55	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-8	178739	8255129	23L	30,0	13,77	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-9	821274	8255631	22L	30,0	11,66	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-10	821112	8255865	22L	24,0	8,84	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão Piçarrão
LX-11	821042	8255351	22L	14,0	8,84	4,0 (10 a 6)	Ribeirão Piçarrão
LX-12	820971	8254813	22L	30,0	7,63	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão Piçarrão
LX-13	821052	8254156	22L	30,0	8,00	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão Piçarrão
LX-14	821105	8253742	22L	20,0	9,6	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão Piçarrão
LX-15	821298	8252893	22L	30,0	8,20	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-16	821206	8253347	22L	24,0	8,99	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-17	178835	8253354	23L	50,0	14,20	14,0 (42 a 38, 30 a 24 e 16 a 12)	Ribeirão do Torto
LX-18	179507	8253233	23L	30,0	7,74	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-19	180073	8253164	23L	30,0	5,30	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto

**Tabela 6** - Localização e principais características construtivas dos poços de monitoramento instalados nas adjacências do maciço de aterro (incluindo Parque Nacional de Brasília, limites externos do Lixão e área urbana da cidade Estrutural). NE medidos nos dias 04 e 05/08/20 (e dia 22/08/20 LX16 e LX18). As coordenadas são obtidas diretamente do GPS portátil para facilitar a verificação em campo.

A rede de monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos é composta pelos poços instalados pelo presente projeto, além de um poço instalado em projeto de pesquisa anterior (Abreu, 2001) denominado Poço LX-20, de mais 5 poços instalados pelo Projeto CEB/Finattec denominados poço: PCX1 e PCX2 (situados na crista do maciço de lixo), PX Moinho, PX Entrada e PX Norte, além do Poço 18 da rede de monitoramento da Adasa. Portanto, a rede de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas associada à área do maciço de lixo e adjacências é composta por 27 pontos de acesso direto à zona saturada do aquífero freático local.

A maior parte dos poços objetiva ao monitoramento e avaliação do aquífero freático local associado ao Sistema Intergranular P1, contudo, os poços LX-6 e LX-17 permitem acesso ao aquífero fraturado do Subsistema A e os poços LX11, LX12, LX13 e LX-14 permitem acesso ao Subsistema S/A ambos do Sistema Paranoá.

A rede de monitoramento das águas subterrâneas deverá ser aplicada para monitoramento da qualidade das águas (ou alternativamente da pluma de contaminação) e da variação dos níveis

freáticos, sendo desta forma uma rede para monitoramento quali-quantitativo das águas subterrâneas.

### **5.3.2 Métodos Analíticos e Procedimentos de Coleta de Amostras**

Para a realização das análises das substâncias consideradas no presente estudo foram utilizados / aplicados os seguintes métodos analíticos:

- Determinação de metais totais, solúveis/dissolvidos por espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplada (ICP-OES), com os seguintes Limites de Quantificação (LQ): antimônio 1 µg/L; arsênio 1 µg/L; bário 10 µg/L; cádmio 1 µg/L; cálcio 0,1 mg/L; chumbo 10 µg/L; cobalto 10 µg/L; cobre 1 µg/L; cromo 10 µg/L; magnésio 0,1 mg/L; mercúrio 0,1 µg/L; níquel 10 µg/L; sódio 0,2 mg/L e zinco 10 µg/L;
- Determinação de cloreto total e nitrato (como N) por espectrofotometria com LQ = 0,1 mg/L;
- Determinação de nitrato (como N) por espectrofotometria com LQ = 0,23 mg/L;
- Determinação de nitrito (como N) por espectrofotometria com LQ = 0,015 mg/L;
- Determinação de amônia (como NH<sub>3</sub>) e amônio por espectrofotometria com LQ = 0,015 mg/L;
- Determinação de demanda química de oxigênio (DQO) por espectrofotometria com LQ = 3 mg/L.

As análises foram realizadas no Laboratório Tommasi Ambiental, filial de Brasília, situado em Taguatinga, Distrito Federal. As amostras foram coletadas pelos técnicos responsáveis pelo presente estudo, seguindo as melhores práticas para se evitar qualquer tipo de contaminação durante a amostragem (uso de luvas, limpeza prévia das sondas de leituras *in situ*, identificação dos fracos fornecidos pelo laboratório, dentre outras práticas).

Todas as coletas de amostras foram realizadas com auxílio de um amostrador tipo “*bailer*”. Para a coleta de amostras a diferentes profundidades de forma a ser verificar a possibilidade de estratificação da pluma de contaminação foram acoplados pesos no *bailer* para que este possa submergir no interior da coluna de água do poço e amostrar águas nas zonas dos filtros (Figura 35).

No ato da coleta são realizadas medidas de parâmetros físico-químicos denominadas análises *in situ*, que incluem a temperatura da amostra, seu pH e a condutividade elétrica, com auxílio de equipamentos portáteis multiparâmetro dotado de sondas específicas (Figura 36).

Após coleta, as amostras foram preservadas em caixa de isopor com gelo para manutenção da temperatura abaixo de 20° C.

### 5.3.3 Resultados das Análises Químicas

A Tabela 7 traz os resultados de análises químicas e parâmetros físico-químicos de amostras de águas subterrâneas coletadas em poços de monitoramento situados sobre o maciço de resíduos e em suas adjacências (incluindo área do Parque Nacional de Brasília e área urbana da Cidade Estrutural). O Anexo 1 traz os laudos dos resultados das análises realizadas pelo Laboratório Tommasi Ambiental.



**Figura 35** - Amostragem de água no poço LX3 situado no Parque Nacional de Brasília. Notar o detalhe dos pesos acoplados no corpo do *bailer*. A água se apresenta turva, pois a obra do poço havia sido recém-concluída.



**Figura 36** - Sonda multiparâmetro YSI Professional Plus e sonda HQ 40d da Hach Instruments, utilizadas para coleta dos parâmetros (pH, temperatura, total de sólidos dissolvidos (TDS), e condutividade elétrica (CE)).

Poço-Amostra Parâmetro	LX2-01	LX3A-01	LX4A-01	LX5-01	LX6-01	LX7-01	LX7A-01	LX8-01	LX9-01	LX10-01	LX11-01	LX12-01
<b>Prof. Amostragem</b>	10,0	10,0	10,0	15,0	20,0	20,0	8,5	20,0	20,0	18,0	12,0	15,0
<b>Cond. Elétrica.</b>	300	35	88,3	302,4	143,1	210	2.330	156	169	226	3.640	4.640
<b>Temp.</b>	22,6	22,3	23,1	23,2	23,3	22,8	23,8	23,4	22,5	23,5	23,5	26,8
<b>pH</b>	11,8	6,7	6,9	8,3	7,5	8,4	8,1	8,4	8,8	8,64	12,9	7,9
<b>Amônia</b>	< LQ	< LQ	< LQ	1,2	0,5	1,8	121,5	0,5	< LQ	< LQ	28,7	280,0
<b>Nitrito</b>	0,604	< LQ	0,014	0,3	0,009	0,004	1,108	0,350	0,088	0,159	0,289	0,019
<b>Nitrato</b>	3,6	0,3	< LQ	0,6	0,7	3,2	15,2	1,9	0,90	0,90	2,6	0,6
<b>Cloreto</b>	7,9	7,6	1,1	18,0	10,5	8,5	261,0	26,8	9,9	13,6	388,0	508,0
<b>Sulfato</b>	3,0	< LQ	2,0	2,0	4,0	6,0	26,0	4,0	4,0	2,0	8,0	126
<b>DQO</b>	< LQ	< LQ	< LQ	8,0	< LQ	20,0	1.260	16,0	16,0	< LQ	108,0	204,0
<b>Antimônio</b>	< LQ	< LQ	< LQ	0,0054	< LQ	0,0058	< LQ	0,0057	0,004	< LQ	< LQ	< LQ
<b>Arsênio</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
<b>Bário</b>	0,09	0,03	< LQ	0,078	0,0195	0,119	0,086	0,066	0,027	0,035	0,401	0,079
<b>Cádmio</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,035	< LQ	< LQ
<b>Chumbo</b>	0,034	< LQ	0,0442	0,05	< LQ	0,041	< LQ	0,114	0,088	0,033	0,014	0,016
<b>Cobalto</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
<b>Cobre</b>	0,0029	< LQ	< LQ	0,0023	< LQ	0,0059	0,0064	0,0037	< LQ	0,0011	0,021	0,0028
<b>Crômio</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,047	< LQ
<b>Mercúrio</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
<b>Níquel</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,010	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,018	< LQ
<b>Zinco</b>	0,299	0,074	0,0559	0,279	0,0364	0,589	0,096	0,392	0,069	0,049	0,336	0,045
<b>Cálcio</b>	83,19	3,97	7,98	26,26	10,7	52,32	43,07	21,97	16,6	25,37	342,36	26,98
<b>Magnésio</b>	5,76	0,654	0,826	12,87	0,719	24,38	9,77	7,79	6,63	12,3	31,9	31,79
<b>Sódio</b>	27,01	0,718	3,73	36,87	3,25	40,91	136,13	48,6	44,94	46,64	69,57	298,27

Poço-Amostra Parâmetro	LX13-01	LX14-01	LX15-01	LX17-01	LX19-01	LX20-01	CH1-01	PX ENTR-01	PX MOINHO- 01	PX NORTE- 01	PX1- 01	PCX1- 01
<b>Prof. Amostragem</b>	15,0	20,0	15,0	15,0	15,0	2,5	3,0	20,0	20,0	15	21	21
<b>Cond. Elétrica.</b>	1.532	227,0	198,4	56,0	176,0	44,3	5.990	127,5	959,0	17.800,0	361,0	15.470,0
<b>Temp.</b>	23,3	23,7	23,3	24,2	22,3	23,4	29,5	27,2	25,6	29,5	30,0	41,6
<b>pH</b>	7,6	8,3	7,6	6,1	9,2	5,56	7,77	6,3	7,76	8,75	7,0	7,83
<b>Amônia</b>	47,0	< LQ	< LQ	< LQ	2,0	2,90	402,0	<LQ	71,0	1.800,0	3,8	1.130,0
<b>Nitrito</b>	0,404	0,250	0,017	0,029	0,051	< LQ	< LQ	< LQ	0,228	0,002	0,083	< LQ
<b>Nitrato</b>	20,20	0,5	10,30	2,0	1,70	0,7	< LQ	0,20	0,70	1,0	0,30	0,50
<b>Cloreto</b>	198,0	63,5	12,5	16,5	11,6	5,6	655,0	5,9	320,0	1.480,0	28,0	1.352,0
<b>Sulfato</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	8,0	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	40,0	2,0	12,0
<b>DQO</b>	34,0	3,0	11,0	101,0	8,0	< LQ	1.260	15,0	697,0	3.070,0	132,0	2.042,0
<b>Antimônio</b>	0,0029	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,0289	< LQ	< LQ				
<b>Arsênio</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,1335	< LQ	< LQ					
<b>Bário</b>	0,163	0,186	0,0304	0,051	0,014	< LQ	0,236	0,049	0,236	0,05	0,067	0,248
<b>Cádmio</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ					
<b>Chumbo</b>	0,038	0,289	< LQ	< LQ	0,133	< LQ	< LQ	0,051	< LQ	0,048	< LQ	< LQ
<b>Cobalto</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,048	< LQ	< LQ					
<b>Cobre</b>	0,0012	0,0532	< LQ	< LQ	0,0014	0,0069	< LQ	< LQ	< LQ	0,0058	0,0045	< LQ
<b>Crômio</b>	< LQ	0,116	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,015	< LQ	0,062	< LQ	0,0434
<b>Mercúrio</b>	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ					
<b>Níquel</b>	< LQ	0,017	<LQ	< LQ	0,144	> LQ	0,0972					
<b>Zinco</b>	0,056	0,111	0,0509	0,033	0,082	0,050	0,037	0,058	0,037	0,138	0,064	0,0543
<b>Cálcio</b>	64,55	34,4	17,4	1,77	10,06	0,37	106,67	8,3	1,53	15,2	25,4	32,5
<b>Magnésio</b>	28,98	2,83	0,59	0,42	2,40	0,19	107,32	0,63	0,41	13,5	2,98	38,6
<b>Sódio</b>	98,33	8,62	11,7	8,39	37,38	9,07	367,36	9,71	27,4	893,0	5,64	687,0

**Tabela 7** - Dados de análises de amostras coletadas em poços de monitoramento sobre o lixão e adjacências. Profundidade de amostragem em metros;

Condutividade elétrica em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; Temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ ; demais substâncias em  $\text{mg}/\text{L}$ . LQ - limite de quantificação do método analítico.

Amostragens realizadas em 24 de julho de 2020 e em 14 de agosto de 2020.

Os valores de referência para comparação com os resultados do presente estudo são referidos à Resolução Conama 396 de 03 de abril de 2008 (que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências). Conforme a supracitada resolução as substâncias apresentam os seguintes valores relativos à Classe Especial: pH entre 6 e 9; amônia 1,5 mg/L; nitrito 1,0 mg/L; nitrato 10,0 mg/L; cloreto e sulfato 250,0 mg/L; antimônio 5 µg/L; arsênio 10 µg/L; bário 700 µg/L; cádmio; 5 µg/L; chumbo 10 µg/L; cobalto 70 µg/L; cobre 2,0 mg/L; crômio 50 µg/L; mercúrio 1 µg/L; níquel 70 µg/L; zinco 1,8 mg/L e sódio 200,0 mg/L. As demais substâncias avaliadas não apresentam correspondentes na legislação brasileira.

Os resultados das análises mostram uma grande variação da condutividade elétrica da água subterrânea na poligonal estudada, e indicam que os dados hidroquímicos corroboram integralmente com os dados geofísicos evidenciando que a ampla maioria dos poços instalados confirma a presença da pluma de contaminação em profundidade.

O uso dos resultados de condutividade elétrica (CE) do fluido (água ou efluente) é indicado, pois este parâmetro é diretamente proporcional a todas as substâncias presentes na zona amostrada do aquífero. Alternativamente podem-se utilizar dados de totais de sólidos dissolvidos (TSD ou TDS na sigla em inglês). A partir dos dados de CE é possível separar as zonas de contaminação em três zonas contrastantes:

- Zona de máxima concentração correspondente à porção de geração do chorume pela decomposição dos resíduos. Esta região é fortemente vinculada ao maciço de lixo e suas adjacências, mas pode ser ampliada em função de variações das propriedades dos aquíferos (ex.: presença de valores anômalos de condutividade hidráulica, ou aumento do gradiente hidráulico pela elevação da pilha de resíduos). Nesta zona as concentrações são superiores a 1000 µS/cm, chegando ao valor de 17.800 µS/cm no ponto ao norte do lixão;
- Zona de espalhamento corresponde à região marginal do lixão que pode alcançar até mais 500 metros para a direção sudoeste, sendo definida por valores de condutividade elétrica variáveis de 1000 a 200 µS/cm;
- Zona de diluição corresponde à borda externa da pluma a qual apresenta valores menores que 200 µS/cm, contudo sempre mais elevados que os valores de *background* para águas freáticas dos aquíferos do Distrito Federal (associados a latossolos). Esta zona pode alcançar de forma comprovada até mais de 1 km em direção a sudoeste do lixão mais recente ou cerca de 600 metros a sudoeste de aterros considerados antigos.

Os valores dos metais de transição (metais com peso atômico elevado) nas diferentes posições com relação à pluma de contaminação são relativamente baixos. Este fato não é exclusivo do Lixão da Estrutural, mas observado em outros extratos de resíduos como os observados nos Estados Unidos (em Du Page, Illinois e na média dos aterros do estado de

Wisconsin; Fetter, 1994) (Tabela 8). A relativa baixa concentração de metais nos diferentes tipos de chorume é atribuída à origem dos resíduos, que são dominante ou exclusivamente relacionados a lixo doméstico em que o volume de resíduos orgânicos domina e as fontes para disponibilização de metais é restrita (grande parcela é retirada para reciclagem antes de se incorporar ao aterro) (Fetter *et al.*, 2018).

O pH apresenta ampla variação podendo alterar de ácidos até fortemente alcalinos, em função do tempo de operação do aterro, do tempo de geração do chorume e do clima da região em que os resíduos estão aterrados.

<b>Substâncias Seleccionadas</b>	<b>Du Page, Ilinois, EUA (média)</b>	<b>Wisconsin, EUA (intervalo de variação)</b>
Condutividade Elétrica	10.200	408,8 - 35.301
pH	6,9	5 - 8,9
Amônia	862	26 - 557
Nitrito	-	0 - 0,11
Nitrato	-	0 - 1,4
Cloreto	3.484	2 - 2.651
Sulfato	< 0,10	8,4 - 500
DQO	1.340	1.120 - 50.450
Antimônio	-	0 - 3,19
Arsênio	0,11	0 - 0,225
Bário	-	0 - 5,0
Cádmio	1,95	0 - 0,07
Chumbo	4,46	0 - 1,11
Cobre	< 0,10	0,32
Crômio	< 0,10	> LQ
Merúrio	0,0008	0 - 0,01
Níquel	0,3	0 - 1,65
Zinco	18,8	0 - 54
Cálcio	46,8	200 - 2.100
Magnésio	233	120 - 780
Sódio	748	12 - 1.630
Potássio	501	0 - 1.375
Manganês	< 0,1	0,03 - 25,9
Ferro	4,2	2,1 - 1.400

**Tabela 8** - Concentrações de substâncias selecionadas medidas em aterros de resíduos urbanos na cidade de Du Page, Ilinois, EUA e valores mínimos em máximos encontrados em aterros do estado de Wisconsin, EUA. Condutividade elétrica em  $\mu\Omega/\text{cm}$  e demais substâncias em  $\text{mg/L}$  (Fetter, 1994).

No caso do Lixão da Estrutural os principais indicadores da presença e concentração do chorume em profundidade são a condutividade elétrica, pH, amônia, cloreto, DQO, cálcio, magnésio e sódio. O pH é fortemente alcalino nas zonas de produção do chorume e tende a diminuir a alcalinidade quando há diluição com águas de recarga. O aquífero freático, sem qualquer contato com o extrato dos resíduos varia de ácido a levemente ácido.

O par sódio e cloreto em associação com amônia, cálcio e magnésio são poderosos indicadores da presença de águas subterrâneas contaminadas por chorume. A origem do sódio e do cloreto é atribuída a alimentos processados (restos de comida) que são levados em grandes volumes ao aterro. A amônia também é associada à decomposição de alimentos, e uma vez que o ambiente do aterro é fortemente redutor o nitrogênio permanece na forma de amônia ( $\text{NH}_4$ ) e não oxida para nitrito e nitrato como é comum nos ambientes subterrâneos com condições Redox positivas, isto é ambiente oxidante. O cálcio e o magnésio são considerados como oriundos da dissolução de concreto encontrado em grande volume no aterro, associado a escombros de demolição e restos de obras.

Para maior destaque dos indicadores da contaminação será apresentada a discussão sobre as principais substâncias que ocorrem nas águas subterrâneas das adjacências do Lixão, bem como seu comportamento e comparação com os valores naturais de *backgrounds* relativos aos subsistemas aquíferos que ocorrem na área de estudo.

Amônia varia de menor que o limite de quantificação do método analítico alcançando valores de 1.800 mg/L no chorume mais denso. Esta substância representa a forma mais reduzida da série nitrogenada e sua concentração diminui progressivamente quando se afasta da zona de produção do chorume, como efeitos da diluição pela água de recarga e por oxidação. Entretanto, é possível afirmar que deve existir alguma forma de eliminação da amônia na fase gasosa, uma vez que as concentrações de nitrato presentes nas faixas marginais da pluma são reduzidas e não correspondem à oxidação total da amônia. Esta observação pode ser feita também a partir da avaliação dos teores de nitrito observados nas porções mais distais da fonte de geração do chorume.

O sódio varia de 0,718 até 893,0 mg/L e o cloreto de 1,1 a 1.480,0 mg/L e são íons associados à dissolução do sal de cozinha ou NaCl oriundo de alimentos. Na maior parte dos pontos de amostragem estes íons não apresentam relação de proporcionalidade de concentrações, o que é comum em efluentes de fossas domésticas. Assim, admitem-se possíveis outras fontes de sódio e cloreto, provavelmente vinculadas a alimentos industrializados.

O cálcio varia de valor menor que 1 mg/L, o que é considerado o *background* regional até 106 mg/L o que é reconhecido como contaminação e provávelmente oriunda da dissolução de blocos de concreto e restos de obras comumente encontrados na massa de resíduos. Um valor considerado *outlier* de 342 mg/L é atribuído à contaminação por cimento utilizado na completação do poço que teve vazamento durante a instalação do isolamento sanitário composto por concreto (mistura de areia, brita e cimento).

O magnésio varia de 0,41 até o máximo de 107,32 mg/L, sendo que o valor considerado como natural é até 1,5 mg/L. Assim todos os valores acima de 3,0 mg/L são comprovadamente

associados à contaminação. Como apresenta geoquímica similar à do cálcio as mesmas fontes de contaminação são consideradas para este cátion divalente.

A DQO ou demanda química de oxigênio corresponde a um indicador de matéria orgânica que é baseado na concentração do oxigênio consumido para a oxidação da M.O., sendo geralmente medida como  $\text{mgO}_2/\text{L}$  ou simplesmente  $\text{mg/L}$ . No caso dos efluentes derivados da decomposição de resíduos domésticos é um indicador robusto, pois nos aterros as condições redutoras são alcançadas em grande parte pelas reações de oxidação que elevam os valores da DQO. No caso do Lixão da Estrutural os valores variam desde inferiores ao limite de quantificação do método analítico até maiores que  $3.000 \text{ mgO}_2/\text{L}$  na porção mais crítica de geração do chorume.

Os metais selecionados representados por antimônio, arsênio, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, mercúrio, níquel e zinco ocorrem de forma geral abaixo do limite de quantificação do método analítico e apenas em casos isolados ocorrem com teores da ordem de microgramas por litro, sempre abaixo dos limites estabelecidos nos parâmetros de qualidade da água para diferentes finalidades.

O pH apresenta ampla variação como é comum nos efluentes de lixões, sendo que os indicadores funcionam da seguinte forma: efluente mais alcalino representa porções de chorume mais concentrado e quando se dilui a solução pela entrada das águas de recarga há diminuição progressiva da alcalinidade. Valores de pHs mais ácidos são indicadores de águas subterrâneas de melhor qualidade. Ainda pode-se afirmar que os valores das primeiras campanhas de medição de pH *in situ* ainda devem trazer influência da construção dos poços de monitoramento, uma vez que o isolamento sanitário utilizou cimento na sua composição, o que é foi particularmente evidenciado nos poços LX11 e LX19.

A temperatura medida *in situ* é um indicador importante da contaminação e concentração do chorume. As maiores temperatura medidas correspondem às maiores concentrações do chorume traduzidas pela condutividade elétrica também medida *in situ*. O poço PCX1 apresenta temperatura maior que  $40^\circ\text{C}$  e os poços PX Norte, PX1 e CH1 mostram temperaturas da ordem de  $30^\circ\text{C}$ . Estes poços correspondem aos locais mais próximos ao centro produtor do chorume, localizados na porção norte do maciço de resíduos. Quando se afasta para as áreas marginais da pluma de contaminação há redução da temperatura para valores entre  $22$  e  $23^\circ\text{C}$ .

O sulfato ocorre abaixo do limite de quantificação para a maior parte dos pontos de amostragem. Apenas em um local de máxima concentração do chorume no ambiente subterrâneo os valores alcança  $126 \text{ mg/L}$ , em outros 3 pontos variam de  $12$  a  $40 \text{ mg/L}$  e nas demais ocorrências os teores são da ordem da unidade. Este comportamento é esperado em função da condição redutora da contaminação, sendo que o enxofre deve ocorrer na forma de sulfeto ou

sulfito. De qualquer forma, o por se tratar de uma substância pouco reativa sua diluição em função das entradas das águas de recarga naturais é bastante efetiva.

Com a continuidade do monitoramento a avaliação de ocorrência e persistência dos diferentes substâncias analisadas deverá facilitar a definição dos melhores indicadores para a contaminação das águas subterrâneas e a porção do aquífero comprometida pela pluma de chorume.

#### **5.3.4 Mapa da Extensão da Pluma de Contaminação**

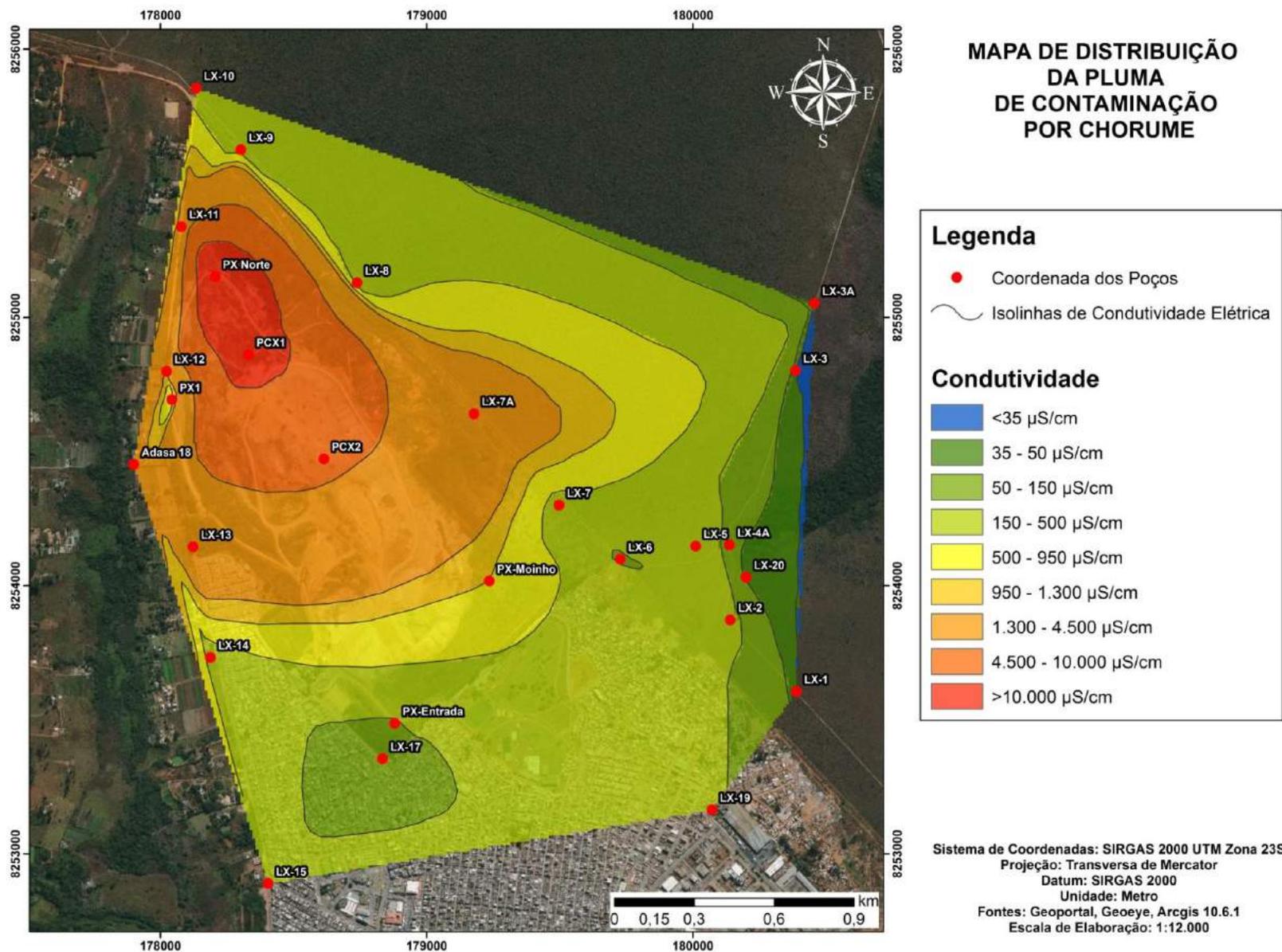
A Figura 37 apresenta o mapa da pluma de contaminação por percolados líquidos do antigo Lixão da Estrutural, tendo sido integrado a partir dos resultados do estudo geofísico com os dados de análises de águas coletadas nos poços de monitoramento e em poços existentes na região do Lixão da Estrutural e adjacências.

A distribuição da pluma foi representada a partir da condutividade elétrica (em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) do fluido amostrado de cada ponto com acesso direto à zona saturada do aquífero freático. Este parâmetro é o mais adequado para a determinação da densidade e concentração do contaminante, uma vez que representa todas as espécies iônicas dissolvidas na água. Também apresenta relação direta entre as zonas de produção do chorume e as zonas de espalhamento e diluição. O mapa foi classificado em 8 classes discriminadas por cores, incluindo as seguintes concentrações de contaminantes ou condutividades elétricas: < 35, entre 35 e 50, entre 50 e 500, entre 500 e 950, entre 950 e 1.300, entre 1.300 e 4.500, entre 4.500 e 10.000 e maior que 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A opção pelo uso de intervalos não regulares se deve às relações de áreas de interpolação das diferentes classes.

O método do “*Vizinho mais Próximo*” foi adotado para operação de interpolação, pois os dados apresentam contrastes, além da baixa densidade do banco de dados hidroquímicos, contudo boa distribuição espacial.

As áreas destacadas em vermelho (tons mais escuro e claro) representam a zona de produção da pluma de chorume (imediatamente abaixo da principal zona de acumulação de resíduos), o que representa concentração de chorume muito elevada, com condutividades elétricas do fluido maiores que 4.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (alcançando 14.700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em um poço de monitoramento instalado na porção norte do maciço de resíduos).

A faixa destacada em tons de cor laranja (claro e escuro) e amarelo representa a zona de distribuição do contaminante, com concentração moderada à alta com condutividades elétricas do fluido entre 4.500 e 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esta classe inclui uma estreita faixa destacada em amarelo que representa a passagem da zona de mistura da pluma de maior concentração com águas de recarga natural.



**Figura 37** - Distribuição da pluma de contaminação por chorume baseada na condutividade elétrica do fluido (medição realizada em agosto de 2020). Sistema de coordenadas plana SIRGAS 2000 Zona 23. Imagem base obtida do Sistema *Google Earth*, de maio de 2020.

A poligonal externa delimitada nas cores em tons de limão e verde representa a zona de dispersão da pluma de contaminação, o que na prática indica pluma diluída marcada por condutividades elétricas entre 35 e 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A área com valores entre 35 e 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  é bastante expressiva e marca a grande capacidade de depuração natural da pluma por águas de recarga.

A área restrita de cor verde em tom mais escuro, apenas situada no Parque Nacional de Brasília, apresenta valor de condutividade elétrica inferior a 35  $\mu\text{S}/\text{cm}$  o que é considerado o background do aquífero freático regional.

## **6. MAPA POTENCIOMÉTRICO**

### **6.1 Método de Interpolação**

Um conjunto de 27 pontos foi utilizado para a confecção do mapa potenciométrico e consequente determinação da direção e sentido do fluxo subterrâneo. Este banco de dados (Tabela 9) é composto por 19 poços instalados pelo presente estudo, mais 6 poços instalados pelo projeto CEB / Finatec, e um poço operado pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (Poço Raso número 18 da rede de monitoramento das águas subterrâneas da ADASA).

A determinação do georreferenciamento foi feito com auxílio de GPS portátil sobre cada ponto e a cota foi obtida a partir do Modelo Digital de Elevação com uso de imagens de grande resolução espacial (com possibilidade de ampliação até 1:12.500), sendo que os valores obtidos foram comparados com os obtidos por GPS barométrico em campo (com erro de 50 cm na elevação).

A carga potenciométrica em cada ponto foi obtida pela subtração da cota em cada ponto menos a medida do nível estático - NE de cada poço, menos a elevação da boca do poço até o nível do terreno. Após a consolidação dos dados a interpolação foi realizada com auxílio do software ArcGis 9.4 da ESRI, com uso do interpolador definido como “*Vizinho mais Próximo*”. Como a maior parte da área apresenta pequeno desnível optou-se por aplicar as isolinhas de carga potenciométrica (isopiezas) a cada 2 metros.

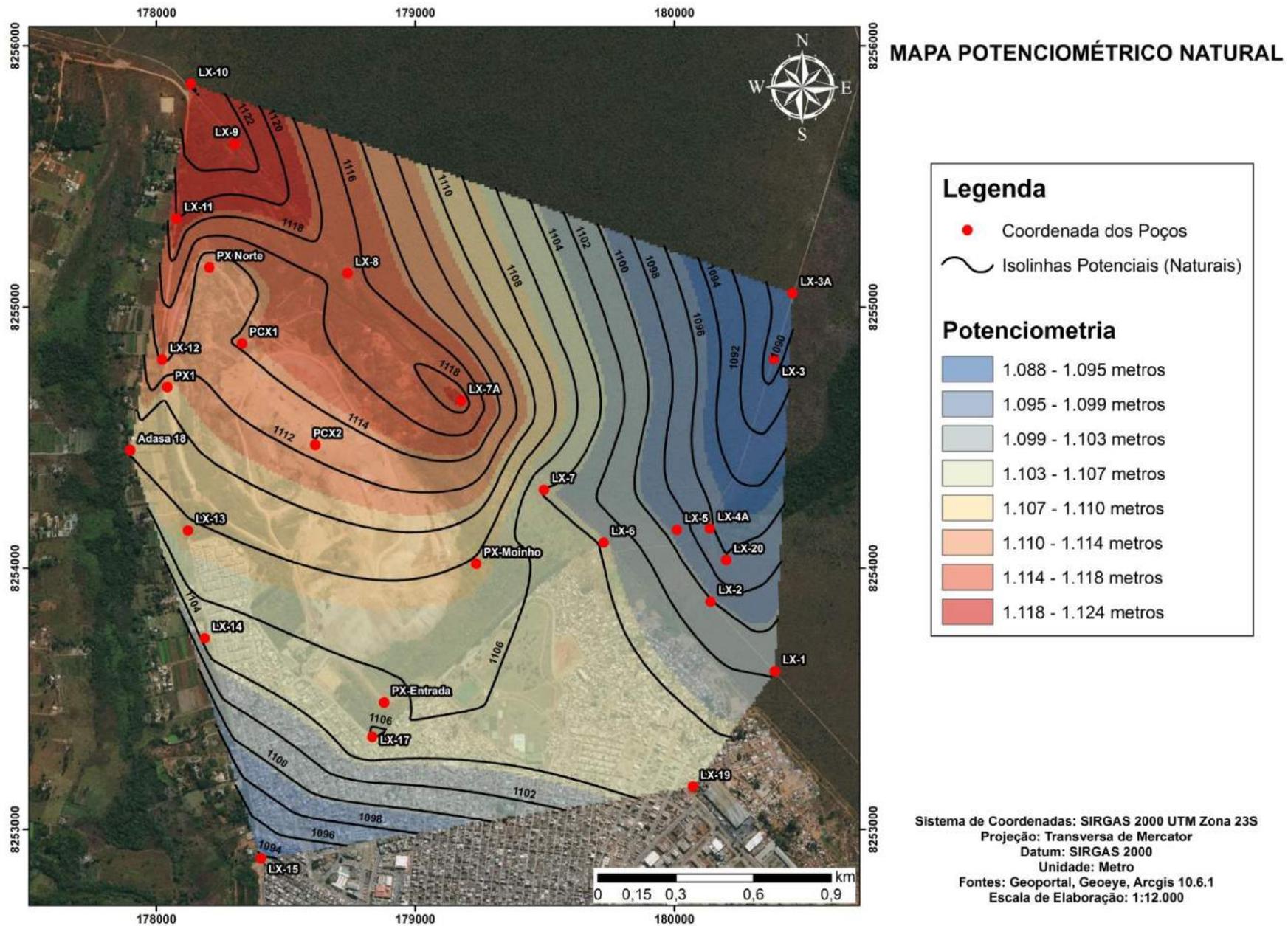
O banco de dados permitiu confeccionar três produtos cartográficos: Mapa de Carga Potenciométrica Natural (considerando a área sem a acumulação de resíduos sólidos), Mapa Potenciométrico Atual (que inclui as mudanças topográficas devidas ao acúmulo dos resíduos) e Mapa da Espessura da Zona Não Saturada do Aquífero Freático. Na produção cartográfica digital optou-se pela representação dos mapas apenas no interior das áreas limitada pela presença de dados (poços), uma vez que fora desta região não há dados disponíveis.

PONTO	POÇO	Coordenadas		Cota Terreno	HBT	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	NE (m)
		UTME	UTMN				
1	LX-1	180389	8253605	1105,37	0,45	35,8	5,11
2	LX-2	180141	8253872	1102,81	0,62	182,0	3,07
3	LX-3	180386	8254801	1096,94	0,45	35,4	8,38
4	LX-3A	180457	8255053	1095,83	0,37	35,0	8,15
5	LX-4A	180138	8254152	1097,38	0,42	60,0	1,16
6	LX-5	180011	8254147	1102,23	0,59	332	3,65
7	LX-6	179728	8254098	1108,91	0,35	118,2	6,17
8	LX-7	179498	8254300	1116,22	0,39	258,0	12,55
9	LX-8	178739	8255129	1130,21	0,24	203	13,77
10	LX-9	821274	8255631	1134,97	0,55	216	11,66
11	LX-10	821112	8255865	1132,30	0,34	237	8,84
12	LX-11	821042	8255351	1128,75	0,34	2.140	8,84
13	LX-12	820971	8254813	1121,48	0,36	1.281	7,63
14	LX-13	821052	8254156	1115,61	0,34	2.260	8,00
15	LX-14	821105	8253742	1114,45	0,26	227	9,6
16	LX-15	821298	8252893	1100,82	0,32	198,4	8,20
17	LX-17	178835	8253354	1120,90	zero	60,0	14,7
18	LX-19	180073	8253164	1110,65	0,32	176,0	5,30
19	LX-20	180201	8254031	1097,84	0,31	44,3	2,20
20	LX-7A	179178	8254641	1128,20	zero	2.420	7,95
21	PX Moinho	179236	8254017	1127,02	zero	959,0	13,40
22	PX Entrada	178881	823486	1122,71	0,60	127,5	17,24
23	PX Norte	821163	8255161	1136,78	0,03	17.800	21,07
24	PX1	820988	8254707	1120,18	zero	361,0	9,95
25	PCX1	821281	8254866	1143,99	0,70	14.090	21,03
26	PCX2	178615	8254472	1150,0	1,30	6.100	20,30

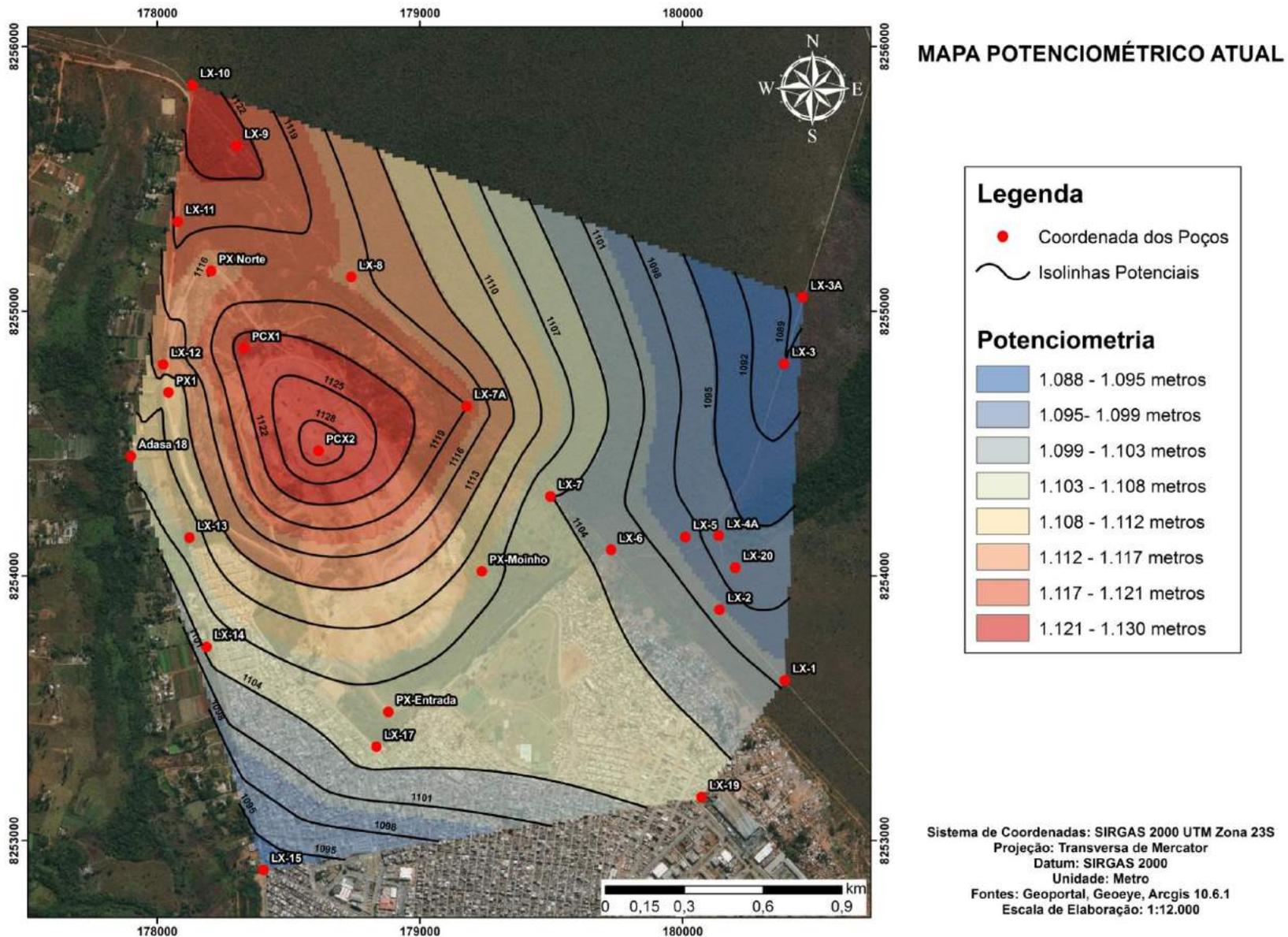
**Tabela 9** - Banco de dados utilizado para a confecção do mapa potenciométrico da área estudada. Cota do terreno com referência ao nível do mar; HBT - elevação da boca do poço ao nível do terreno, CE - condutividade elétrica do fluido e NE - nível estático. As coordenadas são obtidas diretamente do GPS portátil para facilitar a verificação em campo, uma vez que a área está inserida no limite entre as zonas 22 e 23.

