
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

DRUSKO DA CUNHA COVCEVICH

**AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA
POR MEIO DA INGESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA
CONTENDO METAIS NAS ADJACÊNCIAS DO ANTIGO
ATERRO BENÓPOLIS – PORTO ALEGRE**

Porto Alegre

Julho 2015

DRUSKO DA CUNHA COVCEVICH

**AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA POR MEIO DA INGESTÃO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA CONTENDO METAIS NAS ADJACÊNCIAS DO ANTIGO
ATERRO BENÓPOLIS – PORTO ALEGRE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Pedro Antonio Roche Reginato

Porto Alegre

Julho 2015

DRUSKO DA CUNHA COVCEVICH

AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA POR MEIO DA INGESTÃO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA CONTENDO METAIS NAS ADJACÊNCIAS DO ANTIGO
ATERRO BENÓPOLIS – PORTO ALEGRE

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **03/07/2015** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Eng. Sanitarista Márcio José Oliveira Frangipani – Divisão de Assessoramento Técnico –
Unidade de Assessoramento Ambiental – Ministério Público/RS

.....
Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde – DHH/IPH/UFRGS

.....
Eng. Ambiental Débora Karine Koller – Mestranda do programa de pós-graduação em
Recursos Hídricos e Saneamento – IPH/UFRGS

Conceito:.....

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao orientador desse trabalho, Prof. Pedro Antônio Roehé Reginato, pela compreensão, constante auxílio e solicitude em responder aos questionamentos que surgiram durante o desenvolvimento dos estudos. Sem seus comentários, tecidos sempre de forma amigável, e pertinentes revisões, esse trabalho não teria sido possível.

Agradeço à minha família, tanto pelo incentivo e apoio aos meus estudos, como por fornecer-me uma sólida base educacional e ética.

Agradeço aos professores de excelência da UFRGS, que me conduziram a uma maior compreensão das complexas e diversas interações que ocorrem na área ambiental.

Agradeço ao Biólogo José Francisco Furtado (DEMHAB), que muito gentilmente auxiliou nos trâmites de acesso a material inestimável para realização desse trabalho.

Agradeço à Divisão de Química da FEPAM (especialmente à Eng. Química Maria Lúcia Kolowski Rodrigues, cujo apoio e constantes ensinamentos foram – e continuam sendo – extremamente valiosos), onde fiz meu primeiro estágio e entrei em contato com, entre tantos outros, os conceitos de análise de risco.

Agradeço à Divisão de Assessoramento Técnico do Ministério Público/RS (especialmente ao Eng. Sanitarista Márcio José Oliveira Frangipani) por toda a instrução e pela valiosa experiência que obtive durante meu tempo de estágio na instituição.

Agradeço aos colegas e amigos que fiz ao longo de toda a Engenharia Ambiental, que tornaram não apenas os momentos dentro de sala de aula mais prazerosos ao demonstrar o verdadeiro valor de coleguismo, mas também compartilhando tantas ocasiões festivas, viagens e momentos memoráveis.

“A realidade é aquilo que,
quando você para de acreditar, não desaparece“

Philip K. Dick

RESUMO

COVCEVICH, D.C. Avaliação de risco à saúde humana por meio da ingestão de água subterrânea contendo metais nas adjacências do antigo Aterro Benópolis – Porto Alegre. 2015. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este estudo avalia o risco não carcinogênico existente à saúde de uma população residente nas adjacências do atualmente desativado Aterro Benópolis, no bairro Humaitá, município de Porto Alegre/RS, supondo a eventual ingestão de água subterrânea. Primeiramente foi efetuada a caracterização hidrogeológica da região, realizada com base na interpretação de dados geológicos e hidrogeológicos obtidos em sua maior parte junto ao Departamento Municipal de Habitação (DEMHAB). Nesses documentos, constam levantamentos diversos (como perfis de solo, ensaios hidrogeológicos e laudos de análises químicas de água subterrânea) de nove loteamentos na região de interesse (totalizando 158 poços de monitoramento), como segue: 1) Loteamento Liberdade; 2) Loteamento Frederico Mentz, n.º 303; 3) Loteamento Frederico Mentz, n.º 521; 4) Casa de Passagem; 5) Loteamento 14; 6) Loteamento Vila Dona Teodora; 7) Cooperativa Santo Antônio; 8) Vila dos Ferroviários e 9) Residencial Barcelona I e II. Posteriormente, foi realizada a análise dos dados físico químicos, através da comparação dos teores das substâncias químicas avaliadas com os valores preconizados pela legislação vigente. Para o cálculo do risco, foram considerados os teores dos metais que ultrapassaram os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420 (Al, Ba, B, Co, Fe, Mn, Pb, Ni, Zn) em 144 poços de monitoramento (91% do total), os quais captam água subterrânea de aquífero livre. Foi aplicada a metodologia de avaliação de risco à saúde humana da USEPA, que é dividida em quatro etapas: coleta e avaliação dos dados, avaliação toxicológica, avaliação da exposição e quantificação do risco. Há indícios de que há na região uma composição litológica responsável pelos altos teores metálicos encontrados, não se podendo descartar a influência das atividades humanas ali presentes (pequenas indústrias, disposição irregular de resíduos). Ao avaliar os resultados do cálculo de risco, constata-se que 24% dos poços analisados exibiram Índices de Risco (HI) mais elevados do que a unidade ($HI > 1$), considerando-se receptores adultos. A maioria dos loteamentos possui fluxos preferenciais de água subterrânea com direção ao aterro. Uma das duas exceções, a Vila dos Ferroviários, contígua ao antigo aterro, apresentou valores significativamente mais elevados de risco do que o restante. Assim, há indicação de que o Aterro Benópolis exerce potencial influência sobre a Vila dos Ferroviários. Ressalta-se que a água subterrânea e a ingestão oral são apenas um caminho e uma rota de exposição aos metais selecionados para estudo e que também existem incertezas associadas ao cálculo do risco. Nesse sentido, sugerem-se estudos complementares, avaliando aquíferos mais profundos, bem como outros caminhos de exposição, como água superficial e solo.

Palavras-chave: água subterrânea, contaminação, metais, análise de risco.

ABSTRACT

COVCEVICH, D.C. Human health risk assessment for metals contaminated groundwater in the former Benópolis Landfill surroundings - Porto Alegre/RS, Brazil. 2015. 92 pages. Environmental Engineering Graduation Work - Institute of Hydraulic Research. Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

This study assesses the existing non cancer health risk regarding a population living in the vicinity of the currently disabled Benópolis Landfill at the municipality of Porto Alegre/RS, assuming the potential ingestion of groundwater. Firstly, a hydrogeological characterization of the region was conducted, carried out based on interpretation of geological and hydrogeological data made available, for the most part, by the Municipal Department of Housing (DEM HAB). These documents contain various surveys (such as soil profiles, hydrogeological studies and groundwater chemical analysis reports) on nine land lots in the region of interest (totaling 158 monitoring wells), as follows: 1) Loteamento Liberdade; 2) Loteamento Frederico Mentz, No. 303; 3) Loteamento Frederico Mentz, No. 521; 4) Casa de Passagem; 5) Loteamento 14; 6) Loteamento Vila Dona Teodora; 7) Cooperativa Santo Antônio; 8) Vila dos Ferroviários and 9) Barcelona I and II apartment blocks. Subsequently, the analysis of physical-chemical data was performed by comparing the levels of the evaluated chemicals with the values recommended by law. To calculate the risk, only the content of metals that exceeded the limits established by CONAMA Resolution 420 (Al, Ba, B, Co, Fe, Mn, Pb, Ni, Zn) in 144 monitoring wells (91% of total) were taken into account. The USEPA human health risk assessment methodology was used, which is divided into four steps: collection and evaluation of data, toxicological assessment, exposure assessment and risk quantification. There are indications that the regional lithological composition might be responsible for the high metal levels found, although one cannot rule out the influence of local human activities (small industries, irregular waste disposal). When evaluating the results of the risk calculation, it appears that approximately 24% of the wells exhibited elevated Risk Indexes ($HI > 1$), considering residential adult exposures. The majority of land lots exhibit groundwater flow towards the former landfill. One of the two exceptions, Vila dos Ferroviários, adjacent to the former landfill, presented significantly higher risk than the rest. Thus, there is indication that the Benópolis Landfill exerts potential influence on the Vila dos Ferroviários land lot. It is noteworthy, however, that groundwater and oral intake are just a path and a route of exposure to metals selected for this study and that there are also uncertainties associated with the calculation of risk. In this sense, further studies, evaluating deeper aquifers, as well as other exposure pathways, such as surface water and soil, for example.

Keywords: groundwater, contamination, metals, risk assessment.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Diferentes aquíferos, de acordo com os tipos de vazios presentes..... | 17 |
| Figura 2 – Diferentes aquíferos, de acordo com sua posição e estrutura..... | 18 |
| Figura 3 – Contaminação das águas subterrâneas por diversas fontes..... | 21 |
| Figura 4 – Variação das características do lixiviado de aterro de resíduos..... | 26 |
| Figura 5 – Composição percentual dos gases presentes em aterros de resíduos..... | 26 |
| Figura 6 – Etapas de avaliação de risco à saúde humana, como preconizado pela USEPA..... | 28 |
| Figura 7 – Localização do Aterro Benópolis..... | 34 |
| Figura 8 – Representação da área pertencente ao antigo Aterro Benópolis..... | 35 |
| Figura 9 – Vista aérea da região com aterramento de dez hectares..... | 36 |
| Figura 10 – Mapa geológico do município de Porto Alegre, com o Aterro Benópolis destacado em vermelho..... | 38 |
| Figura 11 – Mapa de solos do município de Porto Alegre, com o Aterro Benópolis destacado em vermelho..... | 39 |
| Figura 12 – Mapa de sistemas aquíferos do município de Porto Alegre, com o Aterro Benópolis destacado em vermelho..... | 40 |
| Figura 13 – Antigo Aterro Benópolis (em vermelho) e área visitada (em roxo), exibindo os loteamentos estudados..... | 42 |
| Figura 14 – Modelo hidrogeológico conceitual da área estudada, de acordo com os estudos avaliados..... | 48 |
| Figura 15- Mapa do Loteamento Liberdade, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d'água subterrânea local..... | 60 |
| Figura 16 – Mapa do loteamento Frederico Mentz n. 303, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d'água subterrânea local..... | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 17 – Mapa do loteamento Frederico Mentz n. 521, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d’água subterrânea local..... | 64 |
| Figura 18 – Mapa da Casa de Passagem, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d’água subterrânea local..... | 66 |
| Figura 19 – Mapa do Loteamento 14, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d’água subterrânea local..... | 68 |
| Figura 20 – Mapa do Loteamento Vila Dona Teodora, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d’água subterrânea local..... | 70 |
| Figura 21– Mapa da Cooperativa Santo Antônio, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d’água subterrânea local..... | 72 |
| Figura 22 – Mapa da Vila dos Ferroviários, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d’água subterrânea local..... | 74 |
| Figura 23 – Mapa do Residencial Barcelona I e II, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d’água subterrânea local..... | 76 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|--------|
| Quadro 1 – Parâmetros de exposição sugeridos, considerando a rota de ingestão d'água..... | 31, 44 |
| Quadro 2 – Doses de referência (RfD) para os elementos estudados..... | 46 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – VMP e VI para os parâmetros de interesse..... | 22 |
| Tabela 2 – Amostras do Loteamento Liberdade apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420..... | 52 |
| Tabela 3 – Amostras do Loteamento Frederico Mentz n.º 303 apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420..... | 53 |
| Tabela 4 – Amostras do Loteamento Frederico Mentz n.º 521 apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420..... | 54 |
| Tabela 5 – Amostras da Casa de Passagem apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420..... | 55 |
| Tabela 6 – Amostras do Loteamento 14 apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420..... | 56 |
| Tabela 7 – Amostras do Loteamento Vila Dona Teodora apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420..... | 57 |
| Tabela 8 – Amostras da Cooperativa Santo Antônio apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420..... | 58 |
| Tabela 9 – Amostras da Vila dos Ferroviários apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420..... | 59 |
| Tabela 10 – Amostras do Residencial Barcelona I e II apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420..... | 60 |
| Tabela 11 – Cálculo referente à análise de risco para o Loteamento Liberdade, exibindo os <i>Hazard Quotient</i> (HQ) para cada elemento em cada poço, e os <i>Hazard Index</i> (HI) para cada poço..... | 61 |
| Tabela 12 – Cálculo referente à análise de risco para o Loteamento Frederico Mentz n. 303, exibindo os <i>Hazard Quotient</i> (HQ) para cada elemento em cada poço, e os <i>Hazard Index</i> (HI) para cada poço..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Tabela 13 – Cálculo referente à análise de risco para o Loteamento Frederico Mentz n. 521, exibindo os <i>Hazard Quotient</i> (HQ) para cada elemento em cada poço, e os <i>Hazard Index</i> (HI) para cada poço..... | 65 |
| Tabela 14 – Cálculo referente à análise de risco para a Casa de Passagem, exibindo os <i>Hazard Quotient</i> (HQ) para cada elemento em cada poço, e os <i>Hazard Index</i> (HI) para cada poço..... | 67 |
| Tabela 15 – Cálculo referente à análise de risco para o Loteamento 14, exibindo os <i>Hazard Quotient</i> (HQ) para cada elemento em cada poço, e os <i>Hazard Index</i> (HI) para cada poço..... | 69 |
| Tabela 16 – Cálculo referente à análise de risco para o Loteamento Vila Dona Teodora, exibindo os <i>Hazard Quotient</i> (HQ) para cada elemento em cada poço, e os <i>Hazard Index</i> (HI) para cada poço..... | 71 |
| Tabela 17 – Cálculo referente à análise de risco para a Cooperativa Santo Antônio, exibindo os <i>Hazard Quotient</i> (HQ) para cada elemento em cada poço, e os <i>Hazard Index</i> (HI) para cada poço..... | 73 |
| Tabela 18 – Cálculo referente à análise de risco para a Vila dos Ferroviários, exibindo os <i>Hazard Quotient</i> (HQ) para cada elemento em cada poço, e os <i>Hazard Index</i> (HI) para cada poço..... | 75 |
| Tabela 19 – Cálculo referente à análise de risco para o Residencial Barcelona I e II, exibindo os <i>Hazard Quotient</i> (HQ) para cada elemento em cada poço, e os <i>Hazard Index</i> (HI) para cada poço..... | 77 |

LISTA DE SIGLAS

ABAS: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas

ATSDR : Agency for Toxic Substances and Disease Registry

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DEMHAB: Departamento Municipal de Habitação

DRH: Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria das Obras Públicas, Saneamento e Habitação

FEPAM: Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IRIS: Integrated Risk Information System

MMA: Ministério do Meio Ambiente

SIAGAS: Sistema de Informação de Águas Subterrâneas

SRHU: Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USEPA: United States Environmental Protection Agency

LISTA DE SÍMBOLOS

I = Ingresso por ingestão de água contaminada (mg/kg.dia)

C = Concentração do composto químico na água (mg/L)

IR = Taxa de ingestão de água (L/dia)

EF = Frequência da exposição (dias/ano)

ED = Duração média da exposição (ano)

BW = Peso corpóreo médio do indivíduo durante a exposição (kg)

AT_n = Período de exposição médio durante a exposição a substâncias não carcinogênicas
(dias)

AT_c = Período de exposição médio durante a exposição a substâncias carcinogênicas (dias)

I_n = Dose de ingresso para o cenário de exposição “n” (mg/kg.dia)

SF = Slope Factor ou Fator de potencial carcinogênico (mg/kg.dia)

HQ = Perigo não carcinogênico

RfD_i = Dose de referência para a via de ingresso “i” (mg/kg.dia)

Risco_{ET} = Risco carcinogênico para exposição total

Risco_{caminhoi} = Risco carcinogênico estimado para cada caminho de exposição

HI_{ET} = Índice de perigo não carcinogênico para exposição Total

HI_{caminhoi} = Índice de perigo não carcinogênico para cada caminho de exposição “i”

VMP = Valores Máximos Permitidos

VI = Valores de Investigação

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1.1. OBJETIVO GERAL..... | 18 |
| 1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 18 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA E LEGISLAÇÃO..... | 17 |
| 2.2. CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS..... | 21 |
| 2.2.1. CONTAMINAÇÃO POR ATERROS SANITÁRIOS..... | 23 |
| 2.3. AVALIAÇÃO DO RISCO À SAÚDE HUMANA..... | 27 |
| 2.4. O ATERRO BENÓPOLIS..... | 33 |
| 2.4.1. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO ATERRO ESTUDADO | 39 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 43 |
| 3.1. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA | 43 |
| 3.2. AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA..... | 43 |
| 3.3. ANÁLISE DE RISCO NÃO-CARCINOGENICO À SAÚDE HUMANA | 45 |
| 4. RESULTADOS | 49 |
| 4.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA..... | 49 |
| 4.2. AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA..... | 50 |
| 4.2.1. Loteamento Liberdade | 51 |
| 4.2.2. Loteamento Frederico Mentz n.º 303 | 52 |
| 4.2.3. Loteamento Frederico Mentz n.º 521 | 53 |
| 4.2.4. Casa de Passagem..... | 54 |
| 4.2.5. Loteamento 14..... | 55 |
| 4.2.6. Loteamento Vila Dona Teodora..... | 57 |
| 4.2.7. Cooperativa Santo Antônio..... | 58 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 4.2.8. | Vila dos Ferroviários | 59 |
| 4.2.9. | Residencial Barcelona I e II..... | 59 |
| 4.2.10. | Captações na área estudada..... | 60 |
| 4.3. | AVALIAÇÃO DO RISCO À SAÚDE HUMANA..... | 61 |
| 4.3.1. | Loteamento Liberdade..... | 61 |
| 4.3.2. | Loteamento Frederico Mentz n.º 303 | 63 |
| 4.3.3. | Loteamento Frederico Mentz n.º 521 | 65 |
| 4.3.4. | Casa de Passagem..... | 67 |
| 4.3.5. | Loteamento 14..... | 69 |
| 4.3.6. | Loteamento Vila Dona Teodora..... | 71 |
| 4.3.7. | Cooperativa Santo Antônio..... | 73 |
| 4.3.8. | Vila dos Ferroviários | 75 |
| 4.3.9. | Residencial Barcelona I e II..... | 77 |
| 4.3.10. | Análise dos resultados | 79 |
| 5. | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 80 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 83 |
| | APÊNDICE A - Registros Fotográficos..... | 89 |

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda hídrica, alavancada pelo constante incremento populacional e industrial, torna os mananciais de água subterrânea cada vez mais valorizados. Tais recursos mostram diversas vantagens em relação aos corpos d'água superficiais, já que se encontram melhor protegidos contra poluição, são abundantes e geralmente possuem qualidade superior, tornando-os de importância estratégica para o desenvolvimento da sociedade. No Brasil, aproximadamente 76% dos municípios realizam captação de água subterrânea para seu abastecimento (IBGE, 2008). O *status* de recurso crítico traz consigo a necessidade premente de preservação e controle adequado, a fim de possibilitar sua exploração pela presente e próximas gerações, com níveis de qualidade compatíveis com as necessidades das populações abastecidas.