O mapa da Figura 38 mostra o Mapa Potenciométrico Natural, isto é, antes da acumulação da pilha de resíduos, com linhas equipotenciais a cada 2 metros dentro da área delimitada pelos poços de monitoramento disponíveis.

O mapa da Figura 39 mostra o Mapa Potenciométrico Atual, considerando o relevo da elevação da pilha de rejeitos. A comparação dos dois mapas potenciométricos mostra que o divisor das bacias hidrogeológicas foi transferido para sudoeste em cerca de 500 metros de distância, sendo que naturalmente era posicionado próximo à cerca limítrofe com o Parque Nacional de Brasília, passando atualmente para a zona da crista central do maciço de resíduos.



**Figura 38** - Potenciometria com base no relevo antes da acumulação dos resíduos na área. (Imagem base obtida do sistema *Google Earth*, de maio de 2020).



**Figura 39** - Potenciometria com base no relevo atual (pós-acumulação dos resíduos na área). Medidas de níveis realizadas em agosto de 2020. (Imagem base obtida do sistema *Google Earth*, de maio de 2020).

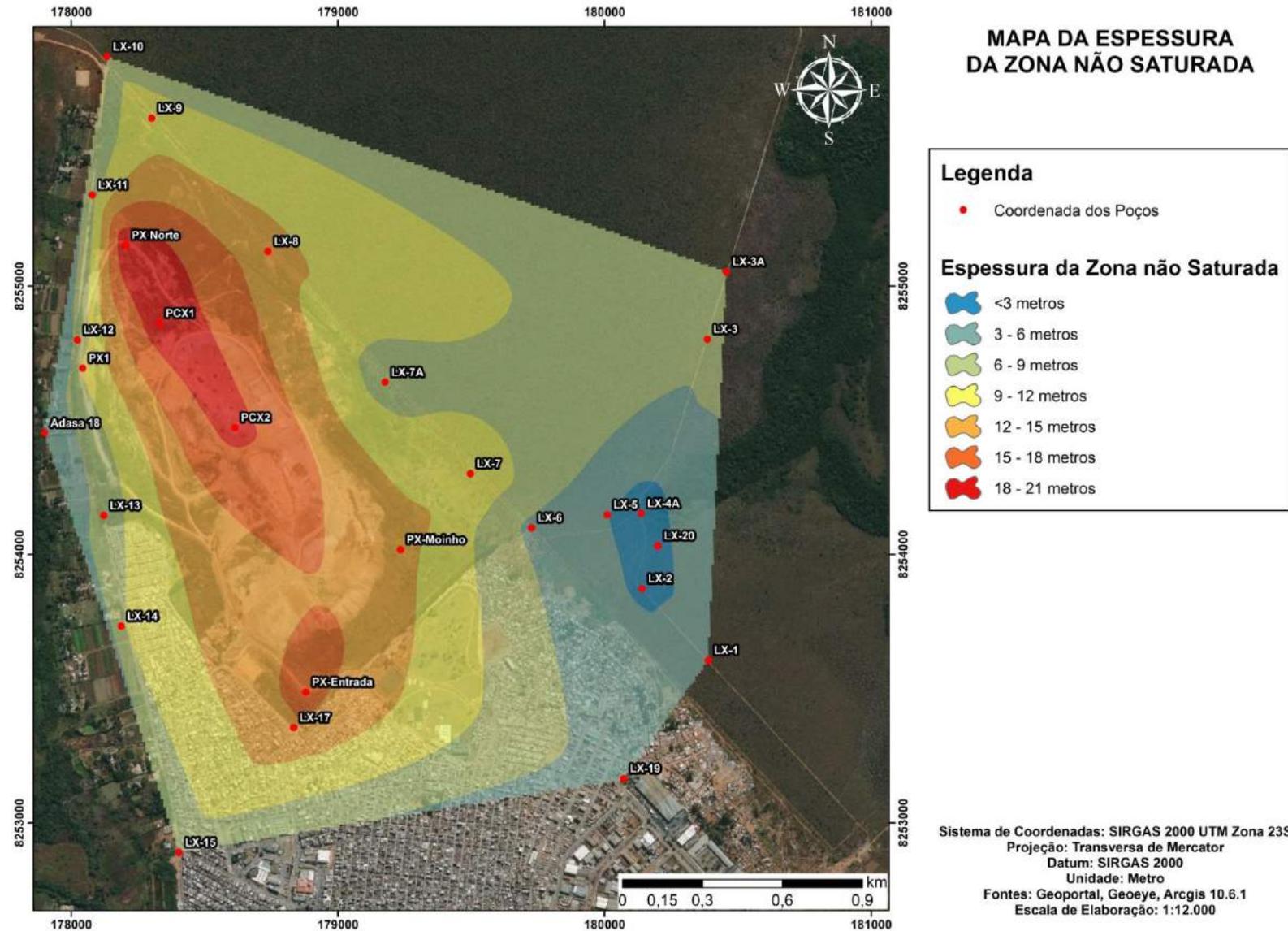
O mapa potenciométrico representa a cartografia em duas dimensões das linhas de mesma elevação do nível freático. Este mapa é similar a um mapa planialtimétrico, mas não com a representação da topografia da superfície do terreno, e sim com a representação das curvas do nível do topo da zona saturada do aquífero. Este cartograma também é denominado de mapa de isopiezas e é confeccionado a partir de dados pontuais da carga hidráulica em poços de monitoramento. No caso específico do atual estudo, é feita a medida da boca do poço até o nível d'água. Para a obtenção da carga hidráulica em cada ponto, a cota do terreno obtida do Modelo Digital de Elevação (com *datum* referido ao nível do mar) é subtraída da medida de profundidade do nível d'água e da elevação da boca do poço até a superfície do terreno.

A confecção do Modelo Digital de Elevação foi feita com base em levantamento topográfico, e em de pontos cotados no terreno com auxílio de GPS de mão dotado de barômetro que permite alcançar precisão de 1,0 metro.

O mapa potenciométrico é o produto cartográfico que será aplicado para a determinação da direção e sentido do fluxo subterrâneo, uma vez que, o fluxo se dá de um ponto de carga hidráulica maior para um ponto de carga hidráulica menor. Em aquíferos freáticos e livres, considerados homogêneos e isotrópicos a superfície potenciométrica segue o relevo, entretanto, com padrão suavizado.

Contudo, no caso em estudo, representado pr uma área em que se acumulou resíduos compondo um relevo artificial, positivo, a superfície potenciométrica natural foi deslocada em direção ao maciço de rejeitos.

O mapa da Figura 40 mostra a distribuição da espessura da zona não saturada para o mês de agosto de 2020. A partir do monitoramento do nível estático dos poços outros mapas deverão ser produzidos para verificação do comportamento da variação da espessura da zona não saturada, principalmente na zona principal de acúmulo de resíduos. Prevê-se a confecção de mapas potenciométricos e de espessura da zona não saturada, no mínimo para os meses de dezembro, janeiro e abril, quando será possível avaliar um ciclo completo de nível mínimo e máximo. Os níveis mínimo e máximo estão previstos, de forma preliminar, para ocorrer respectivamente nos meses dezembro e abril. Estes dados serão fundamentais para avaliar o volume anual de recarga, tanto na área do aterro de resíduos, quanto em áreas urbanas (na Cidade Estrutural) e naturais (no Parque Nacional de Brasília). A recarga por águas naturais de precipitação representa o principal fator de atenuação da carga contaminante por chorume, quando se distancia da zona principal de acumulação de resíduos.



**Figura 40** - Espessura da zona vadosa do aquífero freático, representado por latossolos e por resíduos acumulados. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema *Google Earth*, de maio de 2020).

## 6.2 Sentido do Fluxo Subterrâneo

A partir do mapa potenciométrico pode-se determinar o fluxo subterrâneo que se distribui a partir do maciço de resíduos mais recentemente acumulado (porção da crista elevada do lixão) em direção às áreas mais rebaixadas adjacentes. Assim, foi possível propor o mapa da Figura 41, confeccionado diretamente sobre o mapa potenciométrico e a partir da premissa de que o aquífero existente é do tipo homogêneo e isotrópico (resíduos e solos com porosidade intergranular sem camadas confinantes e sem a influência de zonas fraturadas). Neste caso as linhas de fluxo são perpendiculares às linhas equipotenciais (conforme indicação das setas no mapa de sentido de fluxo).

A partir do maciço de resíduos é possível se verificar cinco divisões do fluxo da água subterrânea e conseqüentemente da pluma de contaminação (Figura 41). O fluxo se distribui para os quadrantes Oeste e Leste a partir da porção central da crista de resíduos. No quadrante oeste, a partir da zona norte do lixão há fluxo no sentido oeste / S60W; a partir da porção central e sul do aterro há fluxo no sentido S45W e no extremo sul do maciço o fluxo é para S20-30W migrando sob a área urbana. Todo o fluxo do quadrante oeste migra em direção ao córrego Cabeceira do Valo. No quadrante leste dois sentidos de fluxo podem ser individualizados: para leste (podendo variar até S60-70E) a partir da zona principal de acumulação de resíduos e para N45E a partir do lixo antigo acumulado na área do parque urbano da Cidade Estrutural em direção à zona de cabeceira do córrego do Acampamento.

Avaliação preliminar do poder de diluição e atenuação pode ser considerada em dois casos em que existem pares de poços que permitem tal tipo de análise: poços PX Entrada e LX17 e poços PX Moinho e LX6. É importante salientar que o gradiente hidráulico entre os dois pares é similar e que no primeiro caso existe aterro na zona saturada do aquífero e no segundo não há aterro, tratando-se de Latossolo com feições físicas preservadas.

No caso do par de poços PX Entrada e LX17 a condutividade elétrica da pluma varia de 127,8 para 60,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , em uma distância de aproximadamente 145 metros, o que resulta em um fator de diluição de 0,46  $\mu\text{S}/\text{cm}$  por metro de migração no aquífero. No par PX Moinho e LX6 há uma variação de CE de 959 para 118  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em 375 metros de fluxo, resultando em um fator de diluição de 2,24  $\mu\text{S}/\text{cm}/\text{metro}$ . Esta avaliação é preliminar, mas permite ter uma aproximação do poder de diluição que as águas de recarga imprimem na atenuação da pluma de contaminação.

Este mapa de fluxo deverá ser a base para avaliação de componentes hidráulicos como velocidade de fluxo para previsão de migração e tempo de trânsito da pluma, análises de diluição incluindo os componentes recarga e diluição, além de outros aspectos vinculados ao modelo conceitual de fluxo subterrâneo.



- a posição proximal do curso d'água em suas áreas de nascentes e
- a determinação do fluxo de escoamento subterrâneo determinado em modelos numéricos propostos por trabalhos prévios (Carneiro, 2002 e Campos, 2007).

Desta forma, foram determinados 4 pontos de amostragem nas três cabeceiras que fluem a partir da área do lixão: dois pontos no córrego Cabeceira do Valo (sendo um antes e um na confluência com o córrego Cana do Reino); um na região de nascente do Córrego do Acampamento e um na zona de nascente do Ribeirão Bananal; além da lagoa de acumulação de chorume.

## 7.2 Métodos Analíticos

Os métodos analíticos são os mesmos aplicados para as análises de águas subterrâneas uma vez que as análises foram realizadas no mesmo Laboratório Tommasi Ambiental e foram analisadas e medidas *in situ* as mesmas substâncias e os mesmos parâmetros. Basicamente foram aplicados os métodos de análises por emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplada (ICP-OES) e espectrofotometria, além de medidas *in situ* com equipamento multiparâmetro da marca Hach (modelo HC 40d).

Da mesma forma que as análises de águas subterrâneas e da pluma de contaminação, depois da coleta, as amostras foram preservadas em caixa de isopor com gelo para manutenção da temperatura abaixo de 20° C.

As amostras foram obtidas de pontos de acumulação de água próximo às nascentes ou no curso d'água principal com fluxo livre, isto é, em zona de correnteza sem estagnação.

## 7.3 Resultados das Análises Hidroquímicas

Até o momento estão disponíveis 4 amostras de águas consideradas representantes do ambiente “superficial”, embora apesar de serem águas brutas coletadas em cursos de água em reservatório de chorume, ainda guardam estreita relação com os reservatórios subterrâneos (aquífero freático, no caso das amostras de córregos) e maciço de resíduos sólidos (no caso da piscina de chorume).

Para efeitos da avaliação da qualidade das águas subterrâneas foram considerados 4 pontos na rede de monitoramento. Os pontos são denominados de RB1 correspondente à nascente do Ribeirão Bananal; CA1 associado à zona de nascente do Córrego do Acampamento; CV2 relacionado ao Córrego Cabeceira do Valo e LC1 representado pela Lagoa de Chorume situada no interior da área do Lixão da Estrutural. Esta rede deverá ser oportunamente adicionada de outros pontos nos córregos Cabeceira do Valo e do Acampamento de forma a melhorar a caracterização das relações entre a descarga da pluma de contaminação e a qualidade das águas superficiais.

A Tabela 10 traz os resultados da primeira campanha de amostragem das águas superficiais.

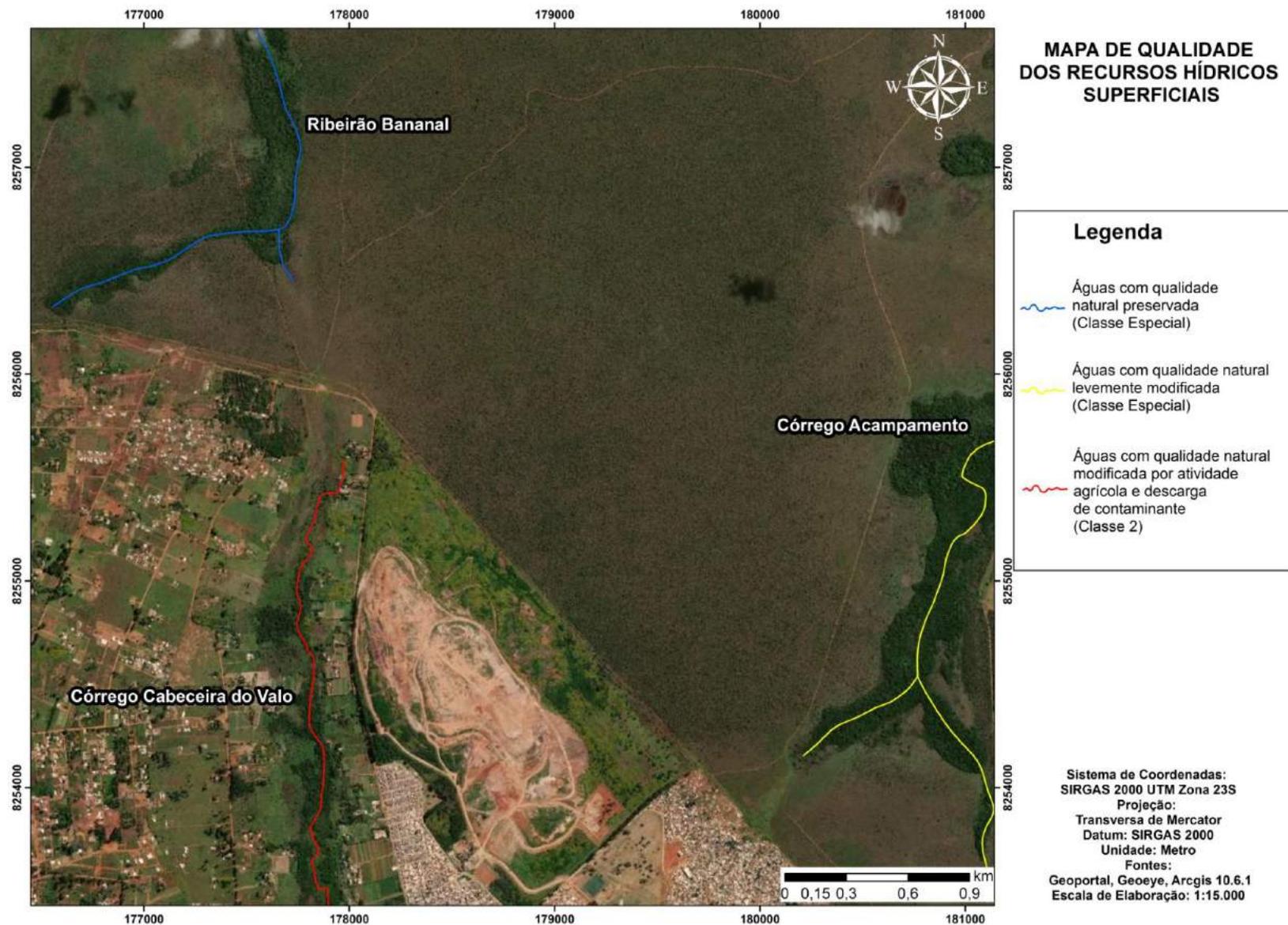
Substância / Parâmetro	Ponto de amostragem-amostra					Padrão Potabilidade
	RB1-01	CA1-01	CV1-01	CV2-01	LC-01	
Condutividade Elétrica (em $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	6,09	22,5	73,4	64,5	10.710	-
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	20,0	22,5	18,8	20,1	22,6	-
pH	5,05	4,85	7,9	7,37	9,09	6 a 9
Amônia	2.800	3.100		2.700	882.000	1.500
Nitrito	> LQ	> LQ	31,0	30,0	> LQ	1.000
Nitrato	> LQ	> LQ	900	700	200	10.000
Cloreto	200	100	14.700	8.500	1.195.000	250.000
Sulfato	> LQ	> LQ	2.000	> LQ	> LQ	250.000
DQO	> LQ	> LQ	6.000	> LQ	440.000	-
Antimônio	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	5
Arsênio	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	10
Bário	> LQ	> LQ	14,1	> LQ	160	700
Cádmio	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	5
Chumbo	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	10
Cobalto	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	310	70
Cobre	2,6	1,0	> LQ	1,6	> LQ	2.000
Crômio	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	41	50
Merúrio	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	1
Níquel	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	70
Zinco	46	31	36,3	38	47	1.800
Cálcio	470	280	1.180	3.220	53.240	-
Magnésio	110	180	22,7	410	76.690	-
Sódio	450	310	8.170	5.500	868.840	200.000

**Tabela 10** - Resultados de análises de águas consideradas no sistema superficial. Condutividade Elétrica em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; Temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ ; demais substâncias em  $\mu\text{g}/\text{L}$ . LQ - limite de quantificação do método analítico.

#### 7.4 Extensão da Contaminação das Águas Superficiais

Considerando as análises de amostras de águas nos cursos d'água que drenam a partir da região de acumulação dos resíduos pode-se afirmar que o Ribeirão Bananal em sua zona de nascente apresenta água com a qualidade natural preservada, mantendo valores de sólidos totais dissolvidos muito baixos, sendo suas águas na zona de cabeceira classificada como Classe Especial (segundo Resolução Conama 357 de 17 de março de 2005).

O mapa da Figura 42 mostra a qualidade da água dos cursos superficiais que drenam a partir da área de acumulação histórica dos resíduos sólidos.



**Figura 42** - Distribuição qualitativa das águas dos cursos superficiais das três bacias que drenam a partir da área do Lixão da Estrutural. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema *Google Earth*, de maio de 2020).

O Córrego do Acampamento apresenta alguns parâmetros fracamente influenciados pela contaminação do aquífero pelo aterro de resíduos, entretanto, de forma extremamente tênue. Os principais parâmetros que determinam esta condição são a condutividade elétrica da água e o teor de amônia, da ordem de 3.100 µg/L. Embora tais parâmetros sejam indicadores da modificação antrópica, estas águas ainda são caracterizadas como da Classe Especial, por apresentarem potabilidade natural (sem necessidade de tratamento) e por situarem-se no interior de uma unidade de conservação ambiental de proteção integral.

O Córrego Cabeceira do Valo é um dos braços (com drenagem geral de norte para sul) que em associação com o córrego Cana do Reino (que drena de oeste para leste) compõem o Ribeirão Vicente Pires. A qualidade das suas águas já mostra a influência da antropização da área, sendo que este curso hídrico recebe contaminação oriunda de duas fontes principais: chorume produzido na zona saturada do sob o maciço de lixo e efluentes gerados pela agricultura intensiva realizada em grande parte da área de sua vertente leste. Os principais indicadores da contaminação incluem: cloreto, sódio, cálcio e magnésio. A condutividade elétrica variável entre 65 e 73 µS/cm embora, ainda reduzida, é outro indicador consistente. Segundo a Resolução Conama 357 este curso d'água é enquadrado como da Classe 2, uma vez que suas águas podem ser destinadas: ao abastecimento humano, após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, como natação e mergulho; à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques e jardins; e à aquicultura e atividade de pesca.

A contaminação no Córrego Cabeceira do Valo não é maior que a atualmente observada, pois sua vertente oeste apresenta ampla área de contribuição ainda preservada da ocupação humana ou em processo de ocupação ainda incipiente. Assim, a descarga do aquífero freático de oeste para leste resulta na contribuição de uma vazão superior à vertente em que o Lixão está situado. Como estas águas ainda apresentam boa qualidade, parte do chorume que é descarregado no curso d'água superficial é diluída. Agricultores que captam águas de nascentes da margem oeste informam que estes exutórios apresentam águas com qualidade equivalente à potabilidade natural (isto é, sem necessidade de tratamento).

## **8. CONTAMINAÇÃO DOS SOLOS**

### **8.1 Materiais e Métodos**

Para fins de diagnóstico da contaminação dos solos foram considerados diferentes tipos de contaminantes associados diretamente às áreas de disposição de resíduos no interior da área do lixão (incluindo o maciço do lixo e áreas embargadas no limite entre o lixão e o Parque Nacional de Brasília); áreas de acumulação de resíduos fora dos limites do lixão, além de áreas que recebem efluentes provenientes de área urbana não consolidada (ocupação de “Santa Luzia”).

Assim são consideradas fontes potenciais de contaminação os resíduos sólidos urbanos com componentes orgânicas e inorgânicas e as fontes de efluentes domésticos sem nenhum tipo de tratamento. A contaminação deverá ser observada principalmente na forma de fases orgânicas (coliformes e outras bactérias), fases inorgânicas não metálicas (amônia, nitrito, nitrato, cloreto e fosfato) e fases inorgânicas metálicas (metais de transição). Para o presente trabalho as análises foram focadas nos principais indicadores da contaminação dos solos em área de disposição de resíduos sólidos domésticos que são os metais.

A amostragem dos solos foi realizada com auxílio de cavadeira articulada tipo “boca de lobo” (Figura 43) e trado manual de 4 polegadas de diâmetro (Figura 44), sendo considerados dois tipos de amostras: composta e simples. As amostras compostas representam duas profundidades de coleta em um mesmo ponto, entre 10 e 30 cm e entre 50 e 65 cm, e a amostra simples corresponde ao material retirado entre 10 e 30 cm de profundidade, sendo que a maior parte do material é obtida entre 10 e 20 cm. Além das ferramentas manuais, a trena de mão foi aplicada para determinação da profundidade de coleta do material. Toda amostra foi georreferenciada com auxílio de GPS portátil com erro de posicionamento inferior a 1 metro.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de 30 x 60 cm e cada amostra identificada com rótulo padrão com a seguinte codificação ISO - nA ou ISO - nB, onde: **ISO** representa a primeira campanha de amostragem, **n** o número sequencial de cada amostras e **A** e **B**, respectivamente amostra rasa e profunda (nos casos de amostragem composta, Figura 45). Os resultados desta campanha de amostragem, além de ser aplicados ao diagnóstico da contaminação, também serão utilizados em experimentos de fitorremediação e de fixação de metais no solo.

A Tabela 11 traz a identificação das amostras, sua localização por coordenadas UTM e as principais características dos pontos de coleta.

Para efeito da presente pesquisa o conhecimento dos teores de metais biodisponíveis é considerado mais relevante que o conteúdo total de metais nos solos, e, portanto, para a extração foram utilizadas soluções de KCl e Reagente Mehlich 1.

Para as análises geoquímicas de solos e rochas diferentes tipos de extratores ou digestores das amostras podem ser utilizados, sendo sua escolha função dos objetivos da pesquisa. Por exemplo, quando se utilizada a geoquímica dos solos para a prospecção de metais a partir de elementos farejadores, utiliza-se a técnica de digestão total, com aplicação de Água Régia a quente (mistura de ácido clorídrico (HCl) e ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) concentrado numa proporção de 3:1, a uma temperatura superior a 400°C).

Quando a geoquímica de solos é aplicada para a determinação de nutrientes dos solos disponíveis para as plantas (ex. Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>), utiliza-se ácido acético a frio, pois por se tratar de um ácido fraco apenas solubilizará os nutrientes livres para serem apropriados pelas raízes e não os elementos ligados aos minerais estáveis que compõem os solos.



**Figura 43** - Amostragem de solo superficial com uso de cavadeira articulada.



**Figura 44** - Amostragem de solo em profundidade de 60 cm com auxílio de trado manual.



**Figura 45** - Amostras em diferentes profundidades em um mesmo ponto.

Amostra	Coordenadas UTM	Observações
1SO - 1A	179427 / 8254160	<p>Latossolo Vermelho argiloso, com textura argilosa, coletado em área em que houve deposição e aterro de resíduos sólidos urbanos, com posterior remoção, tanto dos resíduos, como da porção superficial dos solos (<i>top soil</i>, incluindo horizontes A e AB). Localmente ainda são observados restos de resíduos em locais em que são observados restos orgânicos, plástico, muitos fragmentos de vidro e localmente restos de material metálico (principalmente ferro).</p> <p>Área em que se desenvolve o experimento de estabilização de metais biodisponíveis no solo com elevação de pH.</p> <p>Amostras retiradas no dia 03 de janeiro de 2020.</p>
1SO - 1B		
1SO - 2A	179404 / 8254157	
1SO - 2B		
1SO - 3A	179388 / 8254155	
1SO - 3B		
1SO - 4A	179364 / 8254157	
1SO - 4B		
1SO - 5A	179340 / 8254155	
1SO - 5B		
1SO - 6A	179444 / 8254142	
1SO - 6B		
1SO - 7A	179444 / 8254142	
1SO - 7B		
1SO - 8A	179470 / 8254096	
1SO - 8B		
1SO - 9A	179480 / 8254076	
1SO - 9B		
1SO - 10A	179367 / 8254133	
1SO - 10B		
1SO - 11A	179369 / 8254114	
1SO - 11B		
1SO - 12A	179372 / 8254093	
1SO - 12B		
1SO - 13A	179378 / 8254059	
1SO - 13B		
1SO - 14A	179453 / 8254208	<p>Latossolo Vermelho, com textura muito argilosa, com remoção dos horizontes superficiais em local em que foram acumulados resíduos sólidos, os quais foram posteriormente removidos.</p> <p>Área situada em uma faixa de 300 metros de largura entre o sítio de acumulação de resíduos e o Parque Nacional de Brasília, denominada de “área embargada”, pois é uma faixa em que não há autorização para acumulação de resíduos.</p> <p>Área em que é desenvolvido experimento de fitorremediação de área degradada pela supressão da vegetação nativa, acumulação de resíduos e remoção de horizontes superficiais dos solos.</p> <p>Amostras retiradas no dia 10/03/2020</p>
1SO - 14B		
1SO - 15A	179442 / 8254234	
1SO - 15B		
1SO - 16A	179418 / 8254255	
1SO - 16B		
1SO - 17A	179395 / 8254280	
1SO - 17B		
1SO - 18A	179380 / 8254312	
1SO - 18B		
1SO - 19A	179356 / 8254345	
1SO - 19B		
1SO - 20A	179344 / 8254375	
1SO - 20B		
1SO - 21A	179475 / 8254187	
1SO - 21B		
1SO - 22A	179497 / 8254217	
1SO - 22B		
1SO - 23A	179520 / 8254185	

ISO - 23B		
ISO - 24A	179497 / 8254150	
ISO - 24B		
ISO - 25A	179526 / 8254124	
ISO - 25B		
ISO - 26A	179567 / 8254146	
ISO - 26B		
ISO - 27A	179551 / 8254092	
ISO - 27B		
ISO - 28	179059 / 8254147	Topo de aterro, com material acumulado em canaleta de drenagem pluvial.
ISO - 29	821267 / 8254613	Material rico em matéria orgânica em local em que o chorume drena diretamente na base de um talude de resíduos.
ISO - 30	821110/ 8255814	Área de acumulação periódica de resíduos de natureza diversa, contendo matéria orgânica, plástico, papel, dentre outros.
ISO - 31	280978 / 825430	Margem da estrada marginal ao lixão em uma borda noroeste. Histórico de acumulação de aterros e resíduos sólidos.
ISO - 32	821249 /8254095	Latossolo vermelho com textura argilosa, situado imediatamente na margem de aterro antigo.
ISO - 33	178844 / 8253327	Área de acumulação periódica resíduos. Matriz de restos de obra com resíduos orgânicos de forma subordinada.
ISO - 34	179746 / 8254081	Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa situado no limite entre o Parque Nacional de Brasília e a ocupação de “Santa Luzia”.
ISO - 35	179950 / 8253866	Latossolo Vermelho-Amarelo de textura muito argilosa, que recebe efluentes líquidos oriundos da ocupação de “Santa Luzia”.
ISO - 36	180123 / 8254159	Latossolo Vermelho-Amarelo em área preservada no interior do Parque Nacional de Brasília.
ISO - 37	180518 / 8254243	Latossolo Vermelho-Amarelo em área preservada no interior do Parque Nacional de Brasília.
ISO - 38	179508 / 8254499	Latossolo Vermelho textura muito argilosa a cerca de 200 metros do limite da área de acumulação de resíduos.
ISO - 39	178909 / 8254979	Latossolo Vermelho, em ambiente preservado no limite entre o Parque Nacional de Brasília e a “área embargada”.
ISO - 40	179243 / 8254130	Área de acúmulo de resíduos no interior do lixão.
ISO - 41	178577 / 8255103	Misturas de solos na área do atro
ISO - 42	193854 / 8254759	Latossolo Vermelho no Centro Olímpico da Universidade de Brasília. Solo similar e contexto geológico similar à área do Lixão da Estrutural

**Tabela 11** - Localização e principais feições dos pontos de amostragem dos solos aplicados para o diagnóstico da contaminação dos solos na área do Lixão da Estrutural e adjacências. As amostras ISO-28 a ISO-42 foram coletadas no dia 14/03/2020. Coordenadas UTM obtidas diretamente do GPS portátil de campo, para facilitar a verificação em campo, pois a área situa-se no limite das zonas 22 e 23.

Além dos extremos dos extratores para geoquímica, considerando a extração total (ex. Água Régia a quente, ou fusão), ou a extração limitada (ex.: solução de KCl ou ácido acético) existem inúmeros outros métodos de extração incluindo os ácidos cítrico, láctico e oxálico com diferentes pHs.

Na presente pesquisa foram utilizados dois tipos de extração para as análises de metais nos solos. Todas as amostras foram submetidas à extração pelo método de Mehlich 1 (ácido clorídrico + ácido sulfúrico a frio) uma vez que, o objetivo é determinar os metais biodisponíveis, e essas análises foram realizadas no Laboratório Soloquímica. Amostras selecionadas (em um total de 28 coletadas nos diferentes locais de amostragem) foram submetidas à fusão alcalina com borato de lítio ( $\text{LiBO}_2$ ) a  $950^\circ\text{C}$  seguida por redissolução por ácido clorídrico (HCl) 2 Molar no Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília. Este tipo de extração por fusão permite a solubilização dos metais inclusive de minerais muito estáveis como rutilo e magnetita presentes no solo.

Após a etapa de extração as soluções obtidas pelos dois métodos de extração foram analisadas em equipamento de espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplada (ICP-OES).

Para efeitos de avaliação dos resultados foram utilizados os valores orientadores de qualidade para o Estado de São Paulo (CETESB, 2016) para os metais analisados, conforme Tabela 12.

Metal	Valor de Referência de Qualidade	Valor de Prevenção	Valor de Intervenção		
			Agrícola	Residencial	Industrial
Cobre	35	60	760	2.100	10.000
Zinco	60	86	1900	7.000	10.000
Chumbo	17	72	150	240	4.400
Cádmio	<0,5	2	5	10	25
Arsênio	3,5	15	35	55	150
Mercúrio	0,05	2	5	10	25

**Tabela 12** - Valores orientadores para diferentes categorias dos metais analisados no presente trabalho aplicados para solos. Teores em mg/Kg em peso de solo seco. Segundo CETESB (2016).

## 8.2 Resultados das Análises e Discussão

A Tabela 13 traz os resultados das análises das substâncias consideradas os principais indicadores de contaminação por resíduos sólidos urbanos. Além dos metais apresentados nesta tabela ainda foram analisados Cádmio, Arsênio e Mercúrio, entretanto estes metais de transição apresentaram resultados inferiores ao Limite de Quantificação (LQ) do método analítico, que é de 0,01 mg/kg de peso de solo seco, e portanto não foram apresentados.

Substância	pH	pH	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Cu	Zn	Pb
Método de Extração	Água	KCl	KCl	KCl	KCl	Mehlich I	KCl	Mehlich I	Mehlich I	Mehlich I	Mehlich I
Unidade de Medida	-	-	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg				
ISO - 1A	6,30	5,10	0,05	2,70	0,60	0,01	0,00	57,9	0,50	0,50	0,50
ISO - 1B	6,10	5,20	0,04	0,90	0,10	0,01	0,00	103,7	0,50	0,10	0,50
ISO - 2A	6,00	5,30	0,04	2,90	0,50	0,01	0,00	62,4	0,40	0,30	0,60
ISO - 2B	5,90	4,90	0,06	0,70	0,10	0,01	0,00	97,9	0,40	0,01	0,70
ISO - 3A	6,10	5,30	0,03	3,30	0,70	0,01	0,00	75,5	0,50	1,80	0,70
ISO - 3B	5,80	5,30	0,02	0,60	0,00	0,01	0,10	71,7	0,30	0,01	0,60
ISO - 4A	6,10	5,50	0,04	4,80	0,40	0,02	0,00	127,4	0,90	3,60	0,70
ISO - 4B	5,70	5,40	0,02	0,80	0,00	0,01	0,10	117,5	0,40	0,10	0,60
ISO - 5A	5,90	5,40	0,04	2,10	0,30	0,01	0,00	79,5	0,40	0,30	0,70
ISO - 5B	5,80	5,50	0,02	0,80	0,00	0,01	0,00	102,9	0,40	0,10	0,80
ISO - 6A	6,00	5,60	0,07	2,90	0,50	0,01	0,00	73,4	0,40	0,30	0,70
ISO - 6B	5,80	5,40	0,03	0,70	0,10	0,01	0,00	95,4	0,40	0,01	0,70
ISO - 7A	5,90	5,50	0,04	1,80	0,30	0,01	0,10	70,7	0,50	0,10	0,50
ISO - 7B	5,80	5,50	0,03	0,60	0,10	0,01	0,10	67,5	0,30	0,01	0,70
ISO - 8A	6,10	5,60	0,03	1,50	0,30	0,01	0,00	60,6	0,40	0,10	0,70
ISO - 8B	5,80	5,70	0,02	0,70	0,10	0,01	0,10	101,7	0,50	0,01	0,60
ISO - 9A	5,80	5,50	0,03	1,60	0,20	0,01	0,00	110,5	0,50	0,10	0,70
ISO - 9B	5,60	5,40	0,02	0,80	0,10	0,01	0,00	98,8	0,40	0,01	0,70
ISO - 10A	5,80	5,40	0,03	2,50	0,40	0,01	0,00	95,5	0,40	0,40	0,70
ISO - 10B	5,60	5,50	0,01	0,90	0,10	0,01	0,00	114,7	0,40	0,20	0,70
ISO - 11A	6,20	5,40	0,02	2,40	0,40	0,01	0,00	120,3	0,60	0,30	0,70
ISO - 11B	5,60	5,20	0,01	1,10	0,10	0,01	0,00	61,2	0,40	0,10	0,60
ISO - 12A	6,70	5,30	0,03	3,50	0,40	0,01	0,10	42,0	0,40	0,50	0,70
ISO - 12B	5,50	5,40	0,01	0,70	0,00	0,01	0,00	43,3	0,40	0,10	0,60
ISO - 13A	6,00	5,10	0,02	0,90	0,10	0,01	0,00	73,3	0,60	0,10	0,50

ISO - 13B	5,80	5,40	0,01	0,70	0,10	0,01	0,00	89,6	0,50	0,01	0,50
ISO - 14A	6,10	5,30	0,02	1,40	0,20	0,01	0,00	47,9	0,40	0,20	0,60
ISO - 14B	5,70	5,50	0,02	0,80	0,10	0,01	0,10	44,4	0,30	0,10	0,60
ISO - 15A	6,20	5,40	0,04	5,10	0,70	0,01	0,00	60,8	1,40	2,90	0,90
ISO - 15B	5,80	5,70	0,02	1,60	0,10	0,01	0,00	36,6	0,30	0,10	0,60
ISO - 16A	6,20	5,60	0,03	5,60	0,50	0,01	0,00	81,3	3,00	6,30	1,70
ISO - 16B	5,90	5,80	0,01	2,60	0,20	0,01	0,00	50,5	1,00	1,40	1,00
ISO - 17A	6,30	5,80	0,02	2,90	0,30	0,01	0,00	55,5	1,60	3,00	0,80
ISO - 17B	6,30	6,00	0,02	1,70	0,10	0,01	0,00	32,2	0,50	0,20	0,60
ISO - 18A	6,30	5,90	0,03	6,00	0,70	0,01	0,10	77,6	3,30	9,20	1,60
ISO - 18B	6,10	6,10	0,01	2,80	0,20	0,01	0,00	44,6	0,60	0,60	0,80
ISO - 19A	6,60	5,80	0,03	3,90	0,50	0,01	0,10	35,3	1,00	2,50	2,60
ISO - 19B	6,20	5,80	0,01	1,40	0,10	0,01	0,10	37,7	0,30	0,20	0,70
ISO - 20A	6,50	5,80	0,03	4,50	0,60	0,01	0,10	27,1	0,50	0,80	1,40
ISO - 20B	6,30	5,90	0,01	1,30	0,10	0,01	0,10	39,5	0,30	0,10	0,90
ISO - 21A	6,30	5,60	0,05	2,50	0,40	0,01	0,00	75,9	0,30	0,01	1,00
ISO - 21B	6,20	5,10	0,03	1,20	0,10	0,01	0,00	59,1	0,30	0,01	1,00
ISO - 22A	6,10	6,00	0,03	4,90	0,70	0,01	0,00	57,3	1,50	2,80	1,80
ISO - 22B	5,70	6,20	0,02	1,90	0,20	0,01	0,00	49,0	0,60	0,30	1,00
ISO - 23A	6,00	6,00	0,04	5,50	0,60	0,01	0,00	96,2	3,80	7,70	2,00
ISO - 23B	5,60	6,20	0,01	2,00	0,10	0,01	0,00	39,1	0,40	0,20	1,00
ISO - 24A	6,10	6,10	0,02	4,00	0,40	0,01	0,10	70,5	2,30	3,40	2,60
ISO - 24B	5,90	6,30	0,02	2,30	0,20	0,01	0,10	42,9	0,70	0,40	1,00
ISO - 25A	6,20	6,40	0,02	4,90	0,70	0,01	0,00	52,9	0,70	4,60	2,50
ISO - 25B	6,10	6,20	0,02	0,20	0,70	0,01	0,10	81,4	2,20	0,60	1,50
ISO - 26A	6,40	6,20	0,02	6,80	0,70	0,01	0,10	108,7	3,50	7,90	1,50
ISO - 26B	6,10	6,40	0,01	2,50	0,20	0,01	0,10	31,6	0,60	0,50	1,10
ISO - 27A	6,80	6,10	0,02	3,90	0,40	0,01	0,00	60,6	1,20	1,50	1,50
ISO - 27B	6,40	6,30	0,01	1,60	0,10	0,01	0,10	36,6	0,40	0,10	1,00

ISO - 28	6,70	7,00	0,25	12,50	1,00	0,11	0,10	103,5	1,30	2,20	1,80
ISO - 29	6,60	6,50	0,04	10,00	0,90	0,01	0,00	75,8	0,90	0,30	1,40
ISO - 30	7,00	6,70	0,08	8,50	0,40	0,03	0,00	85,6	1,30	3,90	1,20
ISO - 31	6,80	6,50	0,04	5,80	0,60	0,02	0,00	156,6	1,10	0,80	1,20
ISO - 32	7,00	6,50	0,59	12,50	0,90	0,17	0,00	61,4	2,90	4,00	2,50
ISO - 33	6,90	6,90	0,04	3,70	0,40	0,01	0,00	207,9	1,50	2,60	1,50
ISO - 34	7,00	5,80	0,05	7,70	0,30	0,02	0,10	111,8	1,10	1,10	1,00
ISO - 35	6,80	6,20	0,02	2,10	0,20	0,01	0,10	125,4	0,90	0,80	1,30
ISO - 36	6,60	4,90	0,03	1,60	0,10	0,01	0,10	93,5	0,60	0,10	1,20
ISO - 37	6,20	4,60	0,03	0,90	0,10	0,01	0,10	68,0	0,60	0,10	1,20
ISO - 38	5,80	4,30	0,03	1,90	0,20	0,01	0,10	78,8	0,40	1,00	1,20
ISO - 39	5,70	4,40	0,03	1,00	0,10	0,01	0,30	91,1	0,60	0,10	1,20
ISO - 40	6,00	5,10	0,05	4,90	0,30	0,01	0,02	47,4	0,50	0,30	1,10
ISO - 41	6,20	6,20	0,01	1,00	0,10	0,01	0,10	40,1	0,80	0,30	1,20
ISO - 42	6,10	4,80	0,05	3,00	0,20	0,05	0,10	90,8	35,30	0,90	1,50

**Tabela 13** - Resultados de análises de solos na área do Lixão da Estrutural e adjacências. Análises realizadas no Laboratório Soloquímica, com extração por solução de KCl ou pelo Método Mehlich I. Além das substâncias discriminadas nesta tabela foram analisados Cádmio, Arsênio e Mercúrio, entretanto todos os resultados retornaram valores inferiores ao Limite de Quantificação do método que é de 0,01 mg/kg de peso de solo seco para estes três metais pesados.