Atualmente, nota-se conflito entre a necessidade de proteção da água subterrânea e a inevitável geração de poluição oriunda das atividades humanas. Nesse escopo é relevante a contaminação dessa classe de recursos hídricos por aterros de resíduos sólidos (sejam eles não controlados ou desativados), que constituem passivos ambientais de grande vulto pelo potencial de degradação atmosférica, de solo e de corpos d'água. A referida contaminação se dá através da percolação de efluente de alto poder poluente oriundo da degradação de matéria orgânica (chorume), rico também em poluentes inorgânicos e de composição extremamente variável (SANTOS, 2004).

Sobrepondo-se a relevância dos recursos hídricos subterrâneos no tocante ao abastecimento e sua eventual contaminação por efluentes de aterros sanitários, obtém-se um risco potencial à saúde humana, que deve ser quantificado para garantir a segurança da população que vier a fazer uso de tais recursos.

O presente estudo busca avaliar a contaminação da água subterrânea e estimar o risco oferecido à saúde humana através de um cenário hipotético de ingestão desse recurso hídrico, considerando como área de estudo uma região onde já houve um aterro sanitário e que foi contaminada pelo mesmo. Assim, com esse estudo foi possível identificar os riscos que podem ser gerados à saúde e que estariam associados a uma potencial utilização da água subterrânea para consumo.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente estudo é avaliar a contaminação da água subterrânea e o risco a saúde humana de uma região previamente ocupada por um aterro de resíduos sólidos, localizada no município de Porto Alegre.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos consistem de:

- Caracterizar a hidrogeologia da área previamente ocupada pelo aterro de resíduos sólidos;
- Avaliar a contaminação da água subterrânea na área de influência do aterro de resíduos sólidos;
- Avaliar o risco não-carcinogênico à saúde humana através de um cenário hipotético de ingestão de água subterrânea contaminada com metais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA E LEGISLAÇÃO

Nas últimas décadas tem-se tornado cada vez mais evidente que a água subterrânea constitui um dos recursos naturais mais valiosos. Utilizada como manancial de abastecimento, possui muitas vantagens em relação às águas superficiais: usualmente é de melhor qualidade, é melhor protegida contra potencial poluição (incluindo infecção), é menos suscetível a flutuações sazonais de disponibilidade, e é mais uniformemente distribuída em grandes regiões – sendo que muitas vezes pode ser encontrada em abundância mesmo onde não se encontrem corpos d'água superficiais (ZEKTSER e EVERETT, 2004).

As águas subterrâneas encontram-se contidas em formações geológicas chamadas aquíferos, que, de acordo com a Resolução CONAMA 396 (2008), são definidas como:

“corpo hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos”.

Tais formações geológicas, conforme documento da Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano do Ministério do Meio Ambiente – SRHU/MMA (2007), podem ser classificados de acordo com os tipos de vazios que contêm (Figura 1):

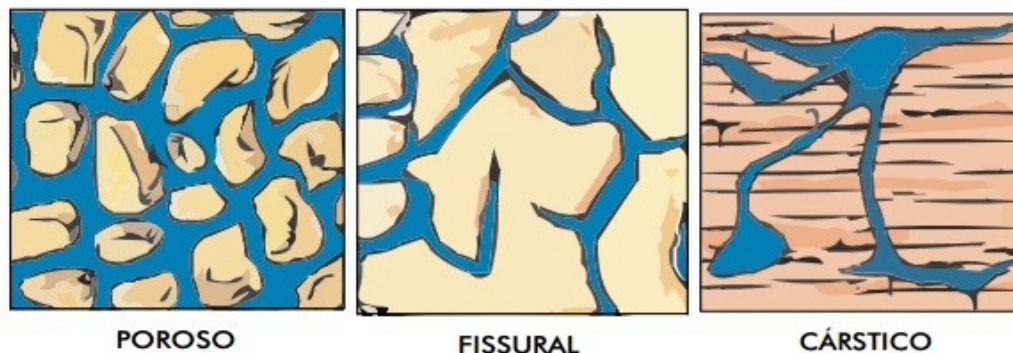


Figura 1 – Diferentes aquíferos, de acordo com os tipos de vazios presentes

Fonte: SRHU/MMA (2007 – pág. 12)

- I. Poroso – com água armazenada nos espaços entre os grãos depositados durante a formação da rocha (é o caso das rochas sedimentares, como os arenitos do

Sistema Aquífero Guarani). Os aquíferos porosos funcionam com esponjas onde os espaços vazios são ocupados por água;

- II. Fissural (cristalino/embasamento cristalino) – a água circula pelas fissuras resultantes do fraturamento das rochas relativamente impermeáveis (ígneas ou metamórficas), como as rochas vulcânicas que estão sobre arenitos do Guarani;
- III. Cársticos – São os aquíferos formados em rochas carbonáticas (sedimentares, ígneas ou metamórficas). Constituem um tipo peculiar de aquífero fraturado, onde as fraturas, devido à dissolução do carbonato pela água, podem atingir aberturas muito grandes, criando, neste caso, verdadeiros rios subterrâneos.

Pode-se também classificar os aquíferos segundo a sua posição e estrutura (Figura 2):

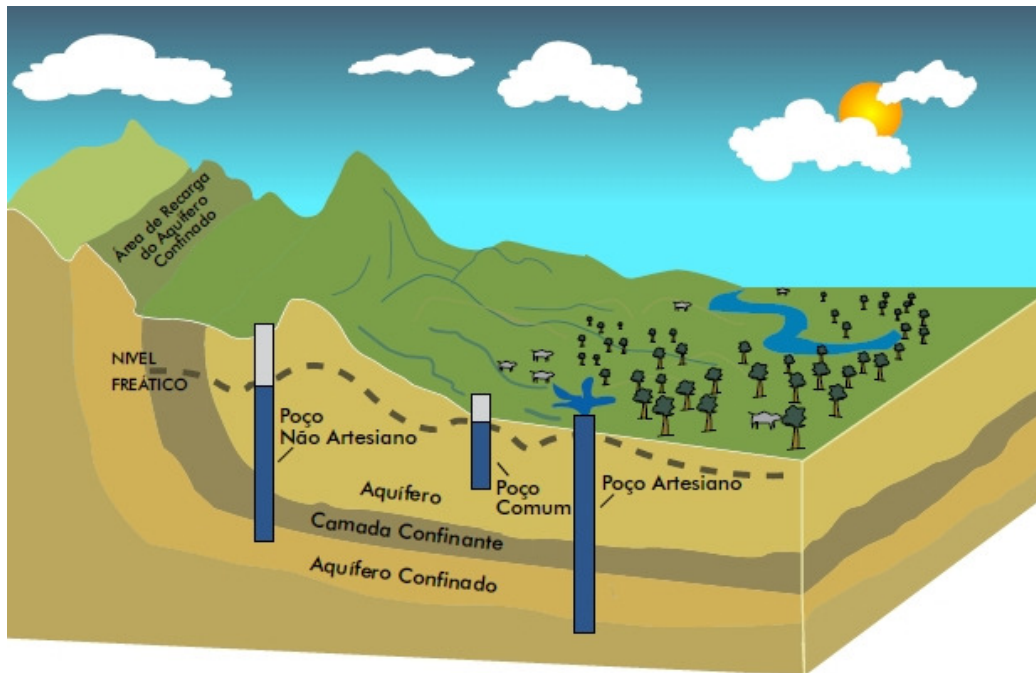


Figura 2 – Diferentes aquíferos, de acordo com sua posição e estrutura

Fonte: SRHU/MMA (2007 – pág. 13)

- I. Livres – aquíferos que se localizam mais próximos à superfície, portanto com a recarga no próprio local (em toda a extensão da formação);
- II. Confinados – presença de uma camada de menor permeabilidade (confinante) que submete as águas a uma pressão superior à atmosférica, caso da porção central do Sistema Aquífero Guarani. Nos aquíferos confinados os poços tubulares profundos podem apresentar artesianismo, isto é, a água jorra do poço

sem necessidade de equipamento de bombeamento. O seu reabastecimento ou recarga, através das chuvas, dá-se somente nos locais onde a formação aflora à superfície;

III. Semi-confinados – situação intermediária entre os dois.

No Brasil, a proteção dada a esse importante recurso natural é regulamentada através da supracitada Resolução CONAMA n.º 396/2008, a qual dispõe sobre classificação e diretrizes para enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências, como o estabelecimento de diretrizes ambientais para prevenção e controle da poluição desse recurso hídrico (CONAMA, 2008).

Nota-se que os Valores Máximos Permitidos (VMP), presentes na referenciada Resolução, deverão ser obedecidos quando da utilização da água subterrânea – seja com ou sem tratamento – seja qual for a classe de enquadramento. Os padrões das Classes 1 a 4 deverão ser estabelecidos nos Valores de Referência de Qualidade determinados pelos órgãos competentes, e nos VMPs para cada uso preponderante (as águas subterrâneas enquadradas como Classe Especial deverão ter suas condições de qualidade naturais mantidas).

No presente estudo é dada atenção especial aos parâmetros avaliados em poços no entorno do antigo Aterro Benópolis que excederam os limites previstos na Tabela 1. Além da resolução citada, existem também a Portaria MS N° 2914 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011) e a Resolução CONAMA 420 (CONAMA, 2009). A Portaria estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. A Resolução CONAMA 420 dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade e uso do solo e água subterrânea quanto à presença de substâncias químicas e estabelece Valores de Investigação (VI) que são os teores acima dos quais existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

Tabela 1 – VMP e VI para os parâmetros de interesse

| Parâmetros | VMP (mg/L) | | VI (mg/L) |
|------------|------------|------------------|------------|
| | CONAMA 396 | Portaria MS 2914 | CONAMA 420 |
| Alumínio | 0,2 | 0,2 | 3,5 |
| Bário | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Boro | 0,5 | - | 0,5 |
| Chumbo | 0,01 | 0,01 | 0,1 |
| Cobalto | - | - | 0,07 |
| Ferro | 0,3 | 0,3 | 2,45 |
| Manganês | 0,1 | 0,1 | 0,4 |
| Níquel | 0,02 | 0,07 | 0,02 |
| Zinco | 5 | 5 | 1,05 |

- : Não disponível

Fonte: alterado da CONAMA 396, CONAMA 420 e MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011

No Rio Grande do Sul, a Lei N° 10.350/94 institui o Conselho de Recursos Hídricos (CRH) como instância deliberativa do Sistema de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul. O CRH tem como competência, entre outras, a aprovação de critérios de outorga de uso da água, a qual será emitida pelo Departamento de Recursos Hídricos (DRH), órgão da Secretaria do Meio Ambiente (SEMA). O DRH então realiza a integração do Sistema de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul nos casos em que os recursos hídricos não se enquadrarem no Código de Mineração Decreto-Lei N° 227/67, o qual define os recursos hídricos de exploração para fins minerais ou termais.

O Decreto Estadual N° 42.047/02 regulamenta as disposições da Lei N° 10.350/1994, dispondo sobre a conservação das águas subterrâneas e dos aquíferos no Estado do Rio Grande do Sul. O decreto determina que a Secretaria da Saúde deva fiscalizar a qualidade das águas subterrâneas utilizadas para consumo humano, e, em seus artigos 6 e 7, define que a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Luis Roessler (FEPAM) deva normatizar procedimentos de prevenção, controle e fiscalização da qualidade das águas subterrâneas.

O Decreto Estadual N° 23.430/74, em seu artigo 96, determina que, nas zonas abastecidas por rede de água potável, é permitida a instalação de poços somente para suprimentos industriais e uso em agricultura ou floricultura, devendo essas instalações serem fechadas com tampa a no mínimo 0,40 m da superfície, além de serem dotadas de bomba. Frisa-se que em Porto Alegre 99,5% da população possui seu suprimento de água através do abastecimento regular do Departamento Municipal de Água e Esgoto

(DMAE), sendo que algumas áreas com problemas de regularização ou áreas de risco têm o abastecimento realizado por caminhão-pipa (DMAE, 2008).

2.2. CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A água é um excelente solvente, dissolvendo uma ampla gama de substâncias presentes nos ambientes por onde passa, promovendo diversas interações com o ambiente subsuperficial. Tal característica determina o maior teor de sais minerais das águas subterrâneas quando comparadas com águas superficiais (LNEG, 2001). É comum a contaminação das águas subterrâneas ser identificada tardiamente, já que é de difícil constatação e, quando identificada, pode já ter atingido largas extensões. Ressalta-se que para a resolução desse problema a adoção de medidas preventivas mostra-se a melhor alternativa, já que a remediação de águas subterrâneas é um processo que enfrenta dificuldades e limitações técnicas, além de ter um custo elevado (CUTRIM e CAMPOS, 2011). De maneira simplificada, as diversas atividades humanas (sejam elas urbanas, industriais, agrícolas ou mineradoras) geram cargas de contaminantes que, após a incidência de chuvas, infiltram-se no solo (como mostra a Figura 3). Poços tubulares mal construídos ou abandonados também configuram-se como caminho de contaminação, já que consistem em interfaces entre a superfície e os aquíferos, ou até mesmo entre diferentes aquíferos (SRHU/MMA (2007)).

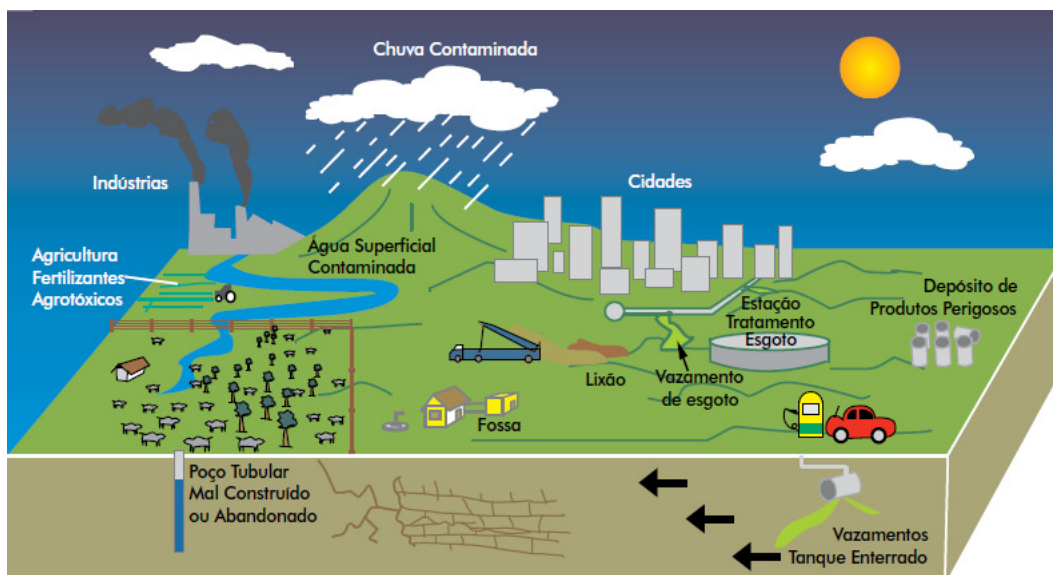


Figura 3 – Contaminação das águas subterrâneas por diversas fontes.
Fonte: SRHU/MMA (2007 – pág. 20)

Dada a maior proximidade das fontes poluidoras, os aquíferos adjacentes à superfície tendem a ser mais facilmente contaminados, porém a baixa velocidade das águas subterrâneas determina que tal processo ocorra de modo lento. Por lógica análoga, conclui-se que aquíferos mais profundos sofrem menos com contaminação (CETESB, 1978). Portanto, nota-se que as águas subterrâneas menos sujeitas a contaminação localizam-se em aquíferos confinados (entre camadas impermeáveis confinantes) enquanto as reservas hídricas mais vulneráveis encontram-se em aquíferos freáticos. A referida contaminação pode se dar de maneira direta ou indireta, podendo ter fontes naturais ou antrópicas. Quanto à contaminação causada pelo homem, sabe-se que as atividades ligadas ao desenvolvimento urbano, agrícola e industrial são responsáveis pela descarga de resíduos e efluentes – de forma pontual e não pontual (LIVINGSTONE et al, 1995). Tais atividades são categorizadas pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia de Portugal (LNEG, 2001), como segue:

- Atividades urbana e doméstica: caracterizadas pelo despejo de efluentes domésticos não tratados, seja por fossas sépticas ou lixões, bem como a geração de lixiviados oriundos da circulação de água através de resíduos orgânicos. Ao serem dispostos irregularmente no ambiente, tais resíduos liberam contaminantes no solo ou águas superficiais que podem ser transportados até o lençol freático, comprometendo a qualidade da água subterrânea.