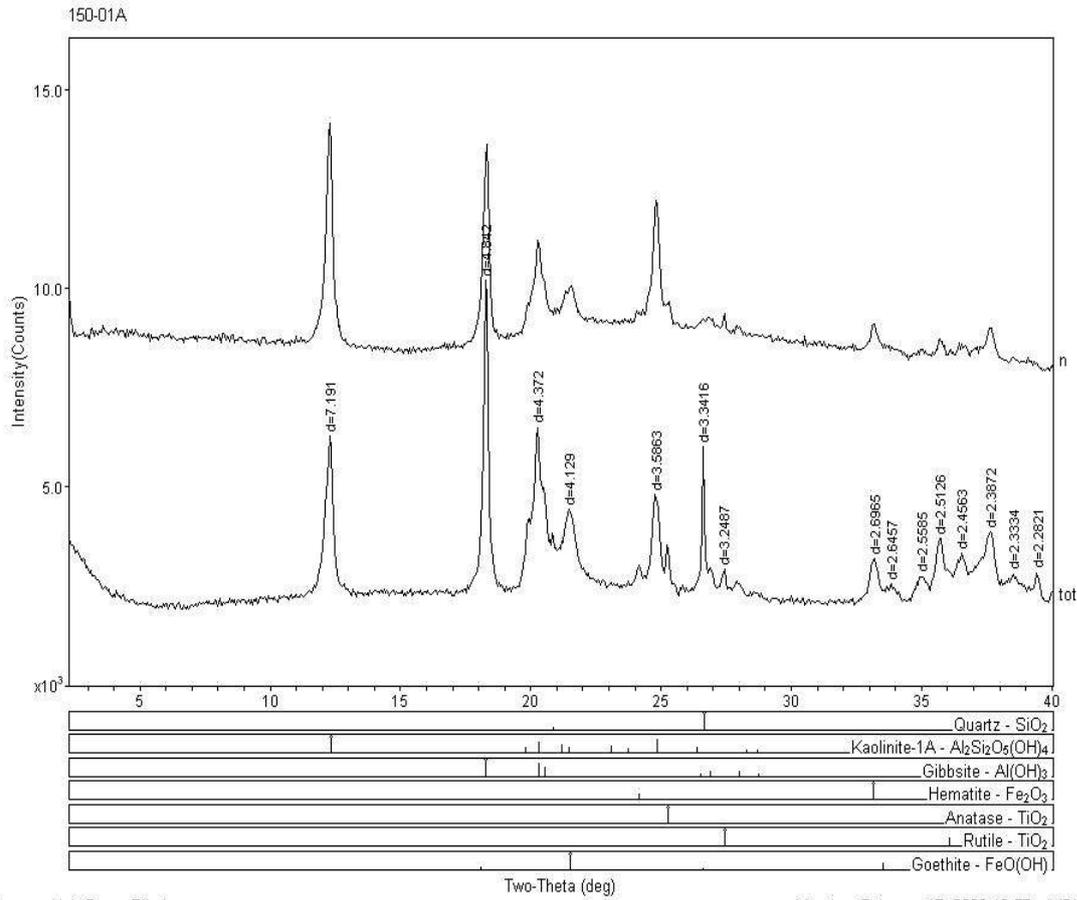
O pH em água varia de 5,5 a 7,0, sendo a maioria das amostras com pH ácido a levemente ácido e apenas duas amostras com pH neutro. O pH em KCl varia entre 4,3 e 7,0 sendo que a ampla maioria das amostras apresentam valores inferiores a 6,5. Assim, o  $\Delta\text{pH}$  é negativo em mais de 95% das análises, mesmo considerando as amostras compostas. A relação entre o pH em água e em solução de KCl resulta em  $\Delta\text{pH}$ s negativos, isto é, na maior tendência dos solos estudados reterem cátions com relação a retenção de ânions.

O potássio trocável apresentou valores baixíssimos fluando entre 0,01 a 0,59  $\text{Cmol/dm}^3$  (*centimol* por decímetro cúbico de solo) sendo a maior parte dos resultados inferiores a 0,05  $\text{Cmol/dm}^3$ . Estes valores reduzidos são coerentes com as classes de latossolos observados nas áreas de amostragem e aparentemente não há nenhuma fonte de contaminação por este cátion nas fontes de resíduos domésticos.

Os resultados das análises de cálcio apresentaram valores variáveis entre 0,7 e 12,5  $\text{Cmol/dm}^3$  e os teores mais elevados que 1,0  $\text{Cmol/dm}^3$  devem ser considerados como indicadores de contaminação, uma vez que este nutriente é muito restrito nos latossolos derivados de metassedimentos do Grupo Paranoá no Distrito Federal. Apesar de ser considerado um indicador de contaminação, isto é, por fonte externa aos ambientes geogênico e pedogênico os valores são baixos com relação aos máximos que poderiam eventualmente causar impacto ambiental. A fonte antropogênica mais provável deste metal são os resíduos de blocos de concreto amplamente espalhados pela área do aterro e adjacências. É fácil notar na avaliação dos resultados que os teores mais elevados são associados às áreas com maior atividade antrópica e maior volume de aterros de resíduos.

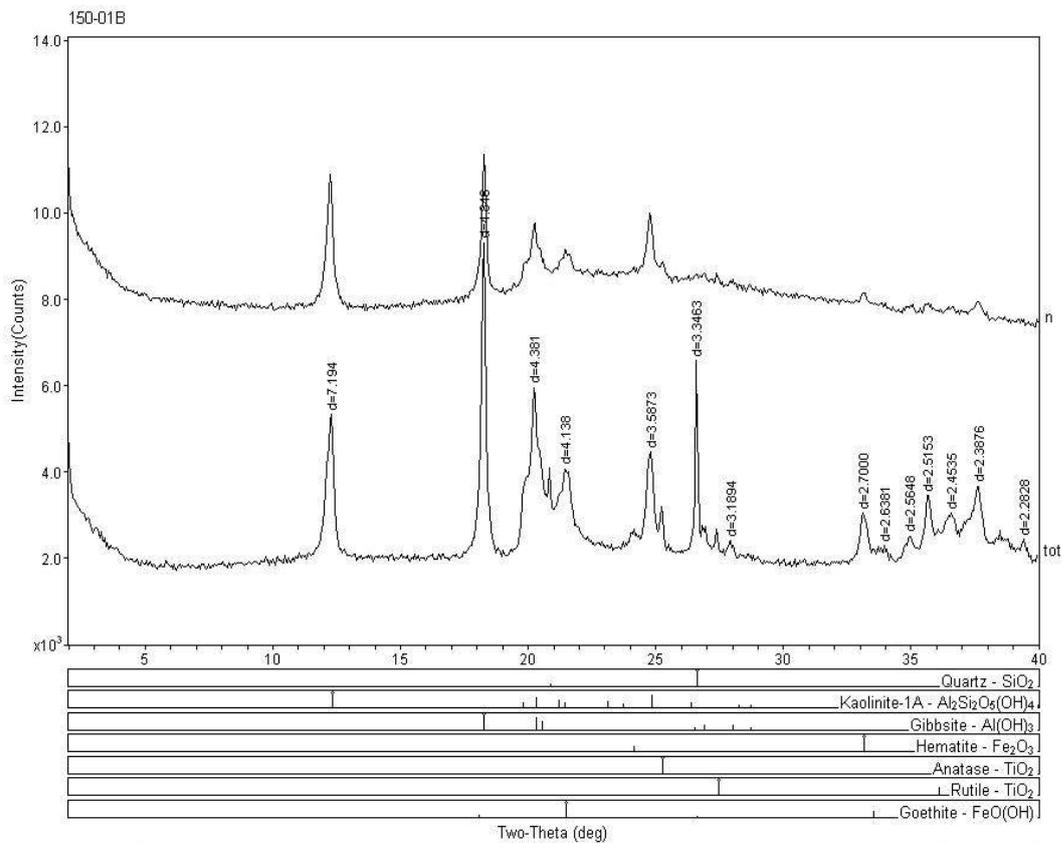
O sódio ocorre em valores baixíssimos, entre 0,01 e 0,17  $\text{Cmol/dm}^3$  sendo um cátion muito solúvel que dificilmente fica retido nos solos tropicais. Os valores reduzidos já são esperados em função no material parental, em que não existem minerais ricos em sódio, além de serem perfis muito evoluídos que tendem a eliminar por lixiviação esta fase catiônica.

O alumínio resulta em valores muito reduzidos entre zero e 0,3  $\text{Cmol/dm}^3$  sendo valores considerados anômalos, uma vez que são esperados teores mais elevados de alumínio trocável no tipo de solo estudado. A provável explicação para os resultados encontrados deve ser vinculada à mineralogia em que o alumínio está associado, representada eminentemente por caolinita e gibisita que são minerais de ampla estabilidade e não são digeridos pelo método Mehlich I. A Figura 46 apresenta os difratogramas de Raios X das amostras SO-15A e SO-15B que indicam a presença dos seguintes minerais: quartzo, caolinita, gibisita, hematita, anatásio, rutilo e goethita.



Campus Univ Darcy Ribeiro

Monday, February 17, 2020 12:57 p (MDI/JADE9)



Campus Univ Darcy Ribeiro

Monday, February 17, 2020 12:58 p (MDI/JADE9)

**Figura 46** - Difratoformas de Raios X das amostras SO-15A e SO-15B. **tot** - representa a amostra total analisada pelo método do pó. **n** - representa a separação da fração argilosa.

O ferro é o metal mais abundante nos solos estudados, sendo os valores variáveis entre 32,2 e 207,9 mg/kg com valor médio de 75,15 mg/kg. Este ferro deve ser em parte associado aos minerais hematita e goethita, mas também deve ser principalmente vinculado às fases amorfas presentes nos latossolos e não se pode desconsiderar a possibilidade de ser associado a eventual contaminação em função da decomposição dos resíduos domésticos e de escombros de obras.

Com relação aos metais pesados que apresentaram teores acima do limite de quantificação do método analítico, destacam-se o cobre, zinco e chumbo, respectivamente com os seguintes intervalos de variações: 0,3 a 2,90; 0,01 a 7,9 e 0,5 a 2,6 mg/kg. Os valores são significativamente maiores na área do aterro e proximidades diminuindo quando se afasta das áreas principais de acumulação dos resíduos. Mesmo sendo valores que devem ser considerados como de origem antropogênica, todos os valores obtidos são muito inferiores aos valores de referência de qualidade - VRQ considerados por CETESB (2106).

Os reduzidos valores dos resultados analíticos por metais tanto, por análises com extração pelo método Mehlich 1, quanto pelo método da fusão total indicam que os solos apresentam restrita contaminação por estes elementos de transição. Muito provavelmente esta constatação é vinculada ao tipo de resíduo acumulado por décadas na área, que se trata eminentemente de lixo doméstico. Contaminações em níveis mais elevados que alcançam valores de prevenção (VP) e de intervenção (VI) são mais comumente vinculados aos resíduos de atividades industriais específicas, incluindo mineração, indústria de curtumes, cromação e metalurgia.

As Tabelas 14 e 15 mostram os resultados das análises realizadas na Universidade de Brasília, respectivamente com a lista dos elementos maiores expressos em percentuais e os elementos traços em mg/kg.

A perda ao fogo representa a água que ocorre na hidratação dos hidróxidos de ferro e alumínio, incluindo a goethita, liminita e gibisita.

Todas as substâncias que foram analisadas pelo método por fusão total a alta temperatura apresentam valores superiores quando comparados à extração pelo método Mehlich 1. Neste caso são avaliados os metais trocáveis (biodisponíveis) e a fase contida em minerais estáveis (não biodisponíveis).

O destaque é o alumínio que resultou em valores próximos a zero quando a digestão foi realizada pelo método Mehlich 1 e retorna valores entre 12,8 e 42% quando o método de extração é por fusão a elevada temperatura e redissolução. Neste caso, todo o alumínio é vinculado a minerais com ampla estabilidade no ambiente pedogênico como, por exemplo, gibisita.

Amostra	Elementos Químicos Maiores - (%)								
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	SiO	TiO <sub>2</sub>	Perda ao Fogo
1A	39,3	0,2	10,3	0,2	0,1	0,1	21,1	1,9	24,32
3A	40,5	0,1	12,0	0,2	0,1	0,1	22,1	2,0	23,59
10A	40,7	0,1	12,6	0,2	0,1	0,1	20,2	2,0	24,12
11A	41,4	0,1	13,5	0,2	0,1	0,1	20,3	2,1	24,35
14A	41,6	0,1	12,4	0,2	0,1	0,1	20,3	2,1	24,08
15A	39,3	0,4	12,5	0,2	0,1	0,1	24,3	2,0	23,93
17A	39,3	0,3	12,9	0,2	0,1	0,1	25,2	2,0	22,20
20A	38,1	0,3	12,4	0,3	0,1	0,1	27,2	2,0	22,48
22A	38,9	0,3	12,6	0,1	0,1	0,1	24,0	2,0	24,35
1B	41,6	0,1	13,5	0,2	0,1	0,1	23,5	2,1	22,53
3B	41,6	0,1	13,8	0,2	0,1	0,1	23,5	2,2	22,12
10B	41,5	0,1	14,2	0,2	0,1	0,1	23,5	2,1	22,72
11B	42,4	0,1	14,2	0,2	0,1	0,1	20,7	2,2	23,50
14B	42,4	0,1	14,3	0,3	0,1	0,1	22,0	2,2	22,81
15B	42,0	0,2	13,7	0,2	0,1	0,1	23,8	2,2	22,17
17B	41,3	0,2	13,4	0,2	0,1	0,1	24,5	2,2	22,08
20B	40,1	0,1	13,2	0,3	0,1	0,1	27,4	2,1	21,15
22B	41,7	0,2	13,7	0,3	0,1	0,1	23,0	2,2	22,93
28	24,4	3,1	7,9	1,0	0,5	0,5	51,1	1,4	15,66
29	13,1	1,0	3,6	1,2	0,2	0,2	71,6	0,7	12,09
33	12,8	9,3	6,4	1,2	1,2	1,2	56,3	0,9	13,79
35	36,1	0,6	18,0	0,8	0,2	0,2	23,5	1,9	23,26
37	41,1	0,1	8,7	0,6	0,1	0,1	23,0	2,2	25,89
39	38,5	0,2	13,3	0,3	0,1	0,1	25,1	2,0	25,48
40	42,0	0,1	14,4	0,4	0,1	0,1	23,0	2,2	23,08
41	22,8	0,6	12,2	1,5	0,5	0,5	58,4	1,0	10,72
42	38,7	0,2	12,1	0,4	0,1	0,1	28,6	1,9	22,87

**Tabela 14** - Resultados dos principais constituintes dos solos amostrados. O ferro e alumínio compõem a maior massa do Latossolo Vermelho e do Latossolo Vermelho-Amarelo.

	Elementos Traços (mg/kg)														
	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	Pb	Sr	V	Zn	Zr
1A	29,1	17,9	<ld	22,8	90,9	26,6	94,8	<ld	16,2	360,0	<ld	15,0	199,8	41,9	469,6
3A	25,9	17,9	<ld	58,9	114,2	22,5	97,0	<ld	27,6	340,0	<ld	14,7	212,9	50,0	496,7
10A	29,0	14,4	<ld	32,9	118,1	31,1	95,0	<ld	24,2	390,0	<ld	12,7	215,8	48,0	502,2
11A	25,6	18,0	<ld	29,8	132,1	27,8	100,8	<ld	51,4	390,0	<ld	13,7	218,6	47,5	508,7
14A	29,9	13,9	<ld	30,0	112,3	36,7	94,8	<ld	32,5	340,0	<ld	12,0	222,9	43,6	508,3
15A	23,0	25,3	<ld	36,4	124,3	255,5	114,1	<ld	31,9	560,0	<ld	20,2	205,4	65,9	481,9
17A	21,4	22,0	<ld	19,4	133,3	37,6	103,2	<ld	24,5	400,0	<ld	16,0	207,5	58,5	490,9
20A	20,9	19,6	<ld	23,4	122,5	28,5	91,3	<ld	26,3	370,0	<ld	17,4	198,1	49,8	461,9
22A	35,8	28,4	<ld	26,1	122,1	37,0	103,5	<ld	29,4	480,0	<ld	18,6	203,3	64,9	482,3
1B	32,0	15,9	<ld	22,5	138,0	27,4	104,6	<ld	21,9	310,0	<ld	14,8	216,1	52,8	506,3
3B	33,3	14,8	<ld	23,7	143,6	26,0	100,8	<ld	22,4	280,0	<ld	14,6	219,6	102,7	508,9
10B	29,4	16,0	<ld	19,8	138,6	24,8	93,1	<ld	24,7	320,0	<ld	14,0	216,8	58,8	502,7
11B	32,3	12,2	<ld	22,6	142,9	24,6	85,8	<ld	20,9	310,0	<ld	12,3	222,0	73,1	535,3
14B	28,3	11,4	<ld	21,3	139,7	106,1	85,7	<ld	22,1	300,0	<ld	12,0	223,6	50,2	535,8
15B	32,4	15,5	<ld	20,7	143,5	21,5	85,7	<ld	20,9	310,0	<ld	14,6	219,3	56,0	531,2
17B	24,5	13,6	<ld	29,6	140,3	26,7	85,7	<ld	20,7	300,0	<ld	13,4	211,9	54,7	511,2
20B	28,5	13,2	<ld	25,9	137,2	15,2	85,5	<ld	21,7	280,0	<ld	13,5	208,9	48,7	486,0
22B	30,4	16,2	<ld	29,4	142,5	25,3	89,2	<ld	20,9	310,0	<ld	14,4	217,0	65,5	517,1
28	13,1	154,1	<ld	44,7	110,3	36,7	101,3	<ld	23,0	330,0	<ld	91,7	131,4	73,2	413,7
29	7,4	221,7	<ld	84,3	71,8	30,4	31,5	<ld	15,9	360,0	<ld	26,5	85,3	65,4	415,6
33	7,1	204,3	<ld	69,2	90,0	26,5	179,9	<ld	20,9	320,0	<ld	245,7	96,8	73,6	237,3
35	37,0	74,7	<ld	69,2	168,6	32,1	111,2	<ld	20,2	480,0	<ld	30,5	233,5	81,1	437,5
37	15,2	34,5	<ld	28,0	174,8	36,7	66,7	<ld	37,2	330,0	<ld	9,0	210,7	42,7	596,1
39	22,6	13,1	<ld	22,6	127,6	29,1	90,7	<ld	22,9	440,0	<ld	11,1	207,9	78,5	486,6
40	26,4	13,1	<ld	29,2	150,7	85,3	87,2	<ld	20,1	310,0	<ld	12,3	221,7	47,3	510,7
41	38,3	137,3	<ld	48,9	182,0	43,4	61,2	<ld	19,3	210,0	<ld	37,1	179,9	45,8	371,3
42	23,9	31,0	<ld	23,3	136,0	203,2	239,2	<ld	26,0	360,0	<ld	24,2	186,7	72,1	505,3

**Tabela 15** - Resultados das análises dos elementos menores com uso de digestão por fusão a elevada temperatura.

### 8.3 Mapa da Extensão da Contaminação dos Solos

Para a confecção do mapa de extensão da contaminação dos solos os dados de campo de observações de fontes de contaminação e os dados de análises químicas dos solos (com ênfase nos metais mais comuns) foram espacializados. Cinco zonas distintas marcadas por diferentes contaminantes ou diferentes densidades de contaminação potencial foram discriminadas, incluindo a contaminação potencial por: fertilizantes e agroquímicos, efluentes domésticos, áreas de acumulação e remoção de resíduos sólidos, área com acumulação de resíduos em baixa densidade e área com acumulação vertical de grandes volumes de rejeitos.

O mapa da Figura 28 apresenta a espacialização das áreas de solos contaminados, sendo que a faixa alongada norte-sul situada na margem esquerda (leste) do córrego Cabeceira do Valo é uma área de contaminação por fertilizantes químicos solúveis, fertilizantes orgânicos e outros produtos químicos aplicados na agricultura intensiva irrigada. Não foram realizadas análises específicas, mas o histórico de uso da área, com produção agrícola de hortaliças a décadas corrobora a interpretação da presença deste tipo de contaminação.

Na faixa estreita situada no limite da ocupação de “Santa Luzia” com o Parque Nacional de Brasília existe acúmulo superficial de efluentes produzidos pela população residente que adentra na área da unidade de conservação ambiental. Mesmo sem a realização de análises específicas a observação de campo permite confirmar a presença deste tipo de contaminação.

Os demais tipos de contaminação que foram cartografados são diretamente decorrentes da acumulação permanente ou sazonal de resíduos sólidos de origem doméstica e de entulhos de obras civis.

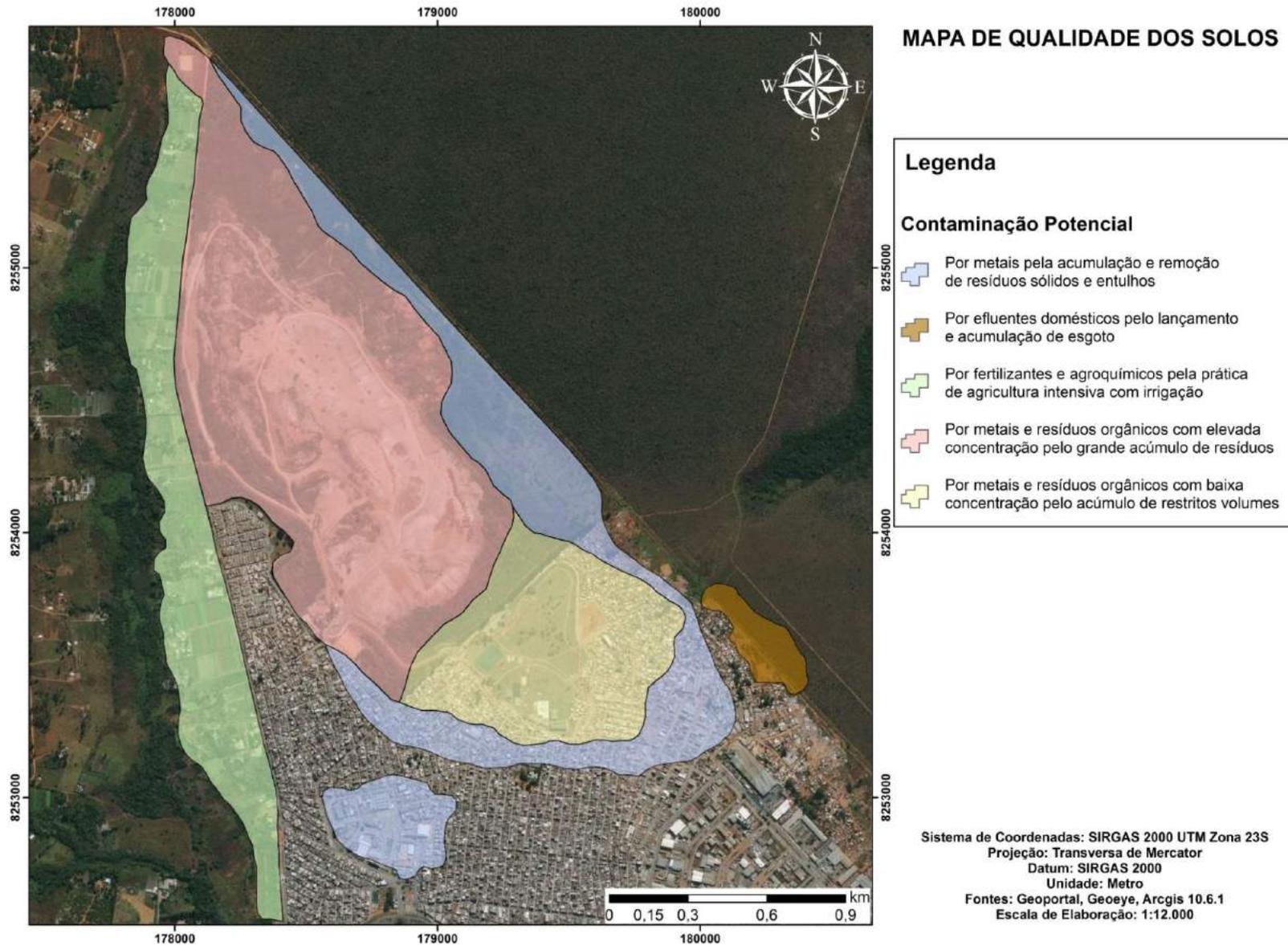
A distinção destas três faixas foi baseada no volume, tempo de permanência dos resíduos (se permanente ou não) e nos tipos de resíduos (relação de entulho e lixo orgânico). A faixa “embargada” recebeu resíduos que foram posteriormente retirados (em função da proximidade com o Parque Nacional de Brasília). Áreas de acumulação distribuídas em locais onde atualmente está localizada a Cidade Estrutural (denominada de aterro antigo) receberam menor volume total de resíduos, uma vez que a operação àquela época era na forma de abertura de trincheiras, compactação dos resíduos e aterramento. Em muitas destas áreas atualmente dominam entulhos, pois o longo período desde a acumulação dos resíduos causou a decomposição total do lixo orgânico. Por fim, a poligonal considerada “lixo mais recente” foi dividida em duas faixas com diferente potencial de contaminação em função do volume acumulado e de ser atualmente ativa ou inativa.

## **9. CONTAMINAÇÃO ATMOSFÉRICA**

A qualidade do ar é um dos aspectos do meio físico com a maior carência de dados e informações no Distrito Federal. A dificuldade de acesso a dados sobre a qualidade do ar no tempo e no espaço no território distrital se deve ao restrito número de estações de monitoramento e ao fato destas poucas estações apresentarem registros curtos e com inúmeras interrupções.

De certa forma, a falta de dados é decorrente da boa qualidade do ar na maior parte do tempo e na maior parte do território, uma vez que é uma região pouco industrializada, tem cidades pouco verticalizadas e ainda uma densidade de veículos menor que nos centros metropolitanos das maiores conurbações existentes no território nacional.

De forma geral, a preocupação com a qualidade do ar é uma questão local, sendo mais preocupante no período que inclui os meses de agosto e setembro, justamente o final da estação seca antes do início da temporada de chuvas.



**Figura 47** - Mapa da Distribuição das áreas com diferente potencial de contaminação. A confirmação da contaminação é feita por análises químicas específicas ou com base em informações qualitativas. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema *Google Earth*, de maio de 2020).

No Distrito Federal os pontos críticos com relação à qualidade do ar que foram monitorados, de forma intermitente incluem: a Rodoviária de Brasília, a região de central de Taguatinga e as localidades das fábricas de cimento referidas de forma genérica como “Região da Fercal” (Região Administrativa de Sobradinho II). Nas áreas urbanas a preocupação é vinculada à elevada densidade de veículos em certos horários do dia que podem ser responsáveis pelo aumento do particulado derivado de gases de combustão dos motores. Na região da Fercal o problema é vinculado com a operação das pedreiras (fonte de calcários para as fábricas) e dos fornos de produção do cimento que exalam grande volume de gases e poeira.

Além das duas fontes anteriormente enumeradas ainda existem duas outras que são significativas e afetam a atmosfera como um todo e não são apenas localizadas devido às atividades específicas: poeira de áreas expostas (pela agricultura, para expansão urbana, para realização de obras civis, dentre outras) e fumaça de queimadas florestais (infelizmente comuns nos meses de agosto e setembro) e de resíduos sólidos.

No Brasil, os padrões de qualidade do ar são estabelecidos pela Resolução Conama 491/2018 contemplando os parâmetros: partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis (PI), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), ozônio (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e fumaça. Os padrões estabelecidos são classificados em: primários e secundários. Os padrões primários de qualidade do ar referem-se às concentrações de poluentes que, uma vez ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Os padrões secundários de qualidade do ar são relacionados às concentrações de poluentes que resultam no mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, da fauna e flora, e dos materiais (Tabela 16).

<b>Poluente</b>	<b>Tempo de Amostragem</b>	<b>Padrão Primário (µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Padrão Secundário (µg/m<sup>3</sup>)</b>
Partículas Totais em Suspensão	24 horas	240	150
	MGA	80	60
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	24 horas	365	100
	MAA	80	40
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	40000	40000
	8 horas	10000	10000
Ozônio (O <sub>3</sub> )	1 hora	160	160
Fumaça	MAA	60	40
Partículas Inaláveis (PM10)	24 horas	150	150
	MAA	50	50
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	1 hora	320	190
	MAA	100	100

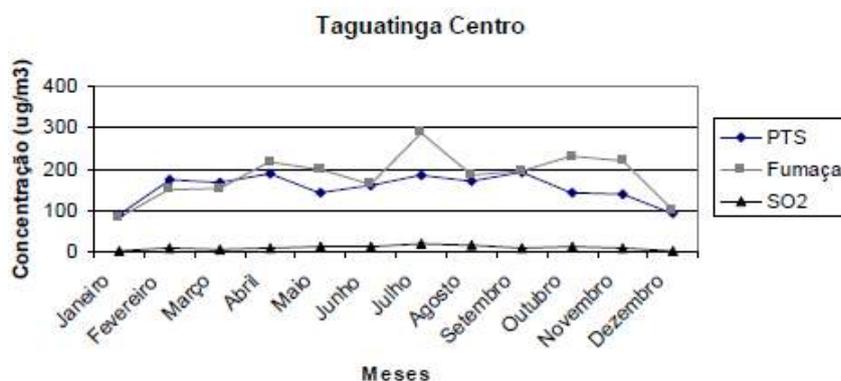
**Tabela 16** - Padrões de qualidade do ar segundo a Resolução CONAMA nº 491/2018. MGA - média geométrica anual e MAA - média aritmética anual.

Com base nos dados obtidos pelas análises do material coletado nas estações, obtêm-se a concentração dos poluentes desejados em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e então se calcula o Índice de Qualidade do Ar (IQAr). O IQAr é um índice adimensional resultante do cálculo com a associação dos seguintes parâmetros: partículas inaláveis, partículas inaláveis finas, fumaça, ozônio, monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio. Este índice é utilizado para avaliar os efeitos da poluição sobre a saúde e bem estar da população, conforme Tabela 17, sendo a massa de atmosférico classificada como: boa, regular, inadequada, má ou péssima.

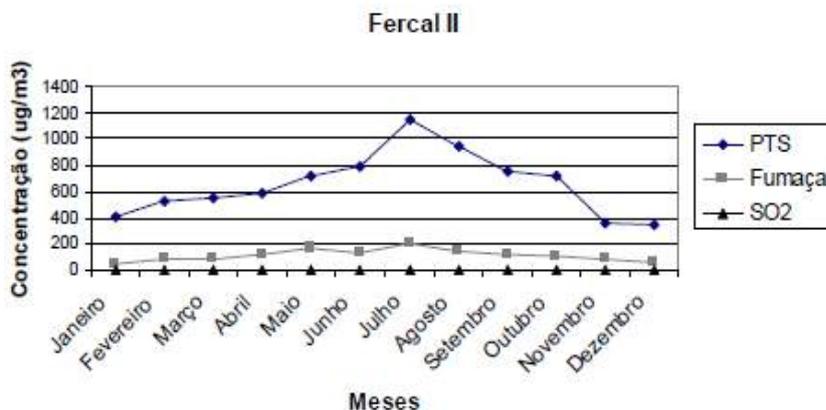
Qualidade do Ar	Índice	Descrição dos efeitos sobre a Saúde
Boa	0-40	Não há riscos à saúde.
Moderada	41-80	Pessoas de grupos sensíveis, como crianças e idosos com doenças respiratórias e cardíacas, podem apresentar sintomas como tosse e cansaço. A população em geral não é afetada.
Ruim	81-120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças e idosos com problemas respiratórios e cardíacos) podem apresentar efeitos mais severos à saúde.
Muito Ruim	121-200	Toda a população pode apresentar agravamento de sintomas como tosse, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda apresentar falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves na população sensível.
Péssima	> 200	Toda a população pode apresentar riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

**Tabela 17** - Índice de qualidade do ar (IQAr) e efeitos sobre a saúde humana (CETESB, 2013).

A título de exemplo são apresentados dois gráficos de distribuição de dados de qualidade do ar no Distrito Federal (Figuras 29 e 30).



**Figura 48** - Distribuição mensal da poluição atmosférica no ano de 2008 no Centro da cidade de Taguatinga. Fonte: IBRAM/SEDUMA, (2008).



**Figura 49** - Variação de componentes indicadores de qualidade do ar nas adjacências da fábrica de cimento Planalto (Ciplan). Fonte: IBRAM/SEDUMA, (2008).

No centro da cidade de Taguatinga, conhecido como um dos tráfegos de veículos mais intensos do Distrito Federal os valores de particulados totais em suspensão alcançam o valor máximo de 200  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ , sendo que no ano de 2008 o indicador de fumaça alcançou o valor de 300  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$  no mês de julho. Na região da Fercal nas proximidades da fábrica de cimentos Ciplan o PTS alcança 1200  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$  sendo que os índices de fumaça e  $\text{SO}_2$  permanecem similares ao da cidade Taguatinga, o que indica que os valores de particulados totais em suspensão são controlados pela operação da fábrica e não por queimadas ou tráfego de veículos.

Quatro tipos de poluentes atmosféricos são produzidos em grande escala na área do lixão e adjacências, quais sejam:

- Particulados atmosféricos derivados da suspensão de partículas (argila, silte e fragmentos amorfos) a partir de áreas expostas e da operação do Moinho de Resíduos, sendo elevadas pela ação de ventos e ao longo do trajeto de veículos (em estradas não pavimentadas);
- Fumaça e gases com elevado potencial de enriquecimento em Dióxido de Enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e Monóxido de Carbono (CO) por serem produzidos majoritariamente pela combustão de óleo diesel de máquinas e caminhões que trafegam de forma contínua na área da atual Unidade de Recebimento de Entulhos - URE e na cidade Estrutural (para acesso à URE);
- Fumaça de queima de massa florestal e áreas verdes e de queima de resíduos sólidos que são acumulados indistintamente em locais inadequados na periferia do lixão e da própria área urbana da Cidade Estrutural;
- Gases de Efeito Estufa - GEE (principalmente metano -  $\text{CH}_4$ ) derivados da metanogênese oriunda da decomposição dos resíduos orgânicos aterrados no corpo principal do lixão mais recente (depositado a partir de 1995).

Na região da Cidade Estrutural e nas adjacências do antigo Lixão não existem dados disponíveis de monitoramento da qualidade do ar, embora seja uma região que particularmente apresente problemas associados a esta questão ambiental.

Com relação aos gases de efeito estufa não existem dados disponíveis de monitoramento. Apenas um trabalho que apresenta resultados de medições de gases foi encontrado na literatura. O trabalho de Del'Rey (2020) apresenta os resultados da estatística de medições realizadas em queimadores de gases que na prática são drenos verticais da fração gasosa produzida pela decomposição dos resíduos orgânicos. A Tabela 18 apresenta a síntese dos resultados do referido trabalho a partir da medição em 70 pontos de queima de gases (para a medição, o fogo foi extinto e se aguardou 5 horas antes da leitura). A medição da concentração de metano e dióxido de carbono foi realizada com um instrumento portátil da marca Land Tec modelo GEM 5000.

Nenhum dado de vazão dos gases (volume por tempo) foi encontrado, sendo que para fins de avaliação do potencial de geração de energia pela combustão dos gases este dado é fundamental.

<b>Tipo de Gás</b>	<b>Concentração Mínima</b>	<b>Concentração Máxima</b>	<b>Concentração Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>CH<sub>4</sub></b>	1,9	57,9	38,9	15,9
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,6	58,4	33,4	16,3

**Tabela 18** - Estatística de variação de metano e gás carbônico médio em 70 drenos verticais de gás situados na porção elevada do maciço de resíduos. Valores em porcentagem por volume (% por volume). Medições realizadas em abril de 2019. Fonte Del'Rey (2020).

Para minimizar os efeitos dos poluentes na atmosfera local e minimizar eventuais problemas de saúde à população local as seguintes práticas são desenvolvidas: queima dos gases nas saídas dos drenos verticais de gás e aspersão de água nas áreas internas do lixão.

Atualmente está em desenvolvimento um projeto de pesquisa no âmbito do programa de Pesquisa & Desenvolvimento da Eletronorte / Companhia Energética de Brasília (CEB), que pretende avaliar o potencial de geração de energia pela combustão dos GEEs derivados do antigo aterro. Como uma das metas do referido projeto se destaca o dimensionamento do volume dos resíduos aterrados e a quantificação da produção de gases atualmente eliminados pelos drenos.