- Atividade agrícola: é de especial interesse em estudos de deterioração da qualidade d'água subterrânea, por possuir caráter difuso de poluição. Portanto, é responsável pela poluição a partir de áreas extensas, destacando-se os fertilizantes (orgânicos e inorgânicos) e pesticidas como contaminantes de maior expressão. Fertilizantes inorgânicos como o amoníaco, sulfato de amônia, nitrato de amônia e carbonato de amônia e os orgânicos, como a ureia, são os responsáveis pelo incremento de nitrato, nitrito e amônia nas águas subterrâneas, por serem aplicados em quantidades superiores às necessárias ao desenvolvimento das plantas. O incremento de sulfatos, cloretos e fósforo nas águas subterrâneas é um problema menos importante que o dos compostos nitrogenados e está relacionado com a aplicação de fertilizantes como o sulfato de amônia, cloreto de potássio, carbonato de potássio e compostos de fósforo. Dentro dos pesticidas e produtos fitossanitários, os pesticidas organoclorados como o DDT são os mais perigosos devido à sua persistência e elevada toxicidade.

- Atividade industrial: apesar de potencialmente atingir diversos meios (solo, ar, águas superficiais e subterrâneas) durante etapas de produção, armazenamento e transporte, é considerada como fonte de poluição pontual. As principais indústrias poluentes são as indústrias alimentares, metalúrgicas, petroquímicas, nucleares, mineiras, farmacêuticas, eletroquímicas, de fabricação de pesticidas e inseticidas etc. Dentre os contaminantes liberados por essas atividades, além de outros já citados (emitidos pelas atividades agrícolas, urbanas e domésticas), pode-se incluir metais tóxicos.

- Construção imperfeita de poços e bombeamento excessivo: o desrespeito à boa prática e à legislação existente (no tocante a instalação adequada do poço e sua proteção sanitária) poderá também provocar a contaminação das águas subterrâneas pela introdução de contaminantes no sistema aquífero. Por exemplo, no caso da intrusão salina, que ocorre em regiões costeiras, a contaminação ocorre quando do bombeamento de grandes volumes de água subterrânea, podendo promover a introdução da água salgada dos oceanos no aquífero explorado e a consequente salinização da água retirada dos poços.

2.2.1. CONTAMINAÇÃO POR ATERROS SANITÁRIOS

São numerosos os relatos sobre a ocorrência de problemas ambientais associados a aterros sanitários, como a contaminação dos mananciais subterrâneos. Nota-se que persistem impactos negativos originados tanto por depósitos recentes mal executados, quanto de depósitos antigos que ainda não passaram por intervenções ambientais adequadas (CHRISTENSEN *et al.*, 2001).

Segundo Sousa *et al.* (2002), a contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas provocada por resíduos sólidos urbanos passou cada vez mais a ser motivo de estudos em todo o mundo, principalmente nos países industrializados, dado o grande potencial poluidor e os enormes volumes gerados diariamente. É destacado ainda que existe uma grande dificuldade para a resolução do problema do lixo urbano, especialmente no âmbito das administrações públicas municipais, já que há grande potencial de contaminação ambiental, associado à sempre presente necessidade de grandes áreas para disposição e tratamento dos resíduos.

De acordo com a NBR 15849 (ABNT, 2010), o lixiviado é definido como o “líquido resultante da infiltração de águas pluviais no maciço de resíduos, da umidade dos resíduos e da água de constituição de resíduos orgânicos liberada durante sua decomposição no corpo do aterro sanitário”. O termo “percolado” não é aplicável nessa condição, já que a percolação consiste somente na passagem de um líquido através de um meio poroso, sem o arraste (lixiviação) de substâncias por esse líquido (SOUTO, 2009). A degradação dos resíduos para a síntese do lixiviado advém da combinação de processos físico-químicos, químicos e biológicos presentes no interior do aterro. Nota-se que os processos biológicos são dominantes, geralmente regulando os demais processos (MCBEAN *et al.*, 1995).

Os processos físico-químicos consistem basicamente no contato e arraste mecânico pela água, sendo os principais a sorção e a difusão. De acordo com Souto (2009), a degradação química é explicada por uma série de eventos que ocorrem no interior do maciço de resíduos, como reações redox, dissolução, precipitação e complexação. É importante destacar que metais detectados no lixiviado não são necessariamente provenientes de resíduos industriais, já que resíduos domésticos, principalmente quando não separados adequadamente, podem ser uma fonte significativa destes elementos (FERREIRA, 2010). De maneira geral, a exposição humana a metais pode potencialmente trazer uma miríade de malefícios à saúde, dada sua propriedade de acumulação nos tecidos. Os sistemas mais sensíveis à contaminação são: sistema nervoso (central e periférico), sistema gastrointestinal, cardiovascular, sistema renal e sistema hematopoiético (LOBO, 2011).

Já os processos biológicos envolvem a ação de diversos microorganismos, sendo que metabólitos de um grupo podem servir como fonte de alimento para outros grupos (SOUTO, 2009). As variedades de microorganismos presentes variam no tempo de acordo com as diversas fases pelas quais passa o aterro. Assim, para um entendimento adequado dos processos de degradação e lixiviação de compostos no aterro, torna-se crucial conhecer a dinâmica temporal de tais processos.

As cinco fases do modelo de decomposição do material orgânico nos aterros de resíduos, representadas pelas Figuras 4 e 5, são descritas conforme segue (BIDONE, 1999):

- Fase I – Adaptação: decomposição inicial da matéria orgânica em condições aeróbias, devido à presença de certa quantidade de ar no interior do aterro. Possui duração estimada de poucos dias a poucas semanas;
- Fase II – Transição: transição da aerobiose para a anaerobiose. Nitratos e sulfatos são utilizados como aceptores de elétrons, ao invés do oxigênio. São estabelecidas condições óxido-redutivas, com início da conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Inicia a formação do chorume e seu pH começa a cair devido à presença dos ácidos e pelas elevadas concentrações de CO_2 . Possui duração estimada de 1 mês a 1 ano;
- Fase III – Acidogênica: hidrólise dos compostos de maior massa molecular, gerando compostos intermediários que são convertidos em ácido acético e outros ácidos mais complexos. O CO_2 é o principal gás gerado. Decréscimo do pH do lixiviado devido a maior dissolução de ácidos, aumentando a DBO, DQO e a solubilização dos metais. Possui duração estimada de poucos meses a 2 anos;
- Fase IV – Metanogênica: predomínio dos organismos denominados metanogênicos que convertem os ácidos gerados na etapa anterior em CH_4 e CO_2 . Devido à conversão dos ácidos o pH retorna a neutralidade, ocorrendo a precipitação dos metais e drástica redução de DQO no lixiviado. Possui duração estimada de 10 a 50 anos;
- Fase V – Maturação: Relativa inatividade dos microrganismos devido à escassez de nutrientes. Predominância de condições ambientais naturais. Surgimento de O_2 e espécies oxidativas. Conversão lenta dos materiais orgânicos resistentes aos microrganismos.

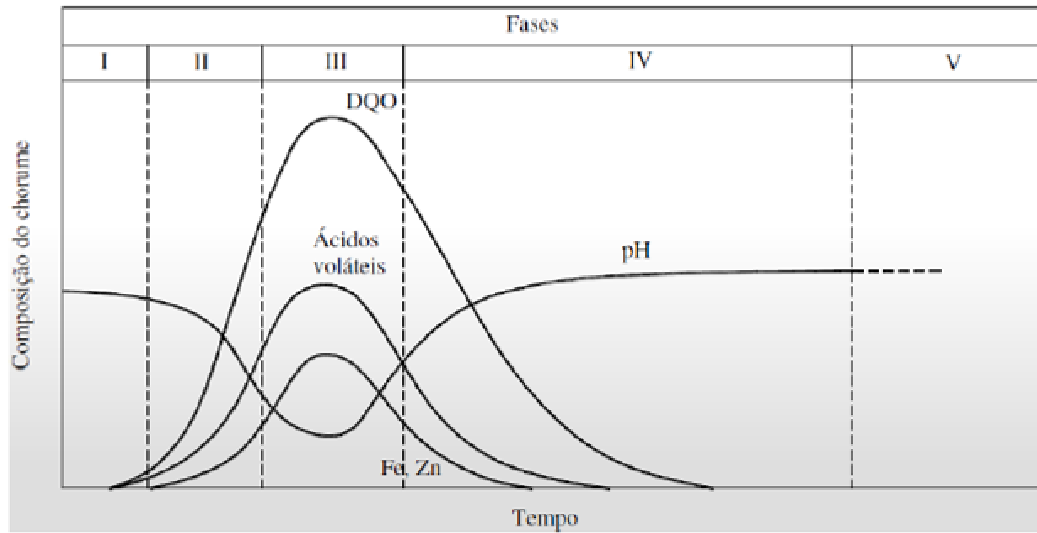


Figura 4 – Variação das características do lixiviado de aterro de resíduos.

Fonte: Tchobanoglous *et al.*, 1993 *apud* Ensinas, 2003.

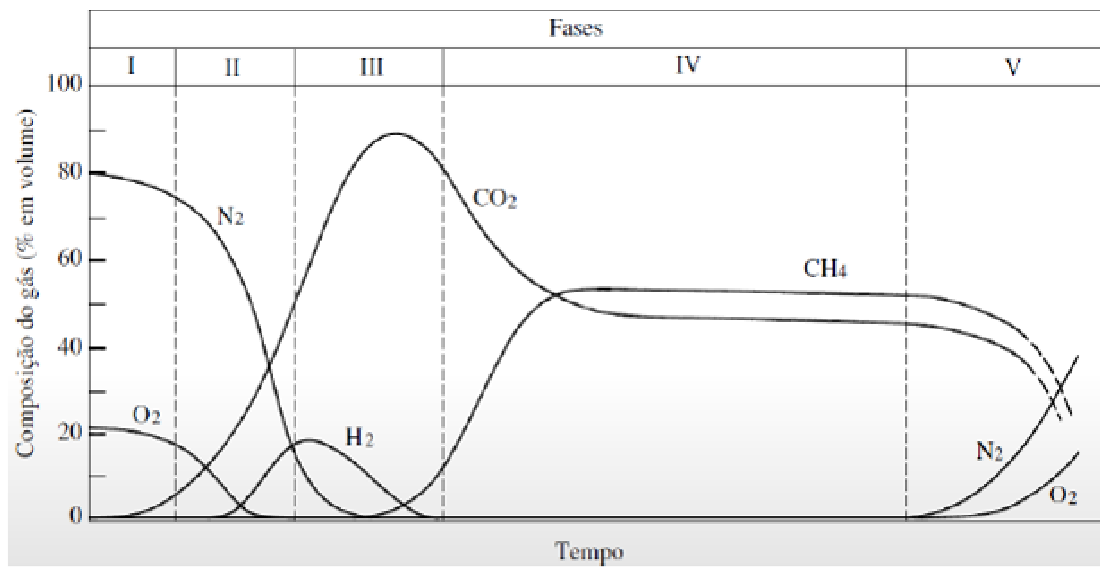


Figura 5 – Composição percentual dos gases presentes em aterros de resíduos.

Fonte: Tchobanoglous *et al.*, 1993 *apud* Ensinas, 2003.

2.3. AVALIAÇÃO DO RISCO À SAÚDE HUMANA

Como está redigido na Resolução CONAMA nº 420/2009, risco é definido como “a probabilidade de ocorrência de efeito(s) adverso(s) em receptores expostos a contaminantes”, à medida que a avaliação de risco é conceituada como “o processo pelo qual são identificados, avaliados e quantificados os riscos à saúde humana ou a bem de relevante interesse ambiental a ser protegido”.

O objetivo de uma avaliação de risco é fornecer subsídio conceitualmente sustentável para os agentes envolvidos no processo decisório, responsáveis por resolver ou mitigar dada problemática que se situe simultaneamente nas esferas de saúde e meio ambiente (LOUVAR & LOUVAR, 1998). Adicionalmente, de acordo com a United States Environmental Protection Agency (USEPA, 1989), a avaliação de risco é uma ferramenta que pode ser utilizada para caracterizar a natureza e magnitude dos riscos tanto à saúde humana como a receptores ecológicos de contaminantes químicos e quaisquer outros potencialmente presentes no meio ambiente.

A criação de métodos de avaliação de áreas degradadas, utilizando-se considerações de avaliação de risco como importante ferramenta para tomada de decisão, ocorreu em razão das dificuldades técnicas e do alto custo associado à remediação de solos e aquíferos contaminados. Assim, padrões são estabelecidos considerando-se as condições e os riscos relacionados à saúde humana e ao meio ambiente do local contaminado em vez do uso de critérios únicos, como os padrões de potabilidade de água (VMPs) (PORFÍRIO, 2014).

No Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB/GTZ, 2001), é ressaltado que o objetivo principal da avaliação de risco é a identificação e quantificação dos riscos a saúde humana, uma vez que tanto esta, como a segurança da população, devem ser priorizadas, dentre os bens a proteger. Este mesmo Manual estabelece um procedimento tecnicamente defensável para a determinação dos seguintes aspectos:

- Proteção à saúde humana;
- Determinação do nível de remediação ambiental necessário;
- Estabelecimento de metas de remediação;
- Avaliação da viabilidade técnica da remediação;

- Determinação dos benefícios associados ao processo de remediação;
- Priorização de áreas contaminadas;
- Priorização de alocação de recursos;
- Gerenciamento ambiental integrado.

Segundo a U. S. Environmental Protection Agency – USEPA (1989), a complexidade e circunstâncias particulares de cada local ditarão a necessidade de avaliações de risco específicas para cada caso. Porém, há quatro etapas básicas no processo (Figura 6):

1. Coleta e análise de dados;
2. Avaliação da exposição;
3. Avaliação de toxicidade;
4. Caracterização do risco.

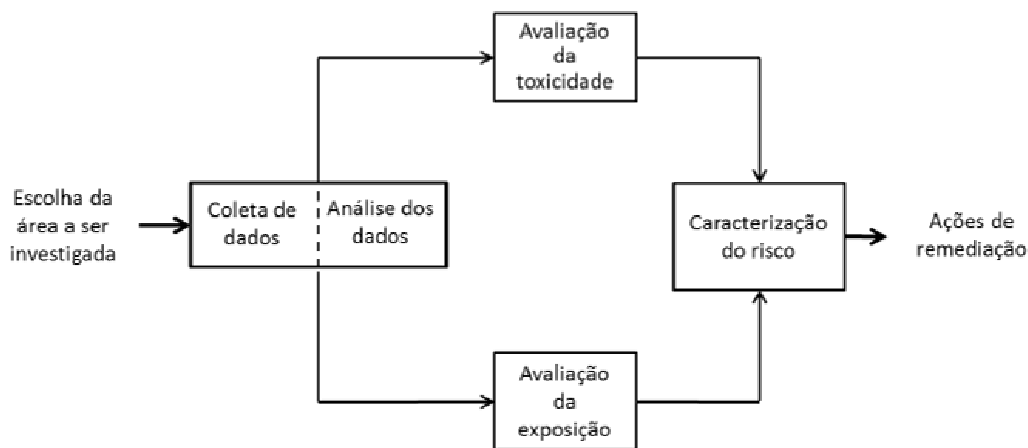


Figura 6 – Etapas de avaliação de risco à saúde humana, como preconizado pela USEPA.

Fonte: USEPA, 1989 *apud* Koller, 2013.

Primeiramente, dever-se-á obter e analisar as informações consideradas relevantes sobre a área de estudo, reconhecendo a complexidade do meio físico e os processos ali presentes, as particularidades das fontes de contaminação, sua diversidade

e a variação dos níveis de contaminação no local. A coleta e avaliação de dados inicia na avaliação preliminar e geralmente se estende na investigação confirmatória e na investigação detalhada. Dados históricos, como laudos analíticos de amostragens anteriores, descrições dos usos anteriores do solo e quaisquer outros registros históricos da área, assim como entrevistas com moradores devem ser compilados e analisados, a fim de qualificar e abreviar o processo de amostragem das substâncias suspeitas de contaminação. Frisa-se que muitos dos dados somente podem ser obtidos em estudos preliminares, e estes – quando bem conduzidos – podem trazer economias de recursos e tempo de investigação (CETESB/GTZ, 2001).

A etapa seguinte, avaliação da exposição, objetiva estimar a magnitude, frequência e duração da exposição humana aos contaminantes identificados na etapa anterior, assim como as vias pelas quais ocorre esta exposição. Deverão ser criados cenários de exposição de acordo com os usos atuais e futuros do solo, identificando as várias possibilidades de um dado contaminante atingir as populações potencialmente receptoras (USEPA, 1989). É crucial que as potenciais rotas de exposição sejam verificadas, para determinar se são completas ou incompletas. Elas somente serão completas existindo concomitantemente: fonte e mecanismo de liberação química; algum meio de retenção ou transporte por meio dos quais as substâncias químicas são transferidas; um ponto de exposição, onde o contato ocorre; uma rota de exposição por meio da qual o contato ocorre (CETESB/GTZ, 2001).

A exposição aos contaminantes pode ocorrer por meio de três rotas: ingestão, contato dérmico e inalação, sendo que cada uma dessas se divide ainda em outras vias de exposição, como águas superficial e subterrânea, sedimento, solo e ar. Ressalta-se que as rotas de exposição que envolvem a ingestão resultam, normalmente, em estimativas superiores do que aquelas originadas pelo contato dérmico ou inalação, devido à maior absorção de contaminantes através do trato gastrointestinal, quando se compara à absorção através da pele ou inalação (CETESB/GTZ, 2001).

Posteriormente, as concentrações das substâncias químicas, assim como os parâmetros de exposição, são utilizadas para calcular os níveis de ingestão de cada substância (em miligramas de substância química por quilograma de peso corporal, por dia). No presente estudo, os parâmetros utilizados são extraídos das planilhas desenvolvidas pela CETESB para caracterização do risco em áreas contaminadas que,

por sua vez, foram retirados de bancos de dados, como o IRIS (IRIS, [2004]) e USEPA (USEPA, 1997) (Quadro 1).

Quadro 1 – Parâmetros de exposição sugeridos, considerando a rota de ingestão d'água.

| Parâmetros de Exposição para Ingestão de Água Contaminada | | | | | | | |
|---|--------------|-------------------|-------------------|-------------|---------|-------------|---------|
| Parâmetro | Fonte | Trab. de Obras | Trab. Comercial e | Residencial | | Residencial | |
| | | Civis e Escavação | Industrial | Urbano | | Rural | |
| | | Adulto | Adulto | Adulto | Criança | Adulto | Criança |
| <u>IRw</u> (l/dia) | CETESB, 2009 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| <u>EF</u> (dias/ano) | CETESB, 2009 | 290 | 290 | 350 | 350 | 350 | 350 |
| <u>ED</u> (anos) | CETESB, 2001 | 2 | 25 | 30 | 6 | 72 | 6 |
| <u>BW</u> (kg) | COUTO, 2006 | 70 | 70 | 70 | 15 | 63 | 15 |
| <u>ATn</u> (dias) | IBGE, 2008 | 730 | 9125 | 10950 | 2190 | 26280 | 2190 |
| <u>ATc</u> (dias) | CETESB, 2009 | 26280 | 26280 | 26280 | 26280 | 26280 | 26280 |
| Observação: <u>ATn</u> – efeitos não carcinogênicos <u>ATc</u> – Efeitos Carcinogênicos | | | | | | | |

Fonte: CETESB, 2009.

De posse das concentrações das substâncias químicas de interesse e dos parâmetros de exposição, calcula-se o ingresso, que é definido, segundo a CETESB (2001), como a quantidade de composto químico disponível para absorção que poderá entrar em contato com determinado organismo. A fórmula utilizada para o cálculo do ingresso por ingestão de água contaminada é apresentada abaixo (Equação 1):

$$I = C \times \frac{IR \times EF \times ED}{BW} \times \frac{1}{AT}$$

Equação 1

Onde:

I = Ingresso por ingestão de água contaminada (mg/kg.dia)

C = Concentração do composto químico de interesse na água

IR = Taxa de ingestão de água (L/dia)

EF = Frequência da exposição (dias/ano)

ED = Duração média da exposição (ano)

BW = Peso corpóreo médio do indivíduo durante a exposição (kg)

AT = Período de exposição médio durante a exposição (dias)

Tanto a variabilidade entre os indivíduos como a incerteza na avaliação da exposição devem ser analisadas, pois os termos são distintos. A separação conceitual da variabilidade e incerteza é crítica para a obtenção de uma responsabilização adequada e uma maior transparência. A decisão sobre como controlá-las separadamente deve ser feita caso a caso para cada variável (EPA, 1997).

A incerteza representa uma falta de conhecimento sobre fatores específicos, parâmetros ou modelos. Um exemplo são as dúvidas referentes à concentração média de um determinado poluente em um solo contaminado. Entretanto, a incerteza pode muitas vezes ser reduzida por meio da coleta de dados adicionais. Já a variabilidade trata da heterogeneidade em uma população ou em parâmetros de exposição. Inclui variações fisiológicas (como a variação de massa corporal, altura, taxas de respiração), variabilidade no tempo e variação no tipo de solo. Geralmente não pode ser reduzida ou eliminada por medidas adicionais ou de estudos, como no caso da incerteza, entretanto pode ser melhor caracterizada com dados adicionais (FINLEY & PAUSTENBACH, 1994).

A avaliação de toxicidade, terceira etapa da avaliação de risco, é realizada levando em conta: (a) os tipos de efeitos adversos à saúde associados com a exposição aos produtos químicos de interesse; (b) a relação entre a magnitude da exposição e seus efeitos adversos; e (c) incertezas relacionadas (USEPA, 1989).

Nessa etapa, de acordo com o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB/GTZ, 2001), os dados disponíveis são utilizados para determinar e quantificar a relação entre o nível de exposição de um contaminante (dose ou ingestão) e o aumento da probabilidade de ocorrência e/ou gravidade dos efeitos adversos. A essa relação se dá o nome de dose-resposta e a mesma fornece a base para a obtenção dos valores de toxicidade quantitativos utilizados na avaliação do risco.

O potencial não-carcinogênico de efeitos à saúde a partir da ingestão, objeto de interesse no presente estudo, é avaliado por meio da comparação dos níveis diários de ingestão estimados com doses de referência (RfDs), que representam níveis de ingestão diária (em termos de mg/kg.dia) nos quais não são esperadas ocorrências de efeitos deletérios. Tais RfDs vêm sendo definidos por grupos de estudo da USEPA, já havendo mais de seiscentas substâncias químicas descritas e passíveis de acesso (IRIS, 2004).

Alternativamente, se o desenvolvimento de efeitos carcinogênicos à saúde humana é o objeto de interesse, são utilizados fatores de inclinação (*Slope Factor*) na estimativa do risco, que são definidos como o limite superior de probabilidade de uma resposta (isto é, câncer) por unidade de consumo de uma substância química ao longo da vida.

A quarta e última etapa, caracterização do risco, combina e resume os cenários de exposição com a avaliação de toxicidade, tanto de forma qualitativa quanto quantitativa, determinando os níveis de risco atuais e futuros (VIANA, 2010).

Nesse escopo, os efeitos não carcinogênicos são estimados pelo cálculo do quociente de perigo não carcinogênico (*Hazard Quotient*, ou HQ), que é obtido por meio da comparação de um nível de exposição por período de tempo (dose de ingresso, “I”) com uma RfD para um período de exposição similar, como apresentado na equação abaixo (Equação 2):

$$HQ = \frac{I_n}{RfD_i}$$

Equação 2

Onde:

I_n = Dose de ingresso para o cenário “n” (mg/kg.dia)

RfD_i = Dose de referência para a via de ingresso “i” (mg/kg.dia)

De maneira distinta às estimativas de risco carcinogênico, o HQ não é expresso em termos de probabilidade. Basicamente, valores de HQ inferiores à unidade ($HQ < 1$) indicam exposições provavelmente não associadas a efeitos não-carcinogênicos adversos. À medida que o valor de HQ ultrapassa o valor 1, a probabilidade de efeitos adversos aumenta, devendo ser tomadas ações para redução da exposição. Por conta das incertezas envolvidas, valores entre 1 e 10 são tidos como de preocupação. No entanto, devido ao fato de que os RfDs não possuem igual precisão e não são baseados no mesmo efeito, a avaliação dos índices de perigo devem levar em conta as incertezas associadas com os RfDs (CETESB/GTZ, 2001).

O índice de perigo (*Hazard Index*, ou HI) é definido pelo somatório de dois ou mais HQs para múltiplas substâncias químicas e rotas de exposição, com é apresentado na Equação 3:

$$HI = \sum \frac{I_n}{RfD_i}$$

Equação 3

Onde:

I_n = Dose de ingresso para o cenário de exposição “n” (mg/kg.dia)

RfD_i = Dose de referência para a via de ingresso “i” (mg/kg.dia)

O risco não-carcinogênico (ou carcinogênico) total, ao qual um determinado indivíduo está potencialmente exposto, deve ser calculado somando todos os riscos não-carcinogênicos (ou carcinogênicos) totais estimados para cada caminho de exposição “i”. Assim, o Risco Cumulativo Total é a somatória do risco para cada composto químico, dentro de cada caminho de exposição, e para todos os meios que ocorrem dentro dos mesmos cenários de exposição, simultaneamente. Abaixo é apresentada a equação (Equação 4) para quantificação do risco não-carcinogênico para múltiplos caminhos de exposição:

$$HI_{ET} = \sum HI_{CAMINHOEXPOSIÇÃOi}$$

Equação 4

Onde:

HI_{ET} = Índice de Perigo não-carcinogênico para Exposição Total

$HI_{caminhoi}$ = Índice de Perigo não-carcinogênico para cada caminho de exposição “i”

2.4. O ATERRO BENÓPOLIS

A área de interesse do presente estudo é o entorno de uma antiga área de disposição de resíduos localizada no bairro Humaitá, no município de Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul, denominado Aterro Benópolis (Figura 7).

O Aterro Benópolis tem uma extensão de aproximadamente 100 hectares, perfazendo cerca de 25% do bairro Humaitá. A delimitação do mesmo é dada basicamente pela Av. Ernesto Neugebauer a leste, Av. A. J. Renner a oeste, Rua José Pedro Boéssio ao norte e Av. Amyntas Jacques de Moraes ao sul (Figura 8) (TRINDADE; FIGUEIREDO, 1982).

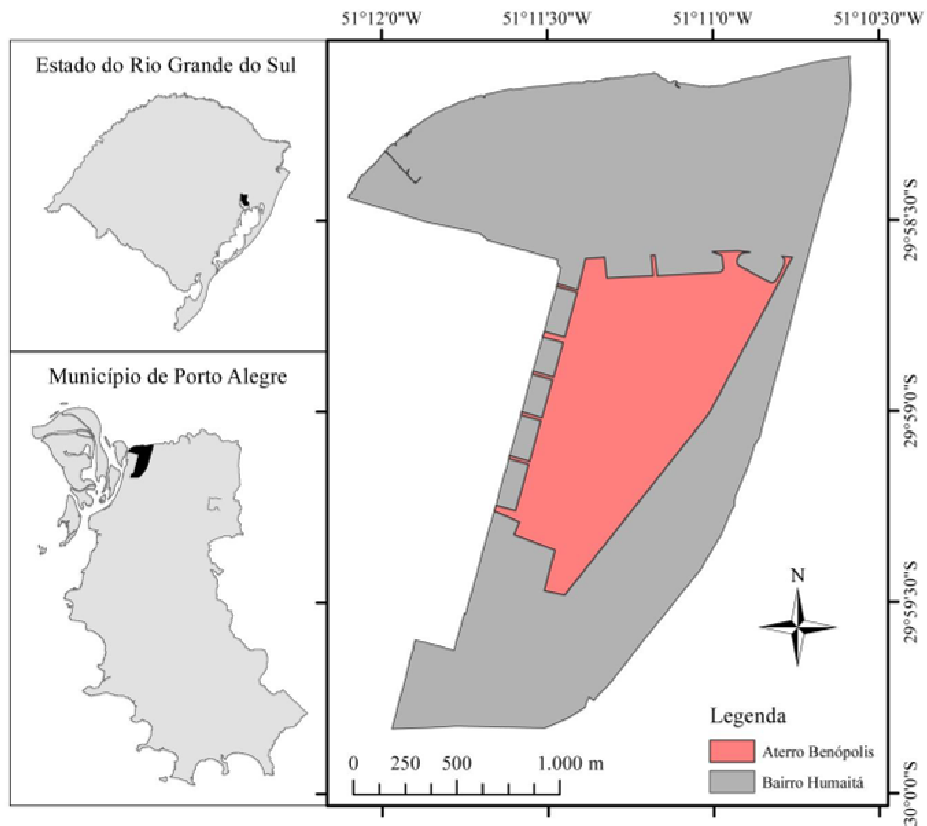


Figura 7 – Localização do Aterro Benópolis.

Fonte: Palagi, 2014.

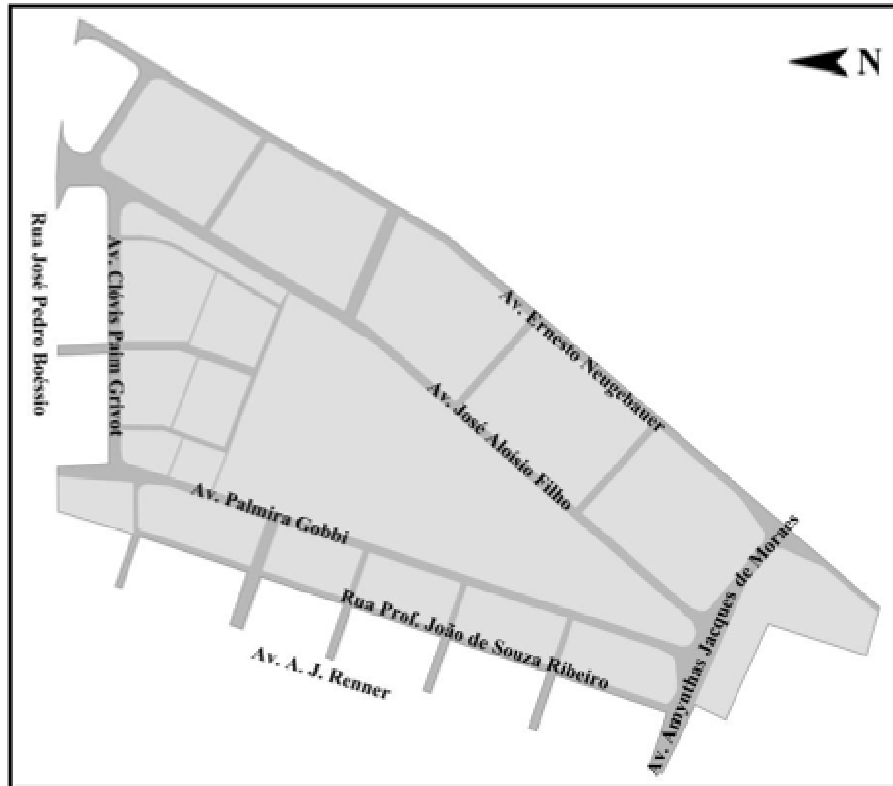


Figura 8 – Representação da área pertencente ao antigo Aterro Benópolis.

Fonte: Palagi, 2014.

De acordo com Trindade e Figueiredo (1982), o Aterro Benópolis, de maneira inusitada, foi concebido para elevar a cota de uma região alagadiça com o objetivo de instalar um parque industrial e residencial, com capacidade para (quando concluído) quinze mil pessoas em uma área total de 140 hectares. Assim, de forma inédita, o proprietário da área remunerou a Prefeitura de Porto Alegre a fim de implantar e operar o aterro, além de fornecer apoio na abertura das vias, concessão de material de recobrimento, canteiro de obras e cooperação nos ensaios realizados. Sua construção se deu em 1977, sendo realizado o aterro de 10 hectares à época (Figura 9).

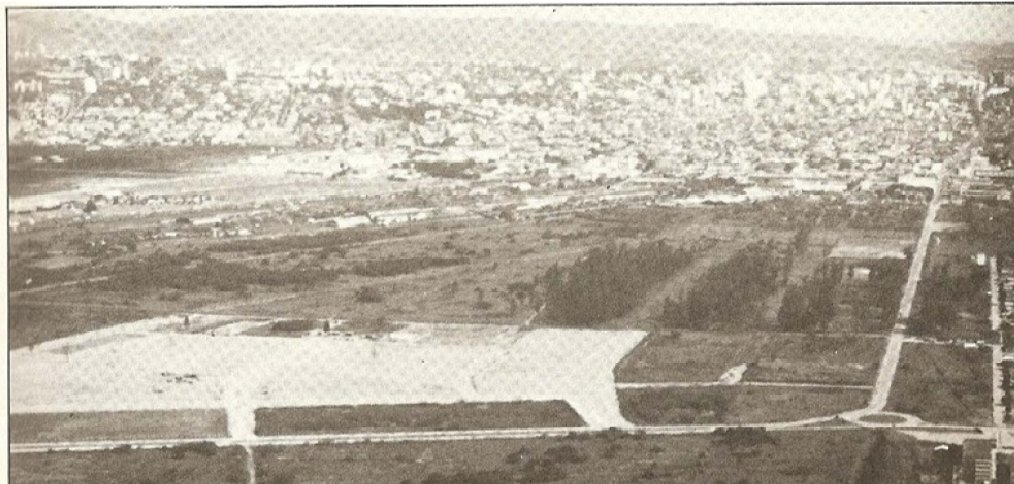


Figura 9 – Vista aérea da região com aterramento de dez hectares.

Fonte: Trindade e Figueiredo, 1982 *apud* Quadrado, 2013.

Deve-se ressaltar que a excelente localização do Aterro Benópolis facilitou em muito a destinação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) recolhidos pelo DMLU, recebendo durante a sua operação grande parte dos resíduos coletados em Porto Alegre. Enquanto operou – de 1977 até 1981 – recebeu mais de um milhão de toneladas de RSU, além de resíduos industriais oriundos de indústrias siderúrgicas e de lâmpadas de mercúrio, dentre outras (TRINDADE; FIGUEIREDO, 1982).

O projeto previa aterramento composto de resíduos nas quadras, com compactação e cobertura dos mesmos, e uso de aterro convencional em todo sistema viário numa altura média de 1 m e 20 cm (podendo chegar até 2 m e 70 cm em alguns pontos). Ao se iniciar o aterramento das quadras, a rede viária já havia sido executada, possibilitando o acesso do maquinário até a frente operacional do aterro. A cobertura dos resíduos foi realizada com espessura mínima de 25 cm, inicialmente com pó de pedra, que segundo os ensaios realizados possui características não drenantes, com condutividade hidráulica de $2,1 \times 10^{-4}$ cm/s. Em relação ao chorume gerado pela decomposição orgânica, foi criado um valo de oxidação que dividiu o loteamento ao meio. Esse valo recebeu o escoamento de líquidos provenientes do aterro (TRINDADE; FIGUEIREDO, 1982).

Foi previsto no projeto que o loteamento seria abastecido integralmente com água tratada do Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE), vedando-se a possibilidade de captação de água do subsolo para fins de abastecimento (PORTO ALEGRE, 1977). Nota-se que, à época, obteve-se em estudo uma distância de no mínimo 70 m como o raio de influência dos resíduos na água subterrânea (TRINDADE; FIGUEIREDO, 1982).