Para a completa caracterização dos poluentes atmosféricos na região é fundamental que uma estação de monitoramento seja instalada para medição contínua de PTS, PI e fumaça, além do monitoramento da saída dos gases dos drenos verticais.

## **10. MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE RESÍDUOS**

### **10.1 Caracterização dos Tipos de Resíduos**

A área do Lixão da Estrutural, bem como a atual área urbana da Cidade Estrutural representam locais de acumulação de resíduos há mais de 50 anos.

Durante as escavações para a instalação dos poços de monitoramento no âmbito deste projeto comumente foram interceptados aterros em maior ou menor espessura.

Durante a tentativa de instalação do Poço LX16 próximo à Administração Regional da Estrutural foi possível confirmar a existência de mais de 20 metros de entulho de obras com grandes fragmentos de concreto, blocos pré-moldados, restos de azulejos dentre outros. Nesta mesma região a Escola Classe foi interditada em função da acumulação de gás nas salas de aulas gerado pela decomposição de resíduos. Estes dados indicam a ampla área impactada pela disposição de rejeitos, não apenas dentro dos limites da poligonal controlada pelo Serviço de Limpeza Urbana, mas também em suas adjacências (incluindo áreas urbanas já consolidadas).

Na área urbana a escavação de trincheiras relativamente pequenas (de 2 m de comprimento por 1 m de largura por 1 m de profundidade) mostra a presença de diferentes tipos de materiais, incluindo: plástico, papel / papelão, tecido, metal e vidro. Todos os fragmentos vêm misturados em uma matriz composta por diferentes tipos de solos (Figura 50). Na área do lixão mesmo em porções que tiveram os resíduos removidos por determinação legal, ainda é possível observar diferentes tipos de resíduos a pequenas profundidades (Figura 51).



**Figura 50** - Resíduos observados em trincheira rasa aberta na área urbana da Cidade Estrutural. Notar a ampla predominância de plástico.



**Figura 51** - Resíduos expostos em área que foi gradeada para implantação de experimento de fitorremediação.

No maciço do aterro mais recente, em suas porções com maior espessura de resíduos acumulados é difícil se ter uma definição exata das proporções dos diferentes tipos. Entretanto, a observação de locais que tiveram remoção de resíduos em obras de retaludamento, na construção de trincheiras para contenção de chorume, nos aterros das vias de acesso é possível verificar a seguinte proporção das classes de resíduos: entulho > plástico > tecido > madeira > vidro > metais. Estes materiais estão sempre envoltos por diferentes proporções de terras de origens distintas. A porção orgânica, de forma geral, já foi parcial ou totalmente decomposta.

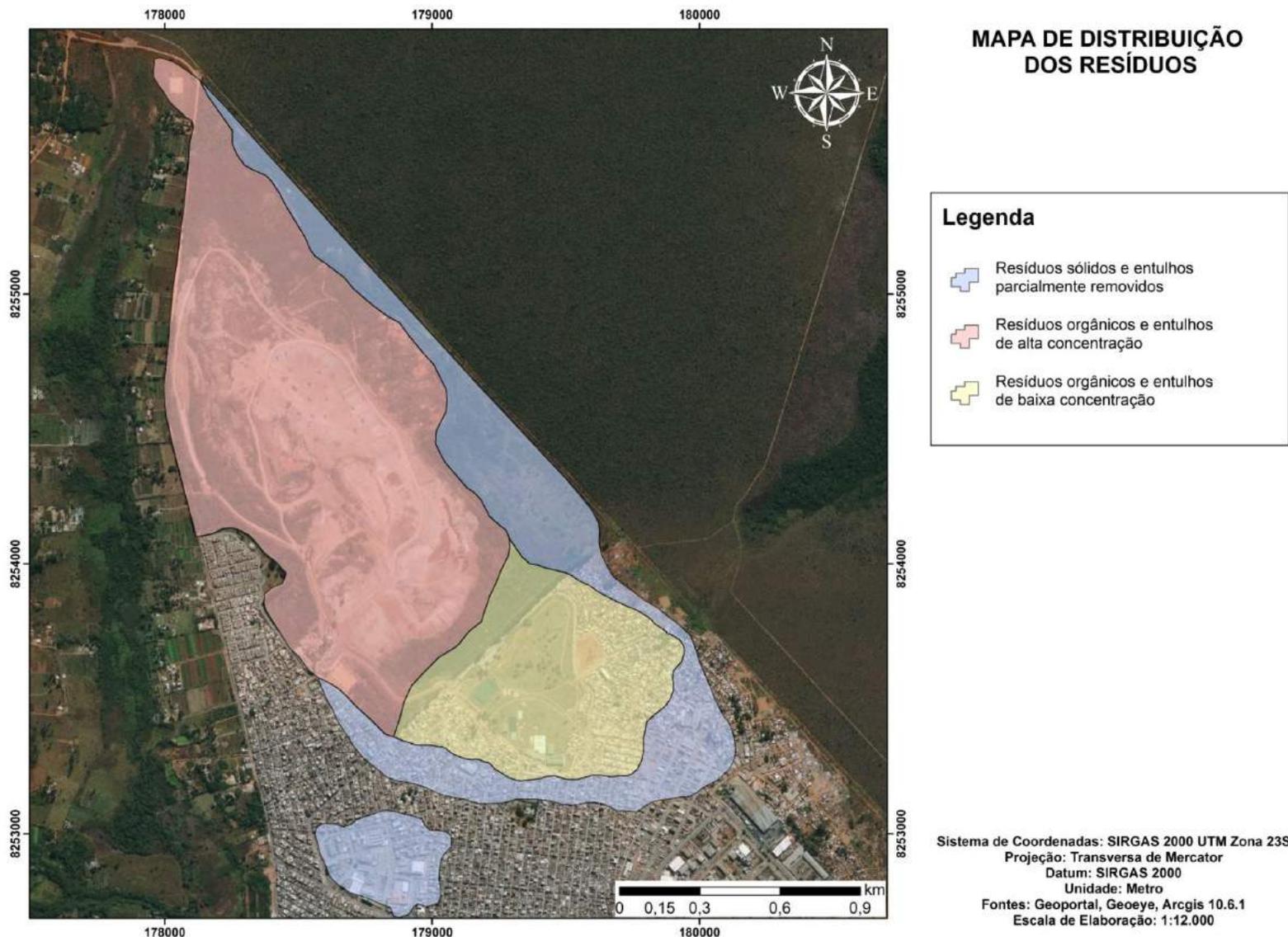
As proporções de classes de resíduos mudam no tempo e no espaço a partir de diferentes parâmetros. No início de operação da área os resíduos domésticos ricos em matéria orgânica predominavam. Em outros momentos materiais oriundos de bota-fora de obras de infraestrutura e outras obras civis passaram a dominar. Atualmente a área é operada como uma Unidade de Recebimento de Entulho e resíduos de podas, entretanto, é possível se observar diferentes tipos de resíduos, incluindo plásticos, madeira e tecidos.

Outro ator que influencia historicamente nas classes de resíduos acumulados é a “cultura da reciclagem”. A reciclagem de materiais potencialmente aproveitáveis sempre existiu. Contudo, este cenário modificou de forma mais intensiva a partir dos anos 2000, quando por “conscientização” da população ou por “necessidade” dos catadores e cooperativas de catadores, grande parte dos resíduos secos passaram a ser retirados antes de serem acumulados no aterro.

O volume de material acumulado também sofreu mudanças radicais durante o tempo de atividade do Lixão. Inicialmente se aplicava um método de aterramento por trincheiras em que os resíduos eram depositados e compactados em pequenas espessuras (~5 metros) e posteriormente aterrados. Quando as áreas se tornaram mais limitadas, em função da ocupação urbana, se optou pela acumulação vertical dos resíduos.

Na operação por acumulação na vertical ocorreram vários momentos de aterramento e nova disposição dos resíduos, de forma que atualmente existem superfícies compactadas e impermeabilizadas no interior do maciço de resíduos.

O mapa da Figura 52 mostra a distribuição dos resíduos. De forma, geral há muita variação e heterogeneidade dos resíduos, mas são observadas diferentes proporções contendo blocos de concreto e outros restos de obras, plástico, papelão, vidro, ferro e matéria orgânica em diferentes estágios de decomposição (inclusive em condições redutoras, e em fase metanogênica no interior do maciço mais espesso de resíduos).



**Figura 52** - Distribuição dos resíduos na área do Lixão, incluindo áreas de acumulação histórica e área de acumulação mais recente. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema *Google Earth*, de maio de 2020).

## 11. DADOS PARA ALIMENTAÇÃO DOS MODELOS DE FLUXO

### 11.1 Condutividade Hidráulica da Zona Não Saturada

O mapa de solos da área adjacente ao Lixão da Estrutural apresenta três classes de solos caracterizadas como Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e Gleissolo Háplico. Estes solos apresentam como feições similares sua textura muito argilosa e sua estruturação granular a grumosa, de forma que compõem coberturas similares em função de seu funcionamento hídrico. Desta forma, foram realizados cinco ensaios de infiltração *in situ* para a determinação da sua condutividade hidráulica em superfície e até 200 cm, o que representa a porção superficial da zona não saturada do aquífero freático da região.

Os ensaios de infiltração correspondem a uma medida pontual que é extrapolada para as áreas adjacentes com características pedológicas, geológicas e de uso do solo semelhantes. Em geral, os métodos de ensaios de infiltração, como é o caso da condutividade hidráulica vertical (Kv), são desenvolvidos a partir da medição da quantidade de água percolada em um determinado intervalo de tempo. O parâmetro hidrodinâmico condutividade hidráulica apresenta grande relevância por ser um dos principais fatores de caracterização dos aquíferos. Em especial, os ensaios de infiltração *in situ* baseiam-se nos princípios da Lei de Darcy para o fluxo laminar do movimento da água no solo.

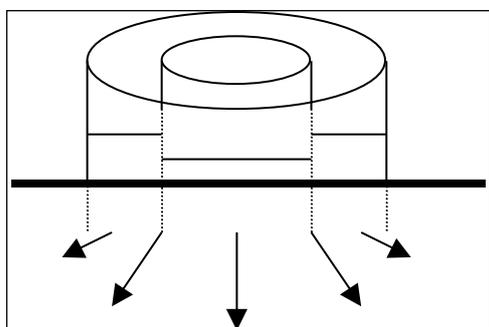
Ao realizar um ensaio para obtenção dos valores de condutividade hidráulica deve-se estar atento para alguns fatores que podem interferir no comportamento da movimentação da água no meio e, conseqüentemente em suas medições, tais como: qualidade da água; viscosidade da água; textura, estrutura e consistência do solo; ação de microrganismos no solo e presença de ar nos poros.

Os métodos têm sua aplicação variando em conformidade com a natureza do meio testado, tipo de prospecção e objetivo. Conforme Souza (2001) e Fiori (2010) são exemplos de ensaios de campo: ensaio de furo de trado em presença de lençol freático; ensaio de furo de trado em ausência de lençol freático (*Open End Hole*); ensaio de anéis concêntricos e ensaio em poços de monitoramento (ABGE, 1996).

Neste estudo, os testes foram realizados considerando pontos estratégicos com relação à distribuição das classes de solos, condições geológicas e geomorfológicas, além da situação natural dos locais analisados. Os valores de Kv foram adquiridos utilizando-se dois dos métodos citados anteriormente para identificação dos valores de Kv: anéis concêntricos, com análise de Kv na superfície e *Open End Hole*, com análise de Kv em profundidade (Earth Manual, 1974).

Os estudos da condutividade hidráulica distinguem medições quanto à direção do fluxo, vertical e horizontal, e quanto à carga, que pode ser constante ou variável. Os dois tipos de ensaios desenvolvidos no presente estudo buscam valores de condutividade hidráulica vertical utilizando carga variável.

O ensaio dos anéis concêntricos utiliza um bloco de dois anéis metálicos soldados concentricamente com 25 cm de altura, 45 cm de diâmetro no anel externo e 35 cm de diâmetro no anel interno, como pode ser visto na Figura 53.



**Figura 53** - Ensaio de infiltração *in situ* com o método dos anéis concêntricos.

O procedimento de campo envolve, primeiramente, a cravação dos anéis na porção superficial do solo. Essa cravação é necessária para evitar que haja vazamento pela lateral do cilindro interno. Esse método busca impedir a tendência de fluxo na direção horizontal ao propiciar a criação de uma barreira de solo saturado decorrente da necessidade de estabilização do nível de água do anel externo antes que se abasteça o anel interno. Essa técnica utiliza a coluna inicial e final de água e o tempo de infiltração (conforme Eq. 3). Após a aplicação dessa fórmula, são obtidos os valores de K apresentados na Tabela 19.

$$K = \mu \times \frac{I}{\Delta t} \times \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \text{ (Equação 3)}$$

Onde:

$I$  - Profundidade de cravação (mm);

$h_0$  - Coluna d'água inicial (mm);

$h$  - Coluna d'água final (mm);

$\Delta t$  - Tempo decorrido para o rebaixamento entre  $h_0$  e  $h$  (min);

$\mu$  - Fator de transformação de unidades (de mm/min para m/s = 1/10000).

O método denominado *Open End Hole* consiste na perfuração, com trado, de quatro furos, dispostos em uma área quadrada com um metro de aresta, ou alinhados, que variaram em profundidade de 50, 100, 150 e 200 cm. É necessário ressaltar que por vezes não foi possível executar todos os furos em determinados pontos e que alguns furos tiveram uma pequena variação quanto à profundidade em função de dificuldades operacionais, como interceptação de linhas de pedra ou de horizontes impenetráveis.

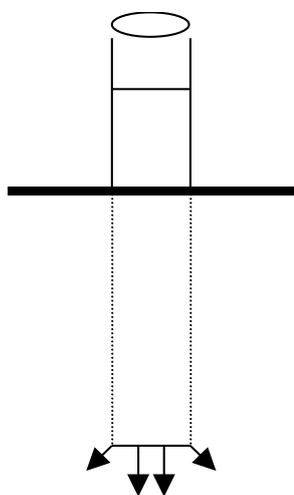
De acordo com a Figura 54, depois da execução dos furos são cravados com marreta de borracha tubos de PVC de 50 mm de diâmetro, objetivando revestir as paredes do poço. Neste estudo, para a perfuração a trado foi utilizado o diâmetro de 100 mm, o que resulta em um

espaço anelar de 50 mm, folga suficiente ao controle da cravação. Desta forma, garante-se que a água de enchimento dos tubos de revestimento não vaze e se infiltre através das paredes do furo. Também, evita-se o uso de força para cravação, manobra que implica quebra da estrutura do solo e polimento das paredes do furo.

	Coord. UTM	Observações	I (mm)	Ti	Mi (cm)	Tf (seg)	Mf (cm)	K m/s
<b>Ponto 1</b>	180141 8254167	Transição LVA/Glei; Furo 100 cm: condições de umidade próximas ao limite de saturação (água visível na base do furo no decorrer do ensaio); 20 minutos de estabilização.	55	0	3,0	3000	13,3	$1,79 \times 10^{-5}$
<b>Ponto 2</b>	178983 8254913	Ensaio em LVA. Estrutura superficial comum pequena granular (entre grumosa e granular); Muita atividade de raízes, inclusive em maiores profundidades (200 cm). Cerrado em recuperação (área queimada)	100	0	4,0	179	11,4	$6,24 \times 10^{-4}$
<b>Ponto 3</b>	178253 8255701	Ensaio em LVA. Estrutura superficial muito comum pequena grumosa; Muita atividade de raízes nos primeiros 50 cm. Cerrado do tipo campo sujo	60	0	3,1	562	15,5	$1,62 \times 10^{-4}$
<b>Ponto 4</b>	178044 8254431	Ensaio em LVA próximo a lagoa de chorume (beira da estrada). Primeiros 7 cm de material muito compacto	50	0	3,4	3013	15,4	$2,13 \times 10^{-5}$
<b>Ponto 5</b>	178439 8253941	Ensaio em LV; Superfície gramada. Horizonte A com 16 cm (coloração preto-amarronzada)	50	0	0,044	3000	14,2	$1,65 \times 10^{-5}$

**Tabela 19** - Valores de condutividade hidráulica na superfície pelo método dos anéis concêntricos (m/s).

I - profundidade de cravação dos anéis; Ti - tempo inicial; Tf - tempo final; Mi - medida inicial; Mf - medida final da coluna d'água no anel central e K - condutividade hidráulica vertical na superfície.



**Figura 54** - Ensaio de infiltração *in situ* com método *Open End Hole*.

O passo subsequente consiste em preencher com água a um limite de altura inicial da coluna d'água,  $h_0$ , em um tempo também inicial,  $t_0$ . Após certo tempo,  $t$ , a partir do início do processo de infiltração, fez-se uma medição da coluna de água final,  $h$ , para cada um dos tubos cravados no local do ensaio. Assim, a estimativa de  $K_v$  é feita pela aplicação desses dados na Eq. 4, e os resultados apresentados na Tabela 20.

$$K_v = 2,303 \times \left( \frac{R}{4\Delta t} \right) \times \left[ \log \left( \frac{h_0}{h} \right) \right] \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

$R$  = raio do tubo (m),

$h_0$  = coluna d'água inicial (m),

$h$  = coluna d'água final (m),

$\Delta t$  = tempo decorrido para o rebaixamento entre  $h_0$  e  $h$  (seg).

Ponto 1						
Prof.	H (cm)	Ti (seg)	Mi (cm)	Tf (seg)	Mf (cm)	K (m/s)
50	50,50	0,00	5,40	3000,00	16,20	$5,7 \times 10^{-7}$
100	101,00	12,22	5,90	3022,00	8,40	$5,5 \times 10^{-8}$
Ponto 2						
Prof.	H (cm)	Ti (seg)	Mi (cm)	Tf (seg)	Mf (cm)	K (m/s)
50	53,00	0,00	7,70	1200,00	40,40	$6,6 \times 10^{-6}$
100	106,00	12,95	7,30	3000,00	18,90	$2,6 \times 10^{-7}$
150	149,00	24,50	6,60	3022,00	27,90	$3,3 \times 10^{-7}$
200	202,00	34,96	5,70	3040,00	7,80	$2,2 \times 10^{-8}$
Ponto 3						
Prof.	H (cm)	Ti (seg)	Mi (cm)	Tf (seg)	Mf (cm)	K (m/s)
50	52,40	0,00	5,80	2100,00	40,00	$3,9 \times 10^{-6}$
50	52,40	0,00	5,80	3015,00	48,80	$5,3 \times 10^{-6}$
100	108,50	11,00	6,60	3033,00	12,70	$1,2 \times 10^{-7}$
150	150,40	22,00	6,40	3052,00	27,80	$3,3 \times 10^{-7}$
200	205,90	32,21	5,90	3070,00	9,40	$3,6 \times 10^{-8}$
Ponto 4						
Prof.	H (cm)	Ti (seg)	Mi (cm)	Tf (seg)	Mf (cm)	K (m/s)
50	57,50	0,00	3,20	3000,00	23,80	$9,9 \times 10^{-7}$
100	111,30	13,00	6,60	3013,00	7,70	$2,2 \times 10^{-8}$
150	151,50	21,00	6,20	3033,00	16,80	$1,5 \times 10^{-7}$
200	206,00	32,00	6,10	3045,00	8,20	$2,1 \times 10^{-8}$
Ponto 5						
Prof.	H (cm)	Ti (seg)	Mi (cm)	Tf (seg)	Mf (cm)	K (m/s)
50	55,00	0,00	6,10	3000,00	18,10	$5,8 \times 10^{-7}$
100	108,50	11,00	5,60	3026,00	36,50	$7,4 \times 10^{-7}$
150	151,00	24,00	5,40	3044,00	11,60	$9,0 \times 10^{-8}$
200	205,50	42,00	6,80	3059,00	6,90	$1,0 \times 10^{-9}$

**Tabela 20** - Valores da Condutividade Hidráulica por método *Open End Hole* (m/s). A numeração dos pontos relaciona-se com a apresentada para os ensaios com Anéis Concêntricos e, portanto, as coordenadas UTM são as mesmas. Ti - tempo inicial; Tf - tempo final; Mi - medida inicial da coluna d'água; Mf - medida final da coluna d'água no tubo de PVC e K - condutividade hidráulica vertical.

## 11.2 Condutividade Hidráulica da Zona Saturada

Para a determinação da condutividade hidráulica da zona saturada foram realizados ensaios do tipo Slug Test em dezesseis poços de monitoramento instalados pelo presente projeto. Não foram utilizados poços existentes, uma vez que os perfis construtivo e descritivo dos poços não são conhecidos.

Para a elevação instantânea da coluna de água no poço, não foi utilizada uma barra impermeável de volume conhecido (*slug* em inglês), mas um volume de água que foi adicionado de forma rápida no interior da tubulação de revestimento / filtro.

### *Slug Tests - Base Teórica*

De forma sucinta, este teste consiste na elevação do nível d'água de um poço seguido da observação das condições para recuperação do nível estático inicial. As técnicas incluem o lançamento de objetos ou certa quantidade de água, sempre de volume conhecido (Figura 55). A avaliação é feita pela interpretação de uma curva do tipo Rebaixamento *versus* Tempo, construída com medidas regulares de nível dinâmico, seja com medidores manuais de nível ou com transdutores de pressão acoplados a computadores.

Os dados de campo podem ser aplicados em diferentes equações matemáticas. Os principais métodos usados para tratamento dos dados de campo incluem: i) Bouwer & Rice, ii) Hvorslev e iii) Vazão (Fiori, 2010), descritos a seguir.



**Figura 55** - Adição de água ao poço a fim de se elevar o nível estático para averiguação das condições de recuperação.

### Método de Bouwer & Rice

Este método pode ser utilizado tanto para aquíferos livres quanto para aquíferos confinados, desde que a base da camada confinante esteja consideravelmente acima da seção de filtro do poço (Fiori, 2010). A componente radial da condutividade hidráulica ( $K_r$ ) é obtida pela Eq. 5:

$$K_r = - \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln \frac{H_t}{H_0} \text{ (Equação 5)}$$

Onde (Figura 2):

$r_c$  = raio do revestimento (m);

$R_e$  = raio efetivo de dissipação da carga hidráulica (m);

$r_w$  = raio efetivo do filtro ou raio de perfuração do poço (m);

$L_e$  = comprimento da seção de filtro (m);

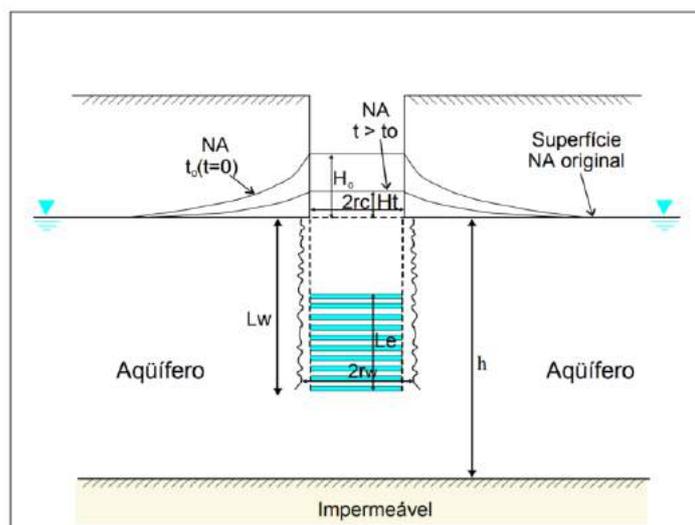
$t$  = tempo (s);

$H_0$  = elevação no tempo  $t = 0$  (m)

$H_t$  = elevação no tempo  $t = t$  (m)

A determinação de  $R_e$  não é trivial. Empiricamente, adotam-se valores de  $3 \times r_w$ ,  $5 \times r_w$  e  $7 \times r_w$  (Fiori, 2010).

Segundo Fiori (2010), esta solução pressupõe que o aquífero é livre (ou semiconfinado com contribuição do aquítarde) com extensão infinita, homogêneo, isotrópico e de espessura uniforme. Além disso, o lençol freático é horizontal antes do teste e a mudança da carga hidráulica no início do teste é instantânea. Ainda, considera-se que a inércia da coluna d'água e as perdas não lineares são insignificantes; o poço é totalmente ou parcialmente penetrante; e seu armazenamento não é desprezível. Finalmente, o fluxo para o poço está em um estado estacionário e não há fluxo acima do lençol freático. A Figura 37 ilustra os parâmetros e as condições de contorno deste método.



**Figura 56** - Ilustração esquemática do teste tipo *Slug* com parâmetros geométricos utilizados na análise da condutividade hidráulica pelo método de Bouwer & Rice (1976). Poço parcialmente penetrante. Extraído de Pede (2004).

### *Método de Hvorslev*

Segundo Fiori (2010), este método pode ser aplicado para aquíferos confinados e livres, homogêneos, isotrópicos, de espessura uniforme e baixo gradiente hidráulico. A condutividade hidráulica é obtida pela Eq. 6:

$$K_r = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{L_e}{R}\right)}{2L_e T_L} \text{ (Equação 6)}$$

Onde:

$K_r$  = componente radial da condutividade hidráulica (m/s);

$r_c$  = raio do revestimento (m);

$L_e$  = comprimento da seção de filtro (m);

$R$  = raio contínuo de interferência do poço de observação (m);

$T_L = \pi^2 / FK$ , onde  $FK = \pi^2 * (dr/dt)$ ;

$T_L$  = tempo para 37% de recuperação (s).

Este método pressupõe que o aquífero é semiconfinado, não drenante, com extensão lateral infinita, homogêneo, isotrópico e de espessura uniforme. Além disso, considera-se que o lençol freático é horizontal antes do teste e a injeção ou retirada de água resulta em uma mudança instantânea no nível d'água. Assume-se que a inércia da coluna d'água e as perdas não lineares são insignificantes e o poço é considerado de largura infinitesimal e totalmente ou parcialmente penetrante. Finalmente, o fluxo em direção distante do poço é horizontal (Fiori, 2010). Na prática, o fator  $R$  refere-se ao raio da perfuração  $r_w$ , onde o espaço anelar entre o tubo de revestimento e o furo é preenchido por pré-filtro.

### *Método da vazão*

Segundo a “função da vazão”, a condutividade hidráulica da zona saturada pode ser determinada pela Eq. 7:

$$K = Q / 5.5 * \Delta h * r \text{ (Equação 7)}$$

Onde:

$K$  = condutividade hidráulica (m/s);

$Q$  = vazão medida a partir do volume de água lançado e tempo de ensaio ( $m^3/s$ );

5.5 = constante empírica;

$\Delta h$  = variação da carga hidráulica inicial e final do teste (m);

$r$  = raio do revestimento do poço de observação (m).

Os valores obtidos pelo método da vazão são, em geral, superestimados. Sua aplicação restringe-se a casos em que as características construtivas de um poço são desconhecidas.

### ***Slug Tests - Resultados e Interpretações***

A Tabela 21 traz a base de dados gerada durante a realização dos ensaios e o Apêndice 3 o comportamento da variação dos níveis durante a recuperação da carga hidráulica original. A

decisão dos volumes de água adicionados em cada poço foi baseada no perfil descritivo do poço (presença de areia, entradas d'água e vazão potencial) e na elevação do nível freático. O volume variou de 12 até 50 litros. O lançamento da água foi feito com uso de um funil que permitiu a introdução da água em no máximo 15 segundos.

Poço	Data	NE (m)	Hora Início	Hora Final	Volume (litros)	Ascensão (m)	Recuperação
Lx 01	11/07/2020	4,735	11:50:00	12:01:00	30	1,70460	99,05%
Lx 02	11/07/2020	2,905	11:38:00	12:10:00	20	2,17416	100,17%
Lx 03A	04/08/2020	8,150	14:40:00	16:50:00	25	0,95600	99,42%
Lx 04	11/07/2020	1,690	10:40:00	11:21:00	12	1,14469	100,00%
Lx 04A	04/08/2020	1,170	16:12:00	16:40:00	10	1,01700	100,43%
Lx 05	11/07/2020	3,405	10:15:00	11:15:00	25	2,55510	98,68%
Lx 06	04/08/2020	6,170	12:00:00	13:16:00	30	2,73300	100,15%
Lx 07	11/07/2020	12,310	13:02:00	15:13:00	50	4,33050	98,46%
Lx 08	11/07/2020	13,665	13:28:00	18:48:00	50	4,59206	98,18%
Lx 09	11/07/2020	11,560	15:55:00	17:48:00	25	2,52410	99,53%
Lx 10	11/07/2020	8,670	16:31:00	18:32:00	30	2,50571	98,90%
Lx 12	12/07/2020	7,425	09:07:00	09:25:00	30	2,80141	100,00%
Lx 13	12/07/2020	7,750	08:22:00	08:37:00	30	2,34623	99,94%
Lx 14	04/08/2020	9,685	08:39:00	10:10:00	50	2,71000	98,99%
Lx 15	04/08/2020	8,200	10:25:00	13:40:00	25	3,45000	99,27%
Lx 19	11/07/2020	5,050	08:10:00	09:44:00	50	4,97860	94,26%

**Tabela 21** - Dados base para a realização dos ensaios hidráulicos tipo *Slug test* nos poços de monitoramento instalados no âmbito do presente projeto.

Os resultados de acordo com diferentes métodos são apresentados na Tabela 22. De acordo com estes resultados os aquíferos locais podem ser subdivididos em dois conjuntos: i) condutividade hidráulica moderada (da ordem de  $10^{-6}$  m/s) e ii) condutividade hidráulica baixa (da ordem de grandeza de  $10^{-7}$  m/s). A classificação de moderada e baixa segue o critério de Freeze & Cherry (1979).

O método da vazão apresenta valores elevados, pois não utiliza nenhum dado construtivo dos poços. Por isso neste trabalho optou-se por não utilizar estes resultados inclusive porque os valores obtidos não são compatíveis com os tipos de aquíferos e materiais observados durante a perfuração e instalação dos poços.

	Filtro (m)	Duração	Tempo (s)	Método Vazão	Hvorslev	Bouwer & Rice
<b>Lx 01</b>	8,0	00:09:56	596	1,06E-04	3,80E-06	2,95E-06
<b>Lx 02</b>	8,0	00:31:00	1860	1,77E-05	3,34E-06	2,60E-06
<b>Lx 03A</b>	6,0	02:09:37	7777	1,20E-05	3,87E-07	2,99E-07
<b>Lx 04</b>	8,0	00:41:00	2460	1,53E-05	2,50E-06	1,94E-06
<b>Lx 04A</b>	6,0	00:27:51	1671	2,11E-05	4,05E-06	3,13E-06
<b>Lx 05</b>	8,0	00:59:58	3598	9,73E-06	9,04E-07	7,02E-07
<b>Lx 06</b>	18,0	01:14:03	4443	8,84E-06	4,08E-07	3,25E-07
<b>Lx 07</b>	6,0	02:09:45	7785	5,31E-06	3,26E-07	2,52E-07
<b>Lx 08</b>	6,0	05:18:57	19137	2,04E-06	1,40E-07	1,08E-07
<b>Lx 09</b>	6,0	01:52:01	6721	5,27E-06	5,00E-07	3,87E-07
<b>Lx 10</b>	8,0	01:58:57	7137	6,00E-06	3,34E-07	2,59E-07
<b>Lx 12</b>	6,0	00:16:15	975	3,93E-05	6,65E-06	5,14E-06
<b>Lx 13</b>	6,0	00:14:18	858	5,33E-05	6,59E-06	5,10E-06
<b>Lx 14</b>	8,0	01:31:38	5498	1,20E-05	5,04E-07	3,92E-07
<b>Lx 15</b>	6,0	03:13:43	11623	3,92E-06	2,35E-07	1,81E-07
<b>Lx 19</b>	6,0	01:33:13	5593	6,43E-06	4,65E-07	3,60E-07

**Tabela 22** - Resultados dos ensaios hidráulicos pelos métodos da Vazão, Hvorslev e Bouwer & Rice. Valores em m/s.

Os resultados pelos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice apresentaram resultados na mesma ordem de grandeza sendo que o primeiro resulta em valores ligeiramente mais elevados, e dessa forma, a média destes resultados deverá ser utilizada para alimentar os modelos hidráulicos para previsão do tempo de trânsito da pluma.

### 11.3 Geologia e Hidrogeologia

Até o início do desenvolvimento do presente projeto a geologia de toda a área pesquisada era interpretada como associada à Formação Ribeirão do Torto do Grupo Paranoá de idade Mesoproterozoica (com deposição a cerca de 1 bilhão de anos) (Campos, 2012). Este cenário do conhecimento geológico da área é associado à restrição de exposição rochosa e à inexistência de poços tubulares profundos (em função da própria contaminação potencial dos aquíferos).

Entretanto, com o desenvolvimento dos estudos atuais, principalmente com a construção dos poços de monitoramento e descrição detalhada das amostras de calha, para a composição do perfil pedo-geológico, foi possível atualizar o mapa geológico da região do Lixão da Estrutural e áreas adjacentes.

Na descrição dos Poços LX 3A, LX 11, LX 12 e LX 13 é possível observar os seguintes materiais: siltito friável amarelado, areia média a grossa com grãos arredondados, quartzito grosso a muito grosso, silicificado, pouco fraturado e intercalações de quartzitos e metassiltitos

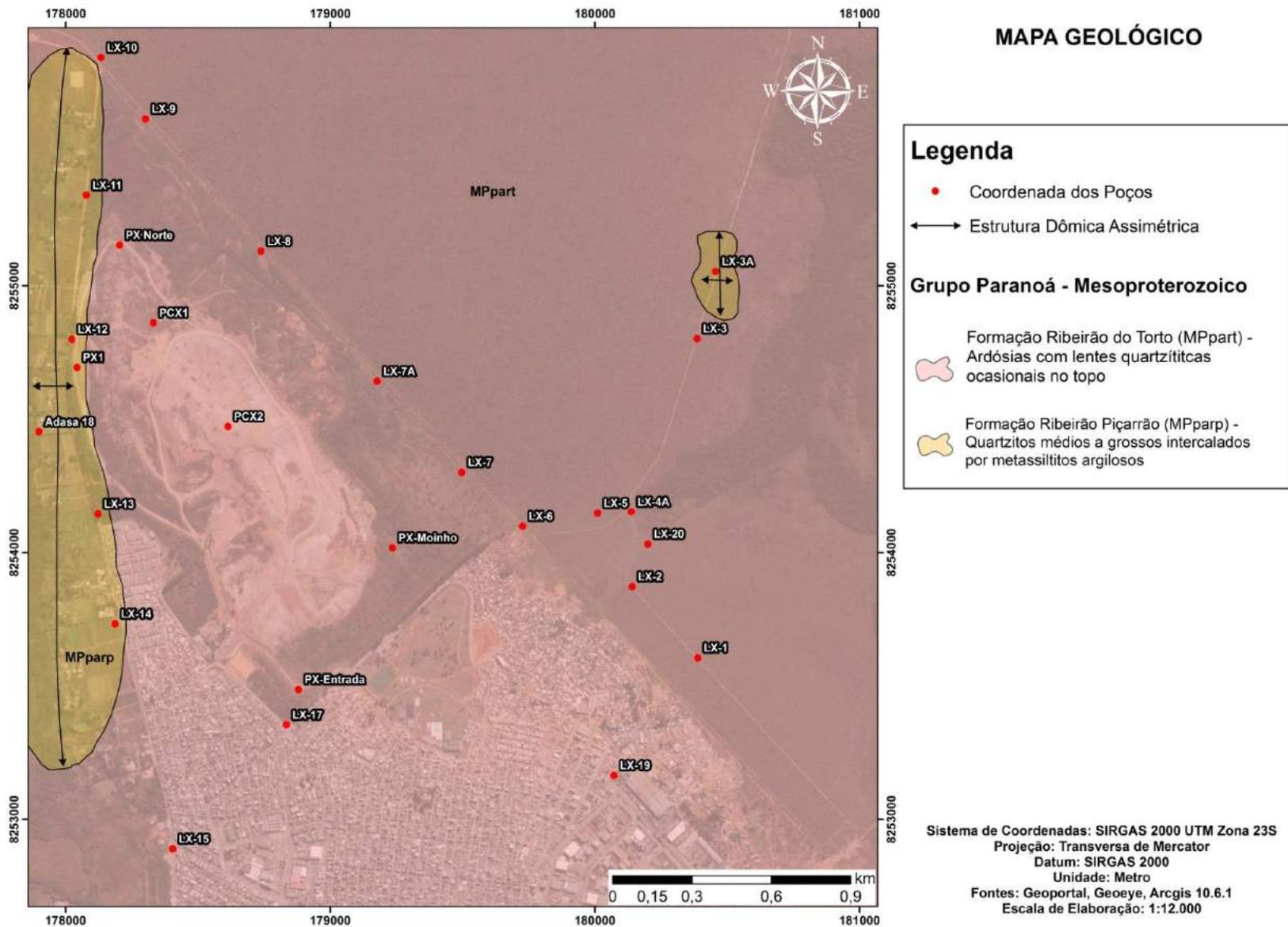
acinzentados. Estes materiais correspondem ao topo da Formação Ribeirão Piçarrão, que aflora em inúmeras “janelas estruturais” na porção central da Depressão do Paranoá, como por exemplo: na região da Granja do Torto, na porção elevada do Eixo Monumental incluindo áreas dos setores Sudoeste, Memorial JK e Noroeste, na região do Núcleo Bandeirante.

No caso da região em estudo duas janelas de ocorrência da Formação Ribeirão Piçarrão são observadas, sendo uma situada a oeste de maior dimensão, a qual foi confirmada durante a perfuração dos poços LX 11, LX 12, LX 13 e LX 14. Nestes casos os quartzitos e metassiltitos ocorrem imediatamente abaixo do perfil de solo. A perfuração do poço LX 3A permitiu verificar material siltoso e arenoso interpretado como vinculado ao topo da Formação Ribeirão Piçarrão. Neste caso a área de interpretação é menor, mas não se destaca a possibilidade de que se já maior. Esta interpretação também foi corroborada pelos resultados geofísicos que mostram uma zona de baixa resistividade na base das seções LX-7 e LX-25 que podem ser interpretados pela presença de zona de maior circulação de águas com maior condutividade elétrica.

A perfuração do Poço LX 6 foi interrompida a 52 metros de profundidade por ter interceptado uma camada de quartzito intensamente silicificada que foi atribuída à Formação Ribeirão Piçarrão não aflorante. Neste caso a estrutura é interpretada como uma anticlinal não exposta.

Com esta atualização do mapa geológico da região, também será necessário atualizar o mapa hidrogeológico. Neste sentido, a área de exposição da Formação Ribeirão Piçarrão são associadas ao Subsistema **S/A** do Sistema Paranoá e a área de ocorrência das ardósias da Formação Ribeirão do Torto são vinculadas ao Subsistema **A** do Sistema Paranoá. As vazões médias dos poços nestes subsistemas aquíferos são da ordem de 12 m<sup>3</sup>/h no Subsistema **S/A** e de cerca de 4,0 m<sup>3</sup>/h no Subsistema **A** (Campos & Freitas-Silva, 1998, Campos & Freitas-Silva, 1999, Campos, 2004).

O mapa geológico apresentado na Figura 57 foi confeccionado a partir de dados de subsuperfície obtidos durante a perfuração dos poços de monitoramento, uma vez que não existem exposições rochosas na área estudada.



**Figura 57** - Geologia da área de estudo, eliminadas as coberturas de solos. Modificado de Freitas-Silva & Campos, (1998) a partir dos dados de perfurações para a instalação dos poços de monitoramento. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema *Google Earth*, de maio de 2020).

## 12. CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

### 12.1 Caracterização Física dos Resíduos

A caracterização dos resíduos aterrados foi realizada a partir de análises gravimétricas *ex situ* e de análises qualitativas. As análises gravimétricas foram desenvolvidas a partir da adaptação da Norma Técnica Brasileira - ABNT/NBR 10007 (ABNT, 2004 - Amostragem de Resíduo Sólido), que geralmente é aplicada a resíduos que são recentemente trazidos aos aterros. No caso em estudo tratam-se resíduos enterrados em intervalos de tempo variáveis de um até mais de 15 anos.