2.4.1. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO ATERRO ESTUDADO

Segundo Hasenack *et al.* (2008), a região de Porto Alegre está localizada no Escudo Sul-riograndense, composto por diversas unidades geotectônicas que representam os principais ambientes e períodos de formação das rochas do sul do Brasil.

As rochas que compõem o substrato do município fazem parte do denominado Batólito Pelotas, a principal unidade da antiga cadeia de montanhas conhecida como Cinturão Dom Feliciano. Este cinturão apresenta fragmentos da antiga crosta continental da porção sul da Plataforma Sul-americana, sendo representado na geologia do município pelos Gnaisses Porto Alegre, uma associação de gnaisses granodioríticos e dioríticos com idade ao redor de dois bilhões de anos e, em sua ampla maioria, pelos diferentes tipos de rochas graníticas que se destacam no relevo do município.

Os Gnaisses Porto Alegre constituem uma área de relevo plano localizado na porção norte do município, onde está situada a área de estudo. Nesta região, porém, os gnaisses estão recobertos por rochas sedimentares de idade Paleozóica pertencentes a Bacia do Paraná e por sedimentos quaternários (depósitos deltaicos, terraços e planícies fluviais). De acordo com o Projeto Plano Diretor de Mineração da Região Metropolitana de Porto Alegre – PDM (CPRM, 2006), os sedimentos quaternários presentes na área de estudo têm classificação geológica Q2 (Depósitos Fluviolacustres e Eólicos), caracterizados por depósitos inconsolidados de areias e argilas relacionados aos sistemas deltaico e fluviolacustre estabelecidos sobre os depósitos de planícies lagunares (Figura 10).

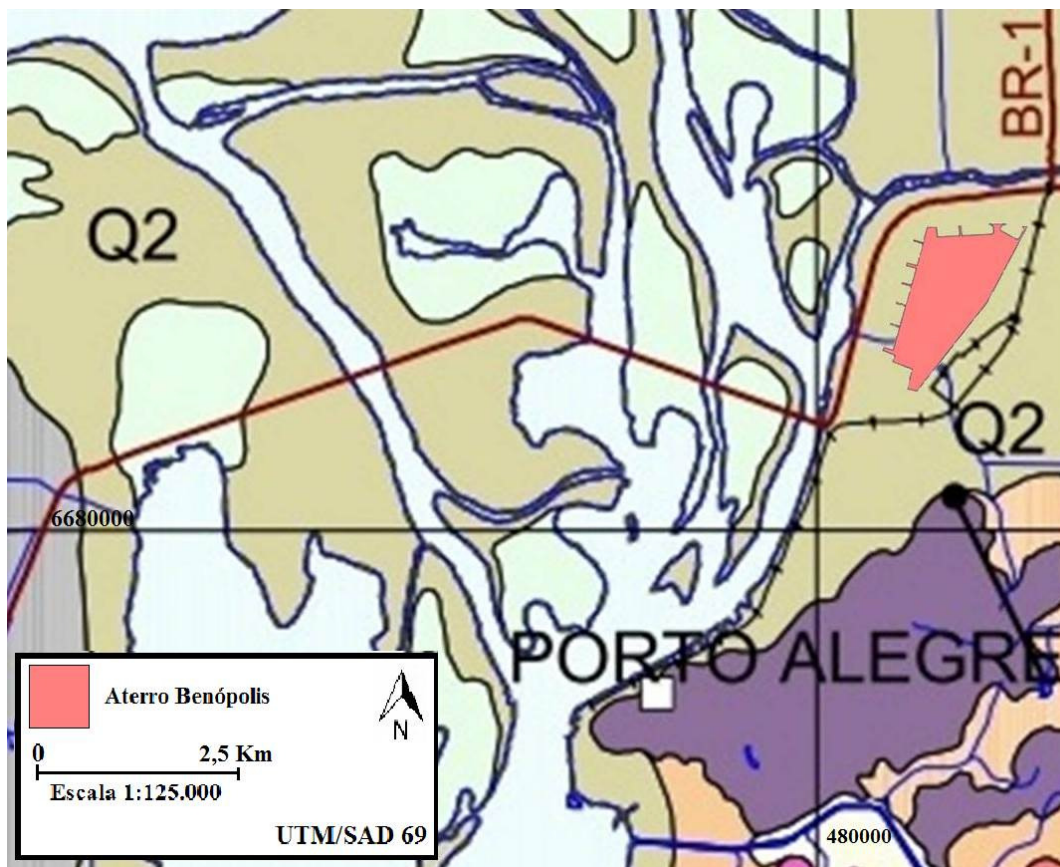


Figura 10 – Mapa geológico do município de Porto Alegre, com o Aterro Benópolis destacado em vermelho.

Fonte: Alterado de CPRM, 2006.

Os solos encontrados na porção norte de Porto Alegre, conforme pode ser observado na Figura 11, são solos sedimentares de áreas planas e mal drenadas (Planossolos), de depressões do microrrelevo muito mal drenadas (Gleissolos) e de partes mais elevadas do microrrelevo, moderadamente drenadas (Plintossolos). Além destes, ocorrem Neossolos Flúvicos ocupando diques marginais junto aos arroios e córregos. As características mais marcantes das áreas onde ocorrem estes solos são as cotas baixas, relevo plano, más condições de drenagem e sujeição a inundações esporádicas ou frequentes.

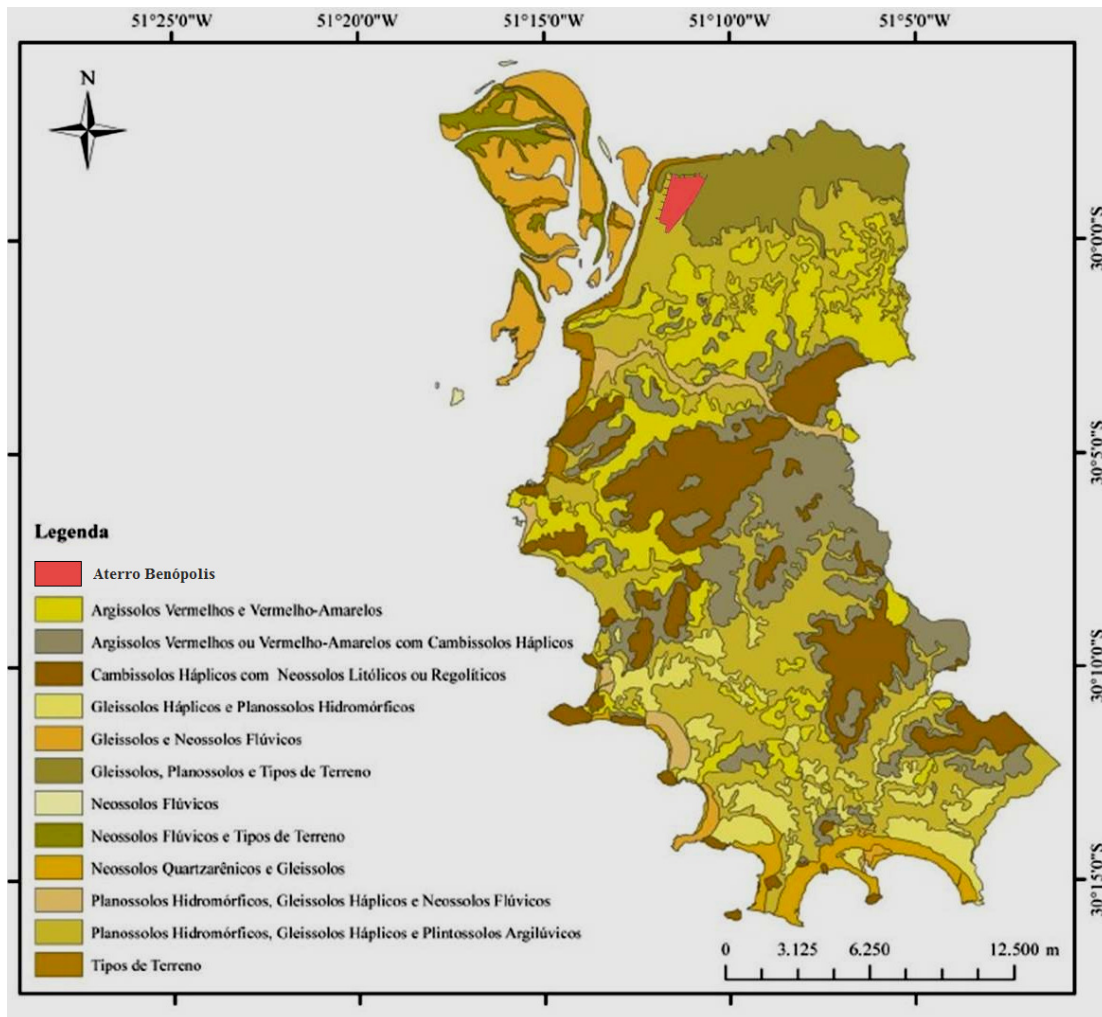


Figura 11 – Mapa de solos do município de Porto Alegre, com o Aterro Benópolis destacado em vermelho.

Fonte: Alterado de Hasenack *et al.*, 2008.

No tocante aos sistemas aquíferos presentes na área de estudo, nota-se uma inserção predominante no Sistema de aquíferos salinizados (b1), apesar de haver alguma sobreposição com as Planícies fluviolacustres atuais e subatuais (b2) (Figura 12). Este sistema é constituído por aquíferos intergranulares extensos semi-confinados a confinados, inseridos nos depósitos fluviais, deltaicos e lacustres, compostos por sequência areno-silto-argilosa, com gradação granulométrica descendente da base para o topo. Os aquíferos salinizados (b1) consistem em sistemas intergranulares extensos confinados de boa permeabilidade com água de péssima qualidade, contaminando aquíferos subjacentes. Ressalta-se que ambos os sistemas têm vulnerabilidade natural

considerada como alta (CPRM, 2006). De acordo com Menegat *et al.* (1998), o antigo Aterro Benópolis, bem como sua potencial área de influência, encontram-se situados na sub-bacia hidrográfica Almirante Tamandaré e Humaitá.

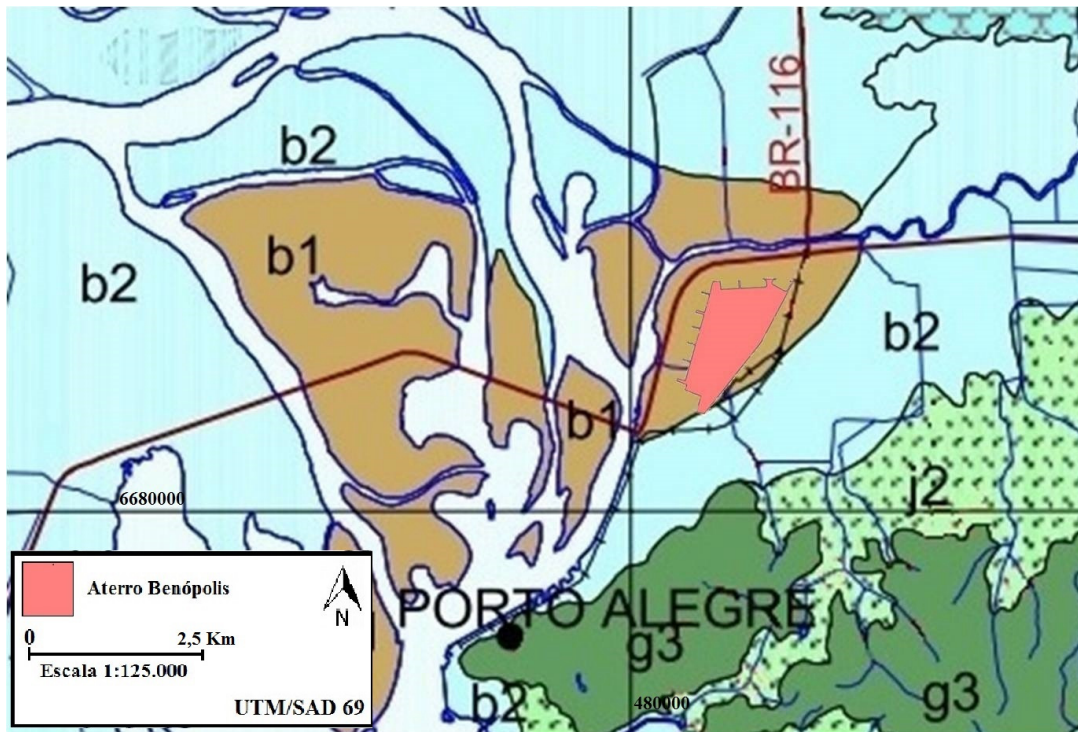


Figura 12 – Mapa de sistemas aquíferos do município de Porto Alegre, com o Aterro Benópolis destacado em vermelho.

Fonte: Alterado de CPRM, 2006.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Inicialmente – no que se insere na etapa de avaliação preliminar – foi realizado um levantamento bibliográfico, objetivando coletar dados que traçassem um retrato acurado do processo de implantação do aterro, bem como uma representação adequada da situação atual da região, incluindo informações que permitissem a completa caracterização hidrogeológica da área.

A referida determinação hidrogeológica foi realizada com base na interpretação de dados geológicos e hidrogeológicos obtidos na etapa de identificação e inventário de pontos de captação. Com o objetivo de identificar e inventariar as formas de captação presentes na área, foi realizada consulta aos bancos de dados do Sistema de Informações de Água Subterrânea (SIAGAS, da CPRM) e do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE).

Ressalta-se que a maior parte das informações utilizadas faz parte do acervo de documentos do Departamento Municipal de Habitação (DEMHAB), que foram cedidos pelo referido órgão. Os dados disponibilizados estão associados a estudos realizados com o objetivo de investigação do solo e água subterrânea, realizados em lotes pertencentes ao denominado Projeto Integrado Entrada da Cidade (Piec). Nos supracitados estudos, constam levantamentos diversos (como perfis de solo, ensaios hidrogeológicos, laudos de análises químicas de água subterrânea, entre outros) de nove áreas (totalizando 158 poços), como segue: 1) Loteamento Liberdade; 2) Loteamento Frederico Mentz, n.º 303; 3) Loteamento Frederico Mentz, n.º 521; 4) Casa de Passagem; 5) Loteamento 14; 6) Loteamento Vila Dona Teodora; 7) Cooperativa Santo Antônio; 8) Vila dos Ferroviários e 9) Residencial Barcelona I e II. Com base na interpretação dos perfis dos poços disponíveis foi feita a identificação dos aquíferos existentes na área de estudo, bem como sua caracterização.

3.2. AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A avaliação da contaminação foi realizada com base na interpretação de laudos de análises de água subterrânea pertencentes aos estudos realizados pelo DEMHAB. Os resultados foram comparados com a Resolução CONAMA 420 e, com base nas

mesmas, foi identificada a ocorrência de contaminação. Esse texto normativo foi selecionado para comparação por sua maior abrangência, compreendendo todos os elementos de interesse, considerando também sua significativa compatibilidade com outras normas relacionadas à qualidade de águas subterrâneas (por exemplo, Portaria MS 2914 e Resolução CONAMA 396).

Ainda na etapa de avaliação preliminar, foi realizado reconhecimento da área, a fim de averiguar a possibilidade de haver captações de água subterrânea no entorno do Aterro Benópolis. Delineou-se um raio de aproximadamente 500 metros dos limites do antigo aterro (Figura 13), limite esse definido através de estimativa de potencial influência da área contaminada pelos resíduos, anteriormente estimada como de no mínimo 70 metros (TRINDADE; FIGUEIREDO, 1982) e pela viabilidade da execução das visitas, considerando o tempo hábil como fator crítico.

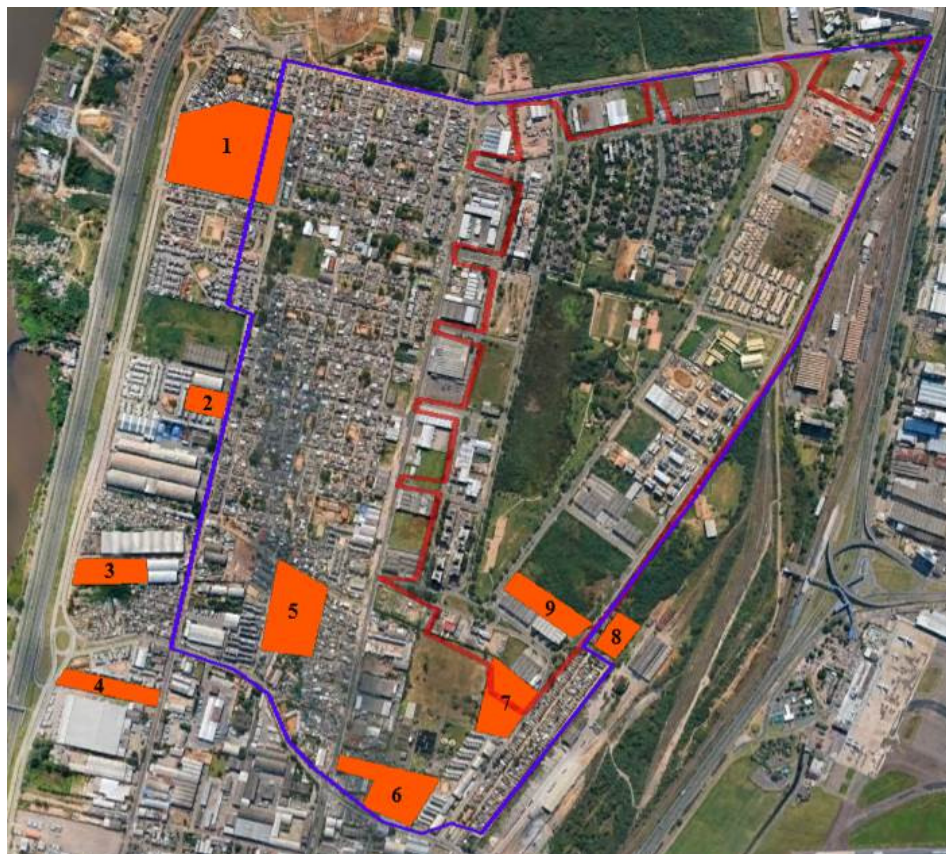


Figura 13 – Antigo Aterro Benópolis (em vermelho) e área visitada (em roxo). São exibidos em laranja os loteamentos estudados, como segue: 1) Loteamento Liberdade; 2) Loteamento Frederico Mentz, n.º 303; 3) Loteamento Frederico Mentz, n.º 521; 4) Casa de Passagem; 5) Loteamento 14; 6) Loteamento Vila Dona Teodora; 7) Cooperativa Santo Antônio; 8) Vila dos Ferroviários e 9) Residencial Barcelona I e II

Fonte: o Autor (software Google Earth).