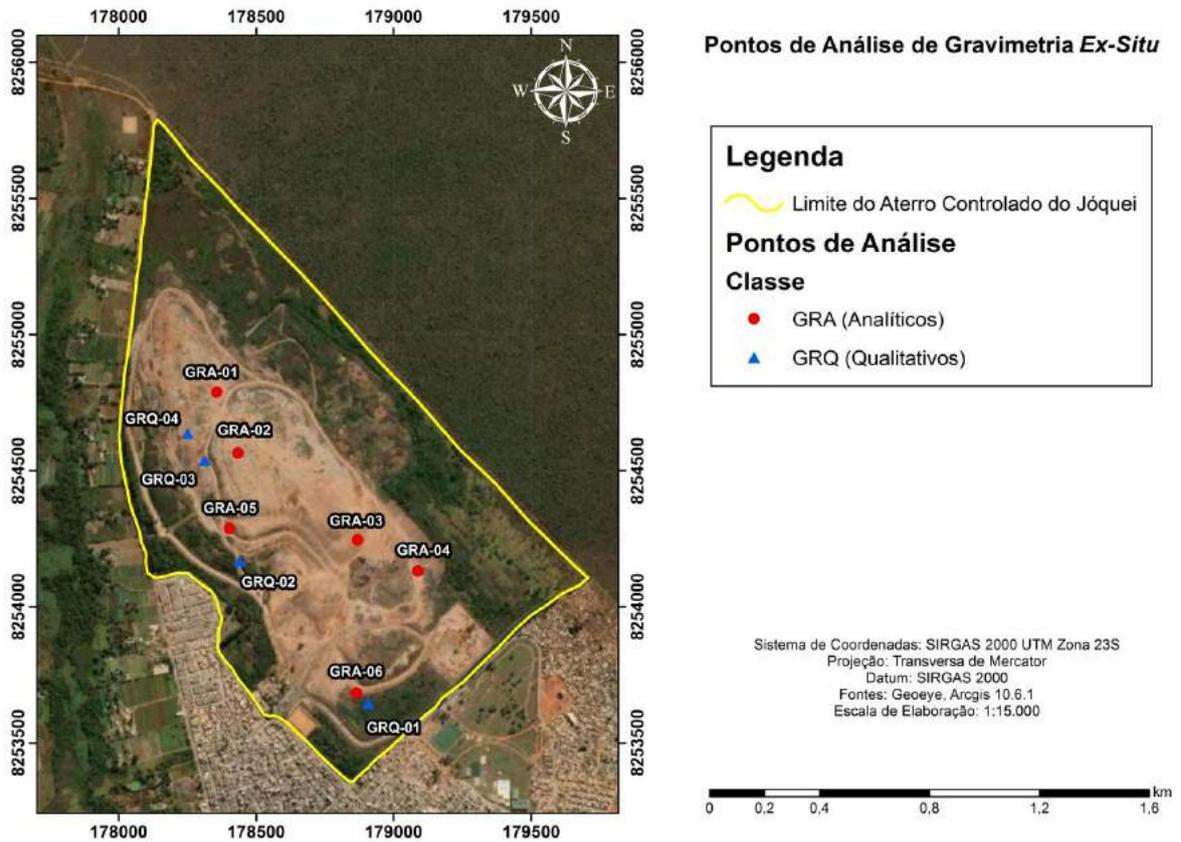
Os trabalhos de campo foram realizados entre os dias 03 e 12 de setembro de 2020 e incluíram as seguintes ações: visita prévia para determinação dos locais de amostragem, abertura de trincheiras com auxílio de retroescavadeira, separação manual dos materiais e disposição sobre lona plástica, pesagem em base úmida e em base seca (após pelo menos 3 dias de exposição do material), observação de taludes em áreas de resíduos expostos em aberturas de canaletas de drenagem ou em áreas de recém deposição e tamponamento das trincheiras.

Assim, para a avaliação das características dos resíduos do Lixão da Estrutural foram desenvolvidos 6 amostragens com abertura de trincheiras específicas para este fim (denominados GRA 01 a GRA 06), além de mais quatro pontos em que se utilizou taludes já abertos, para uma caracterização qualitativa dos resíduos (denominados GRQ 01 a GRQ 04). A localização e dimensões das trincheiras e taludes são apresentadas na Tabela 23. Após a conclusão das análises as trincheiras foram fechadas para se evitar acidentes. O material retirado ficou armazenado para possibilitar futuras observações.

Dos seis pontos de amostragem três estão situados na crista do maciço de lixo e representam materiais mais recentemente acumulados (Fase URE de operação do Lixão) e os outros estão situados nas bordas e são mais antigos, representando a operação tradicional do Lixão da Estrutural (com acumulação de entulhos e lixo doméstico) (Figura 58).

Ponto	Coordenada X	Coordenada Y	Elevação (m)	Dimensões (m)
GRA - 01	0821303	8254793	1149	3,60 x 2,40 x 2,00
GRA - 02	0821374	8254567	1156	4,00 x 2,10 x 1,70
GRA - 03	0178868	8254245	1153	3,60 x 2,40 x 2,10
GRA - 04	0179088	8254131	1136	3,90 x 2,40 x 2,30
GRA - 05	0821335	8254290	1145	3,60 x 2,40 x 2,40
GRA - 06	0178864	8253683	1131	3,30 x 2,10 x 2,00
GRQ - 01	0178907	8253643	1128	3,50 x 1,00
GRQ - 02	0821368	8254171	1137	2,00 x 2,00
GRQ - 03	0821252	8254544	1151	3,00 x 5,00
GRQ - 04	0821193	8254644	1155	3,00 x 4,00

**Tabela 23** - Localização e dimensões dos pontos de amostragem. GRA representam trincheiras e GRQ representam taludes. Coordenadas obtidas com GPS de campo, no sistema de coordenada plana Sirgas 2000.



**Figura 58** - Localização dos pontos de amostragem para análises gravimétricas (GRA) e de observação qualitativa em taludes existentes e em área de deposição atual de resíduos (GRQ). (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema *Google Earth*, de maio de 2020).

Antes de se iniciar a separação dos materiais para medição da massa de cada classe foi realizada uma descrição geral com discriminação de tipos e porcentagens de cada tipo. A verificação da porcentagem foi feita de forma visual, considerando a observação durante a abertura da trincheira e a pilha formada com o material retirado.

O material retirado das pilhas de rejeitos já homogeneizadas foi depositado sobre lonas plásticas com auxílio de baldes plásticos de 30 litros de capacidade, sendo que a separação foi realizada de forma manual. Após a retirada de cada amostra são anotados os volumes e as massas. A pesagem foi feita com auxílio de balança digital com precisão de 10 g.

Para não gerar tendências artificiais ou vieses nas medidas, o material era organizado no interior dos baldes de forma a similar à observada no maciço do aterro, mantendo as mesmas distâncias entre os elementos. Esta ação visava a minimizar a compactação do material no interior do balde a superestimar as densidades obtidas após as operações com os dados de medidas de massa e de volumes. De qualquer modo é importante entender que se trata de análises com amostras homogeneizadas e perturbadas e não de amostras indeformadas e desta forma as densidades obtidas devem ser consideradas como de referência. Mesmo porque não há viabilidade para retirada de amostras indeformadas de maciços de rejeitos tão heterogêneos e com diferentes dimensões dos materiais acumulados.

As Figuras 59 a 62 ilustram o desenvolvimento dos trabalhos de campo desde a abertura das trincheiras, separação dos materiais, sucessivas pesagens além de materiais utilizados durante as operações em campo.

O Anexo 2 traz o relatório específico das análises gravimétricas *ex situ*, onde é possível se verificar detalhes dos trabalhos de campo, bem como maior número de ilustrações dos materiais retirados das trincheiras.



**Figura 59** - Abertura da trincheira GRA - 06 com a retirada e homogeneização dos resíduos. Detalhe para o tecido Geotêxtil retirado



**Figura 60** - Baldes de 30 litros de capacidade utilizados nas operações de medição da massa dos rejeitos.



**Figura 61** - Detalhe de operação de pesagem com auxílio de corda e balança digital.



**Figura 62** - Exemplo de material já retirado e classificado segundo sua natureza (plástico, madeira, concreto e terra).

Durante os trabalhos foram identificados resíduos dos seguintes materiais:

- Terra: material que compõe a matriz dos rejeitos, com natureza variável (argilosa, arenosa, contaminada com outros resíduos), comumente apresenta-se rica em matéria orgânica decomposta, e apresenta tonalidade escura quando úmida com tendência de clareamento quando o material é secado ao sol (Figura 63);
- Madeira: pode ser representada por restos de obra (tábuas e tarugos) (Figura 64) ou por madeira de podas de árvores (com diferentes dimensões, desde gravetos até troncos mais grossos);



**Figura 63** - Exemplo de terra obtida do interior da trincheira. Observar o aspecto heterogêneo e contaminado do material, que inclui pequenos fragmentos de vidro, madeira e rocha.



**Figura 64** - Madeira retirada da escavação da amostra GRA - 04. Predominância de madeira utilizada em obras (tábuas e tarugos).

- Metais: compostos por ferro (vergalhões no interior de blocos de concreto), alumínio e latas, sempre apresentam aspecto fragmentário e são retorcidos (Figura 65);
- Tecido: apresenta natureza muito diversa podendo ser de algodão, sintético ou ainda tecido geotêxtil (tipo bidin, Figura 66);
- Entulhos de obras: são restos de construções em que se destacam blocos de concreto, fragmentos de azulejos e outros revestimentos, pedras de revestimento (Figura 67);



**Figura 65** - Exemplos de material metálico obtido da amostra GRA - 02. Presença comum de vergalhões, além de latas e outros fragmentos.



**Figura 66** - Material classificado como tecido (amostra GRA - 02). Na média esta classe de resíduos inclui pano de algodão, tecidos sintéticos e bidin.



**Figura 67** - Entulho de obra (também classificado como concreto ou escombros), composto por blocos de concreto, revestimentos de piso e paredes e fragmentos de rocha de cantaria.

- Vidro: representado por garrafas (inteiras ou quebradas, Figura 68) e outros fragmentos do tipo vidro laminado;
- Plástico: representados por sacos (utilizados para acomodação do resíduo orgânico), fragmentos de artefatos de natureza variada (brinquedos infantis, peças de veículos, materiais de construção, e outros). Apresentam cores variadas e diferentes graus de preservação e decomposição (Figura 69);
- Papel/papelão: apenas observado em resíduos mais jovens é representado por embalagens, livros, cadernos e outros (Figura 70).



**Figura 68** - Resíduos classificados como vidro, que é representado por garrafas inteiras ou fragmentos de vidros de diferentes cores.



**Figura 69** - Exemplo de plástico obtido da amostragem no ponto GRA – 02. Observar a diversidade de origem dos materiais.



**Figura 70** - Exemplo de papel obtido da escavação da amostra GRA - 02. Este tipo de material não é comum, sendo apenas encontrado em aterro recente. Nas amostras de resíduos antigos esta classe de material já foi totalmente decomposta em conjunto com a porção orgânica.

Um aspecto marcante é a ausência de matéria orgânica, que compõe grande parte dos resíduos de origem doméstica. Este fato é determinado pela rápida decomposição desta fração dos resíduos que se transforma em uma massa de cor preta e forte odor de putrefação. Em alguns casos é possível observar este material com elevada umidade dentro dos sacos plásticos utilizados para transporte destes resíduos até o lixão.

Ainda com relação às feições físicas dos resíduos a observação de campo mostra que o odor fétido é marcante no momento de abertura das trincheiras. Após alguns dias de exposição, tanto o material retirado, quanto a trincheira aberta apresentam diminuição do cheiro.

A heterogeneidade dos resíduos é facilmente caracterizada pela observação das trincheiras e taludes, sendo que a composição dos resíduos não se repete em nenhum local de análise, bem como suas proporções. O lixo mais antigo apresenta maior conteúdo madeira e matéria orgânica decomposta, enquanto nos resíduos mais jovens predominam resíduos inertes, como terra e restos de obras. Esta observação inclusive pode ser aplicada para os resíduos mais recentemente acumulados, que mudam lateralmente para cada caminhão ou caçamba que é depositada (Figura 71).



**Figura 71** - Resíduo depositado entre os dias 08 e 10 de setembro de 2020. No extremo esquerdo da imagem predominam materiais plásticos, na porção central há predominância de escombros de obras e na parte esquerda ocorre exclusivamente material vegetal de podas de árvores. Pilha com média de 2 metros de elevação.

A descrição geral de cada trincheira indica as seguintes condições:

- GRA – 01: ampla predominância de blocos de concreto, com ocorrência de madeira e muito solo na matriz, além de plástico e metais de forma subordinada (um pneu também foi recuperado);
- GRA – 02: resíduos diversificados com restrita contribuição orgânica, sendo a maior parte lixo seco com contribuição de madeira, papel, plástico, pouco vidro, tecido, blocos de concreto e muito solo na matriz;
- GRA – 03: ampla predominância de madeira de poda de árvores (inclusive folhas e gravetos), com restos de obras (concreto, azulejo, fragmentos de mármore) e terra na matriz, além de pouco plástico, vidro e metais.
- GRA – 04: lixo bastante diversificado com predominância de terra na matriz, com madeira, combros de obras, vidro, plástico e metal;
- GRA – 05: resíduo com predominância de terra, plástico e ainda lixo orgânico em decomposição com forte odor de matéria orgânica em decomposição. Ainda se observam fragmentos de madeira, restos de obra (blocos de concreto), ferro (observado como vergalhões em blocos de concreto maiores) e
- GRA – 06: lixo antigo bastante diversificado, com muito plástico, matéria orgânica já decomposta e menores proporções de escombros de obras, e terra muito contaminada compondo a Mariz. Neste ponto se destaca um grande rolo de tecido geotêxtil do tipo bidin (representado por vários meros deste material).

As Tabelas 24 a 29 trazem os resultados das medidas de volumes e massas em cada ponto de observação bem como as densidades em base úmida e seca. A medição do material para determinação da base seca foi realizada após, pelo menos, dois dias de secagem natural das pilhas preservadas sobre lona plástica.

<b>GRA-01</b>	<b>Madeira</b>	<b>Plástico</b>	<b>Concreto</b>	<b>Terra</b>	<b>Pneu</b>	<b>Total ou Média</b>
Porcentagem	12%	3%	50%	35%	-	T = 100%
Volume (m <sup>3</sup> )	0,095	0,03	0,094	0,06	0,03	T = 0,309
Peso em base úmida (kg)	37,450	3,145	121,100	67,82	9,140	T = 238,655
Densidade em base úmida (g/cm <sup>3</sup> )	0,3942	0,1048	1,2882	1,1303	0,3046	M = 0,7723
Densidade em base seca (g/cm <sup>3</sup> )	0,3275	0,1048	1,2882	0,9556	0,3046	M = 0,5961

**Tabela 24** - Material recuperado no ponto de amostragem GRA - 01 e respectivas medidas de volume e massa e densidades (média simples) em base úmida e seca.

<b>GRA-02</b>	<b>Madeira</b>	<b>Plástico</b>	<b>Concreto</b>	<b>Terra</b>	<b>Tecido</b>	<b>Papel</b>	<b>Total ou Média</b>
Porcentagem	10%	7%	25%	50%	4%	4%	T = 100%
Volume (m <sup>3</sup> )	0,065	0,05	0,08	0,06	0,04	0,03	T = 0,315
Peso em base úmida (kg)	21,860	3,490	92,370	76,480	6,460	4,305	T = 204,965
Densidade em base úmida (g/cm <sup>3</sup> )	0,3363	0,0698	1,1546	1,2756	0,16	0,1435	M = 0,6506
Densidade em base seca (g/cm <sup>3</sup> )	0,3128	0,0698	1,1546	1,1864	0,1488	0,1334	M = 0,500

**Tabela 25** - Material discriminado no ponto de amostragem GRA - 02 e respectivas medidas de volume, massa e densidades médias em base úmida e seca.

<b>GRA-03</b>	<b>Madeira</b>	<b>Plástico + Papel</b>	<b>Concreto</b>	<b>Terra</b>	<b>Folha</b>	<b>Metais</b>	<b>Vidro</b>	<b>Tecido</b>	<b>Total ou Média</b>
Porcentagem	35%	5%	20%	30%	6%	1,5%	-	2,5%	T = 100%
Volume (m <sup>3</sup> )	0,12	0,03	0,06	0,04	0,045	0,015	0,01	0,052	T = 0,401
Peso em base úmida (kg)	47,770	3,345	76,630	44,830	6,320	7,490	0,175	8,155	T = 194,715
Densidade em base úmida (g/cm <sup>3</sup> )	0,3980	0,1115	1,2771	1,1207	0,4213	0,4993	0,0175	0,1568	M = 0,4842
Densidade em base seca (g/cm <sup>3</sup> )	0,3699	0,1115	1,2771	1,0416	0,080	0,4993	0,0175	0,147	M = 0,4429

**Tabela 26** - Material obtido do ponto de amostragem GRA - 03 e respectivas medidas de volume e massa e densidades (médias) em base úmida e seca.

<b>GRA-04</b>	<b>Madeira</b>	<b>Plástico</b>	<b>Concreto</b>	<b>Terra</b>	<b>Tecido</b>	<b>Vidro</b>	<b>Total ou Média</b>
Porcentagem	15%	4%	25%	50%	4%	2%	T = 100%
Volume (m <sup>3</sup> )	0,14	0,05	0,075	0,06	0,05	0,008	T = 0,383
Peso em base úmida (kg)	43,220	4,500	103,050	70,310	7,355	5,740	T = 234,17
Densidade em base úmida (g/cm <sup>3</sup> )	0,3087	0,09	1,3740	1,1718	0,1471	0,7175	M = 0,6348
Densidade em base seca (g/cm <sup>3</sup> )	0,2613	0,09	1,3740	1,1386	0,0943	0,7175	M = 0,6126

**Tabela 27** - Material resgatado no ponto de amostragem GRA - 04 e respectivas medidas de volume, massa e densidades em base úmida e seca.

<b>GRA-05</b>	<b>Madeira</b>	<b>Plástico</b>	<b>Concreto</b>	<b>Terra</b>	<b>Total ou Média</b>
Porcentagem	22%	10%	18%	50%	T = 100%
Volume (m <sup>3</sup> )	0,075	0,06	0,064	0,09	T = 0,289
Peso em base úmida (kg)	25,970	9,440	82,770	125,150	T = 243,33
Densidade em base úmida (g/cm <sup>3</sup> )	0,3462	0,1573	1,2932	1,3905	M = 0,8419
Densidade em base seca (g/cm <sup>3</sup> )	0,2568	0,1573	1,2932	1,1836	M = 0,7227

**Tabela 28** - Material obtido no ponto de amostragem GRA - 05 e respectivas medidas de volume, massa e densidades em base úmida e seca.

<b>GRA-06</b>	<b>Madeira</b>	<b>Plástico</b>	<b>Concreto</b>	<b>Terra</b>	<b>Tecido</b>	<b>Total ou Média</b>
Porcentagem	10%	7,5%	10%	60%	12,5%	T = 100%
Volume (m <sup>3</sup> )	0,05	0,12	0,075	0,03	0,12	T = 0,395
Peso em base úmida (kg)	20,170	12,220	93,410	38,810	11,210	T = 175,82
Densidade em base úmida (g/cm <sup>3</sup> )	0,4034	0,1018	1,2454	1,2936	0,0934	M = 0,6275
Densidade em base seca (g/cm <sup>3</sup> )	0,3189	0,1018	1,2454	1,1313	0,08	M = 0,5748

**Tabela 29** - Material acumulado no ponto de amostragem GRA - 06 e respectivas medidas de volume e massa e densidades em base úmida e seca.

Os valores obtidos das análises gravimétricas mostram que há diminuição da densidade dos materiais considerando sua base úmida e seca, sendo que tal comportamento já era esperado uma vez que com a perda da água os materiais se tornam mais leves.

Materiais que absorvem pouca ou nenhuma água não tiveram sua medição de massa replicada após a secagem, pois se verificou que a diminuição era mínima ou imperceptível com a balança digital utilizada (além do erro da medida ainda existem as incertezas na determinação dos volumes).

A Tabela 30 mostra os percentuais médios e as densidades médias das seis amostras estudadas.

<b>Materiais</b>	<b>% Médio</b>	<b>Densidade Média</b>
<b>Madeira</b>	17,333	0,3644
<b>Plástico</b>	4,416	0,1058
<b>Concreto</b>	24,666	1,2720
<b>Terra</b>	45,833	1,2302
<b>Tecido</b>	5,75	0,1393
<b>Metais + Vidro + Papel + Pneus</b>	2,0	1,1084

**Tabela 30** - Médias dos percentuais e das densidades dos materiais para os seis pontos de amostragem.

Terra e concreto são os materiais mais abundantes na massa aterrada, correspondendo a pouco mais de 70% do volume acumulado. Em seguida se destacam resíduos de madeira com 17% da massa de rejeitos. Tecido e plástico completam os volumes com conteúdo significativo, respectivamente com 5,75% e 4,42%. Outros materiais identificados correspondem a 2% da massa do aterro sendo representados por metais, vidro, papel e pneus.

A análise global resulta em uma densidade média ponderada pelos volumes de **0,9756 g/cm<sup>3</sup>**. A densidade global a seco próxima a 1 g/cm<sup>3</sup> é devida à grande porosidade resultante no interior do maciço. Mesmo considerando a grande quantidade blocos de concreto e terra presente na massa de resíduos os vazios no interior são responsáveis pela redução da densidade média.

## 12.2 Quantificação dos Resíduos Acumulados

A estimativa do conteúdo de materiais acumulados no aterro foi feita a partir de um método direto isto é, o volume foi obtido pelo produto da área vezes a altura da pilha de rejeitos e a massa, pelo produto do volume pela densidade média ponderada (pelos volumes individuais obtidos das análises gravimétricas *ex situ*).

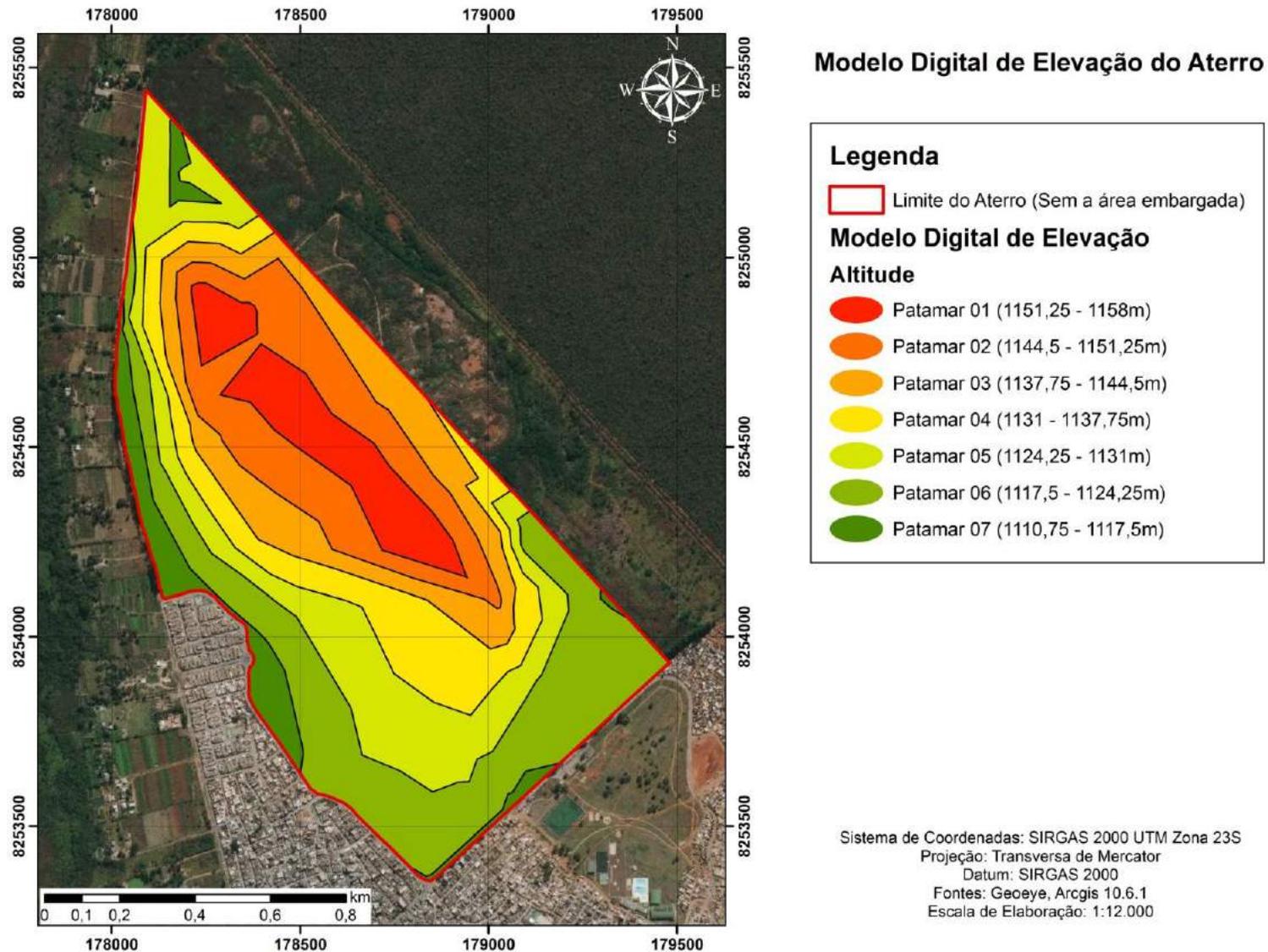
Como o maciço de rejeitos não é representado por uma figura geométrica regular, mas apresenta diferentes elevações com patamares e bermas (ou rampas) e, se optou por seccionar o maciço em fatias com 6,75 metros de elevação, sendo o que o volume total corresponde à soma das diferentes fatias empilhadas.

Como não existe um levantamento topográfico recente e confiável, optou-se pela confecção de um modelo digital de elevação a partir de pontos cotados com GPS dotado de barômetro, que permite uma precisão de 50 cm (desde que sua recepção ocorra simultaneamente com o maior número possível de satélites). Assim, foram utilizados 59 pontos com coordenadas UTM e cotas. Estes dados foram cotejados com os pontos cotados obtidos de mapas com grande escala para se ter a maior confiabilidade nos resultados do modelo de elevação resultante.

É importante salientar que como a URE está plenamente ativa, os levantamentos altimétricos, mesmo com auxílio de drones são rapidamente ultrapassados, pois os volumes diariamente acumulados modificam as superfícies de forma muito rápida. Outro aspecto relevante é a determinação da superfície de base, pois não há informações sobre a época do início da acumulação dos rejeitos da área: se estes foram acumulados diretamente na superfície natural do terreno ou se foram abertas trincheiras e qual a profundidade destas trincheiras.

De qualquer modo praticamente toda a área do antigo Lixão da Estrutural (mesmo em parte da “área embargada”) apresenta registro de acumulação de algum tipo de aterro. Assim, a área de acumulação considerada foi: limitada ao sul pela cidade Estrutural, limitada a leste / sudeste pela rodovia de acesso à ocupação denominada de “26 de Setembro” e limitada à oeste pela área embargada (300 metros a leste da cerca limítrofe do Parque Nacional de Brasília).

A Figura 72 mostra o modelo digital de elevação a partir dos pontos de controle de campo e dos dados topográficos disponíveis e a Tabela 31 traz os dados dos pontos de controle obtidos em campo com GPS barométrico.



**Figura 72** - Modelo Digital de Elevação - MDE do antigo Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos da Estrutural. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema *Google Earth*, de maio de 2020).

Ponto	Coordenada X	Coordenada Y	Elevação
PC-01	179088	8254137	1135
PC-02	179069	8254151	1137
PC-03	179030	8254276	1138
PC-04	179032	8254230	1139
PC-05	178909	8254418	1141
PC-06	178744	8254635	1142
PC-07	821456	8254839	1147
PC-08	821456	8255094	1139
PC-09	821045	8255039	1131
PC-10	820994	8254860	1125
PC-11	821038	8254449	1120
PC-12	821076	8254462	1125
PC-13	821154	8254498	1137
PC-14	821165	8254221	1121
PC-15	821410	8254054	1124
PC-16	821320	8254264	1138
PC-17	821260	8254531	1147
PC-18	821157	8254555	1139
PC-19	821182	8254628	1150
PC-20	821409	8254230	1139
PC-21	178767	8254098	1135
PC-22	178731	8253762	1128
PC-23	178863	8253683	1127
PC-24	178974	8253533	1121
PC-25	178911	8253738	1129
PC-26	178949	8253793	1131
PC-27	178997	8253923	1135
PC-28	179054	8253940	1135
PC-29	821343	8254785	1151
PC-30	821310	8254873	1152
PC-31	821181	8254921	1154
PC-32	821338	8254681	1154
PC-33	821458	8254567	1155
PC-34	178684	8254449	1155
PC-35	178846	8254233	1158
PC-36	179025	8254098	1146
PC-37	179046	8254014	1140
PC-38	179137	8253890	1124
PC-39	179280	8254095	1118
PC-40	179094	8254243	1122
PC-41	179094	8254291	1122
PC-42	179440	8253891	1122
PC-43	179082	8253551	1115
PC-44	178830	8253350	1117
PC-45	178569	8253585	1119
PC-46	821131	8255177	1122
PC-47	821143	8255223	1125
PC-48	821124	8255250	1123
PC-49	821152	8255280	1123
PC-50	821194	8255226	1126
PC-51	821290	8253967	1114
PC-52	821063	8254112	1109
PC-53	820970	8254810	1115
PC-54	821042	8255856	1125
PC-55	821104	8255633	1127
PC-56	821288	8255140	1125
PC-57	178761	8255140	1125
PC-58	179425	8254418	1115
PC-59	179724	8254105	1104

**Tabela 31** - Localização por coordenadas UTM e altitude de pontos de controle para a determinação do Modelo Digital de Elevação da área da Unidade de Recebimento de Entulhos URE da Estrutural. Coordenadas obtidas com auxílio de GPS portátil de campo. Base de gerefenciamento Sirgas 2000, Zona 23.

O cálculo de volume total do aterro foi realizado com auxílio do *Software Arcgis 10.6.1*, onde os 59 pontos cotados por GPS barométrico foram espacializados e interpolados por meio da ferramenta *TIN* (Triangular Irregular Network) gerando o MDE (Modelo Digital de Elevação). A partir desse modelo, o aterro foi seccionado em patamares topográficos, semelhantes a fatias topográficas, e cada patamar teve seu volume medido ( $\text{Volume} = \text{Área} \times \text{Altura}$ ). Com os dados de volume e densidade média dos resíduos foi possível estimar com aproximação a quantidade atual em toneladas de material acumulado no aterro. Importante ressaltar que para essa estimativa as rampas dos taludes não foram levadas em consideração, tendo em vista que as diferenças de altitude obtidas entre os patamares pelo modelo representam a variação em uma superfície totalmente vertical.

Para a caracterização adequada do volume total dos resíduos foram desconsiderados tanto o Patamar 07, que representa a topografia natural do terreno antes do início do aterro como também uma porção nordeste da área. Essa área, que fica a cerca de 300 metros do limite do Parque Nacional de Brasília foi embargada e teve o material acumulado retirado.

A partir dos dados produzidos pode-se afirmar que a maior elevação da pilha de resíduos é de 40,5 metros, o que é corroborado por outros dados disponíveis, de poços estratigráficos e de estudos geofísicos (Tabela 32). Contudo a área ocupada por esta elevação máxima é restrita apenas à crista do maciço de resíduos, sendo que a elevação média é de cerca de 20 metros.

Patamar	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
01	128.911,50	6,75	799.251,30
02	353.243,00	6,75	2.384.390,25
03	465.866,00	6,75	3.144.595,50
04	733.765,00	6,75	4.952.913,75
05	992.947,00	6,75	6.702.392,25
06	1.321.640,00	6,75	8.921.070,00
<b>Total</b>			<b>26.904.613,05</b>

**Tabela 32** - Volume ocupado por cada patamar derivado do MDE.

O volume da pilha de rejeito obtido pelo método adotado foi de **26.904.613,05 m<sup>3</sup>**, o que resulta em uma massa de resíduos *in situ* de **26.248.140 toneladas**, considerando a densidade média de **0,9756 g/cm<sup>3</sup>** (obtida das análises gravimétricas) (Tabela 33).

Volume - Patamares 1 a 6 (m <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Total (Toneladas)
26.904.613,05	0,9756	26.248.140,49

**Tabela 33** - Síntese dos resultados de volume e massa de resíduos contidos no Lixão da Estrutural.

### **13. EXPERIÊNCIAS DE PRÁTICAS PARA REMEDIAÇÃO DE LIXÕES**

Este item tem como objetivo apresentar tecnologias aplicadas à remediação ou mitigação de impactos gerados por deposição inadequada de resíduos sólidos urbanos, classificados nas categorias de lixões ou aterros controlados.

A lista de técnicas a seguir enumerada e brevemente discutida é considerada a partir da literatura e sua aplicação é contextualizada ao caso específico do Lixão da Estrutural.

Os estudos e análises de passivos ambientais devem seguir à seguinte metodologia:

- Avaliação Preliminar
- Investigação confirmatória
- Investigação detalhada
- Avaliação de risco
- Ações de remediação

O caso do Lixão da Estrutural pode ser considerado um caso atípico de um passivo/ativo ambiental com histórico de décadas, sem bom registro da operação (que foi modificada ao longo do tempo) e que atualmente se encontra encravado entre uma unidade de conservação ambiental (o Parque Nacional de Brasília), uma área urbana consolidada (a cidade Estrutural) e uma área de produção agrícola (pequenas propriedades de plantação de hortaliças).

Neste caso, pode-se considerar que a Avaliação Preliminar e a Investigação Confirmatória já estejam contempladas pelos diferentes estudos acadêmicos e de outras naturezas realizados na área (consultorias técnicas, avaliações em campo, análises econômicas, etc.). Estes estudos foram realizados desde o período de antecedeu a decisão de mudança da área de destinação dos resíduos sólidos do Distrito Federal no ano de 2018, além de considerar que os principais impactos ao meio físico gerados pelo Lixão da Estrutural são: contaminação das águas subterrâneas e poluição atmosférica. Além destes dois complexos impactos relativos ao meio físico, também existem impactos relativos aos meios biótico e socioeconômicos, os quais não estão contemplados na presente análise.

A investigação detalhada está em fase de realização (presente Projeto e Projeto CEB/Eletronorte/Finatec). Ainda resta concluir esta etapa, com a conclusão dos projetos citados e complementação de aspectos específicos pendentes (por exemplo, vazão dos gases de efeito estufa produzidos).

A Avaliação de Risco e a Remediação devem ser iniciadas por etapas, em função da disponibilidade de informações técnicas e de recursos financeiros.

Dentre as principais técnicas desenvolvidas para remediação de áreas contaminadas por diferentes fontes (aterros industriais, aterros de resíduos domésticos, hidrocarbonetos, cemitérios, e outras), destacam-se:

- Extração multifásica (*Multi-Phase-Extraction* - MPE)
- Extração de fases mistas (*Dual-Phase-Extraction* - DPE)
- Extração de vapores dos solos (*Soil Vapor Extraction* -SVE)
- Injeção de ar (*Air Sparging* - SPG)
- Bombeamento e tratamento (*Pump and Treat*)
- Instalação de Barreira Hidráulica
- Instalação de Barreira Reativa
- Oxidação Química *In Situ* (ISCO)
- Redução Química *In Situ* (ISCR)
- Biorremediação
- Enclausuramento da fonte
- Atenuação Natural

As técnicas descritas como Multi-Phase-Extraction (MPE), Dual-Phase-Extraction (DPE), Soil Vapor Extraction (SVE), Air Sparging (SPG), Barreira Reativa, Oxidação Química *in situ* (ISCO) e Redução Química *in situ* (ISCR) são mais específicas e aplicadas para área contaminadas por hidrocarbonetos, resíduos industriais organoclorados e organofosfatados, dentre outros.

As informações até o momento disponíveis mostram que os principais problemas ambientais associados ao Lixão da Estrutural são: contaminação dos recursos hídricos subterrâneos e produção de gases de efeito estufa, além de outros poluentes atmosféricos (principalmente gases de combustão e particulados totais). As análises dos solos mostraram que a esperada contaminação deste meio por metais é bastante reduzida e não deve ser considerada como um problema prioritário para as ações de mitigação e recuperação.

Especificamente para o caso do Lixão da Estrutural as seguintes técnicas devem ser priorizadas:

### **Bombeamento e Tratamento**

Técnica específica para a contenção da pluma de contaminação, com a instalação de poços tubulares para bombeamento do chorume diluído em diferentes posições da migração do efluente.

O efluente deverá ser tratado em uma estação dedicada com aplicação de técnicas mistas ou isolada com observação do custo do tratamento, que deve ser o mais baixo possível para viabilizar sua implantação. O tratamento deve ser no mínimo adequado para o lançamento do efluente tratado em cursos d'água naturais (que no caso do Lixão são cabeceiras de afluentes do Lago Paranoá).

A osmose reversa é uma técnica de tratamento que é utilizado de forma comum para atenuar os impactos do chorume ao meio ambiente. Esta técnica é em geral utilizada no chorume bruto acumulado em reservatórios, entretanto, pode e deve ser testado para tratar efluentes

obtidos de poços nas zonas marginais das plumas de contaminação. Uma questão que restringe o uso da osmose reversa para o tratamento de efluentes de lixões é seu custo relativamente elevado.

Tratamentos convencionais com base em técnicas biológicas ou quimicamente assistida são eficazes, contudo, seu custo em alguns casos é proibitivo. Além dos elevados custos, a aplicação do tratamento biológico pode apresentar outras limitações, pois o desenvolvimento da ação das bactérias pode ser limitado em função das características variáveis do chorume (que pode apresentar rápidas mudanças de pH, estado de óxido-redução, concentrações e elevada demanda química e bioquímica de oxigênio).

Além do tratamento pode-se considerar a reinjeção do efluente acumulado em reservatórios no próprio maciço de resíduos para que ocorram processos de degradação em seu interior. A reinjeção é uma técnica tradicional que é considerada efetiva, uma vez que com a recirculação ocorrem reações de óxido-redução capazes de minimizar a toxidez das substâncias e por consequência do efluente, além de evitar o espalhamento do efluente para outras áreas no ambiente não afetado.

A reinjeção para o caso em estudo é bastante significativa, pois a zona não saturada no maciço de lixo varia entre 21 a 10 metros, o que significa um amplo espaço para acumulação do efluente em um “aquífero artificial” com porosidade muito elevada (da ordem de 45 a 50%)

Os poços de bombeamento devem ser instalados nos locais em que as plumas de contaminação se encontram mais avançadas e com as maiores concentrações, o que já foi definido com os resultados do diagnóstico do presente projeto.

### **Barreira Hidráulica**

As barreiras podem ser instaladas de diferentes formas, incluindo barreiras impermeáveis, barreiras permeáveis com tratamento *in situ* ou pela instalação de cones de depressão para contenção da migração da pluma (barreira de contenção).

O mais adequado para o caso do Lixão da Estrutural é que essa técnica seja associada à anterior (bombeamento e tratamento), a partir da instalação de bateria de poços para contenção da migração natural da pluma em direção às cabeceiras dos córregos do Acampamento, Cabeceira do Valo e Ribeirão Bananal.

Na continuidade do desenvolvimento do presente projeto algumas técnicas de tratamento não convencionais serão testadas sempre com foco no custo por metro cúbico de efluente tratado e na efetividade com relação à composição do efluente em diferentes posições na pluma. Assim, serão testados os tratamentos por *wetlands* construídas e filtros de zeólita, uma vez que a amônia é a principal substância contaminante. A simples oxidação não garante depuração adequada, pois

a amônia deve formar nitrato que é um efluente causador da antropização de corpos de água lânticos (como é o caso do Lago Paranoá).

### **Biorremediação**

Essa técnica inclui todas as ações de organismos para a atenuação de cargas contaminantes e plumas de contaminação e outras formas de degradação ambiental. Neste sentido considera-se que a fitorremediação e as *wetlands* construídas, além da simples recuperação da vegetação em áreas específicas já sejam suficiente para o caso do Lixão da Estrutural.

Para a construção de *wetlands* serão aproveitadas as experiências aplicadas a efluentes domésticos, uma vez que não existem exemplos de tratamento de efluentes derivados da decomposição de resíduos sólidos. Em princípio serão testadas espécies vegetais já empregadas neste tipo de técnica, incluindo uma população mista de macrófitas flutuantes, submersas e emergentes.