Com o referido raio de influência delimitado, compreendendo a quase integridade do bairro Humaitá e parte do bairro Farrapos, deu-se início às visitas (do dia 5 ao 20 de fevereiro de 2015), procedendo-se a um processo de questionário informal em todas as casas do perímetro de interesse. O objetivo desse questionamento era identificar a existência de poços nas residências e na região, buscando sempre reforçar o objetivo de proteção à saúde humana. Havendo interesse do(a) morador(a), a entrevista poderia se prolongar, enquanto houvesse informações pertinentes ao estudo para serem compartilhadas. Concomitantemente com as entrevistas, foi realizado levantamento fotográfico *in situ* (Apêndice A).

3.3. ANÁLISE DE RISCO NÃO-CARCINOGENICO À SAÚDE HUMANA

As substâncias avaliadas na etapa da análise de risco foram aquelas cujos teores ultrapassaram os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 420, como segue: alumínio, bário, boro, chumbo, cobalto, ferro, manganês, níquel e zinco. Portanto, foram analisados somente os 144 poços que exibiram tais elementos ultrapassando as determinações da legislação.

Os cálculos de risco foram todos realizados de acordo com o preconizado por CETESB (2001, 2009) e USEPA (1989), realizando-se primeiramente a estimativa do ingresso (ou dose) de substâncias químicas durante o período de exposição considerado. Para tal, as concentrações das substâncias químicas, assim como os parâmetros de exposição, foram utilizadas para calcular os níveis de ingestão de cada substância (em miligramas de substância química por quilograma de peso corporal, por dia). Foram utilizados os parâmetros de exposição sugeridos pela CETESB (2009) (Quadro 1).

Quadro 1 – Parâmetros de exposição sugeridos, considerando a rota de ingestão d'água.

| Parâmetros de Exposição para Ingestão de Água Contaminada | | | | | | | |
|--|--------------|-------------------|-------------------|-------------|---------|-------------|---------|
| Parâmetro | Fonte | Trab. de Obras | Trab. Comercial e | Residencial | | Residencial | |
| | | Civis e Escavação | Industrial | Urbano | | Rural | |
| | | Adulto | Adulto | Adulto | Criança | Adulto | Criança |
| IRw (l/dia) | CETESB, 2009 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| EF (dias/ano) | CETESB, 2009 | 290 | 290 | 350 | 350 | 350 | 350 |
| ED (anos) | CETESB, 2001 | 2 | 25 | 30 | 6 | 72 | 6 |
| BW (kg) | COUTO, 2006 | 70 | 70 | 70 | 15 | 63 | 15 |
| ATn (dias) | IBGE, 2008 | 730 | 9125 | 10950 | 2190 | 26280 | 2190 |
| ATc (dias) | CETESB, 2009 | 26280 | 26280 | 26280 | 26280 | 26280 | 26280 |
| Observação: ATn – efeitos não carcinogênicos ATc – Efeitos Carcinogênicos | | | | | | | |

Fonte: CETESB, 2009.

De posse das concentrações das substâncias químicas de interesse e dos parâmetros de exposição, calculou-se o ingresso por ingestão de água contaminada, através da fórmula utilizada apresentada abaixo (Equação 1):

$$I = C \times \frac{IR \times EF \times ED}{BW} \times \frac{1}{AT}$$

Equação 1

Onde:

I = Ingresso por ingestão de água contaminada (mg/kg.dia)

C = Concentração do composto químico de interesse na água

IR = Taxa de ingestão de água (L/dia)

EF = Frequência da exposição (dias/ano)

ED = Duração média da exposição (ano)

BW = Peso corpóreo médio do indivíduo durante a exposição (kg)

AT = Período de exposição médio durante a exposição (dias)

Os efeitos não carcinogênicos, objeto de interesse no presente estudo, foram estimados pelo cálculo do quociente de perigo não carcinogênico (*Hazard Quotient*, ou HQ), que é obtido por meio da comparação de um nível de exposição por período de tempo (dose de ingresso, “I”) com uma RfD (Quadro 2) para um período de exposição similar, como apresentado na equação abaixo (Equação 2):

$$HQ = \frac{I_n}{RfD_i}$$

Equação 2

Onde:

I_n = Dose de ingresso para o cenário “n” (mg/kg.dia)

RfD_i = Dose de referência para a via de ingresso “i” (mg/kg.dia)

Quadro 2 – Doses de referência (RfD) para os elementos estudados.

| Elemento | RfD _i (mg/kg-dia) |
|----------|---------------------------------|
| Al | 1 |
| Ba | 0,2 |
| B | 0,2 |
| Co | 0,03 |
| Fe | 0,7 |
| Mn | 0,14 |
| Ni | 0,02 |
| Pb | 0,0036 |
| Zn | 0,3 |

Fonte: CETESB, 2013.

A metodologia segue com a caracterização do risco, onde houve a quantificação do risco relativo a cada composto químico e, posteriormente, de todos eles em conjunto. Assim, o índice de perigo (*Hazard Index*, ou HI) foi definido pelo somatório de dois ou mais HQs para múltiplas substâncias químicas e rotas de exposição (no presente estudo, como já mencionado, foi somente considerada a ingestão de água contaminada), como é apresentado na Equação 3. Nota-se que valores de HI superiores à unidade (HI>1) podem ensejar investigação mais aprofundada ou medidas de remediação.

$$HI = \sum \frac{I_n}{RfD_i}$$

Equação 3

Onde:

I_n = Dose de ingresso para o cenário de exposição “n” (mg/kg.dia)

RfD_i = Dose de referência para a via de ingresso “i” (mg/kg.dia)

Os mapas demonstrando os referidos índices de risco foram elaborados através do *software* ArcGIS 10, fazendo uso do método de interpolação Inverse Distance Weighted (IDW). Esta técnica de interpolação assume a lógica de que a variável que está sendo mapeada tem sua influência reduzida conforme a distância do local de amostragem (ESRI, 2011). O critério para a adoção deste método se deu por sua propriedade de não

estimar valores superiores ou inferiores aos máximos e mínimos registrados nos pontos de amostragem (SANTOS *et al.*, 2013).

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

Como apresentado pelo mapa que consta no Projeto Plano Diretor de Mineração da Região Metropolitana de Porto Alegre – PDM (CPRM, 2006), a geologia da área de estudo é marcada pela presença de sedimentos quaternários, constituídos por depósitos inconsolidados de areias e argilas. Adicionalmente, os estudos consultados (PROFILL, 2012a, 2012b, 2012c, 2012d, 2012e, 2012f, 2012g; 2013; SAPOTEC, 2014) descrevem a região como sendo formada por sedimentos fluviolacustres sobrepostos a sedimentos associados a ambiente de inundação, compostos por materiais areno-siltosos a areno-argilosos intercalados com camadas argilo-orgânicas (resultados esses corroborados pelos perfis de solo disponíveis nos referidos estudos). Esses materiais encontram-se assentados sobre as rochas graníticas que compõe o embasamento cristalino de Porto Alegre (Cinturão Dom Feliciano). De maneira geral, constata-se na área de interesse a presença, da base para o topo, de argilas orgânicas pouco compactas e materiais arenosos (eventualmente saibro), podendo os mesmos estar misturados a resíduos sólidos urbanos ou de construção, dependendo do loteamento.

De acordo com o Atlas Ambiental de Porto Alegre (MENEGAT *et al*, 1998), a morfologia encontrada no área de estudo é típica de um modelado plano, caracterizado por planícies fluviais, terraços internos e cordões arenosos (terras baixas). A presença dessa paisagem (terras baixas) é associada a solos hidromórficos com excesso de água, permanente ou temporário.

Segundo os estudos da empresa PROFILL Engenharia e Ambiente (2012a, 2012b, 2012c, 2012d, 2012e, 2012f, 2012g; 2013) e SAPOTEC (2014), o sistema aquífero superficial da área é constituído pelos materiais formadores dos depósitos sedimentares argilo-arenosos e areno-siltosos de origem fluvial, sendo caracterizado como aquífero livre. Sua espessura varia de acordo com a configuração dos referidos pacotes arenosos e o percentual de material argiloso presente, apresentando vazões de até 30 m³/h (reduzidas para de 4 a 9 m³/h quando há intercalação com camadas argilosas). A água subterrânea é tipicamente de baixa qualidade para o consumo humano, apresentando altos teores naturais (devidos à mineralogia das rochas

formadoras desses sedimentos) de ferro e outros metais. O aquífero local apresenta níveis estáticos médios posicionados entre 0,6 m e 2,0 m de profundidade, sendo essas medidas condicionadas ao local estudado, à época das medições e à presença de entulhos diversos da construção civil (como se discutirá mais adiante) (Figura 14).

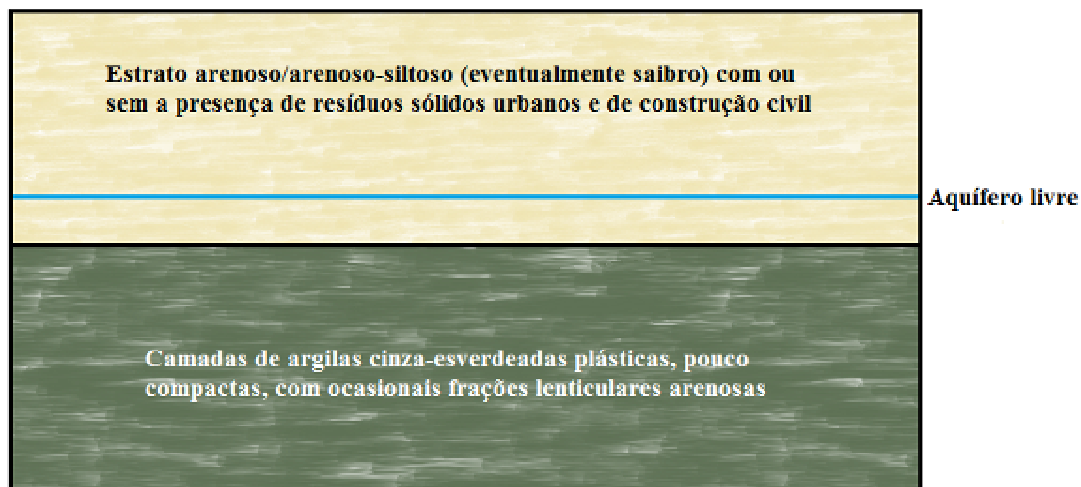


Figura 14 – Modelo hidrogeológico conceitual da área estudada, de acordo com os estudos avaliados.

Fonte: o Autor.

O fluxo preferencial do sistema aquífero estudado é caracterizado, com poucas exceções, por uma convergência para a área do antigo Aterro Benópolis (na maior parte, oeste-leste). Tal fluxo varia localmente, considerando-se o nível d'água superficial, a presença de resíduos da construção civil no substrato do terreno, a oscilação da cota de base do lago Guaíba e períodos de maior ou menor precipitação volumétrica, os quais podem modificar a saturação do solo e, conseqüentemente, os níveis d'água (NA) locais. Maiores detalhes serão apresentados nas áreas dos loteamentos que tiveram o estudo detalhado.

4.2. AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Um total de 144 poços, de um universo de 158 (ou seja, 91% dos poços estudados), apresentaram teores de metais acima dos limites preconizados pela legislação consultada (Resolução CONAMA 420), exibindo água imprópria para consumo humano. Destacam-se os elementos ferro e manganês como os mais as

substâncias que excedem os limites legais de maneira mais frequente. Informações obtidas através da análise de amostras de água subterrânea oriunda de poços tubulares profundos de Porto Alegre (SCHWARZBACH, 2000) indicam como principais problemas os altos teores de ferro e manganês, inclusive a presença de outros metais como cobre, zinco e manganês (este último devido à presença de biotita e hornblenda, ambos os minerais amplamente distribuídos nos solos do município de Porto Alegre). Mas deve-se notar que as atividades humanas são responsáveis por grande parte da contaminação de águas, sob certas condições. De acordo com Martins, I. & Lima, I. V. (2001), aerossóis, pesticidas e fertilizantes são possíveis fontes de contaminação do solo por manganês, que se somam à carga desse metal naturalmente presente nas águas doce e salgada. A presença do elemento pode também ser constatada em resíduos da agricultura e de alimentos, dejetos urbanos e de animais, tratamento de esgoto municipal, resíduos do solo, manufatura de metais e mistura de dejetos orgânicos.

Com vistas à organização e melhor descrição dos resultados obtidos, foi feita a apresentação dos resultados analíticos considerando cada loteamento avaliado, com suas diferentes características hidrogeológicas e de ocupação do solo. Nota-se que serão discutidos somente os poços que apresentaram teores acima dos limites determinados pela Resolução CONAMA 420.

4.2.1. **Loteamento Liberdade**

De acordo com PROFILL (2012a), essa área encontra-se densamente ocupada por casebres conjugados oriundos de invasões, sendo então o acesso interno feito por meio de pequenos becos sem pavimento. Constata-se no local a disposição de efluentes sanitários (esgoto) feita diretamente no solo, havendo também a presença de pilhas de resíduos, sejam os acumulados pela atividade de catação ou orgânicos. O terreno faz divisa com as Avenidas Voluntários da Pátria e Frederico Mentz, além de ser adjacente à Vila Mário Quintana, à Arena do Grêmio e outra área habitacional.

A coleta de amostras de água subterrânea se deu durante o mês de novembro de 2012, perfazendo trinta poços. Através da análise de seus resultados laboratoriais notam-se teores consistentemente elevados (e bastante acima dos limites legais) de manganês, ferro e bário, em ordem decrescente de frequência (Tabela 2). As análises

físico-químicas demonstraram valores de pH próximos à neutralidade e demais parâmetros coerentes com o resultados analíticos e compostos encontrados.

Tabela 2 – Amostras do Loteamento Liberdade apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420.

| | <u>Bário</u> | <u>Ferro</u> | <u>Manganês</u> | | <u>Bário</u> | <u>Ferro</u> | <u>Manganês</u> |
|-------------------|--------------|--------------|-----------------|-------------------|--------------|--------------|-----------------|
| | <u>µg/L</u> | | | | <u>µg/L</u> | | |
| PM-01 | - | 34398 | 3818 | PM-16 | - | - | 2610 |
| PM-02 | - | - | 1323 | PM-17 | - | - | 16588 |
| PM-03 | - | 4629 | 4884 | PM-18 | - | 5764 | 9874 |
| PM-04 | 1360 | 6989 | 1188 | PM-19 | - | - | 5877 |
| PM-05 | - | 7909 | 810 | PM-20 | - | - | 951,8 |
| PM-06 | 765,9 | 11758 | 1749 | PM-21 | - | - | 5969 |
| PM-07 | - | - | 1453 | PM-22 | - | - | 2400 |
| PM-08 | - | - | 1020 | PM-23 | - | 20298 | 4492 |
| PM-09 | - | 2620 | 7378 | PM-24 | - | - | 1613 |
| PM-10 | - | - | 1371 | PM-25 | - | - | 523,9 |
| PM-11 | - | - | 645 | PM-26 | - | - | 704,6 |
| PM-12 | - | - | 435 | PM-27 | - | - | 1089 |
| PM-13 | - | 6743 | 5068 | PM-28 | - | - | 3015 |
| PM-14 | - | - | 5276 | PM-29 | - | - | 3441 |
| PM-15 | - | 3119 | 6447 | PM-30 | - | - | 774,7 |
| CONAMA 420 | 700 | 2450 | 400 | CONAMA 420 | 700 | 2450 | 400 |

Fonte: PROFILL (2012a)

4.2.2. Loteamento Frederico Mentz n.º 303

Segundo PROFILL (2012b), essa área encontra-se inserida em área urbana, cercada por residências, pequenos comércios, uma empresa metalúrgica e a Avenida Frederico Mentz. O terreno se mostra desprovido de edificações, tendo sido utilizado no passado por uma transportadora, existindo ainda no local resquícios das estruturas dos antigos pavilhões da empresa. Foi verificada a presença de resíduos sólidos urbanos depositados na área pela população lindeira, sendo tais resíduos compostos por restos de comida, papeis diversos, garrafas PET, sacos plásticos e dejetos humanos e de animais.

A coleta de amostras de água subterrânea se deu durante o mês de agosto de 2012, perfazendo oito poços. Durante as perfurações dos poços, não foram encontradas

camadas de resíduos. Através da análise de seus resultados laboratoriais notam-se teores elevados de manganês, ferro e bário, em ordem decrescente de frequência (Tabela 3).

Além dos já citados, também são notáveis os altos teores de alumínio, chumbo e zinco apresentados pelo PM-03. As análises físico-químicas demonstraram valores de pH próximos à neutralidade e demais parâmetros coerentes com o resultados analíticos e compostos encontrados.

Tabela 3 – Amostras do Loteamento Frederico Mentz n.º 303 apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420.

| | Alumínio | Bário | Boro | Chumbo | Ferro | Manganês | Zinco |
|-------------------|-------------|------------|------------|-----------|-------------|------------|-------------|
| | µg/L | | | | | | |
| PM-01 | - | - | - | - | - | 1237 | - |
| PM-02 | - | 1849 | 1248 | - | 3276 | 735,4 | - |
| PM-03 | 7360 | 2085 | 1748 | 49,8 | 17388 | 2440 | 1321 |
| PM-04 | - | - | - | - | - | 5000 | - |
| PM-05 | - | 1054 | - | - | - | 2384 | - |
| PM-06 | - | 775,6 | - | - | 5351 | 6377 | - |
| PM-07 | - | - | - | - | - | 1439 | - |
| PM-08 | - | - | - | - | - | 1713 | - |
| CONAMA 420 | 3500 | 700 | 500 | 10 | 2450 | 400 | 1050 |

Fonte: PROFILL (2012b)

4.2.3. Loteamento Frederico Mentz n.º 521

Segundo PROFILL (2012c), essa área encontra-se inserida em área ocupada por moradias irregulares, sendo cercada por pavilhões (depósitos) e tendo como delimitador a Avenida Voluntários da Pátria. O terreno se mostra desprovido de edificações em sua quase totalidade, apresentando casebres contíguos à beira da Avenida Farrapos, oriundos de invasões. Foi verificada a presença de resíduos sólidos urbanos depositados na área pela população lindeira, sendo tais resíduos compostos por restos de comida, papéis diversos, garrafas PET, sacos plásticos e dejetos humanos e de animais. Também há presença de resíduos de construção civil no local.

A coleta de amostras de água subterrânea se deu durante o mês de outubro de 2012, perfazendo doze poços. Durante as perfurações dos poços, não foram encontradas

camadas de resíduos. Através da análise de seus resultados laboratoriais notam-se teores elevados de, predominantemente, manganês (Tabela 4). As análises físico-químicas demonstraram valores de pH próximos à neutralidade e demais parâmetros coerentes com o resultados analíticos e compostos encontrados.

Tabela 4 – Amostras do Loteamento Frederico Mentz n.º 521 apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420.

| | Bário | Boro | Ferro | Manganês |
|-------------------|------------|------------|-------------|------------|
| | µg/L | | | |
| PM-01 | - | 1001 | - | 830,3 |
| PM-02 | - | - | 2516 | 3385 |
| PM-03 | - | - | - | 571,5 |
| PM-04 | - | - | - | 3115 |
| PM-05 | - | - | - | 992,5 |
| PM-06 | - | - | - | 1429 |
| PM-07 | - | - | - | 1749 |
| PM-08 | - | - | 8200 | 3555 |
| PM-09 | - | - | - | 1598 |
| PM-10 | - | - | 5293 | 3595 |
| PM-11 | - | - | - | 854,4 |
| PM-12 | 729,8 | - | 24708 | 1930 |
| CONAMA 420 | 700 | 500 | 2450 | 400 |

Fonte: PROFILL (2012c)

4.2.4. Casa de Passagem

Segundo PROFILL (2012d), essa área encontra-se inserida em um local ocupado por moradores em trânsito oriundos de invasões habitacionais no bairro Humaitá e região. É cercada por diversas empresas, algumas residências, a Avenida Voluntários da Pátria e a Avenida Frederico Mentz. Não há prédios ou edificações de grande porte, somente casas conjugadas.

A coleta de amostras de água subterrânea se deu durante o mês de outubro de 2012, perfazendo treze poços. Durante as perfurações dos poços, não foram encontradas camadas de resíduos, mas sim ocorrência de RSU de forma fragmentada e intercalada com resíduos da construção civil. Através da análise de seus resultados laboratoriais

notam-se teores elevados principalmente de manganês e ferro, com destaque para uma concentração acima do limite de cobalto no PM-03 (Tabela 5). As análises físico-químicas demonstraram valores de pH próximos à neutralidade, levemente ácidas, e demais parâmetros coerentes com o resultados analíticos e compostos encontrados.

Tabela 5 – Amostras da Casa de Passagem apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420.

| | Bário | Boro | Cobalto | Ferro | Manganês |
|-------------------|------------|------------|-----------|-------------|------------|
| | μg/L | | | | |
| PM-01 | - | - | - | - | 3869 |
| PM-02 | - | 569,9 | - | 9875 | 4281 |
| PM-03 | - | - | 228,3 | 7852 | 13558 |
| PM-04 | - | - | - | - | 1274 |
| PM-05 | 705,5 | - | - | 4546 | 3525 |
| PM-06 | - | - | - | - | 2053 |
| PM-07 | - | - | - | - | 1881 |
| PM-08 | - | - | - | - | 1081 |
| PM-09 | - | 1201 | - | - | 1946 |
| PM-10 | - | - | - | - | 5879 |
| PM-11 | - | - | - | - | 3748 |
| PM-12 | - | - | - | 13188 | 422,6 |
| PM-13 | - | - | - | - | 1407 |
| CONAMA 420 | 700 | 500 | 70 | 2450 | 400 |

Fonte: PROFILL (2012d)

4.2.5. Loteamento 14

Segundo PROFILL (2012e), essa área encontra-se inserida em área ocupada por moradias irregulares, sendo próxima a loteamento residencial. É cercada por residências e pequenos comércios, a Rua Padre Blásio Vogel e a Rua Monsenhor Severino Brun. Não há prédios ou edificações de grande porte, somente casebres conjugados oriundos de invasão.

A coleta de amostras de água subterrânea se deu durante o mês de agosto de 2012, perfazendo vinte e nove poços. Durante as perfurações dos poços, não foram encontradas camadas de resíduos, mas sim ocorrência de RSU de forma fragmentada e intercalada com resíduos da construção civil. Através da análise de seus resultados

laboratoriais notam-se teores elevados predominantemente de manganês, com destaque para algumas concentrações acima do limite de níquel (Tabela 6). As análises físico-químicas demonstraram valores de pH próximos à neutralidade e demais parâmetros coerentes com o resultados analíticos e compostos encontrados.

Tabela 6 – Amostras do Loteamento 14 apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420.

| | Bário | Boro | Ferro | Manganês | Níquel |
|-------------------|------------|------------|-------------|------------|-----------|
| | μg/L | | | | |
| PM-01 | - | - | 6732 | 4701 | 21,7 |
| PM-02 | - | - | - | 477,6 | - |
| PM-03 | - | - | - | 3159 | - |
| PM-04 | - | - | - | 1188 | - |
| PM-05 | - | - | - | 2367 | - |
| PM-07 | - | - | - | 772,4 | - |
| PM-08 | - | - | - | 474 | - |
| PM-09 | - | - | - | 1777 | - |
| PM-10 | - | - | - | 2703 | - |
| PM-11 | - | - | - | 2246 | - |
| PM-12 | - | - | - | 7290 | - |
| PM-13 | - | - | - | 918,8 | - |
| PM-14 | - | - | - | 1111 | - |
| PM-15 | - | - | - | 11448 | - |
| PM-16 | - | - | - | 781 | - |
| PM-17 | - | - | - | 5230 | - |
| PM-18 | - | - | - | 685,1 | - |
| PM-19 | - | - | - | 764,8 | - |
| PM-23 | - | - | - | 551,6 | - |
| PM-24 | - | - | - | - | 28,9 |
| PM-25 | 766,7 | - | - | 1251 | - |
| PM-26 | - | - | - | 2410 | 22,8 |
| PM-27 | - | - | - | 5439 | - |
| PM-28 | - | - | - | 1846 | - |
| PM-29 | 1147,9 | 557,6 | - | 2652 | - |
| CONAMA 420 | 700 | 500 | 2450 | 400 | 20 |

Fonte: PROFILL (2012e)

4.2.6. Loteamento Vila Dona Teodora

Segundo PROFILL (2012f), a área encontra-se inserida em local ocupado por invasões, cercada por empresas de médio porte e residências. Há grande quantidade de RSU e pilhas de material relacionado à atividade de catação.

A coleta de amostras de água subterrânea se deu durante o mês de setembro de 2012, perfazendo vinte e cinco poços. Notam-se teores elevados predominantemente de manganês (Tabela 7). Os valores de pH encontraram-se próximos à neutralidade e os demais parâmetros foram coerentes com o resultados analíticos.

Tabela 7 – Amostras do Loteamento Vila Dona Teodora apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420. Fonte: PROFILL (2012f).

| | Bário | Boro | Ferro | Manganês |
|-------------------|------------|------------|-------------|------------|
| | μg/L | | | |
| PM-01 | 830,1 | 579,9 | - | 980,5 |
| PM-02 | - | - | - | 443,1 |
| PM-03 | - | - | - | 3237,8 |
| PM-04 | - | - | - | 426,9 |
| PM-05 | - | - | - | 457,3 |
| PM-06 | - | - | - | 540,8 |
| PM-07 | - | - | - | 281,7 |
| PM-08 | 906 | - | - | 1347,4 |
| PM-09 | - | - | - | 508,5 |
| PM-11 | - | - | - | 1056 |
| PM-12 | - | - | - | 433,9 |
| PM-13 | - | - | 4745,7 | 3397,5 |
| PM-14 | 894,3 | 540,4 | - | 7897,2 |
| PM-15 | - | - | - | 1428 |
| PM-16 | - | - | - | 626,9 |
| PM-17 | 1433 | - | - | 2558,9 |
| PM-18 | - | - | - | 2552 |
| PM-19 | 1298,8 | 1083 | - | 2388,1 |
| PM-20 | 719 | - | - | 1307,7 |
| PM-22 | - | - | 20578 | 7613 |
| PM-23 | 1014,6 | 759,6 | 7051,3 | 1679,9 |
| PM-24 | 941,1 | - | - | 1986,7 |
| PM-25 | - | - | - | 551,1 |
| CONAMA 420 | 700 | 500 | 2450 | 400 |

4.2.7. Cooperativa Santo Antônio

Segundo PROFILL (2012g), o terreno se encontra desprovido de edifícios, estando nele instalados pequenos casebres sobrepostos e conjugados, estes oriundos de invasões. Segundo moradores locais, a área era utilizada para o cultivo de arroz (relato corroborado durante a fase de entrevistas), pela condição alagadiça que apresenta.

A coleta de amostras de água subterrânea se deu durante o mês de outubro de 2012, perfazendo vinte e quatro poços. Durante as perfurações dos poços, não foram encontradas camadas de resíduos, mas sim ocorrência de RSU de forma fragmentada e intercalada com resíduos da construção civil. Através da análise de seus resultados laboratoriais notam-se teores elevados de manganês (Tabela 8). As análises físico-químicas demonstraram valores de pH próximos à neutralidade e demais parâmetros coerentes com o resultados analíticos e compostos encontrados.

Tabela 8 – Amostras da Cooperativa Santo Antônio apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420.

| | <u>Manganês</u> | | <u>Manganês</u> |
|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | <u>µg/L</u> | | <u>µg/L</u> |
| PM-01 | 14138 | PM-12 | 835,2 |
| PM-02 | 8092 | PM-13 | 1793 |
| PM-03 | 1386 | PM-14 | 5261 |
| PM-04 | 8825 | PM-15 | 541,6 |
| PM-05 | 1405 | PM-16 | 934,6 |
| PM-06 | 1899 | PM-17 | 915,1 |
| PM-07 | 1320 | PM-18 | 567,9 |
| PM-08 | 6291 | PM-20 | 482 |
| PM-09 | 3136 | PM-21 | 434,3 |
| PM-10 | 9937 | PM-24 | 2380 |
| CONAMA 420 | 400 | CONAMA 420 | 400 |

Fonte: PROFILL (2012g)

4.2.8. Vila dos Ferroviários

Segundo PROFILL (2013), a área avaliada encontra-se desprovida de moradias, composta por espessa vegetação e sendo utilizada para disposição de lixo doméstico pelos moradores do entorno. O terreno faz divisa com a Avenida Ernesto Neugebauer e instalações administrativas e operacionais da ALL Logística, bem como uma área de residências já implantadas.

Nota-se que, durante a fase de entrevistas, constatou-se presença de moradores irregulares na referida área, com a presença de abrigos precários.

A coleta de amostras de água subterrânea se deu durante o mês de novembro de 2012, perfazendo seis poços. Através da análise de seus resultados laboratoriais notam-se teores elevados de manganês e ferro, com destaque para eum elevado teor de cobalto no PM-02 (Tabela 9). As análises físico-químicas demonstraram valores de pH próximos à neutralidade e demais parâmetros coerentes com o resultados analíticos e compostos encontrados.

Tabela 9 – Amostras da Vila dos Ferroviários apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420.

| | Cobalto | Ferro | Manganês |
|-------------------|-----------|-------------|------------|
| | µg/L | | |
| PM-01 | - | 10538 | 9108 |
| PM-02 | 75,8 | 19678 | 19138 |
| PM-03 | - | 6511 | 3859 |
| PM-04 | - | 13728 | 7853 |
| PM-05 | - | 12688 | 11508 |
| PM-06 | - | 12078 | 9032 |
| CONAMA 420 | 70 | 2450 | 400 |

Fonte: PROFILL (2013)

4.2.9. Residencial Barcelona I e II

Segundo SAPOTEC (2014), o terreno se encontra situado sobre o antigo Aterro Benópolis, inserido em região de ocupação mista (comercial e residencial).

Atualmente a área não possui atividades, e futuramente abrigará um condomínio residencial (Residencial Barcelona I e II, pertencente ao DEMHAB). A área é delimitada pela Avenida Amyntas Jacques de Moraes, Av. José Aloísio Filho, Rua Irmão Félix Roberto e Av. Ernesto Neugebaer.

A coleta de amostras de água subterrânea se deu durante o mês de junho de 2014, perfazendo oito poços. Através da análise de seus resultados laboratoriais notam-se teores elevados de manganês, ferro e boro (Tabela 10). As análises físico-químicas demonstraram valores de pH próximos à neutralidade e demais parâmetros coerentes com o resultados analíticos e compostos encontrados.

Tabela 10 – Amostras do Residencial Barcelona I e II apresentando concentrações de metais acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420.

| | Boro | Ferro | Manganês |
|-------------------|------------|-------------|------------|
| | μg/L | | |
| PM-01 | 588 | 6967 | 2375 |
| PM-02 | - | 15959 | 8302 |
| PM-03 | - | - | 939 |
| PM-04 | - | - | 3631 |
| PM-06 | 530 | - | - |
| PM-07 | - | 5139 | - |
| PM-08 | - | 6927 | 2060 |
| CONAMA 420 | 500 | 2450 | 400 |

Fonte: Sapotec (2014)

4.2.10. Captações na área estudada

Destaca-se que, durante a fase de entrevistas, não foram averiguadas captações de água subterrânea na área de interesse, sendo a região integralmente abastecida pelo DMAE (mesmo as residências mais precárias).

Os relatos colhidos dão conta de que houveram captações na região antes da instalação do Aterro Benópolis, porém a mesma já demonstrava baixa qualidade.

4.3. AVALIAÇÃO DO RISCO À SAÚDE HUMANA

4.3.1. Loteamento Liberdade

Os riscos totais calculados para o Loteamento Liberdade (Tabela 11) apresentam valores acima da unidade ($HI > 1$) em dez dos trinta poços avaliados (33,33% do total), sendo os elementos que mais contribuem para tais resultados o manganês e o ferro.

Alguns poços (PM-01 e PM-18) demonstram HIs ainda mais elevados ($HI > 2$), denotando então a péssima qualidade d'água ali presente e o alto risco potencial à eventual ingestão desse recurso hídrico.

Analisando a espacialização dos resultados obtidos, é possível notar que os poços que apresentam os HIs mais elevados encontram-se na porção norte-nordeste do loteamento, sendo necessário considerar que o fluxo de água subterrânea local possui sentido oeste-leste, em direção ao aterro (Figura 15).