Outra vertente de aplicação da biorremediação é na forma de reflorestamento por espécies arbóreas de maior porte, principalmente para absorver a poluição atmosférica em direção ao Parque Nacional de Brasília. Neste aspecto é fundamental entender que a área limítrofe com um Parque Nacional denominada de “área embargada” (300 metros a oeste / noroeste do limite com o Parque Nacional de Brasília) deve ter a função de absorver parte do problema causado pelo lixão. Neste sentido, considera-se de fundamental importância que esta faixa seja revegetada com espécies arbóreas nativas do bioma cerrado. Esta faixa já foi local de acumulação de resíduos e que por força de processos legais teve seu uso interrompido para este fim. Entretanto, a retirada dos resíduos e a conformação geomorfológica não foram adequadas e a vegetação secundária indicadora da presença de resíduos (leucena, margaridão, mamona e outras) invadiu toda a área.

A revegetação desta faixa deverá ser fundamental para se evitar a invasão da área do parque, principalmente por gramíneas exóticas (como atualmente observado).

### **Enclausuramento da Fonte**

Corresponde ao isolamento da fonte geradora dos impactos e é utilizada como prática de atenuação de impactos ambientais em diferentes projetos de gerenciamento de áreas degradadas. Por exemplo, em uma planta produtora de agregados (brita, areia artificial), em uma usina de asfalto ou em um moinho de rochas para uso na agricultura (pó de dolomito), os equipamentos geram amplos volumes de particulados atmosféricos. A mitigação deste tipo de impacto pode ser alcançada pelo enclausuramento da fonte produtora por um galpão e com o bombeamento para sistemas de filtros úmidos que apreendem os sólidos.

No caso do Lixão esta técnica deve considerar o isolamento do maciço de resíduos pela compactação e impermeabilização de sua superfície de forma a evitar a infiltração das águas de chuvas diretamente no maciço. A água drenada deve ser direcionada por tubulações ou canaletas abertas para que seja infiltrada nas áreas marginais fora da zona de aterro. Esta água deverá ampliar os efeitos da atenuação natural pela diluição das cargas já contidas no aquífero.

A experiência atual na operação do lixão confirma a importância desta técnica. No período chuvoso com destaque para os meses de dezembro a abril há produção ampla de chorume que é acumulado nos dois reservatórios atualmente em operação. O grande volume produzido é bombeado para caminhões-tanque e reinjetado na porção elevada do maciço de resíduos. Quando se adentra no período seco do ano a produção de chorume que se acumula nos reservatórios é minimizada e no final da seca a produção é naturalmente interrompida.

### **Mitigação dos Impactos dos Gases**

Os gases produzidos pela decomposição dos resíduos orgânicos em depósitos de resíduos urbanos são majoritariamente compostos por Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e Metano (CH<sub>4</sub>) o qual é combustivo. Estes resíduos gasosos podem seguir três caminhos: ser liberados diretamente pelos sistemas de drenos verticais, ter sua fração combustiva queimada ou ser aproveitados para geração de energia termoelétrica.

A opção mais adequada do ponto de vista ambiental seria sua canalização e uso em usinas de geração de energia, entretanto, essa opção exige elevado investimento e apresenta riscos relativos às incertezas nas proporções de gases produzidas (relações CH<sub>4</sub> / CO<sub>2</sub>), nas vazões geradas e no poder de produção de calor das misturas. Por isso, a opção de continuidade da queima dos gases é considerada a opção mais adequada para o Lixão da Estrutural, uma vez que o metano após sua combustão se transforma em CO<sub>2</sub> e vapor de água segundo a seguinte reação:  $CH_4 + O_2 \rightarrow \frac{1}{2} CO_2 + 2H_2O$ , sendo que o gás carbônico traz impactos ambientais à atmosfera menos significativos que o metano.

### **Atenuação Natural**

Corresponde à mitigação dos contaminantes pela própria ação da natureza e neste caso os processos devem ser avaliados e monitorados periodicamente ao longo de períodos longos.

Como exemplo cita-se a diluição natural da pluma de contaminação de chorume quando se distancia progressivamente da sua área de geração (maciço de resíduos). Com a infiltração das águas de chuvas há sua mistura com a fase contaminante resultando na diminuição da concentração o que pode ser configurado como um tratamento *in situ* ou atenuação pela própria ação da natureza. Este processo ocorre na área, em especial em direção a leste, pois a recarga

natural na área do Parna Brasília é eficiente. Em direção ao Córrego Cabeceira do Valo este processo é significativamente diminuído em função da ampla impermeabilização da área urbana da cidade Estrutural.

Outro exemplo de atenuação natural seria a adsorção de metais na estrutura cristalina de minerais dos solos ou na porosidade interna de fases amorfas, ou ainda a volatilização de amônia quando exposta à atmosfera.

Outros processos de atenuação natural devem ser considerados, estudados e monitorados na área do Lixão da Estrutural.

## **Fitorremediação**

A fitorremediação representa a propriedade de que diferentes espécies vegetais apresentam de reter contaminantes dispersos nos solos. De forma geral a pesquisa de espécies para fitorremediação é baseada em espécies de ciclo curto utilizadas em lavouras (ex.: girassol, milho, leguminosas, etc.). Entretanto, existem espécies florestais que também apresentam a propriedade de retenção e metais pesados e outros contaminantes (Silva *et al.* 2019).

Os metais pesados ou metais de transição mais comumente encontrados como fonte de contaminação são o Cádmiio, chumbo, cobalto, cobre, mercúrio níquel e zinco. Estes cátions apresentam a propriedade de se ligarem com a hemoglobina do sangue e causar sérios problemas à saúde humana (Silva *et al.* 2019).

Para crescer e completar o ciclo de vida, as plantas devem adquirir não apenas macronutrientes (N, P, K, S, Ca e Mg), mas também micronutrientes essenciais, como Fe, Zn, Mn, Ni, Mo e outros metais que funcionam como micronutrientes. Plantas desenvolveram mecanismos altamente específicos para reter, translocar e armazenar esses nutrientes. Por exemplo, o movimento do metal através das membranas biológicas é mediado por proteínas com funções de transporte. Além disso, mecanismos sensíveis mantêm a concentração intracelular de íons metálicos dentro da faixa fisiológica. Em geral, o mecanismo de captação é seletivo, plantas preferencialmente adquirindo alguns íons sobre outros. A seletividade da captação de íons depende da estrutura e propriedades dos transportadores de membranas. Essas características permitem que os transportadores reconheçam, vinculem e mediam o transporte transmembrana de íons específicos. Por exemplo, alguns transportadores mediam o transporte de cátions divalentes, mas não reconhecem íons mono ou trivalentes (Lasat, 2000).

Atualmente há amplo desenvolvimento da pesquisa a respeito da fitorremediação com destaque para os seguintes trabalhos: Lasat, (2000); Prasad, (2004); Anselmo & Jones, (2005); Tavares, *et al.*, (2013); Cunha & Fernandes, (2014), DalCorso *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2019).

As espécies hiperacumuladoras são convencionalmente definidas como aquelas capazes

de acumular metais em níveis 100 vezes maiores do que aqueles normalmente medidos em plantas comuns não acumuladoras. Assim, um hiperacumulador concentrará mais de 10 ppm de Hg; 100 ppm de Cd; 1.000 ppm de Co, Cr, e Pb; e 10.000 ppm de Ni e Zn.

Souza *et al.* (2013) apresentam um artigo de revisão discutindo sobre técnicas de fitorremediação, mais especificamente com relação às espécies não hiperacumuladoras em associação com agentes orgânicos quelantes. Os autores concluem que esta técnica é promissora, mas que no Brasil apenas são realizados estudos experimentais em casa de vegetação sem a aplicação comercial como desenvolvido nos estados Unidos e Canadá.

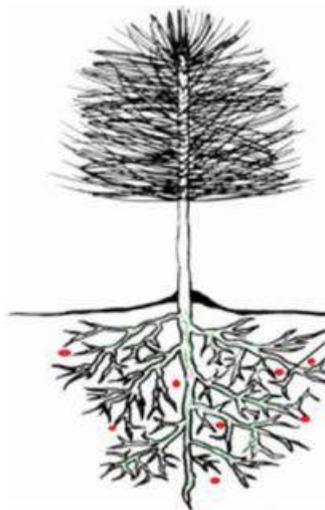
### *Processos atuantes nos Sistemas de Fitorremediação*

#### Fitodegradação

Consiste na absorção dos contaminantes pelas raízes das plantas e posterior quebra das moléculas, de forma que os metabólitos apresentem menor toxidez ou até mesmo não sejam tóxicos. A planta absorve o contaminante em suas raízes a partir da solução do solo e utiliza parte de sua molécula como nutriente, e os metais são incorporados às estruturas orgânicas e se mantêm inertes ou não bio-disponíveis.

Este processo é aplicado para mitigação de contaminantes orgânicos em solos.

A Figura 73 mostra de forma esquemática o processo de fitodegradação (Silva *et al.* 2019).

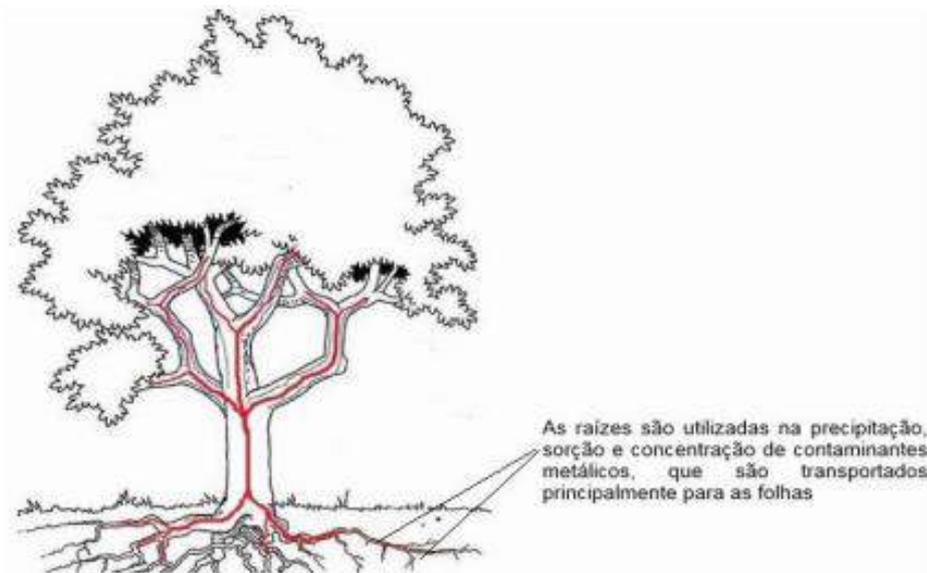


**Figura 73** - Mecanismo de fitodegradação em espécie florestal. Em vermelho os contaminantes em solução do solo. Em verde- a quebra das estruturas moleculares do contaminante e absorção pelas estruturas orgânicas (Silva *et al.*, 2019).

#### Fitoacumulação

A fitoacumulação consiste da absorção dos contaminantes a partir do solo e armazenamentos nas estruturas vegetais como raízes, caules e folhas, com posterior descarte

(Figura 74). A planta pode por mecanismos fisiológicos, se adaptar para acumular maiores níveis de metais, entretanto a plantas já adaptadas para acumulação seletiva de determinados metais as quais são denominadas de hiperacumuladoras. Um exemplo deste tipo de vegetação florestal do cerrado é a volquízea que é reconhecida como hiperacumuladora de alumínio.

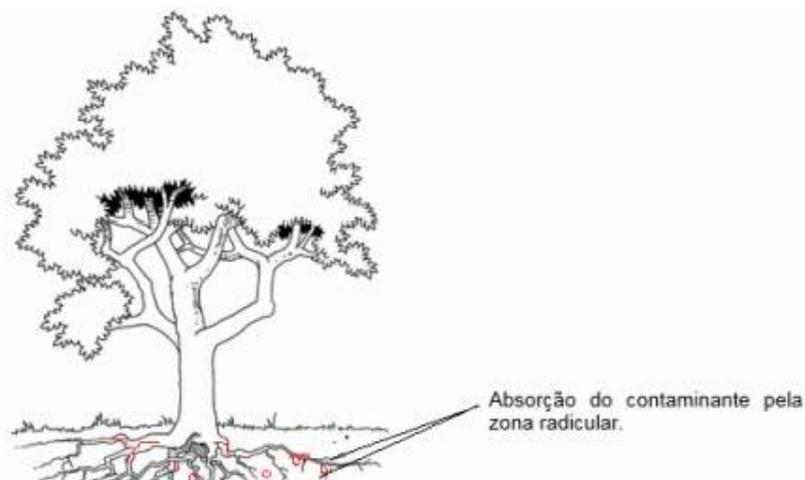


**Figura 74** - Mecanismo de fitoacumulação em espécies florestais (Almeida, 2011).

### Fitoestabilização

Este processo se dá na zona de raízes de forma que a partir de reações de absorção, adsorção e ou precipitação há a acumulação do contaminante (Figura 75). De forma geral visa diminuir a biodisponibilidade de metais para os solos e águas subterrâneas. O processo de estabilização se dá pela mudança das condições físico-químicas proporcionadas pela zona de interação raízes-solo.

Este processo pode ser revertido caso retornem as condições anteriores ao seu desenvolvimento e desta forma os contaminantes poderão ser tornar novamente disponíveis.



**Figura 75** - Mecanismo de fitoestabilização em espécie florestal (Almeida, 2011).

Diferentes abordagens na forma de se estudar a eficiência da fitorremediação mostram que para diferentes espécies vegetais a acumulação dos metais pode ser observada nas folhas, nas raízes ou nos caules. Tal variação se dá em função das estruturas vegetais, e do tipo de processo predominante na retenção dos metais.

O trabalho de Tavares *et al.* (2013) mostra resultados de experimentos com plantio de sorgo, algodão, milho, girassol e mucuna com relação a diferentes metais e dois tipos de análises (DTPA e Mehlich) (Tabela 34).

Espécie	Cu	Zn	Cr	Co	Ni	Cd	Pb
DTPA mg.kg <sup>-1</sup>							
T0	3,10	1,50	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	3,00
Sorgo	2,51 a	1,25 a	<L.D.	<L.D.	0,53 a	<L.D.	2,68 ab
Algodão	2,13 a	1,19 a	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	2,39 ab
Milho	2,22 a	1,13 a	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	2,43 ab
Girassol	1,43 a	1,06 a	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	1,50 b
Mucuna	2,75 a	1,10 a	<L.D.	<L.D.	0,05 a	<L.D.	3,24 a
MEHLICH mg.kg <sup>-1</sup>							
T0	13,00	6,50	0,30	0,40	1,50	<L.D.	5,50
Sorgo	11,19 ab	5,47 a	0,24 bc	<L.D.	0,68 ab	<L.D.	4,75 a
Algodão	10,76 ab	5,27 a	0,21 cd	<L.D.	0,47 ab	<L.D.	4,59 a
Milho	10,57 ab	4,99 a	0,28 ab	0,15 a	0,71 ab	<L.D.	5,49 a
Girassol	6,41 c	4,67 a	0,16 d	0,07 ab	0,32 b	<L.D.	2,65 b
Mucuna	12,72 a	4,82 a	0,31 a	0,092 ab	0,90 a	<L.D.	4,50 a

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey 0,05.

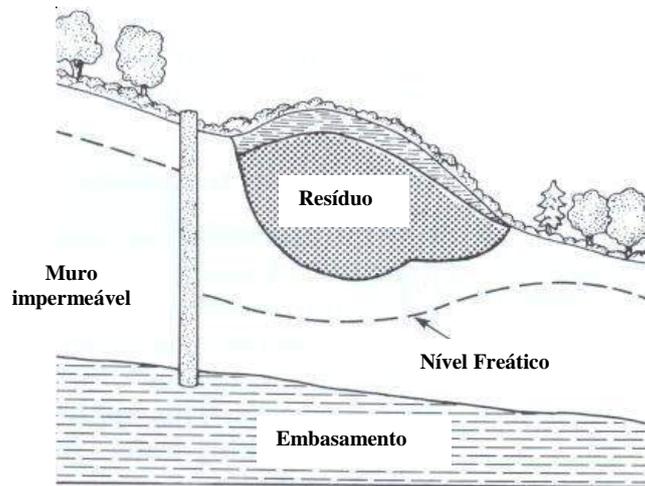
\* T0 (Concentração antes do plantio das espécies).

**Tabela 34** - Comparação entre concentrações antes e depois do plantio em experimento de fitorremediação.

### Estabilização da Pluma de Contaminação

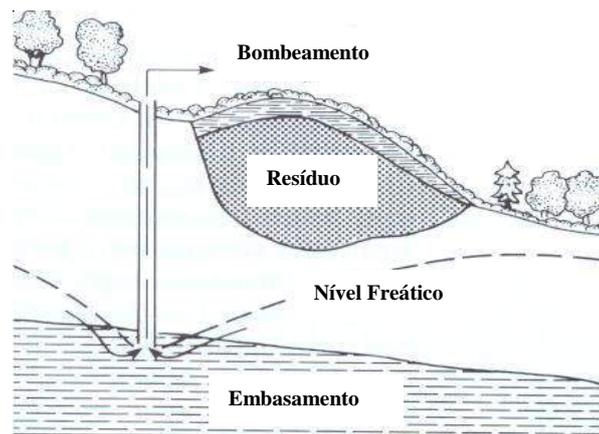
Para a estabilização de plumas de contaminação diferentes técnicas podem ser aplicadas. A escolha da técnica mais adequada deve considerar a: toxidez da pluma, sua densidade, profundidade do nível freático no local, extensão da fonte e dimensões da pluma de contaminação, miscibilidade dos componentes da pluma com a água do aquífero, além de aspectos financeiros (custo de implantação das técnicas, tempo de monitoramento, avaliação da efetividade, dentre outros).

A Figura 76 mostra uma técnica comumente aplicada ao rebaixamento do nível freático sob o sítio gerador do efluente. Esta técnica é útil para casos em que o nível freático é raso e há restrita produção de efluente.



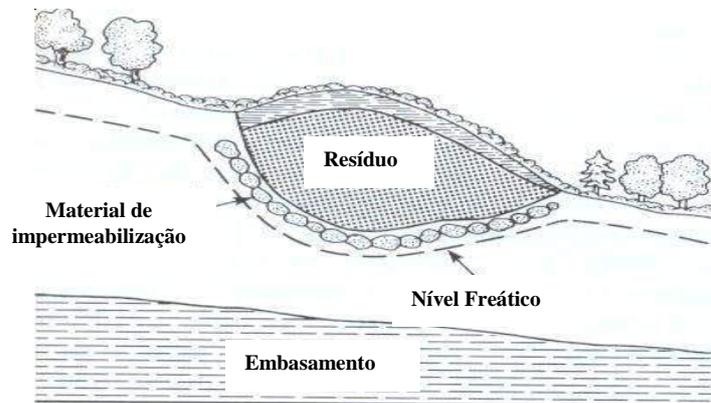
**Figura 76** - Instalação de muro impermeável (Fetter, 2001).

A estabilização por rebaixamento do nível freático é ilustrada na Figura 77. Neste caso uma bateria de poços (em geral alinhados) na porção de montante do sítio gerador do efluente. É aplicado para locais com efluente de elevada densidade. O líquido bombeado é destinado ao devido tratamento.



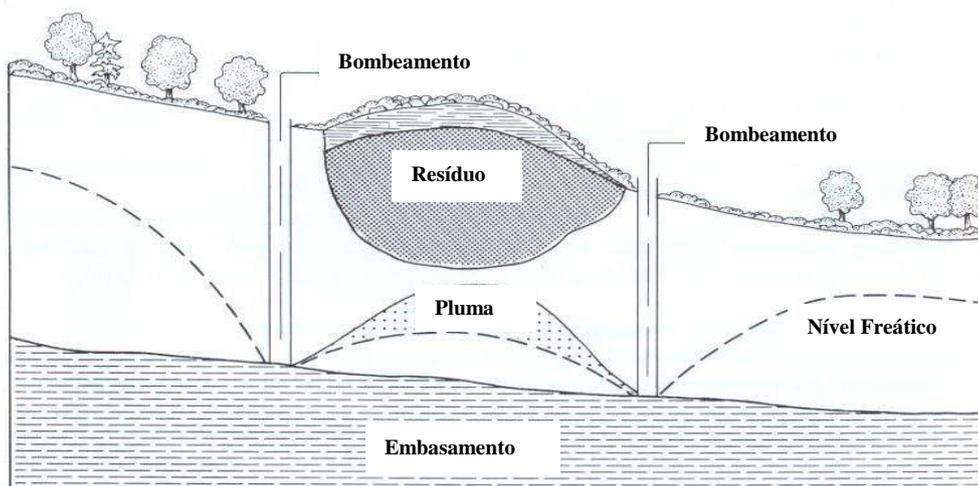
**Figura 77** - Instalação de poço de bombeamento. Com tratamento ou reinjeção (Fetter, 2001).

A técnica ilustrada na Figura 78 é definida pela injeção de material impermeável (mistura de argilas ou pasta de cimento) na porção de fundo do sítio gerador dos efluentes. Trata-se de um método de elevado custo com aplicação restrita a pequenos aterros ou a aterros de resíduos altamente tóxicos em bacias em que há captação de águas para abastecimento.



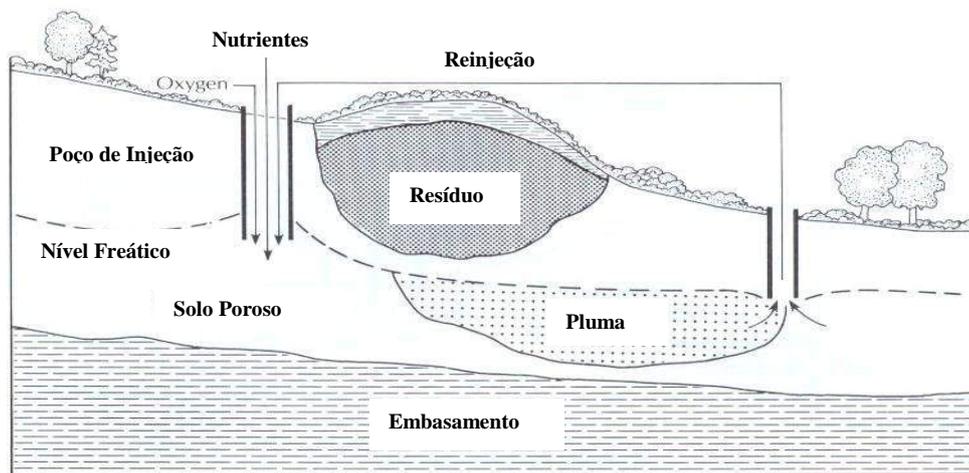
**Figura 78** - Impermeabilização de fundo e topo do sítio de geração da pluma de contaminação (Fetter, 2001).

A Figura 79 mostra a técnica de remoção da pluma de contaminação com bombeamento permanente a montante e a jusante do foco gerador e posterior tratamento dos efluentes. Este método e suas variações são muito comumente aplicados em sítios de deposição de resíduos domésticos.



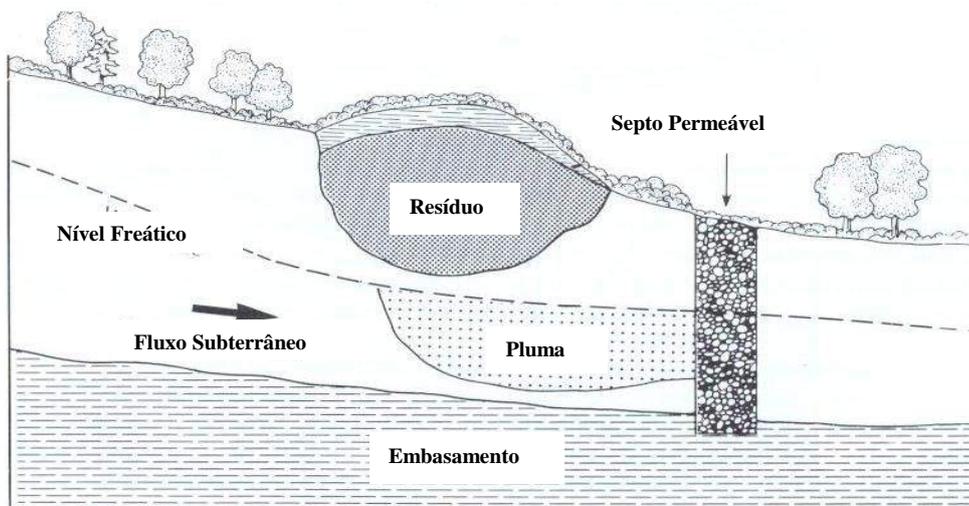
**Figura 79** - Bombeamento a jusante e montante para estabilização da pluma de contaminação (Fetter, 2001).

A técnica ilustrada na Figura 80 corresponde a método avançado e moderno de tratamento *in situ*, com injeção de nutrientes para favorecer a degradação dos contaminantes associada a bombeamento e reciclagem. O processo deve apenas ser cessado quando a produção de efluentes for minimizada ou eliminada. Este tipo de processo é aplicável para casos em que há produção de contaminantes orgânicos no efluente.



**Figura 80** - Injeção de nutrientes a montante com bombeamento da pluma a jusante seguido de tratamento ou reinjeção (Fetter, 2001).

Na Figura 81 é apresentado um método de estabilização da pluma de contaminação acoplada ao tratamento *in situ* por filtro físico. A filtragem é realizada em um septo permeável (com elevada condutividade hidráulica). Junto com o material de elevada permeabilidade (geralmente cascalho) é associado elementos filtrantes (por exemplo, pelets de carvão ativado) que são responsáveis pela retenção de metais ou outros contaminantes.



**Figura 81** - Instalação de septo permeável preenchido com sistema de filtro físico (Fetter, 2001).

Em todos os casos a estabilização da pluma de contaminação é precedida da impermeabilização do maciço em que o efluente é gerado. A ideia é minimizar a produção primária do efluente com a infiltração das águas de chuva

### Tratamento de Chorume

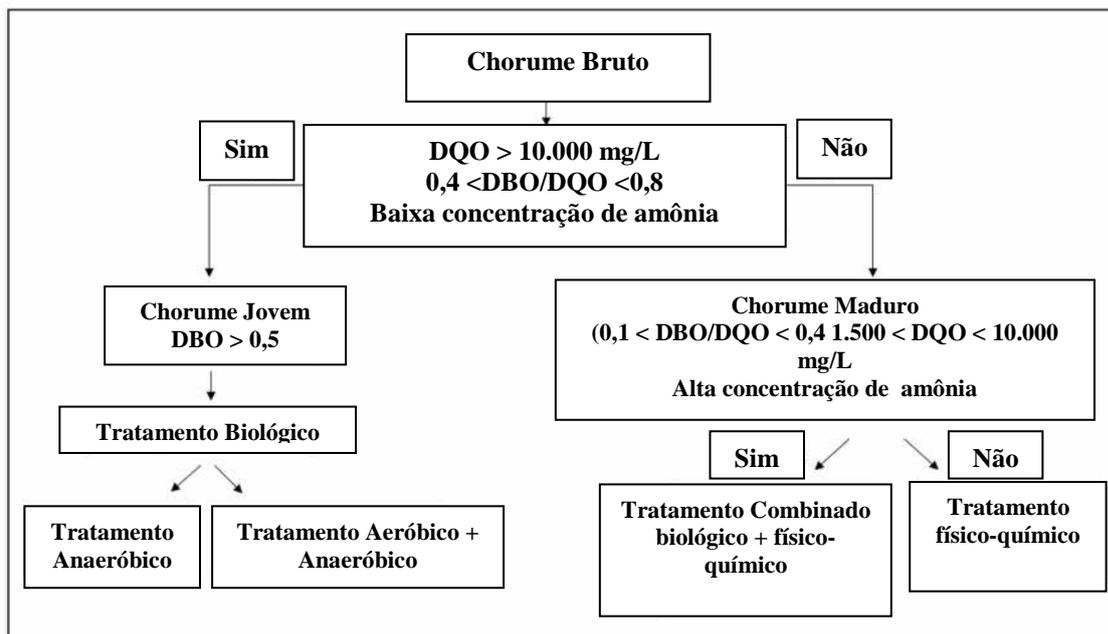
Os aterros de resíduos sólidos urbanos acumulam grandes volumes de materiais orgânicos e inorgânicos cuja decomposição gera um líquido denso rico em metais e substâncias orgânicas e inorgânicas que apresentam amplo potencial de contaminação ambiental, com destaque para as águas subterrâneas e superficiais.

Desta forma, estudar as formar de neutralização deste efluente ou mesmo de seu tratamento antes de seu lançamento final ou aproveitamento da água tratada é de extrema importância.

Várias técnicas são aplicadas ao tratamento de chorume, sendo que o maior problema associado é o custo de processamento por m<sup>3</sup> de efluente tratado.

Atualmente, uma série de tecnologias tem sido utilizada para tratamento de chorume com o objetivo de alcançar valores para lançamento final em corpos hídricos. Os tratamentos podem ser por processos biológicos (lodo ativado, lagoas de estabilização aeróbicas e anaeróbicas e filtros biológicos); processos físico-químicos (flotação, coagulação /floculação, adsorção, precipitação química, injeção de ar, ajuste de pH, oxidação química, troca iônica e tratamento eletroquímico); tratamentos oxidativos avançados (processo Fenton e ozonização) e sistemas naturais (*wetlands* construídas) (Renou *et al.*, 2008 e Raghav *et al.*, 2013).

Para a escolha do método ideal de tratamento é necessário conhecer as características químicas do chorume, uma vez que estas se modificam com o tempo de produção do leixivado de resíduos A Figura 82 mostra um fluxograma que pode ser aplicada para escolha do melhor método de tratamento.



**Figura 82** - Fluxograma com análise de parâmetros considerados para a seleção do método apropriado para tratamento de chorume. DBO - demanda bioquímica de oxigênio; DQO - demanda química de oxigênio (Forgie, 1988 e Renou *et al.*, 2008).

O tratamento e chorume por processos biológicos são os mais comuns e economicamente viáveis no Brasil, com elevada eficiência para remover matéria orgânica biodegradável. O tratamento é realizado com uso de sistemas de lagoas, filtros biológicos lodo ativados e *wetlands*. Este tipo de sistema de tratamento ainda continua sendo utilizado mesmo para

chorumes antigos em que as opções de tratamentos físicos químicos ou por filtração poderiam ser mais adequadas (Tabela 35).

Método de tratamento	Idade do Chorume		
	Jovem < 5 anos	Moderada 5 a 10 anos	Antigo > 10 anos
Tratamento combinado com esgoto doméstico	A	B	C
Processo Aeróbico	A	B	C
Processo Anaeróbico	A	B	C
Evaporação Natural	A	B	C
Coagulação / Floculação	C	B	B
Precipitação Química	C	B	C
Adsorção de Carbono	C	B	A
Oxidação	C	B	B
Injeção de ar	C	B	B
Troca iônica	A	A	A
Microfiltração	C	-	-
Ultrafiltração	C	-	-
Nanofiltração	A	A	A
Osmose reversa	A	A	A

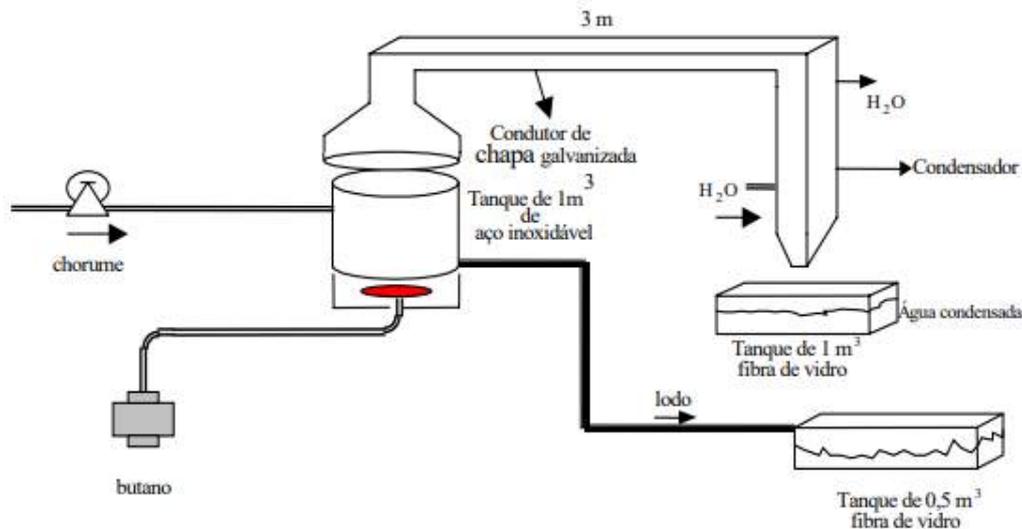
**Tabela 35** - Principais métodos de tratamento de chorume e sua eficiência em função da idade do percolado de resíduos. **A**: boa eficiência; **B**: moderada eficiência e **C**: baixa eficiência (Abbas *et al.*, 2009).

O processo de fitorremediação representa o tratamento com uso de plantas e microrganismos em um habitat similar ao natural. Este tipo de processo quando viável (em função das características do chorume) pode representar uma excelente alternativa para tratamento, pois apresenta baixo custo, operação simples e viabilidade quando existir grandes áreas disponíveis. Em clima tropical esta alternativa ainda é favorecida pelas elevadas taxas de evaporação direta e de evapotranspiração.

A seguir são apresentadas de forma sucinta exemplos de técnicas experimentais aplicadas ao tratamento de efluentes de resíduos sólidos.

### Oxidação Térmica

O princípio da técnica de oxidação térmica é aquecer o chorume em um reator utilizando gás butano como fonte de energia. Um reator experimental proposto por Massai & Massai, (2005) é ilustrado na Figura 83. O resultado obtido é água condensada e lodo em pequenas proporções. O lodo resultante é totalmente inodoro com baixa taxa de contaminação e grande carga de matéria orgânica, podendo ser usado como fertilizante de solos. O custo é em média em torno de R\$ 160,00 por m<sup>3</sup> de gás butano, levando em consideração um botijão de 13 Kg no valor de R\$ 60,00. Caso seja utilizado gás natural do próprio aterro este custo será nulo, havendo apenas o custo da instalação e manutenção do reator.



**Figura 83** - Destilador apresentado contendo um tanque de aço inoxidável AISI-304 de 160 cm de altura e 90 cm de diâmetro de 30 Kg de peso, um condutor de chapa galvanizada de 300 x 0,4 x 0,2 cm, termômetro, chave, duas caixas de fibra de vidro de 0,5 e 1 m<sup>3</sup>, um queimador industrial e um botijão de gás butano (Massai & Massai, 2005).

### Tratamento Biológico

Consiste na transformação química da matéria orgânica em elementos estáveis a partir do contato do chorume com uma cultura de microrganismos. Os principais processos utilizados são:

- Aeróbicos: onde a matéria orgânica e o nitrogênio amoniacal é oxidado na presença de oxigênio livre, produzindo CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub> e NO<sub>3</sub>.
- Anaeróbicos: que metabolizam a matéria orgânica na ausência de oxigênio.

Amaral (2009) propõe dois tipos de tratamentos com uso de reator de lodo ativado e lagoas de aeração.

Este sistema de tratamento objetiva a estabilização da carga iônica presente no chorume.

O lodo proveniente do reator de lodo ativado ou de estação de tratamento de esgotos domésticos é injetado na lagoa aerada que é alimentada por uma bomba peristáltica com vazões variáveis em função do volume de chorume adicionado. A lagoa de decantação recebe continuamente o sobrenadante da lagoa de aeração. Ao atingir volumes elevados na lagoa de decantação, parte do sobrenadante é descartada. Uma vez que esse processo não é significativo para a oxidação do nitrogênio amoniacal, o sobrenadante deve ser submetido a um tratamento físico-químico com adição de sais de fósforo e magnésio com o intuito de formar estruvita, que é um mineral que pode ser usado como fertilizante.

### Osiose Reversa

Baseia-se em um processo físico de separação de partículas presentes em uma solução. Ao aplicar uma pressão superior à pressão osmótica no chorume, as moléculas de água são forçadas a atravessar a membrana no sentido inverso ao da osiose natural. O chorume a ser

tratado circula sobre a membrana osmótica, já o permeado fluirá perpendicularmente, atravessando a membrana e posteriormente circulando pela camada drenante em seu interior.

A desvantagem deste tipo de sistema é vinculada ao elevado custo das membranas que devem ser substituídas periodicamente. Dados da literatura mostram que este método é efetivo para tratamentos de diferentes tipos de chorume.

### Wetland

Trata-se de um tratamento secundário do chorume, que tenha sido previamente tratado em sistemas biológicos aeróbios. A remoção da matéria orgânica e dos nutrientes dentro de um filtro *wetland* se deve ao uso de macrófitas aquáticas. Estas espécies absorvem material orgânico, nutrientes e metais pesados, além de apresentar uma relativa resistência a salinidade elevadas o que é uma das características do chorume de aterros sanitários, principalmente quando o chorume é recirculado. As raízes e rizomas das plantas excretam substância de ações biológicas, como também promovem a transferência de oxigênio do ar atmosférico para o substrato.

Em *wetlands* *construídos* o sistema é artificialmente estabelecido com diferentes tecnologias incluindo plantas aquáticas em diferentes substratos tais como: areia, cascalho, brita ou outro material inerte. Nessas condições, o *wetland* reproduz a atuação da natureza e trata o chorume através de processos físicos, químicos e biológicos (Figura 84).



**Figura 84** - Sistema de *Wetland* na Mina de Águas Claras, MG (Vale, 2018).

### Gases do Efeito Estufa

O gás produzido pela decomposição de resíduos sólidos de aterros compõe uma mistura com diferentes componentes, contudo o metano e o dióxido de carbono são os mais abundantes. Além destes ainda ocorre vapor de água, gás sulfídrico, amônia que imprimem o mau cheiro característico destes voláteis.

O volume de gás produzido e sua composição dependem do tempo em que os resíduos foram acumulados, da compactação do maciço de resíduos, da umidade associada aos resíduos e da relação matéria orgânica / inorgânica nos resíduos.

Os aterros podem produzir gases desde o início de sua operação até décadas depois de encerrada a cumulação de resíduos na área.

A forma mais adequada para se minimizar a ação dos gases de efeito estufa produzidos em lixões e aterros é a partir da produção de energia elétrica em usinas térmicas (termelétricas a gás) ou em associação com fontes solares (em usinas heliotérmicas). Entretanto, o investimento para instalação destas usinas é muito elevado e desta forma este tipo de aproveitamento é pouco aplicado no Brasil.

Assim, para se evitar a liberação dos gases diretamente para a atmosfera faz-se a queima destes produtos nas saídas dos drenos que são edificados durante as fases de acumulação e compactação dos resíduos. Mesmo não sendo a forma mais adequada a queima direta possibilita diminuição do impacto, uma vez que transforma o gás metano e dióxido de carbono que é menos nocivo ao efeito de aquecimento global. Ademais, outros gases são degradados, sendo inclusive produzido vapor de água neste processo.

Um problema recorrente a respeito da caracterização dos gases emitidos pelos lixões é relativo aos poços para drenagem destas substâncias. De forma geral, se utiliza os drenos que são instalados durante a acumulação dos resíduos (na fase ativa do aterro ou lixão). Entretanto, o ideal é a instalação de sistemas dedicados exclusivamente a este tipo de monitoramento e amostragem. Quando o sistema não é instalado de forma adequada pode haver perda de gases nas áreas adjacentes aos drenos, por falta de impermeabilização adequada.

## **14. MODELO CONCEITUAL DO FLUXO DE CONTAMINANTES**

### **14.1 Recarga e Dispersão da Pluma**

A proposição do modelo de fluxo integra todos os resultados obtidos durante o levantamento de dados sobre os aquíferos locais, incluindo informações descritivas obtidas durante a perfuração dos poços, dados hidrodinâmicos alcançados pela execução dos ensaios hidráulicos (*Slug test* e ensaios de infiltração *in situ*), dados hidroquímicos medidos *in situ* e de laboratório, além do conhecimento sobre o clima e condições de recarga natural dos aquíferos.

A descrição do modelo físico dos aquíferos considera quatro conjuntos de aquíferos que são discriminados em função dos tipos de porosidade e parâmetros hidrodinâmicos: dois sistemas aquíferos no domínio das águas freáticas ou rasas e dois subsistemas no domínio das águas profundas.

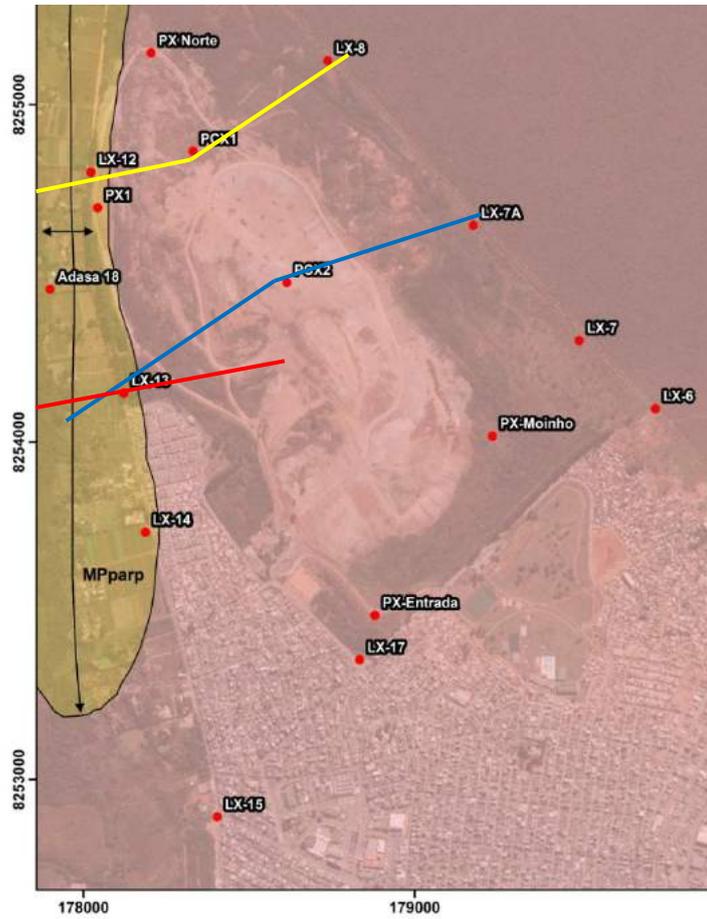
Os aquíferos freáticos são classificados como do tipo intergranulares e livres, homogêneos e pouco anisotrópicos. Estes reservatórios são representados pelos solos e pelos saprolitos. Em função do contraste entre os tipos de materiais foram classificados em dois subconjuntos: solos / saprolitos argilosos (ARG) e solos / saprolitos arenosos (ARN). As espessuras totais destes materiais são, em média, de 40 metros para o conjunto ARG e de 30 metros para os aquíferos do grupo ARN e as espessuras saturadas variam, 15 a 20 metros para os dois conjuntos (valores médios).

Os aquíferos fraturados são representados pelos Subsistemas A e S/A do Sistema Paranoá, com vazões médias de 4,5 e 12,5 m<sup>3</sup>/h. Estes aquíferos são livres ou confinados, anisotrópicos, heterogêneos e apresentam porosidade do tipo secundária planar (planos de fraturas).

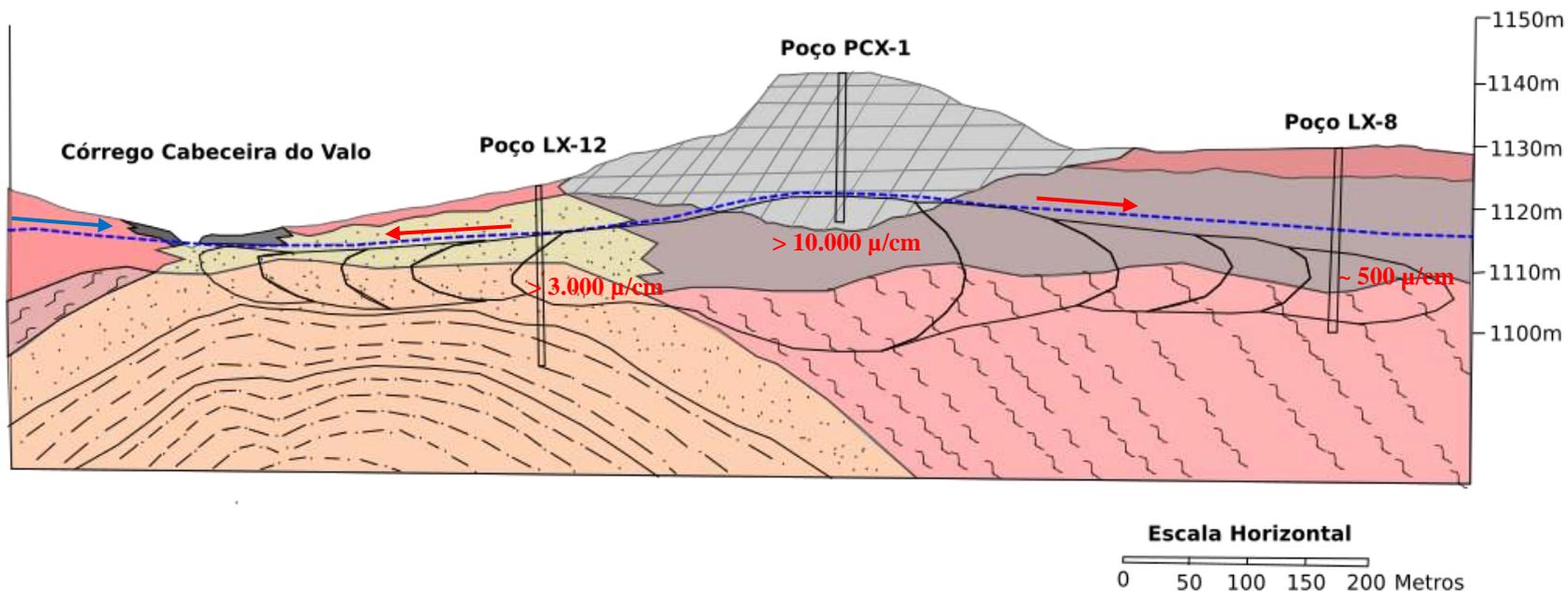
As Figuras 85, 86 e 87 mostram a localização e as seções transversais que cortam as porções em que atualmente há a maior produção de chorume. Os poços PCX 1 e PCX 2 foram perfurados na crista do maciço próximo do que é considerado o divisor hidrográfico e hidrogeológico atual.

As seções trazem detalhes do arcabouço pedológico e geológico, com destaque para a distribuição dos materiais arenosos e argilosos, além do esquema de distribuição da pluma de contaminação e sua respectiva concentração nos poços de amostragem. O exagero vertical tem o objetivo de destacar o contraste do gradiente hidráulico entre as porções leste e oeste do maciço de resíduos.

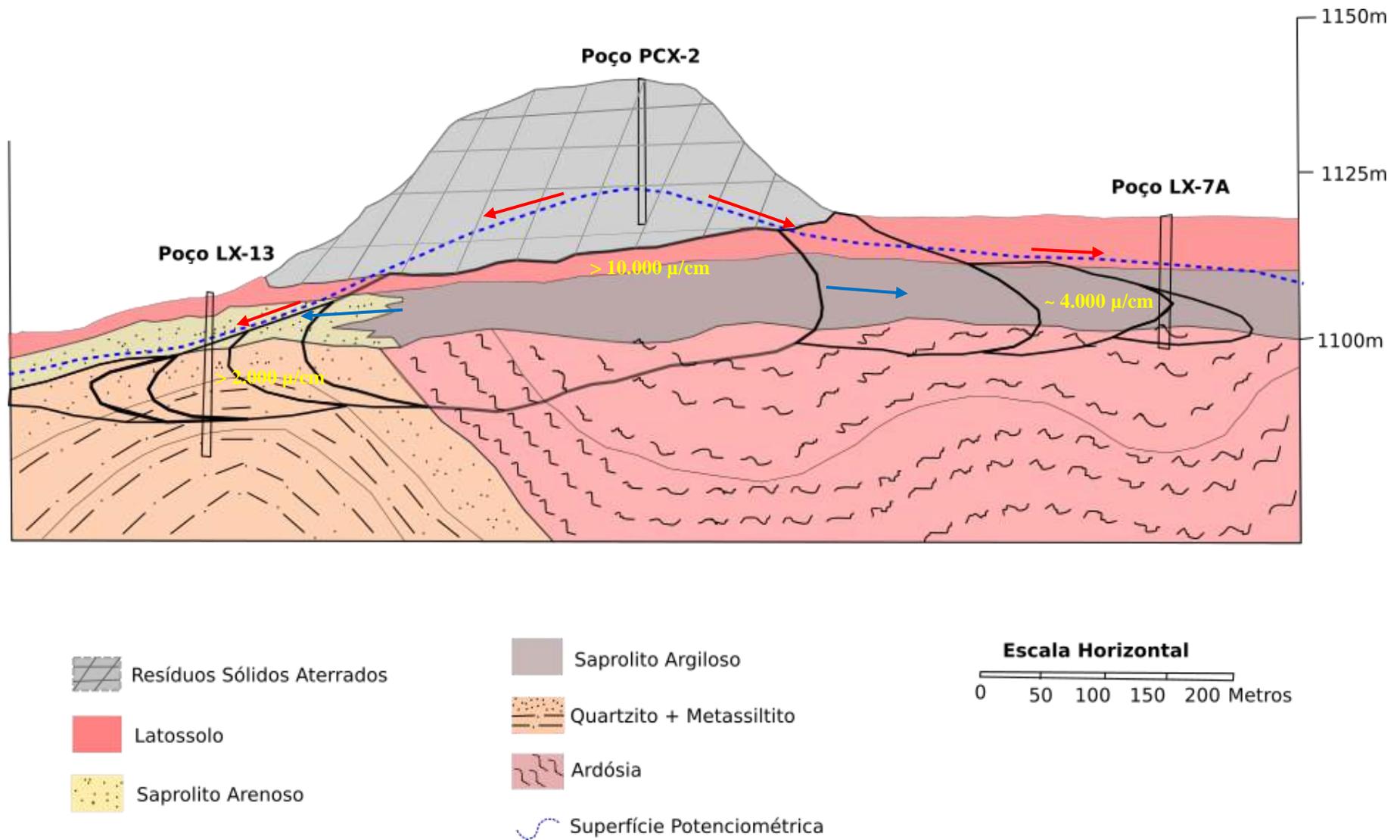
Não existem informações disponíveis com relação ao perfil do Poço 7A (pois este foi instalado no âmbito de outro projeto de pesquisa e foi aproveitado pelo presente estudo), contudo, não se descarta a possibilidade da presença de material arenoso em subsuperfície, uma vez que a pluma apresenta elevada concentração neste ponto em contraste com os poços PX7 e PX 8 instalados durante o desenvolvimento deste projeto (os quais não têm areia em seu perfil, sendo exclusivamente representados por latossolos de textura muito argilosa e saprolito argiloso produzido pelo intemperismo de ardósias).



**Figura 85** - Localização das seções apresentadas na Figura 55 destacada em amarelo; Figura 56 marcada em azul e Figura e 57 representada em vermelho. Base de georeferenciamento Sirgas 2000, Zona 23. (Sistema de coordenadas planas Sirgas 2000, Zona 23. Imagem base obtida do sistema *Google Earth*, de maio de 2020).



**Figura 86** - Seção Oeste – Leste contendo a representação esquemática do modelo conceitual de fluxo de contaminantes no Lixão da Estrutural. A partir da porção central do maciço de resíduos há a divisão do fluxo para o quadrante leste (em direção ao Parque Nacional de Brasília) e para oeste (em direção ao Córrego Cabeceira do Valo). Sob a pilha de rejeitos aterrada há a produção do chorume a partir do contato das águas de chuva com a matéria orgânica e demais materiais no aterro. A pluma se espalha para os dois quadrantes, em função do gradiente hidráulico (setas vermelhas). A densidade da pluma diminui progressivamente quando se distancia da zona de produção do contaminante, sendo que a diluição é associada a três controles: atenuação da carga contaminante em contato com o aquífero, mistura da pluma com águas de boa qualidade já presentes no aquífero e pela mistura com águas de recarga que se processa nas áreas marginais do antigo lixão. À oeste do Córrego Cabeceira do Valo as águas de descarga apresentam baixa mineralização natural e contribuem para a diluição da contaminação do contaminante (seta azul)



**Figura 87** - Modelo conceitual de fluxo e de transporte de contaminante representado em seção transversal do Lixão da Estrutural. A figura destaca o maior gradiente hidráulico da porção oeste, com relação ao quadrante leste, o que aumenta a velocidade de fluxo do contaminante, o que também é controlado pelo material arenoso do saprolito em profundidade que apresenta maior condutividade que o saprolito argiloso presente na porção leste. Os processos de atenuação são de migração da pluma são mais eficientes em locais em que o fluxo migra através das ardósias e seus produtos de intemperismo.

A pluma de contaminação afeta principalmente os aquíferos freáticos, mas podem interferir nos aquíferos profundos em zonas de maior densidade de fraturas. A maior proteção destes aquíferos se dá pela ausência de bombeamento por poços profundos na região. O bombeamento e conseqüente rebaixamento da superfície potenciométrica poderiam causar inversões de fluxo e migração da contaminação para porções profundas do aquífero fraturado. Esta afirmação é corroborada pelos dados de monitoramento do poço de monitoramento P18 (poço profundo) operado pela ADASA, o qual nunca apresentou nenhum tipo de contaminação no período de monitoramento, ao contrário de seu par (poço raso) no qual a contaminação já foi determinada há vários anos.

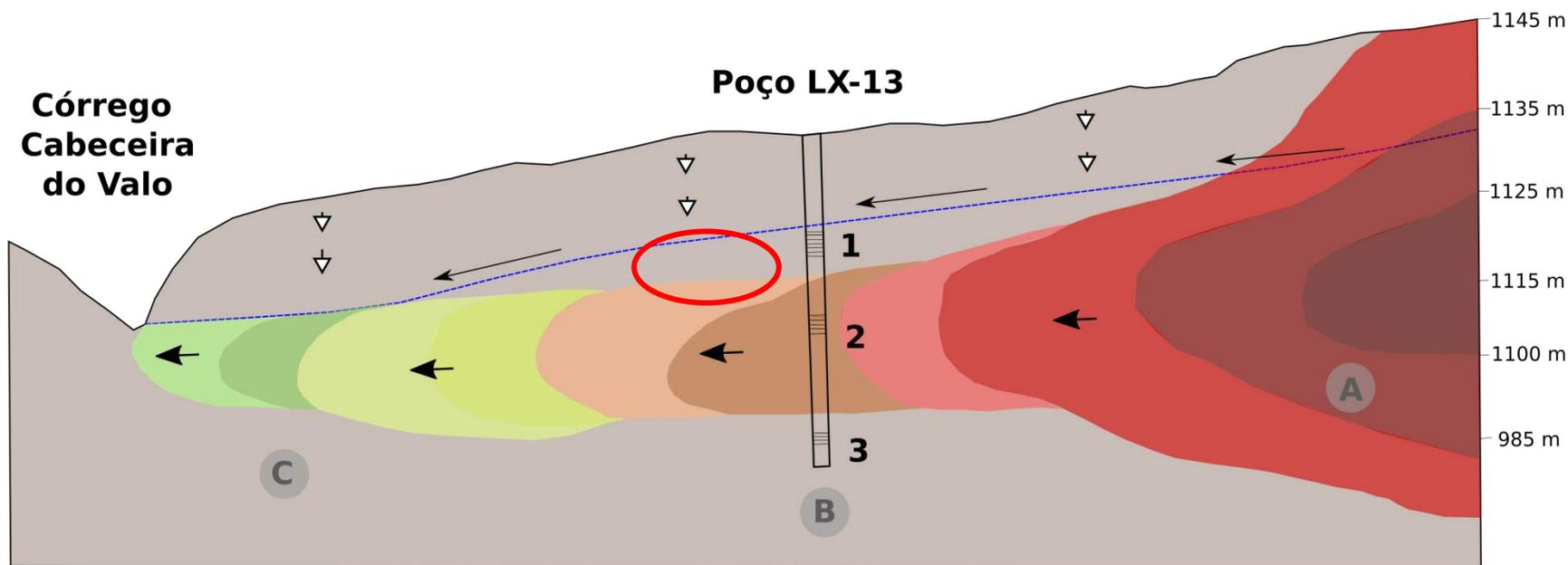
Os dados hidrodinâmicos dos aquíferos freáticos são:

- Condutividade hidráulica não saturada na superfície de  $10^{-5}$  m/s para áreas preservadas e  $10^{-6}$  m/s para áreas de terrenos compactadas (para os conjuntos ARG e ARN) (dados obtidos pelos ensaios de infiltração *in situ* com aplicação do método dos anéis concêntricos);
- Condutividade hidráulica não saturada de  $10^{-7}$  m/s para ambos os conjuntos de 50 a 200 cm de profundidade (dados obtidos pelos ensaios do tipo *open end hole*). Esta ordem de grandeza é considerada para os dois conjuntos de aquíferos freáticos, pois um solo argiloso representado por massa latossólica de textura muito argilosa recobre toda a área. Esse solo de cobertura é considerado como materiais transportados e espalhados pela ação da morfogênese e pedogênese;
- A condutividade hidráulica não saturada e saturada dos maciços aterrados não foi determinada, contudo a descrição dos materiais durante a realização das análises gravimétricas *ex situ* indicam se tratar de valores altos a muito altos, da ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-4}$  m/s (ampla presença de blocos de concreto e outros fragmentos de grande diâmetro e pequeno adensamento da pilha de rejeitos);
- Condutividade hidráulica saturada da ordem de grandeza de  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s para o conjunto ARG e de  $6,6 \times 10^{-6}$  m/s para os materiais classificados como ARN (dados obtidos a partir da execução de ensaios tipo *Slug Test* em 16 poços);
- A porosidade total dos materiais que compõe a zona saturada destes aquíferos intergranulares é considerada de: **25%** para o conjunto ARG e de **18%** para o grupo classificado como ARN;
- A porosidade efetiva foi atribuída a partir da analogia com outros sistemas similares, sendo de **5%** para os materiais argilosos (média entre a massa latossólica e o saprolito argiloso) e de **9%** para os solos / saprolitos arenosos (em função da presença de matriz silto-argilosa nos saprolitos).
- O coeficiente de armazenamento é da ordem de  $10^{-1}$  para todos os aquíferos rasos, uma vez que são do tipo intergranulares e livres.

O modelo de circulação das águas subterrâneas e em conseqüência da pluma de contaminação envolve os seguintes processos:

- Infiltração de parcela das águas de precipitação que incidem sobre terrenos não impermeabilizados. Os dados iniciais de monitoramento da superfície potenciométrica indicam que a infiltração das águas de chuva na região é bastante efetiva. Dois argumentos embasam esta afirmação: i) restrito escoamento superficial a partir de áreas verdes (tanto no interior do Parque Nacional de Brasília, quanto na poligonal da URE Estrutural e até em áreas preservadas na Cidade Estrutural - parque urbano); ii) elevação no nível freático a partir da segunda quinzena do mês de novembro (sendo que o mais comum é que a elevação se inicie no mês de dezembro). Este fato é atribuído ao grande volume de aterros em toda a região antropizada que funciona com um colchão drenante; presença de solos estruturados nos horizontes superficiais de todas as classes de solos presentes na área;
- Produção do chorume com elevadas concentrações nas áreas de maior espessura e maior volume de resíduos aterrados. A migração deste lixiviado para a porção saturada do aquífero se dá pela própria infiltração das águas de precipitação, e pelo processo de recarga natural;
- Migração lateral da pluma de contaminação uma vez que os resíduos compõem uma ampla elevação com direção N30W e cotas que podem alcançar 1150 metros. Neste caso a área da atual URE funciona como um divisor do fluxo que se espalha lateralmente para oeste e sudoeste (no quadrante oeste) e para nordeste, leste e sudeste (no quadrante leste);
- Nas áreas marginais à porção que teve acumulação de resíduos há o transporte e diluição da pluma. A diluição da pluma se dá por dois controles: i) pela mistura entre a pluma com águas não contaminadas em fluxo no aquífero e ii) pela recarga que se dá nas áreas marginais. Este segundo fator pode ser confirmado pela própria descrição vertical da pluma que se mostra com baixa concentração próximo ao topo da zona saturada e apresenta maior concentração de contaminantes em maiores profundidades. Esse comportamento pode ser exemplificado pelo Poço LX13 (Figura 88) em que a pluma, próximo à zona saturada é da ordem de 158  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (da ordem de 10 metros de profundidade), a qual alcança valores superiores a 3.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a cerca de 18 metros e volta a diminuir a profundidades da ordem de 28 metros (outros poços com pluma concentrada apresentam este mesmo padrão);
- Homogeneização da pluma nas áreas mais distais aos centros de produção de chorume. Nas áreas marginais da pluma a pluma se torna homogênea no sentido de não apresentar estratificação e os valores da condutividade hidráulica se mantêm abaixo de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

O modelo de fluxo proposto mostra que a maior parte da pluma de contaminação com maior concentração de chorume migra para oeste / sudoeste em direção ao Córrego Cabeceira do Valo. Este fato é controlado por dois aspectos: maior gradiente em direção ao quadrante oeste e maior condutividade dos materiais em saprolíticos em profundidades saturadas.



### Contaminação

**A** Zona de Produção

**B** Zona de Transporte

**C** Zona de Diluição

### Condutividade Elétrica

**1** 158  $\mu\text{S/cm}$

**2** 3.480  $\mu\text{S/cm}$

**3** 1.340  $\mu\text{S/cm}$

▽ Fluxo vertical de recarga natural

← Fluxo lateral da pluma de contaminação por chorumel

← Fluxo de base

**Figura 88** - Detalhe do modelo conceitual de fluxo de contaminante, destacando a estratificação lateral e vertical da pluma de contaminação. O efluente apresenta máxima concentração sob o maciço de resíduos aterrados. A concentração diminui progressivamente com o aumento da distância. O Poço LX-13 mostra um exemplo de estratificação vertical da pluma em que as concentrações variam em função da densidade da pluma e sua relação com água de recarga natural do aquífero. A elipse em vermelho destaca a porção entre o topo da zona saturada e a zona mais concentrada da pluma que recebe a recarga e dilui a superior da pluma de contaminação.

O quadrante leste, em direção ao Parque Nacional de Brasília, apresenta menor gradiente e condutividade hidráulica saturada com pelo menos uma ordem de grandeza menor que a observada nos saprolitos dos quartzitos presentes em profundidade na porção oeste. Em direção ao Parque Nacional há uma área maior afetada, contudo a contaminação observada é muito diluída, sendo que apenas um poço apresentou valores de condutividade elétrica do fluido da pluma maior que 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A diluição da pluma em direção ao Parque Nacional é devida à área de embargo (300 metros entre o limite dos resíduos e a cerca limítrofe) e à área protegida que permitem ampla recarga e diminuição da concentração da pluma.

#### 14.2 Estimativa da Velocidade Linear Média do Fluxo

Para os cálculos de velocidade do fluxo subterrâneo foram utilizados dois conjuntos de poços situados entre o divisor das duas bacias hidrogeológicas existentes na área de estudo, sendo que a crista do maciço de resíduos é considerada a linha divisora destas bacias. O primeiro conjunto é representado pelo Poço PCX1 (no centro norte do maciço) e pelos poços LX8 e LX12, situados respectivamente a nordeste e a sudoeste. O segundo grupo de poços é integrado pelo Poço PCX2 e pelos poços LX13 e LX7A (situados a sudoeste e a nordeste).

As distâncias foram medidas diretamente na imagem do *Google Earth*, entre os poços centrais e os adjacentes na mesma linha de fluxo, resultando em:

- Distância entre PCX1 e LX8 é de 490 metros;
- Distância entre PCX1 e LX12 é de 350 metros;
- Distância entre PCX2 e LX7A é de 601 metros e
- Distância entre PCX2 e LX13 é de 592 metros.

Os gradientes hidráulicos relativos aos respectivos pares foram obtidos pelas relações entre as cotas da boca de cada poço e a cota da superfície potenciométrica, além de suas distâncias. Os valores são:

- Gradiente entre PCX1 e LX8 é de 0,0122448 (resultante de 9,0 m / 490 m);
- Gradiente entre PCX1 e LX12 é de 0,0238571 (decorrente de 8,35 m / 350 m);
- Gradiente entre PCX2 e LX7A é de 0,0135607 (resultante de 8,15 m / 601 m) e
- Gradiente entre PCX2 e LX13 é de 0,0383783 (correspondente a 22,79 m / 592 m).

A porosidade efetiva será considerada para cada bacia, mesmo se sabendo que o limite entre os diferentes materiais pode não ser exatamente o mesmo do divisor das bacias hidrogeológicas. O número de poços não permite se determinar o contato lateral dos solos e saprolitos argilosos dos arenosos. Assim, para a bacia de leste foi considerado o valor de 5% e para o material arenoso situado na bacia a oeste 9%.

Considerando que os aquíferos sejam homogêneos e isotrópicos, as velocidades lineares médias de fluxo no aquífero são então obtidas pela equação:

$$V = \frac{K \times \text{Grad } h}{\eta e}$$

onde: **K** - condutividade hidráulica do meio (em m/s); **Grad h** - gradiente da carga hidráulica entre os pontos de observação (m/m = adimensional); **ηe** - porosidade eficaz do meio (% = adimensional).

A aplicação da equação resulta nos seguintes resultados de velocidades médias:

- Entre PCX1 e LX8 =  $1,0 \times 10^{-6} \text{ m/s} \times 0,0122448 / 0,05 = 2,44896 \times 10^{-7} \text{ m/s} = 0,021159 \text{ m/dia} = 7,72 \text{ m/ano}$ ;
- Entre PCX2 e LX7A =  $1,0 \times 10^{-6} \text{ m/s} \times 0,0135607 / 0,05 = 2,71214 \times 10^{-7} \text{ m/s} = 0,0234328 \text{ m/dia} = 8,55 \text{ m/ano}$ ;
- Entre PCX1 e LX12 =  $6,6 \times 10^{-6} \text{ m/s} \times 0,0238571 / 0,09 = 1,749501 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 0,1511585 = 55,17 \text{ m/ano}$  e
- Entre PCX2 e LX13 =  $6,6 \times 10^{-6} \text{ m/s} \times 0,0383783 / 0,09 = 2,8144087 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 0,2431649 \text{ m/dia} = 88,75 \text{ m/ano}$ .

Os valores de velocidades obtidos devem ser considerados com reservas e não podem ser aplicados à todo o tempo de operação do Lixão da Estrutural, em função dos seguintes antecedentes e argumentos:

- O gradiente hidráulico atual é muito maior que o observado em épocas anteriores antes de se verticalizar a operação do aterro e se elevar o maciço de resíduos;
- Os valores obtidos não consideram nenhum processo de atenuação e retardo pelos materiais que compõem o aquífero (argilas, estruturação do solo, presença de matéria orgânica, mesmo que em pequenas proporções, entre outros);
- A possibilidade dos aquíferos não serem propriamente isotrópicos e homogêneos e
- Incertezas nas determinações dos parâmetros: condutividade hidráulica e porosidade efetiva (mesmo se considerando que os valores aplicados sejam bastante coerentes com o tipo de aquífero em estudo).

De qualquer forma as ordens de grandezas obtidas são coerentes com o que é observado na região, uma vez que a contaminação já alcançou o Córrego Cabeceira do Valo, situado a distâncias variáveis entre 200 e 500 metros dos limites sudoeste do Lixão da estrutural. Por outro lado, a contaminação não alcançou as nascentes do Córrego do Acampamento situado a distâncias variáveis entre 800 e 1200 metros dos focos de contaminação mais críticos (porção sudeste do aterro atual).

Para percorrer uma distância de 1000 metros nos aquíferos do grupo ARG (no sentido da cabeceira do Córrego do Acampamento) seriam necessários mais de 100 anos. Este tipo de análise não considera a possível presença de anisotropias no aquífero, gerando situações com

maiores valores de condutividade hidráulica e diminuindo o tempo de transporte do contaminante.

### **14.3 Balanço Hídrico Preliminar**

Segundo Fitts (2002) toda água que flui em um curso d'água natural tem origem pela precipitação (Chuva ou gelo/neve), mas a água segue várias rotas até alcançar os corpos hídricos subterrâneos. Uma parcela flui diretamente sobre a superfície do solo até um canal por meio do escoamento superficial e parte infiltra no solo e migra lateralmente até um canal pelo processo denominado de interfluxo. Outra parte infiltra até maiores profundidades se armazena na porção saturada dos aquíferos, podendo migrar lateralmente a partir superfície freática para descarregar de volta à superfície em um corpo hídrico de superfície (nascente, lago ou canal), através do chamado fluxo de base.

Se os solos apresentarem baixa permeabilidade, a maior parte da precipitação não infiltra e o fluxo de base representará apenas uma pequena parte da descarga do córrego. No entanto, se as coberturas de solos na bacia de um curso d'água, apresentarem elevada condutividade hidráulica, como é o caso da região em estudo, o fluxo de base pode representar grande parte da descarga onde ocorrem córregos perenes, que apresentam um fluxo de água considerável, sendo o fluxo de base o único contribuinte para as vazões nos períodos de seca.

Tendo em vista estes conceitos, foi proposto neste trabalho um balanço hídrico preliminar para a área do Lixão da Estrutural. De forma análoga a trabalhos anteriores realizados no Distrito Federal (Coimbra, 1987 e Carmelo, 2002) foi atribuída precipitação média de 1400 mm/ano, sendo que 630 mm/ano infiltram pelo solo e 770 mm/ano são perdidos por evapotranspiração. Do total infiltrado, parte flui pelo fluxo interno até chegar a zona de descarga, e outra parte é responsável pela recarga freática (450 mm/ano) dos sistemas aquíferos freáticos ARG e ARN, os quais são reservatórios intergranulares que contêm as zonas contaminadas. Além disso, estes aquíferos são responsáveis pela alimentação dos sistemas fraturados em profundidade. O escoamento superficial foi considerado desprezível devido ao relevo plano e pela alta capacidade de infiltração das coberturas da área de estudo, incluindo latossolos e aterros.

## **15. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DAS ÁREAS ADJACENTES À URE**

O presente item apresenta a caracterização geotécnica dos perfis de solo-saprolito em áreas adjacentes ao Lixão da Estrutural. As avaliações apresentadas são baseadas na análise de 163 perfis de sondagens do tipo SPT (*Standard Penetration Test*), sendo que 156 sondagens foram produzidas pela empresa DSoares Empreendimentos e Construções (no ano de 2018) e 7 pela Empresa Água & Terra Consultoria Ambiental (no ano de 2007).

O objetivo deste laudo técnico é avaliar as condicionantes para ocupação da área adjacente ao aterro (em suas porções mais antiga e mais recente) por edificações coletivas de maior porte, previstas em projeto a serem localizadas imediatamente nas margens das áreas utilizadas para aterro de resíduos sólidos.

### **15.1 Avaliação Geotécnica**

O ensaio tipo SPT consiste do impacto de um peso padrão de 65 kg e na contagem do número de golpes para penetração de 30 cm no solo / saprolito. O peso acoplado a uma corda é erguido até 75 cm de elevação, com auxílio de um tripé e uma roldana e solto em queda livre sob ação da gravidade.

Os dados são organizados em perfis que trazem a descrição tátil-visual do material interceptado, profundidade do nível d'água, resistência do material e número de golpes para avançar a profundidade padrão. A Figura 89 traz um exemplo de um *log* de sondagem SPT realizado na região do Lixão da Estrutural.

Sondagens SPT foram realizadas em locais adjacentes aos limites sudoeste, sudeste do lixão e em direção a sudeste em área que no passado foi utilizada para aterrar resíduos sólidos. Em toda a faixa em que as sondagens foram realizadas existe a comprovação da presença de contaminação por chorume em profundidade. A existência do chorume é corroborada pelos estudos geofísicos e confirmada pelos poços de monitoramento instalados durante a realização do presente trabalho.

A avaliação do conjunto de perfis disponíveis permite sintetizar as seguintes informações:

- O lixo representa material com alta penetrabilidade e muito heterogêneo (muitas vezes contento blocos de concreto e outros resíduos de obras) e nos locais estudados apresentam pequenass espessuras (< 4 metros);
- A maior parte da seção dos espessos latossolos argilosos da área apresenta alta penetrabilidade, em geral até profundidades maiores que 20 m;
- Em grande parte das sondagens os índices SPT maiores ou iguais a 20 ocorrem a profundidades variáveis de 18 a 32 metros. Considerando índices SPT menores ou iguais a 10 as profundidades variam de 13 a 29 metros, sendo que na maior parte das sondagens esta profundidade é maior que 20 metros;

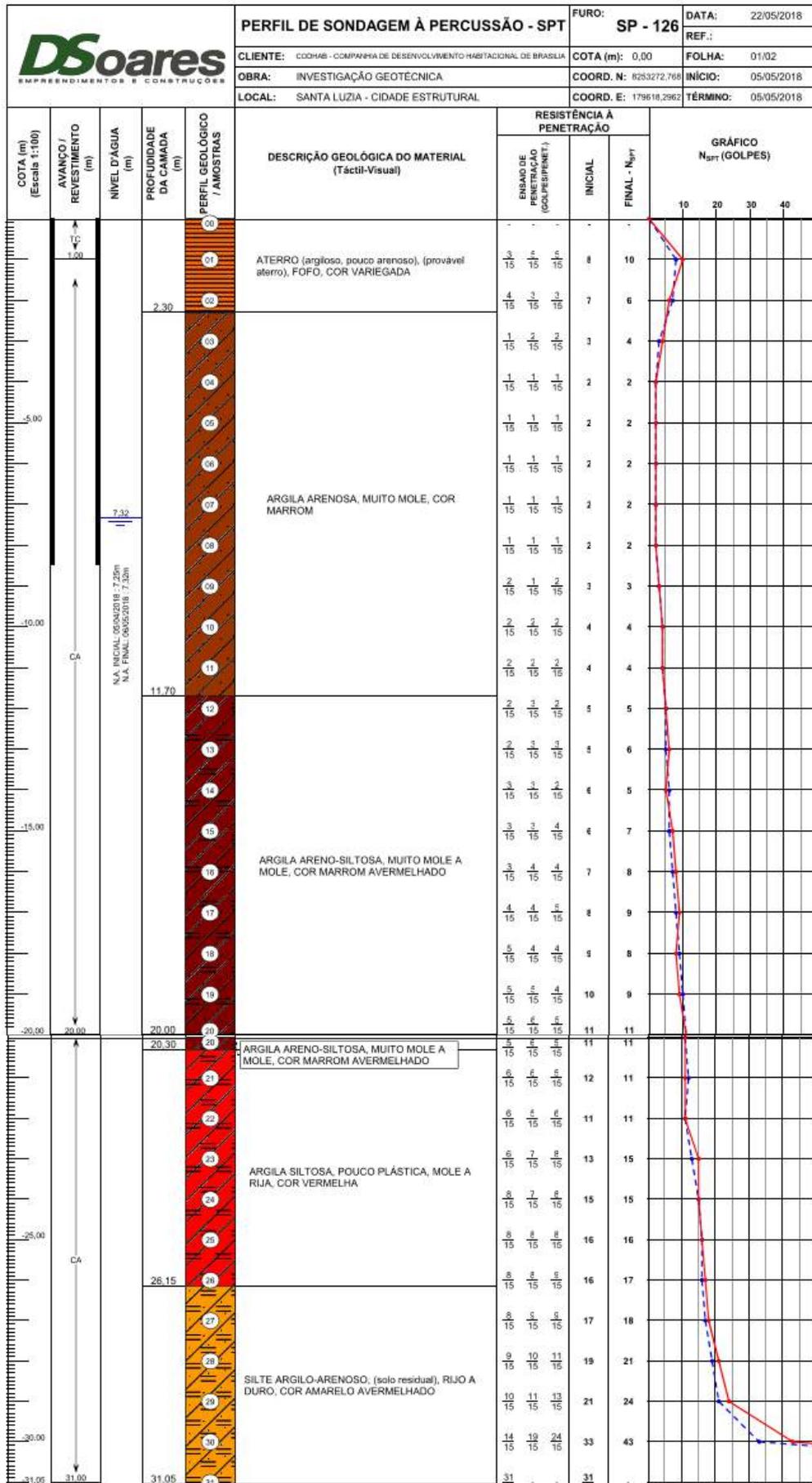


Figura 89 - Exemplo de perfil SPT executado em ponto adjacente à URE na cidade Estrutural.

- A seção com baixa penetrabilidade/impenetrável se dá de forma abrupta, em geral já em material saprolítico ou no contato com a rocha alterada;
- A maior resistência do solo começa a ocorrer em profundidades médias de 20 a 25 metros principalmente em áreas com maiores concentrações de chorume;
- É possível inferir que o horizonte de alteração, que gera o solo, não é homogêneo, apresentando níveis menos ou mais compactados;
- O horizonte mais resistente é o horizonte C, que apresenta uma resistência de 30-40 devido, provavelmente, à presença de pequenos aglomerados de argila dura ou material inconsolidado proveniente da alteração da ardósia.

Além dos dados anteriormente enumerados é possível afirmar que o chorume produzido pela decomposição dos resíduos sólidos enterrados e empilhados na região causa efeitos deletérios à ardósia e seu saprolito. Este ataque do efluente ao material geológico é associado às propriedades do chorume que apresenta alta densidade, pH desde alcalinos até ácidos, condições redutoras, além de gases dissolvidos. Os solos e saprolitos saturados pelo chorume tomam um comportamento mais plástico que aqueles não afetados.

As modificações artificiais das propriedades geotécnicas dos solos e saprolitos são responsáveis pela alta penetrabilidade observada na maior parte das sondagens SPT.

A partir da análise dos perfis das sondagens fica claro que as obras eventualmente construídas nestas áreas que necessitarem de fundações profundas deverão considerar os riscos decorrentes da presença do chorume em profundidade. Como o chorume ataca o solo-saprolito naturais, também apresenta potencial para atacar as fundações nas porções em que estas estruturas estiverem instaladas na zona saturada do aquífero freático local.

Os dados mostram que qualquer tipo de fundação (tubulões, estacas cravadas, tipo Strauss, etc.) utilizada como alternativa para obras de maior porte na região sua viabilidade técnica e econômica deverá ser avaliada. Em princípio pode-se afirmar que mesmo que apresente viabilidade técnica a questão do custo poderá ser um impedimento, pois as fundações tenderão a ser muito mais profundas que as instaladas em áreas naturais sem a percolação de grandes volumes de chorume como é o caso em questão.

Além do ataque pelo chorume há ainda riscos adicionais como a produção de gases, recalques laterais e rompimento da estrutura dos solos adjacentes às áreas das edificações, uma vez que as edificações previstas estão situadas muito próximas ao limite do aterro, e em muitos casos sobre áreas nas quais já foram acumulados resíduos sólidos.

## 15.2 Implicações para Uso Futuro da Área

Após avaliação de mais de 150 perfis de sondagens geotécnicas realizados em áreas adjacentes ao Lixão da Estrutural pode-se afirmar que:

- As fundações de edificações de três ou quatro pavimentos nas áreas adjacentes ao lixão da Estrutural deverão ter, em locais específicos, mais de 15 metros de profundidade. As obras destas fundações deverão ter sua viabilidade econômica comprometida em função da relação custo/benefício, por se tratar de imóveis para atendimento de demandas sociais e, portanto com baixo valor de mercado;
- A presença de grande volume de chorume de alta concentração, provavelmente afeta as características geotécnicas naturais dos solos e saprolitos que ocorrem às margens das áreas de aterro de resíduos sólidos. Dentre as feições que são modificadas se destacam a maior penetrabilidade (observada em ensaios tipo SPT) e aumento da plasticidade do material;
- Caso se considere a alternativa de se ocupar a área, mesmo após as análises de viabilidade técnica e econômica, a escolha do tipo de fundação deve atentar para o fato de na região existir chorume com diferentes concentrações na zona saturada do aquífero.

Com relação à área atualmente ocupada na forma de invasões desordenadas, composta por barracos de madeira e algumas construções de pequeno porte de alvenaria, no conjunto denominado de “Santa Luzia” pode-se afirmar que:

- O risco de desenvolvimento de patologias geotécnicas é restrito devido ao fato de se tratar de edificações de pequeno porte com fundações rasas (ao nível da superfície) quando existentes;
- Nos casos em que o abastecimento é feito por meio de poços escavados (cisternas) há o risco eminente de contaminação, pois o bombeamento deve capturar zonas de chorume progressivamente mais concentrado com o aumento da profundidade;
- A remoção da ocupação deve ser considerada como uma prioridade, pois já afeta o Parque Nacional de Brasília, com a eliminação da cerca limítrofe, acúmulo de resíduos sólidos e direcionamento de efluentes por escoamento superficial em direção à cabeceira do Córrego do Acampamento.

A fragilidade geotécnica dos materiais de subsolo nas adjacências do aterro é evidenciada pelo índice SPT igual ou inferior a 6 que ocorre até a profundidades próximas a 10 metros e não raramente até a 15 metros de profundidade.

Para a ocupação da área do Lixão da Estrutural propriamente dita (cerca de 200 hectares) para qualquer fim (exemplo: geração de energia fotovoltaica, instalação de usina heliotérmica, com combinação de aproveitamento do gás e energia solar, dentre outros) a área deverá ser previamente reabilitada conforme preconizado pela Resolução Conama 420 de 28 de dezembro de 2009. Neste caso, o uso pretendido deverá ser informado ao Instituto Brasília Ambiental -

IBRAM que deverá decidir sobre a viabilidade de ocupação da área com base no diagnóstico ambiental da área, na análise de risco, nas ações propostas para reabilitação da área e no zoneamento do uso do solo.

## **16. COMENTÁRIOS SOBRE O PRIMEIRO WOKSHOP DE DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO PROJETO**

No dia 10 de dezembro de 2020 ocorreu o primeiro Workshop intitulado “DIAGNÓSTICO E TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES - REMEDIAÇÃO DO ANTIGO LIXÃO DA ESTRUTURAL” que objetivou apresentar os resultados do diagnóstico ambiental da área do Lixão da Estrutural e discutir experiências apresentadas por outros pesquisadores na gestão de antigos lixões, inclusive experiências internacionais de usos de áreas de antigos lixões.

O evento foi organizado pela equipe da Secretaria de Meio Ambiente do Distrito Federal com apoio logístico da empresa Prismati. Todos os dados sobre o evento estão apresentados no Anexo 3, que representa o relatório detalhado de descrição e execução do workshop.

Além de diversas autoridades que compuseram a mesa de abertura e participaram das discussões foram apresentadas palestras pelos seguintes pesquisadores:

- Prof. **José Eloi Campos** (Instituto de Geociências da Universidade de Brasília) - *Diagnóstico Ambiental do Lixão da Estrutural*;
- Dr. **Elton Gloeden** (Gerente do Departamento de Áreas Contaminadas da Cetesb) - *Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo*;
- Eng. Químico **Antônio Mallman** (Empresa M2K) - *Tratamento físico químico com osmose reversa*;
- Profa. **Cecília Herzog** (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) - *Transformando Lixões em Parques Multifuncionais*.

O encerramento do evento contou com a realização da Mesa de Discussão intitulada “DIRETRIZES PARA REMEDIAÇÃO DO ANTIGO LIXÃO DA ESTRUTURAL”, que contou com a participação dos seguintes técnicos:

- Dr. **Roberto Carlos Batista** (Promotor do Ministério Público do Distrito Federal e Territórios, MPDFT);
- **Heliana Kátia** (Vice-Presidente da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES);
- **Rômulo Barbosa** (Diretor-Adjunto do Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Fderal, SLU);

- **Élen Dânia** (Superintendente de Resíduos Sólidos, Gás e Energia da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal, ADASA);
- **Sandro Lima** (Diretor de Emergências, Riscos e Monitoramento do Instituto Brasília Ambiental, IBRAM) e
- **Elisa Meirelles** (Assessora Especial da Secretaria de Meio Ambiente do Distrito Federal, SEMA/DF).

Nesta Mesa de Discussão foi possível ouvir a opinião dos representantes das distintas instituições envolvidas com a questão dos passivos ambientais do Lixão da Estrutural e como estes órgãos podem contribuir para se acelerar a solução dos problemas. Em princípio, o MPDFT e o IBRAM devem ser os organismos de cobrança das ações; o SLU deve estar à frente da execução das ações de solução propriamente ditas, inclusive com indicação de recursos financeiros para se viabilizar a execução das tarefas; a ADASA pode atuar como instituição reguladora, por exemplo, para viabilizar cobranças vinculadas às taxas de limpeza urbana para que recursos possam ser canalizados para a solução dos passivos e a SEMA/DF deve ser a entidade do Governo do Distrito Federal para acompanhar a implantação das ações, bem como avaliar sua eficiência.

Este primeiro Workshop alcançou os objetivos no sentido de mostrar os resultados do diagnóstico ambiental da área do Lixão e de agregar informações e experiências de outras áreas com problemas similares. Neste sentido, foi um evento muito rico em que os participantes tiveram a real possibilidade de aprendizado de novos dados, informações e aplicações sobre o Lixão da Estrutural e sobre outras áreas com problemas similares.

Entretanto, quanto à aplicação dos resultados das experiências das outras áreas, no Lixão da Estrutural, em princípio, não foi possível vislumbrar um paralelo entre os problemas, de forma que a replicação das ações discutidas para o estudo de caso no Distrito Federal é considerada limitada. Uma questão que foi verificada é que a aplicação direta de experiências bem-sucedidas em outras áreas nem sempre é viável, sendo necessárias inúmeras adaptações e avaliações de custos para se avaliar sua aplicabilidade.

O Dr. Elton Gloeden apresentou amplas estatísticas sobre as áreas contaminadas no Estado de São Paulo, indicando que existem passivos ambientais relacionados a antigos lixões e aterros controlados, contudo, a maior parte dos casos se relaciona a postos de combustíveis e áreas industriais. Ainda inseriu as ações genéricas que são realizadas nas áreas afetadas, que incluem: cadastro dos casos, monitoramento, cadastro dos usuários de água subterrânea nas imediações dos casos e acompanhamento da remediação *in situ*.

O Engenheiro Químico Antônio Mallman apresentou em detalhes a planta de tratamento de chorume a partir de métodos convencionais com a inclusão da técnica de osmose reversa.

Mostrou ainda que a água produzida após o tratamento apresenta qualidade compatível com o que é preconizado pela legislação. Entretanto, informou que o custo final do tratamento alcança R\$ 87,00 (oitenta e sete reais) por metro cúbico de chorume tratado, o que inviabiliza a aplicação da técnica apresentada para o Lixão da Estrutural. Por outro lado, no Lixão da Estrutural não se pretende tratar o chorume bruto, mas o efluente obtido pela migração da pluma de contaminação no aquífero freático, que é composto por um material com menor toxidez e concentração, comparado ao chorume produzido na zona central do antigo lixão.

A Professora Cecília Herzog mostrou inúmeros casos internacionais em que antigas áreas de disposição de resíduos sólidos foram transformadas em parques urbanos de usos múltiplos (inclusive para educação ambiental). Contudo, os exemplos e a filosofia apresentada não são aplicáveis ao estudo de caso do Distrito Federal, uma vez que a área do Lixão da Estrutural está intrinsecamente associada à uma área urbana consolidada de elevada densidade e uma ocupação irregular (“Comunidade” de Santa Luzia), além de se situar em área limítrofe de uma Unidade de Conservação Ambiental Federal de Proteção Integral (Parque Nacional de Brasília) que apresenta restrições a distintos tipos de usos em sua área de amortecimento.

## **17. PRINCIPAIS AÇÕES PARA REMEDIAÇÃO DOS PASSIVOS AMBIENTAIS**

Embora este relatório técnico se dedique a apresentar o diagnóstico ambiental da área do Lixão e adjacências, o Termo de Referência que norteia sua execução solicita a indicação dos principais aspectos que necessitam ser enfrentados na proposta de remediação dos impactos enumerados de forma a subsidiar e referenciar a tomada de decisão pelo Governo do Distrito Federal, nas estratégias de enfrentamento do passivo ambiental da área.

Desta forma, a seguir são apresentadas de forma sucinta as ações que devem ser consideradas para mitigação e remediação do passivo:

**i)** Estabilização da migração da pluma de contaminação da água subterrânea a partir do bombeamento, o que deverá manter cones de depressão em locais estratégicos para evitar a continuação de propagação da contaminação em direção aos cursos d’água superficiais.

O material extraído das baterias de poços de rebaixamento deverá ser depurado em estações de tratamento de efluentes específicas que contemplem a natureza e concentração dos poluentes. Após o tratamento, a água deverá ser lançada no Córrego Vicente Pires (a jusante da confluência dos córregos Cabeceira do Valo e Cana do Reino). Estudos relativos à capacidade de depuração do Córrego Vicente Pires, com relação à qualidade do efluente tratado, deverão ser realizados antes de se iniciar o lançamento.

Como não existam condições técnicas ou viabilidade econômica para o tratamento dos efluentes bombeados a partir dos aquíferos freáticos, estes deverão ser reinjetados no maciço de

resíduos, de forma a recircularem para ampliar e maximizar a capacidade de atenuação natural dos aquíferos rasos (incluindo suas zonas não saturada e saturada).

**ii)** Aplicação de técnicas de fitorremediação na faixa de 300 metros de largura situada entre o extremo leste do maciço de resíduos e a cerca do Parque Nacional de Brasília (região denominada de “área embargada” em que os resíduos anteriormente acumulados foram parcialmente retirados).

A execução desta técnica de remediação deverá incluir as seguintes ações: supressão da vegetação secundária exótica que se estabeleceu na área (com ampla predominância de leucena, margaridão e mamona); reconformação do relevo local (sem a importação de terras, apenas com a quebra dos taludes ainda existentes) e revegetação da área com uso de espécies arbóreas nativas do cerrado e de mata galeria. A revegetação desta faixa de 60 hectares resultará no aumento de proteção da área do Parque Nacional de Brasília.

Esta ação tem potencial para minimizar a propagação de particulados atmosféricos; ampliar a retenção de escoamento superficial; diminuir os riscos de incêndios florestas que são nucleados na área e adentram em direção ao do parque e atenuar a dispersão de gramíneas exóticas (principalmente brachiaria) que atuamente já entram na área do Parna de Brasília.

**iii)** Enclausuramento das zonas principais de geração do chorume com sua impermeabilização, instalação de sistemas de drenagem das águas pluviais e direcionamento para infiltração nas zonas marginais do maciço de resíduos. Esta ação deverá minimizar a produção de chorume primário, o que em conjunto com o bombeamento facilitará a recuperação dos aquíferos contaminados.

A impermeabilização da porção superior do maciço de resíduos poderá ser alcançada com solos argilosos de áreas de bota-fora de obras civis, com compactação até se obter uma condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-8}$  m/s. Os sistemas de drenos superficiais poderão ser construídos com uso de canaletas em gabiões, em concreto por meias-manilhas ou em concreto armado (deve-se priorizar a solução com menor custo de implantação).

As áreas prioritárias para implantação desta ação estão localizadas na porção centro-norte da atual Unidade de Recebimento de Entulhos.

**iv)** Cercamento e isolamento de toda a área para evitar a presença de pessoas e animais domésticos que são comumente observados no interior da URE.

Esta ação deve ampliar a segurança na área, inclusive para se viabilizar as ações de mitigação necessárias. Por exemplo, sem a segurança devida, as obras e equipamentos utilizados para a contenção da pluma de chorume não poderão ser instaladas sob o risco de depredação das estruturas e de roubos de equipamentos (bombas, cabos elétricos, quadros de comando, etc.).

v) Manutenção, com maior eficiência, da queima dos gases produzidos pela decomposição dos resíduos orgânicos, os quais são atualmente drenados por sistemas de manilhas preenchidas por blocos de rocha. Atualmente se observa inúmeros drenos com escape de gases diretamente para a atmosfera, sem a devida queima.

vi) Por fim, deve-se dar uma destinação adequada para uso sustentável da área, tendo em vista a população residente na área urbana da Cidade Estrutural (a sul e sudoeste) e a presença do Parque Nacional de Brasília (a leste).

Os dados obtidos deste diagnóstico ambiental, relativos à composição dos resíduos e informações sobre testes de poder calorífico da queima dos resíduos indicam que a geração de energia pela combustão dos resíduos tem restrita viabilidade. Estes elementos, associados à indisponibilidade de “resíduos novos” para a blendagem com os “resíduos antigos” em uma taxa de 3 para 1 ou maior, corroboram a dificuldade para uso dos resíduos aterrados como fonte de energia.

Alternativas para uso da área como parques urbanos ou de múltiplos usos como realizado em outros países, não parece ser viável para o caso específico da área em estudo, em virtude da presença urbana em área imediata e da existência do Parque Nacional de Brasília em área contígua, por se tratar de uma área de conservação ambiental categorizada como Unidade de Proteção Integral (neste caso, com restrições a diversos usos em sua área tampão).

Assim, um uso preliminarmente proposto para a área principal da atual URE da Estrutural, seria para instalação de uma usina de produção de energia elétrica com fonte fotovoltaica. Essa alternativa que prevê um uso associado à geração de recursos financeiros pela venda da energia produzida, poderia inclusive ser a forma para viabilizar economicamente a recuperação ambiental da área como um todo (a partir da reversão de parte dos dividendos para custeio das ações de intervenções para mitigar os impactos ambientais que afetam a área).

Esta alternativa de uso futuro da área inclusive converge em alguns aspectos necessários à recuperação do passivo ambiental, no sentido, de gerar recursos para custear as ações ambientais (desde a fase de implantação até a operação das atividades); ampliação da segurança necessária para minimizar riscos de vandalismo e furtos de equipamentos; e eliminação do risco de ocupação da área por invações para urbanização irregular (a exemplo do que é observado na atual ocupação de “Santa Luzia”).

A viabilização desta alternativa pode, inclusive, ser realizada sob as regras de Parcerias Público-Privadas - PPPs ou concessões a serem estabelecidas entre o Governo do Distrito Federal e empresas de geração e distribuição de energia elétrica.

Essas propostas são apresentadas preliminarmente de forma sucinta, contudo deverão ser detalhadas com: apresentação de resultados de projetos pilotos, proposição de localização de

baterias de poços, resultados de testes hidráulicos em poços de monitoramento (previamente instalados), tratamento de água subterrânea contaminada com aplicação de técnicas alternativas e demais aspectos intervenientes e necessários para esclarecimento das sugestões enumeradas. Além dos resultados dos projetos pilotos será realizada uma análise sobre a viabilidade econômica das ações preconizadas.

## **18. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste trabalho foi avaliado o diagnóstico ambiental da área do lixão e adjacências, incluindo parcela no Parque Nacional de Brasília e poligonal urbana da Cidade Estrutural. Alguns resultados encontrados indicam valores menores que os esperados, pois quando se observa a área em que os resíduos foram aterrados e que ainda recebe entulhos, restos vegetais de podas de árvores e outros resíduos seriam esperados impactos ambientais globais mais significativos. Os principais atenuadores dos problemas ambientais gerados pelo antigo lixão da Estrutural são devidos aos tipos de resíduos acumulados e à resiliência da natureza.

Para a determinação dos limites da contaminação das águas subterrâneas e das concentrações do contaminante foram integrados os resultados dos estudos geofísicos e hidroquímicos. Os dados hidroquímicos corroboram integralmente as informações geradas pelo método geofísico de tomografia elétrica (eletrorresistividade), sendo que os valores de resistividade elétrica inferiores a 1000  $\Omega/m$  representam algum tipo de contaminação em subsuperfície.

A instalação de 22 poços de monitoramento e utilização de poços existentes permitiu verificar a heterogeneidade da pluma de contaminação que apresenta condutividade elétrica maior que 10.000  $\mu S/cm$  na área principal do maciço e reduz progressivamente quando se afasta da região com a maior espessura de resíduos, alcançando valores da ordem de 50  $\mu S/cm$  nas zonas externas da pluma de contaminação.

Com relação à contaminação dos aquíferos freáticos o antigo lixão é responsável por afetar uma área de cerca de 600 hectares. Entretanto, a contaminação é apenas crítica sob o maciço de lixo e em suas adjacências, sofrendo rápida diluição a partir da infiltração das águas de recarga natural. A contaminação é maior em direção a oeste e sudoeste, uma vez que para este quadrante o gradiente é maior e a condutividade hidráulica do meio é da ordem de  $10^{-6}$  m/s em função da presença do aquífero do Subsistema S/A do Sistema Paranoá. Com relação aos quadrantes norte e sudeste adentrando a poligonal do Parque Nacional de Brasília a contaminação sofre forte atenuação em função dos seguintes fatores: i) menor gradiente natural que minimiza a velocidade de migração da pluma; ii) excelentes condições de recarga natural que permite anualmente entrada de grande volume de águas de chuvas com excelente qualidade

e iii) presença de ardósias e solos com textura muito argilosa (latossolos e gleissolos). Em direção ao sul, para o interior da área urbana a contaminação é minimizada, pois naquela região nunca foi disposto grandes volumes de resíduos, tendo sido operado um sistema com células rasas em que os resíduos eram compactados e aterrados (o que não permite produção de grandes volumes de chorume de grande densidade). Contudo, mesmo de baixa concentração a contaminação ocupa grande parte dos aquíferos freáticos situados na área urbana e estas águas não são adequadas para o abastecimento humano.

Os principais indicadores da contaminação oriunda da degradação dos resíduos incluem: amônia, DQO (demanda química de oxigênio), cloreto, sódio, cálcio e magnésio. Os metais pesados ocorrem sempre abaixo dos valores de intervenção e se mostram, na maior parte das análises, menores que os limites de detecção dos métodos analíticos.

Em função da dinâmica de evolução e migração das plumas de contaminação do aquífero freático a consequente poluição dos recursos hídricos superficiais é atenuada. A pluma de contaminação migra em direção às nascentes dos córregos Cabeceira do Valo e Acampamento e do Ribeirão Bananal. Os dados atuais indicam que a cabeceira do Ribeirão Bananal ainda está totalmente preservada da contaminação pela pluma de chorume, e as águas apresentam qualidade de água bruta potável (classificada como da Classe Especial). A nascente do córrego do Acampamento já apresenta os primeiros efeitos da chegada da pluma de contaminação, entretanto, nesta região a pluma alcança a zona de descarga com baixíssima concentração de contaminantes. A área em que a pluma migra para o interior da área do Parque Nacional é responsável pela diluição da pluma que pode baixar a concentração da contaminação da ordem de 1000 mg/L para valores da ordem de 20 mg/L de contaminantes.

A contaminação dos solos também apresenta um padrão inferior à expectativa, quando se observa as porções superficiais dos perfis pedogenéticos na região do lixão e adjacências. Quando se avalia as terras em aterros e áreas que tiveram decapeamento da superfície se observa grande volume de resíduos com destaque para fragmentos de vidro, restos de plástico, fragmentos de metais e acúmulo de matéria orgânica (coloração escura). Entretanto, quando se avalia os resultados de análises químicas de solos coletados próximo à superfície e a profundidades de até 60 cm se verifica restritos teores de metais biodisponíveis (cujas extrações para análise foi feita pelo método Mehlich 1). Dentre os principais indicadores de contaminação em áreas situadas no perímetro do lixão destacam-se cálcio, magnésio, ferro, cobre e chumbo. Quando se avalia o conteúdo total de metais (com extração por fusão total a elevada temperatura) o cenário não se modifica, sendo que apenas são observados maiores teores globais de metais e outras substâncias.

A contaminação dos solos não pode ser vista apenas pelos conteúdos anômalos de metais, e neste sentido, é possível confirmar a contaminação por efluentes de áreas urbanas não consolidadas (com percolação de efluentes não tratados), acúmulo de resíduos em áreas urbanas e periurbanas e por agrotóxicos e fertilizantes nas áreas de produção agrícola intensiva com uso de irrigação. A associação de todas as fontes de contaminação, incluindo as acumulações de resíduos, comumente observadas no interior da área urbana, resulta em uma ampla poligonal com problemas de qualidade dos solos.

Com relação à contaminação atmosférica, na região em estudo, são consideradas quatro fontes de poluição: i) gases de efeito estufa com destaque para metano; ii) particulados totais em suspensão; iii) fumaça de queimadas florestais e de resíduos sólidos e iv) gases de combustão de motores a diesel (com intenso trânsito na área do lixão e área urbana adjacente). Dados preliminares de medição em 70 drenos verticais de gases indicam valores médios de 38% de metano (em percentual por volume) e de 33% dióxido de carbono (Del'Rey, 2020).

O volume de rejeito acumulado na área do Lixão (incluindo o período em que operou como depósito de lixo urbano e na fase atual de recebimento de entulhos) é de 26.904.613,05 m<sup>3</sup>, o que resulta em uma massa de resíduos de 26.248.140 toneladas, considerando a densidade média de 0,9756 g/cm<sup>3</sup>. Essas estimativas foram baseadas em análises gravimétricas do rejeito acumulado e no Modelo Digital de Elevação do maciço de rejeitos.

O modelo conceitual de fluxo mostra que a pluma é atualmente gerada na porção central norte do maciço de resíduos e se espalha segundo o gradiente hidráulico para os quadrantes oeste/sudoeste e leste/sudeste. Como a oeste ocorrem saprolitos arenosos com maior condutividade hidráulica e o gradiente da carga hidráulica é maior, a maior parte do efluente com maior concentração migra para esta região. A análise da contaminação que migra em direção ao Parque Nacional de Brasília apresenta baixa densidade, em função da maior atenuação devida à menor velocidade média de fluxo (que resulta em maior tempo de contato do efluente com o reservatório) e ao maior volume de recarga natural (que resulta em maior diluição da pluma).

A caracterização geotécnica preliminar baseada na avaliação de ensaios de penetração no solo do tipo SPT mostra que as condições do terreno não são adequadas para a construção de edificações de maior porte. Os dados de SPT indicam índices muito baixos (menores que 7) até profundidades de 12 a 15 metros, o que deverá onerar os custos das fundações para eventual edificação de prédios de 3 ou 4 pavimentos.

Com relação às ações para mitigar os efeitos deletérios enumerados no presente diagnóstico, no mínimo, as seguintes ações deverão ser consideradas:

- Estabilização da migração da contaminação a partir do bombeamento, o que deverá manter cones de depressão em locais estratégicos para evitar a continuação de migração da pluma de

contaminação em direção às nascentes. Esta ação deve ser seguida por duas alternativas: tratamento do efluente recuperado da pluma e lançamento em curso d'água superficial ou reinjeção do efluente no maciço de resíduos;

- Revegetação da “faixa embargada” com uso de espécies arbóreas nativas, precedido da supressão da vegetação exótica secundária e reconformação do relevo. A proteção desta faixa área resultará em aumento de proteção da área do Parque Nacional de Brasília;
- Isolamento das zonas principais de geração do chorume com sua impermeabilização e direcionamento da água de drenagem superficial para infiltração nas zonas externas ao maciço de resíduos. Esta ação deverá minimizar a produção de chorume primário, o que em conjunto com o bombeamento facilitará a recuperação dos aquíferos contaminados;
- Cercamento eficiente de toda a área para evitar a presença de pessoas e animais domésticos (cavalos e cachorros) comumente observados no interior da URE e
- Manter, com maior eficiência, a queima dos gases produzidos de forma intermitente pela decomposição do maciço de resíduos, os quais são atualmente drenados pelos sistemas de manilhas preenchidas por blocos de rocha.

## **19. REFERÊNCIAS**

- Abbas, A.A., Jingsong, G., Ping, L.Z., Ya, P.Y., Al-Rekabi, W.S. 2009. Review on landfill leachate treatment. *Am. J. Appl. Sci.* 6:672-684.
- ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 1996. Ensaio de Permeabilidade em Solos: Orientações para sua Execução no Campo. Boletim nº 4, São Paulo.
- ABNT 2004. Norma Brasileira 10.007. Amostragem de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 25p.
- Abreu, F. 2001. Estudo e avaliação da contaminação das fontes do Parque Nacional de Brasília. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. (inédito). 123p.
- Abreu, F. 2001. Estudo e avaliação da contaminação das fontes do Parque Nacional de Brasília. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. (inédito). 123p.
- Almeida, E.A.P. 2011. Avaliação do potencial da espécie *Vetiveria Zizanioides* na fitorremediação de metais traço presentes em ambientes aquáticos. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 79p.
- Amaral, M.S. 2009. Tratamento físico-químico de lixiviado de aterro sanitário pré-tratado por processo biológico aeróbio, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. 98 p.
- Amore, L. 1994. Fundamentos para uso e proteção das águas subterrâneas do Distrito Federal. Escola de Engenharia de São Carlos, Dissertação de Mestrado.
- Anselmo, A.L.F. & Jones, C.M. 2005. Fitorremediação de solos contaminados - O estado da arte. XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. p. 5273-5280.
- Araújo, R.N.G. 1996. Estudos Geoquímicos da contaminação dos recursos hídricos e sua propagação nas adjacências do aterro de resíduos sólidos Jockey Club- DF. Dissertação de

- mestrado N° 107. 74p.
- Barbosa, L.Q. 2014. Remediação de Área Degradada por Resíduos Sólidos. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xi,99p.
- Barros, A.C.A. 2007. Estudos sobre o potencial do bambu *Guadua angustifolia* Kunz. para a fitorremediação dos metais pesados zinco e cádmio. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia. Universidade Federal de Alagoas.
- Barros, J.G.C. 1987. Geologia e hidrogeologia do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico do Distrito Federal. (GDF/CAESB) Brasília DF. P. 79-330.
- Barros, J.G.C. 1994. Caracterização geológica e hidrogeológica do Distrito Federal. In: Cerrado, caracterização, ocupação e perspectivas. Pinto, M.N. (Org.). Brasília. Editora UnB/SEMATEC. 2a ed. p. 265-283.
- Bouwer, H.; Rice, R.C. 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, 12(3):423-428.
- Brasil. 1981. Lei N° 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L6938compilada.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938compilada.htm)> Acesso em 13/12/2019
- Brasil. 2010. Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605/1998; e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)> Acesso em 13/12/2019
- Campos, J.E.G. & Freitas-Silva, F.H. 1998. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Parte I. Vol II. IEMA-SEMATEC/Universidade de Brasília. (Inédito). 66p.
- Campos, J.E.G. & Freitas-Silva, F.H. 1999. Arcabouço hidrogeológico do Distrito Federal. In: XII Simp. Geol. Centro-Oeste. Boletim de Resumos. Brasília. 113p.
- Campos, J.E.G. 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal: base para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Rev. Bras. Geogr.*, 34(1):41-48.
- Campos, J.E.G. 2007. Análise e delimitação da pluma de contaminação do Aterro do Jockey, Região da Vila Estrutural - DF. 11p.
- Campos, J.E.G. 2012. Geologia do Distrito Federal. In: Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. Volume II, Meio Físico. SEDUH / GDF.
- Campos, J.E.G.. & Tröger, U. 2000. Groundwater occurrence in hard rocks in the Federal District of Brasília: A Sustainable Supply?. In: Sililo, *Groundwater: Past Achievements and Future Challenges*, Proc. of XXX I.A.H. Congress. Cape Town, South Africa, Balkema, 109-113.
- Campos, J.E.G.; Santos L.M.; Seidel; A.M. 2006. Estudos geotécnicos preliminares e caracterização dos limites da área do antigo aterro na região da Vila Estrutural - DF. Água e Terra Consultoria e Planejamento Ambiental. Relatório Técnico. 70 p.
- Carmelo, A.C. 2002. Caracterização de aquíferos fraturados por integração de informações geológicas e geofísicas. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 153 p.
- Carneiro, G.A. 2002. Estudo da contaminação do lençol freático sob área do aterro de lixo do Jockey Club - DF e suas adjacências. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia,

- Universidade de Brasília. 123p.
- Cavalcanti, M.M. 2013. Monitoramento geoeletrico da pluma de contaminação gerada pelo Lixão da Estrutural. Dissertação de Mestrado em Geociências Aplicadas - Universidade de Brasília.
- CEMPRE, 2010. Compromisso Empresarial para Reciclagem. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado, ed. 3, São Paulo, Editora CEMPRE, 2010.
- CODEPLAN, 1972. Companhia do Desenvolvimento do Planalto Central. I Plano Diretor de Limpeza Urbana do Distrito Federal. Codeplan/GDF, Brasília, DF, 368p.
- Coimbra, A.R.S.R. 1987. Balanço hídrico preliminar do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico do Distrito Federal. (GDF/CAESB) Brasília DF. P. 50-78.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, CETESB. 2013. Padrões de qualidade do ar. <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, CETESB. 2016. Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea. <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-de-solo-agua-subterranea/>
- Conama 357. 2005. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Resolução de 17 de março de 2005.
- Conama 420. 2009. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópica. Resolução de 28 de dezembro de 2009.
- Conama 491. 2018. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente que dispõe sobre os padrões de qualidade do ar. Resolução de 19 de novembro de 2018.
- Conama 396. 2008. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Resolução de 03 de abril de 2008.
- Costa, A.M.; Alfaia, R.G.S.M., Campos, J.C. 2019. Landfill leachate treatment in Brazil - An overview. *Journal of Environmental Management* 232:110-116.
- Cunha, M. & Fernandes T. 2014. Fitorremediação de solos. Universidade Federal de Juiz de Fora. Química Analítica e Ambiental. 36p.
- DalCorso, G.; Fasani, E.; Manara, A.; Visioli, G.; Furini, A. 2019. Heavy Metal Pollutions: State of the Art and Innovation in Phytoremediation. *International Journal Molecular Science*, 20:1-17.
- Del'Rey, G.O. 2020. Metanogênese e variações isotópicas do carbono em ambiente de deposição de resíduos sólidos: o Aterro Controlado do Jockey Club de Brasília, DF. (Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências). 93p.
- Distrito Federal, 2002. Lei Complementar Nº 530 de 1º de fevereiro de 2002. Declara Zona Habitacional de Interesse Social e Público - ZHISP, o parcelamento de solo urbano denominado Vila Estrutural, localizado na Região Administrativa do Guará - RA X. Disponível em : <[http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/52357/Lei\\_Complementar\\_530\\_20\\_01\\_2002.html](http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/52357/Lei_Complementar_530_20_01_2002.html)> Acesso em 12/12/2019.
- Distrito Federal, 2004. Lei Nº 3.315 de 27 de janeiro de 2004. Cria a Região Administrativa do Setor Complementar de Indústrias e Abastecimento- RA XXV e as suas Subadministrações

- Regionais. < [http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/51257/Lei\\_3315\\_27\\_01\\_2004.html](http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/51257/Lei_3315_27_01_2004.html)>
- Distrito Federal, Decreto Nº 37.505 de 22 de julho de 2016. Define as competências do Escritório de Projetos Especiais da Governadoria do Distrito Federal (EPE). Disponível em: <[http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/5fe1ec0f170343c192d128e28ad1f876/exec\\_dec\\_375\\_05\\_2016.html](http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/5fe1ec0f170343c192d128e28ad1f876/exec_dec_375_05_2016.html)> Acesso em 12/12/2019.
- Distrito Federal. 2015. Decreto Nº 36.437/2015. Institui o Grupo de Trabalho para elaborar e implementar o plano de intervenção de atividades de ordenamento do Lixão do Jockey Club, visando dar o correto tratamento e destinação dos resíduos sólidos urbanos, provenientes dos serviços contratados pelo Serviço de Limpeza Urbana- SLU.
- Earth Manual. 1974. A Water Resources Technical Publication - A guide to the use of soils as foundations and as construction materials for hydraulic structures, 2 ed. Washington D.C, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 810 p.
- Elis, V.R. 1998. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 264p.
- Fetter, C.W. 2004. Applied Hydrogeology. Fourth Edition. MacMillan College Publ. Co. New York. 619 pp.
- Fetter, C.W.; Boving, T.; Kremer, D. 2018. Contaminant Hydrogeology. Third Edition. Waveland Press Inc. Long Groove, Illinois. 647p.
- Fiori, J.P.O. 2010. Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, Dissertação de Mestrado, 107p.
- Fitts, C.R. 2002. Groundwater Science. Academic press.
- Forgie, D.J.L. 1988. Selection of the most appropriate leachate treatment methods. Water Pollut. Res. J. Can. 23:308-355.
- Franchi, E.; Rolli, E.; Marasco R.; Agazzi, G.; Borin, S.; Cosmina. P.; Pedron, F.; Rosellini, I.; Barbafieri. M.; Petruzzelli, G. 2017. Phytoremediation of a multi contaminated soil: mercury and arsenic phytoextraction assisted by mobilizing agent and plant growth promoting bacteria. J Soils Sediments 17:1224-1236.
- Franco, H.A. 1996. Geofísica e Química Aquática Aplicados ao Estudo da Contaminação de Recursos Hídricos Subterrâneos no Aterro do Jockey Club, Brasília - DF. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. (inédito). 96p.
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, New York. 604pp.
- Freitas Silva, F.H. & Campos, J.E.G. 1998. Geologia do Distrito Federal. *In*: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Parte I. IEMA-SEMATEC/Universidade de Brasília. 86 p. (Relatório Inédito).
- Gallas, J.D.F. 2000. Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 258p.
- Guedes, V.J.C.B. 2019. Caracterização da assinatura sísmica e geoeletrica do Aterro Jockey Clube de Brasília. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geofísica. Universidade de Brasília. 77p.
- IBGE, 2019. <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/df/brasil.html>> Acesso 10/12/2019.
- IBRAM, Instituto Brasília Ambiental. Secretaria do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente.

2019. Plano de Manejo das Áreas de Proteção da Vila Estrutural- Plano de Uso do Parque Urbano da Estrutural. Disponível em: <<http://www.ibram.df.gov.br/wp-content/uploads/2019/05/Plano-de-Manejo-Parque-Urbano-Estrutural.pdf>> Acesso em 11/12/2019
- IBRAM, Instituto Brasília Ambiental. Secretaria do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. 2008. Relatório do Monitoramento da Qualidade do ar no Distrito Federal. GDF. 35p.
- Junqueira, F.F. 2000. Análise do Comportamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Sistemas Dreno-Filtrantes em diferentes escalas, com referência ao Aterro do Jockey Club - DF, 2000. Tese de doutorado em Geotecnia. Universidade de Brasília, FT, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. xvi, 288 p. Brasília.
- Lasat, M.M. 2000. Phytoextraction of Metals from Contaminated Soil: A Review of Plant/Soil/Metal Interaction and Assessment of Pertinent Agronomic Issues. *Journal of Hazardous Substance Research* 2(5):1-126.
- Loke, M.H., 2004. Res2Dinv versão 3.54 for Windows 98/Me/2000/NT/XP. Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the least-squares method. Software Manual. 133 p. Disponível em: <http://www.geoelectrical.com>
- Lousada, E.O. & Campos, J.E.G. 2005. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(3):407-414.
- Lousada, E.O. 2005. Estudos hidrogeológicos e isotópicos no Distrito Federal: Modelos conceituais de fluxo. Brasília-DF. 124p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- Martins, C.D.C. 2015. Fitorremediação de solo oriundo de área industrial multicontaminado com metais pesados e hidrocarbonetos do petróleo por girassol (*Helianthus annuus*). Tese de Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 187p.
- Massai, L.R. & Massai, L.R.D. 2005 Oxidação Térmica do líquido percolado de aterros sanitários. XXXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Campina Grande, PB.
- Nalon, L. 2008. Potencial do eucalipto na fitorremediação de um solo contaminado por chumbo. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. 94p.
- Novaes Pinto, M. & Carneiro, P.J.R. 1984. Análise preliminar das feições geomorfológicas do Distrito Federal, in: *Anais IV Congresso Brasileiro de Geógrafos*, São Paulo, 2: 190-213.
- Novaes Pinto, M. 1986. Superfícies de Aplanamento na Bacia do Rio São Bartolomeu, Distrito Federal/Goiás. *Revista Brasileira de Geografia*, IBGE, Rio de Janeiro, 48 (3), p. 237-257.
- Novaes Pinto, M. 1994a. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (org). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília. Editora UnB. 2a ed.. p. 285-320.
- Novaes Pinto, M. 1994b. Paisagens do cerrado no Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (org). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília. Editora UnB. 2a ed.. p. 511-542.
- Pede, M.A.Z. 2004. Caracterização da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na região metropolitana de São Paulo. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Rio Claro, Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Dissertação de Mestrado, 95p.
- Pereira, J.F.; Pastore, E.L. Souza, N.M.; Silveira, R.B. 1997. Caracterização Geológico-Geotécnica da área de deposição de resíduos sólidos no Aterro do Jockey Club no Distrito

- Federal. Volumes 1 a 4. Universidade de Brasília - FINATEC - SLU. Brasília DF.
- Pires, J.C.A. 2002. Projeto de Tratamento do Chorume Produzido no Aterro Metropolitano de Gramacho através de “Wetland”. FEN/UERJ, Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.
- Prasad, M.N.V. 2004. Phytoremediation of metals in the environment for sustainable development. *Prod. Indian Natural Science Academy* B70(1):71-98.
- Raghab, S.M., El Meguid, A.M.A., Hegazi, H.A., 2013. Treatment of leachate from municipal solid waste landfill. *HBCR J.* 9:187-192.
- Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P. 2008. Landfill leachate, treatment: review and opportunity. *J. Hazard. Mater.* 150:468-493.
- Santos, P. C. V.1996. Estudos da contaminação de água subterrânea por percolado de aterro de resíduos sólidos- caso Jockey Club- DF. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-32ª/96, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 135 p.
- Silva, J.F. 2012. Prospecção de plantas fitorremediadoras em solos contaminados por metais pesados. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Amazonas. 91p.
- Silva, T.J.; Hansted, F.; Tonello P.S.; Gouveia, D. 2019. Fitorremediação de solos contaminado com metais: panorama atual e perspectivas de uso de espécies florestais. *Revista Virtual de Química*,11(1):1-17.
- SLU, 2015. Serviço de Limpeza Urbana. Plano de Intervenção do Lixão do Jóquei. Disponível em:< [http://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/12/plano\\_intervencao.pdf](http://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/12/plano_intervencao.pdf)> Acesso em 13/12/2019.
- Souza, L.A.; Piotto, F.A.; Nogueiro, R.C.; Azevedo, R.A. 2013. Use of non-hyperaccumulator plant species for the phytoextraction of heavy metals using chelating agents. *Scientia Agricola*, 70(4):290-295.
- Souza, M.T. 2001. Fundamentos para Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Distrito Federal. Brasília. (Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências). 94p.
- Stollberg, R., Weib, H. 2011. Municipal waste disposal Lixão do Jóquei, Brasília, Distrito Federal do Brasil: hydrochemical analysis. Status Report I. Project: IWAS Águas DF, Sub-project 3 Site investigation, groundwater monitoring, and “Hydrological cycle”. HELMOLTZ (Centre for Environmental Research - UFZ). 38p.
- Tavares, S.R.L.; Oliveira S.A.; Salgado C.M. 2013. Avaliação de espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. *Holos*, 29(5):80-97.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.
- Vale, 2018. Vale é pioneira em uso de tecnologia de tratamento de efluentes no Brasil. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-e-pioneira-em-uso-de-tecnologia-de-tratamento-de-efluentes-no-brasil.aspx> 2018>.
- Ward, O.S.H. 1990. Resistivity and Induced Polarization Methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics, Volume 1: Review and Tutorial*. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK, p. 147-189.

## **20. EQUIPE TÉCNICA**

### **Responsável Técnico**

José Eloi Guimarães Campos  
Geólogo, Coordenador do Projeto

### **Membros da Equipe do Projeto**

Welitom Rodrigues Borges  
Geólogo, Estudo Geofísico

Rejane Ennes Cicerelli  
Engenheira Cartógrafa, Cartografia Digital

Jeremié Garnier  
Geólogo, Hidroquímica e Química dos Solos

Julio Henrichs de Azevedo  
Engenheiro Agrônomo, Massa Foliar e Química dos Solos

### **Colaboradores**

Lucas Santos Batista Teles  
Geólogo, Estudo Geofísico, Construção dos Poços e Geoprocessamento

Drielly Souza Rodrigues  
Geóloga, Amostragem de Água e Solos

André Walczuk Gomes  
Geólogo, Estudo Geofísico e Construção dos Poços

Flavio Henrique Freitas e Silva  
Geólogo, Estudo Geofísico e Amostragem dos Solos

Cristiane Moura de Oliveira  
Geóloga, Estudo Geofísico e Amostragem dos Solos

Brasília, Março de 2021.