Tabela 11 – Cálculo referente à análise de risco para o Loteamento Liberdade, exibindo os *Hazard Quotient* (HQ) para cada elemento em cada poço, e os *Hazard Index* (HI) para cada poço.

| | Bário | Ferro | Manganês | HI | | Bário | Ferro | Manganês | HI |
|-------|-----------------------------|-------|----------|--------------|-------|-----------------------------|-------|----------|--------------|
| | <i>Hazard Quotient</i> (HQ) | | | | | <i>Hazard Quotient</i> (HQ) | | | |
| PM-01 | - | 1.346 | 0.747 | 2.093 | PM-16 | - | - | 0.511 | 0.511 |
| PM-02 | - | - | 0.259 | 0.259 | PM-17 | - | - | 3.246 | 3.246 |
| PM-03 | - | 0.181 | 0.956 | 1.137 | PM-18 | - | 0.226 | 1.932 | 2.158 |
| PM-04 | 0.186 | 0.274 | 0.232 | 0.692 | PM-19 | - | - | 1.150 | 1.150 |
| PM-05 | - | 0.310 | 0.159 | 0.468 | PM-20 | - | - | 0.186 | 0.186 |
| PM-06 | 0.105 | 0.460 | 0.342 | 0.907 | PM-21 | - | - | 1.168 | 1.168 |
| PM-07 | - | - | 0.284 | 0.284 | PM-22 | - | - | 0.470 | 0.470 |
| PM-08 | - | - | 0.200 | 0.200 | PM-23 | - | 0.794 | 0.879 | 1.674 |
| PM-09 | - | 0.103 | 1.444 | 1.546 | PM-24 | - | - | 0.316 | 0.316 |
| PM-10 | - | - | 0.268 | 0.268 | PM-25 | - | - | 0.103 | 0.103 |
| PM-11 | - | - | 0.126 | 0.126 | PM-26 | - | - | 0.138 | 0.138 |
| PM-12 | - | - | 0.085 | 0.085 | PM-27 | - | - | 0.213 | 0.213 |
| PM-13 | - | 0.264 | 0.992 | 1.256 | PM-28 | - | - | 0.590 | 0.590 |
| PM-14 | - | - | 1.032 | 1.032 | PM-29 | - | - | 0.673 | 0.673 |
| PM-15 | - | 0.122 | 1.262 | 1.384 | PM-30 | - | - | 0.152 | 0.152 |

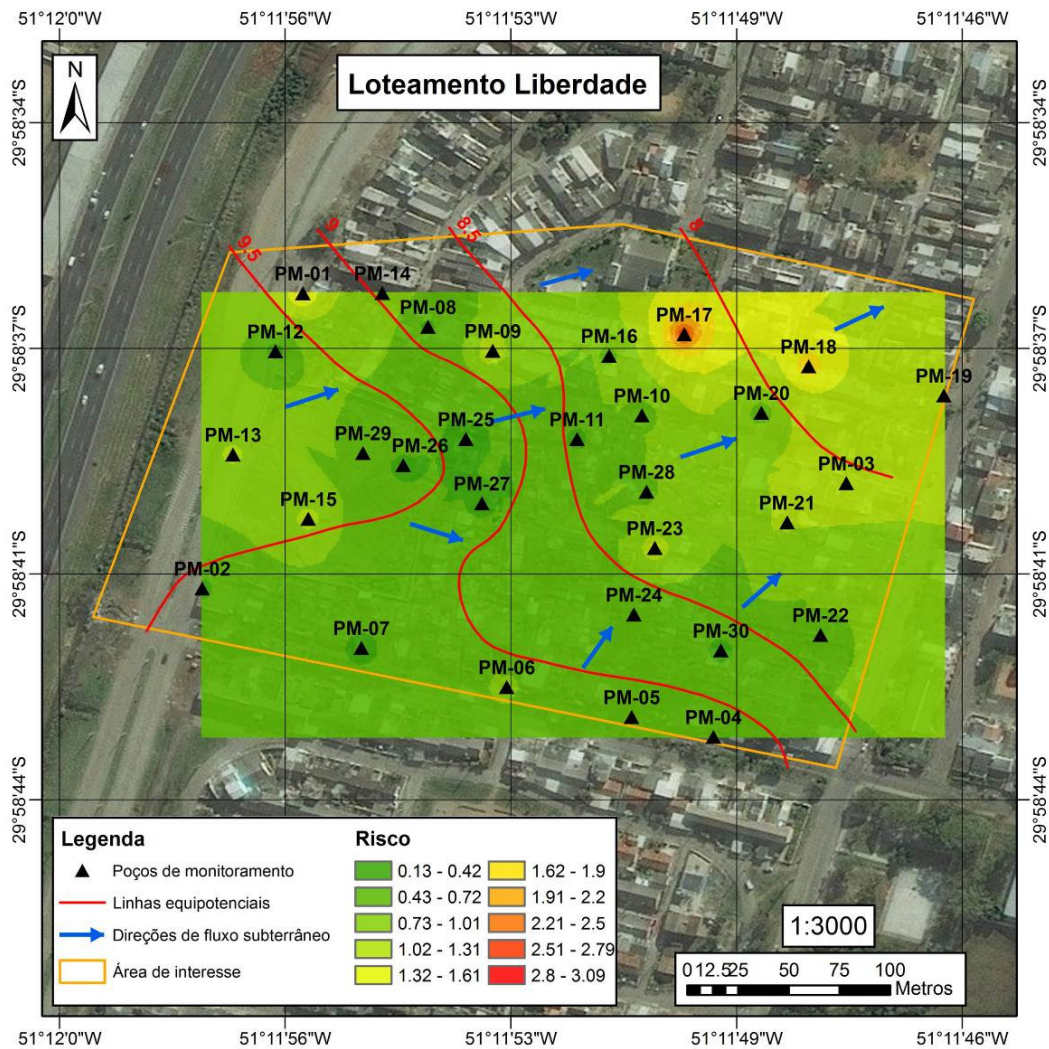


Figura 15 – Mapa do Loteamento Liberdade, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d’água subterrânea local.

Dado o fluxo preferencial do Loteamento Liberdade, nota-se que os altos teores encontrados para bário, ferro e manganês provavelmente não são devidos à presença do Aterro Benópolis (já que, a princípio, não haveria transporte de contaminantes oriundos do aterro), e sim à mineralogia local e às diversas atividades humanas desenvolvidas na área.

4.3.2. Loteamento Frederico Mentz n.º 303

Os riscos totais calculados para o Loteamento Frederico Mentz n. 303 (Tabela 12) apresentam valores acima da unidade ($HI > 1$) em dois dos oito poços avaliados (25% do total), sendo os elementos que mais contribuem para tais resultados o manganês, o ferro e o bário.

Um poço (PM-03) demonstra HI ainda mais elevado ($HI > 2$), denotando então a péssima qualidade d'água ali presente e o alto risco à eventual ingestão desse recurso hídrico.

Analisando a espacialização dos resultados obtidos, é possível notar que os poços que apresentam os HIs mais elevados distribuem-se de maneira irregular no loteamento, havendo valores elevados nas porções noroeste e sudeste do terreno. É necessário considerar que o fluxo de água subterrânea local possui sentido oeste-leste, em direção ao aterro (Figura 16).

Tabela 12 – Cálculo referente à análise de risco para o Loteamento Frederico Mentz n. 303, exibindo os *Hazard Quotient* (HQ) para cada elemento em cada poço, e os *Hazard Index* (HI) para cada poço.

| | Alumínio | Bário | Boro | Chumbo | Ferro | Manganês | Zinco | HI |
|-------|-----------------------------|-------|-------|--------|-------|----------|-------|--------------|
| | <i>Hazard Quotient</i> (HQ) | | | | | | | |
| PM-01 | - | - | - | . | . | 0.242 | . | 0.242 |
| PM-02 | - | 0.253 | 0.171 | . | 0.128 | 0.144 | . | 0.696 |
| PM-03 | 0.202 | 0.286 | 0.239 | 0.379 | 0.681 | 0.477 | 0.121 | 2.005 |
| PM-04 | - | - | - | . | . | 0.978 | . | 0.978 |
| PM-05 | - | 0.144 | - | . | . | 0.467 | . | 0.611 |
| PM-06 | - | 0.106 | - | . | 0.209 | 1.248 | . | 1.564 |
| PM-07 | - | - | - | . | . | 0.282 | . | 0.282 |
| PM-08 | - | - | - | . | . | 0.335 | . | 0.335 |

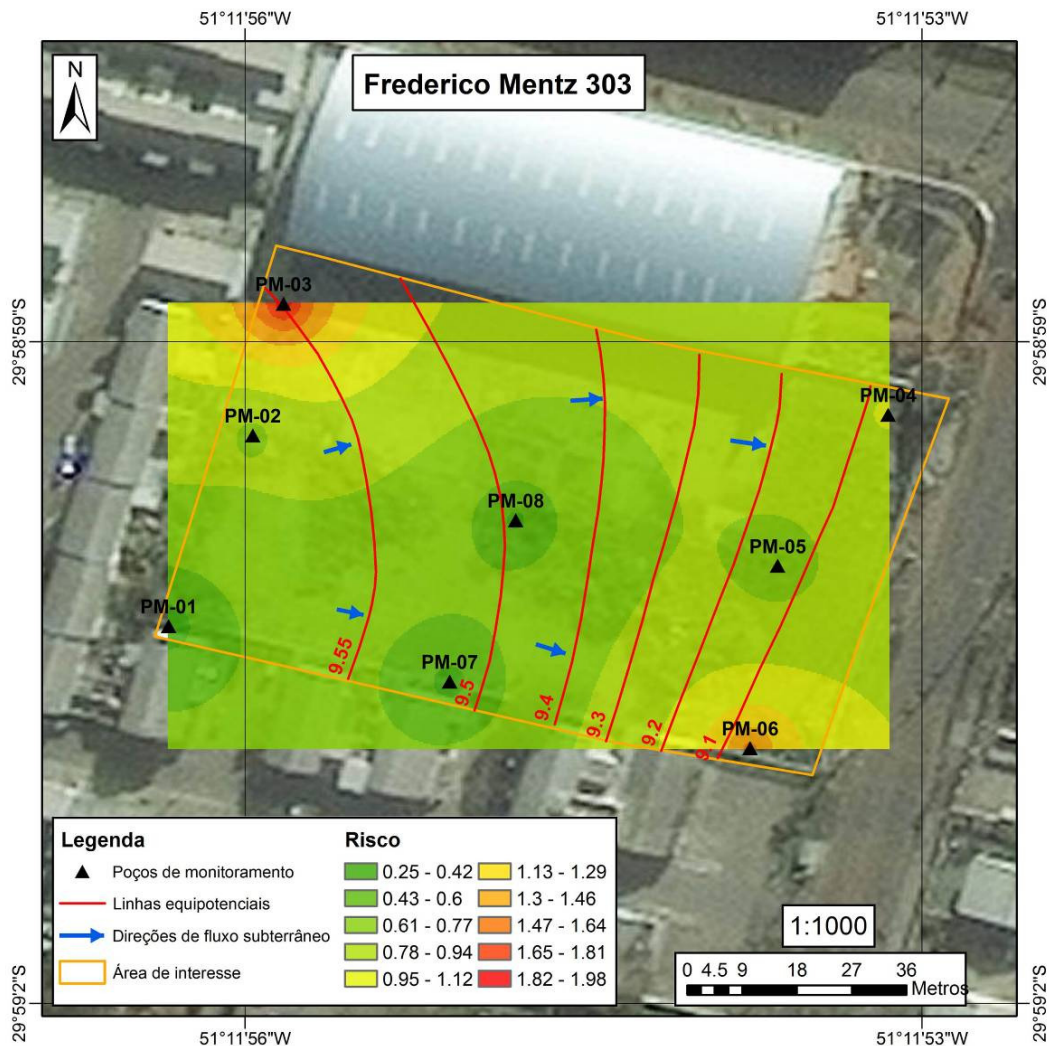


Figura 16 – Mapa do loteamento Frederico Mentz n. 303, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d'água subterrânea local.

Dado o fluxo preferencial do loteamento Frederico Mentz n.º 303, nota-se que os altos teores encontrados para alumínio, bário, boro, chumbo, ferro, manganês e zinco provavelmente não são devidos à presença do Aterro Benópolis (já que, a princípio, não haveria transporte de contaminantes oriundos do aterro), e sim à mineralogia local e às diversas atividades humanas desenvolvidas na área (como, por exemplo, a empresa metalúrgica ali presente).

4.3.3. Loteamento Frederico Mentz n.º 521

Os riscos totais calculados para o Loteamento Frederico Mentz n. 521 (Tabela 13) apresentam valores acima da unidade ($HI > 1$) em dois dos doze poços avaliados (16,66% do total), sendo os elementos que mais contribuem para tais resultados o manganês e o ferro.

Analisando a espacialização dos resultados obtidos, é possível notar que os poços que apresentam os HIs mais elevados distribuem-se na porção oeste-noroeste do terreno. É necessário considerar que o fluxo de água subterrânea local é uma exceção, possuindo sentido leste-oeste, em direção contrária à do aterro (Figura 17). Tal fluxo pode ser devido a uma questão topográfica local, ou uma disposição de camadas diferenciada, já que não foram encontradas camadas de resíduos durante a perfuração dos poços.

Tabela 13 – Cálculo referente à análise de risco para o Loteamento Frederico Mentz n. 521, exibindo os *Hazard Quotient* (HQ) para cada elemento em cada poço, e os *Hazard Index* (HI) para cada poço.

| | Bário | Boro | Ferro | Manganês | HI |
|-------|-----------------------------|-------|-------|----------|--------------|
| | <i>Hazard Quotient</i> (HQ) | | | | |
| PM-01 | - | 0.137 | - | 0.162 | 0.300 |
| PM-02 | - | - | 0.098 | 0.662 | 0.761 |
| PM-03 | - | - | - | 0.112 | 0.112 |
| PM-04 | - | - | - | 0.610 | 0.610 |
| PM-05 | - | - | - | 0.194 | 0.194 |
| PM-06 | - | - | - | 0.280 | 0.280 |
| PM-07 | - | - | - | 0.342 | 0.342 |
| PM-08 | - | - | 0.321 | 0.696 | 1.017 |
| PM-09 | - | - | - | 0.313 | 0.313 |
| PM-10 | - | - | 0.207 | 0.704 | 0.911 |
| PM-11 | - | - | - | 0.167 | 0.167 |
| PM-12 | 0.100 | - | 0.967 | 0.378 | 1.445 |

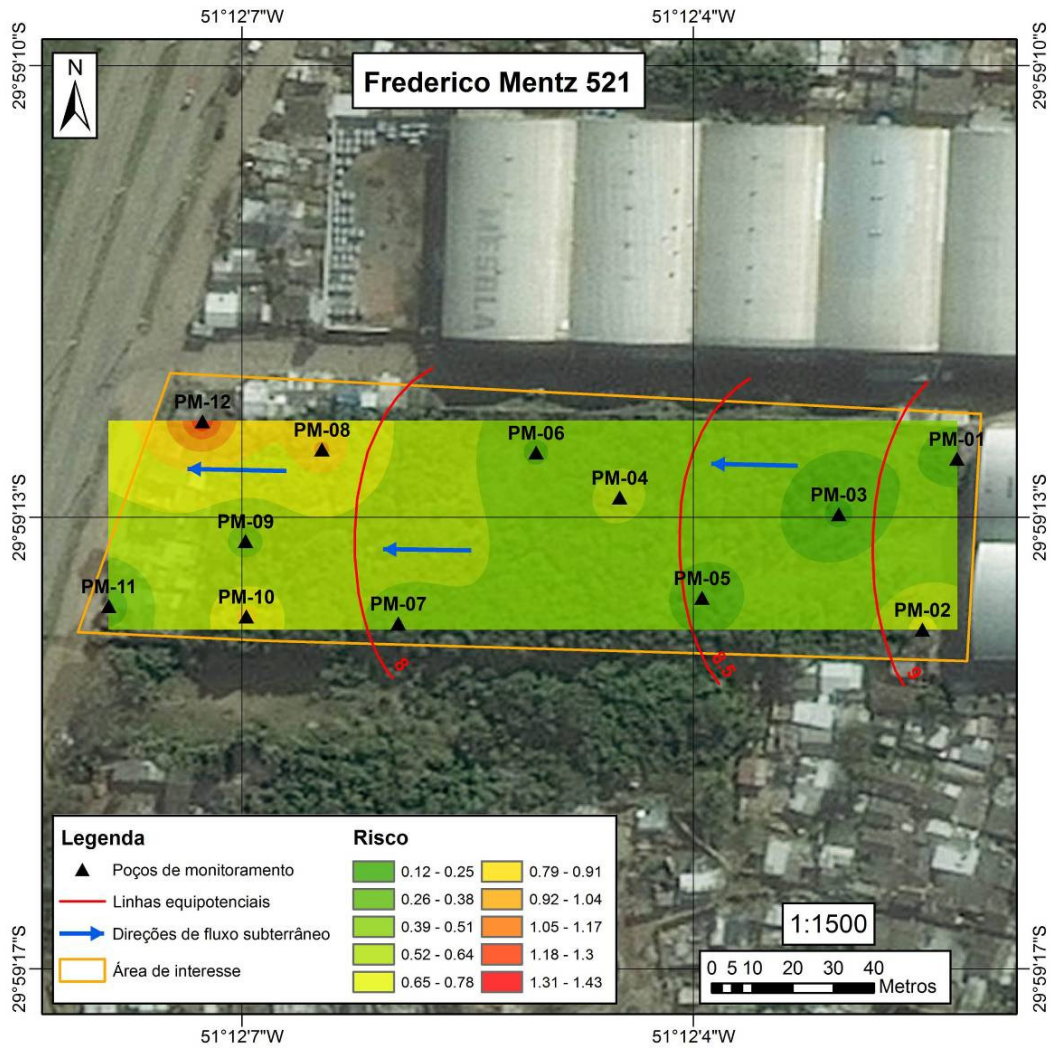


Figura 17 – Mapa do loteamento Frederico Mentz n. 521, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d'água subterrânea local.

4.3.4. Casa de Passagem

Os riscos totais calculados para Casa de Passagem (Tabela 14) apresentam valores acima da unidade ($HI > 1$) em três dos treze poços avaliados (23% do total), sendo os elementos que mais contribuem para tais resultados o manganês e o ferro. Há significativa contribuição do elemento cobalto no PM-03.

Um poço (PM-03) demonstra HI ainda mais elevado ($HI > 3$), denotando então a péssima qualidade de d'água ali presente e o alto risco à eventual ingestão desse recurso hídrico.

Analisando a espacialização dos resultados obtidos, é possível notar que os poços que apresentam os HIs mais elevados distribuem-se na porção leste do terreno. É necessário considerar que o fluxo de água subterrânea local possui sentido oeste-leste, em direção ao aterro (Figura 18).

Tabela 14 – Cálculo referente à análise de risco para a Casa de Passagem, exibindo os *Hazard Quotient* (HQ) para cada elemento em cada poço, e os *Hazard Index* (HI) para cada poço.

| | Bário | Boro | Cobalto | Ferro | Manganês | HI |
|-------|-----------------------------|-------|---------|-------|----------|--------------|
| | <i>Hazard Quotient</i> (HQ) | | | | | |
| PM-01 | - | - | - | - | 0.757 | 0.757 |
| PM-02 | - | 0.078 | - | 0.386 | 0.838 | 1.302 |
| PM-03 | - | - | 0.208 | 0.307 | 2.653 | 3.169 |
| PM-04 | - | - | - | - | 0.249 | 0.249 |
| PM-05 | 0.097 | - | - | 0.178 | 0.690 | 0.964 |
| PM-06 | - | - | - | - | 0.402 | 0.402 |
| PM-07 | - | - | - | - | 0.368 | 0.368 |
| PM-08 | - | - | - | - | 0.212 | 0.212 |
| PM-09 | - | 0.165 | - | - | 0.381 | 0.545 |
| PM-10 | - | - | - | - | 1.150 | 1.150 |
| PM-11 | - | - | - | - | 0.733 | 0.733 |
| PM-12 | - | - | - | 0.516 | 0.083 | 0.599 |
| PM-13 | - | - | - | - | 0.275 | 0.275 |

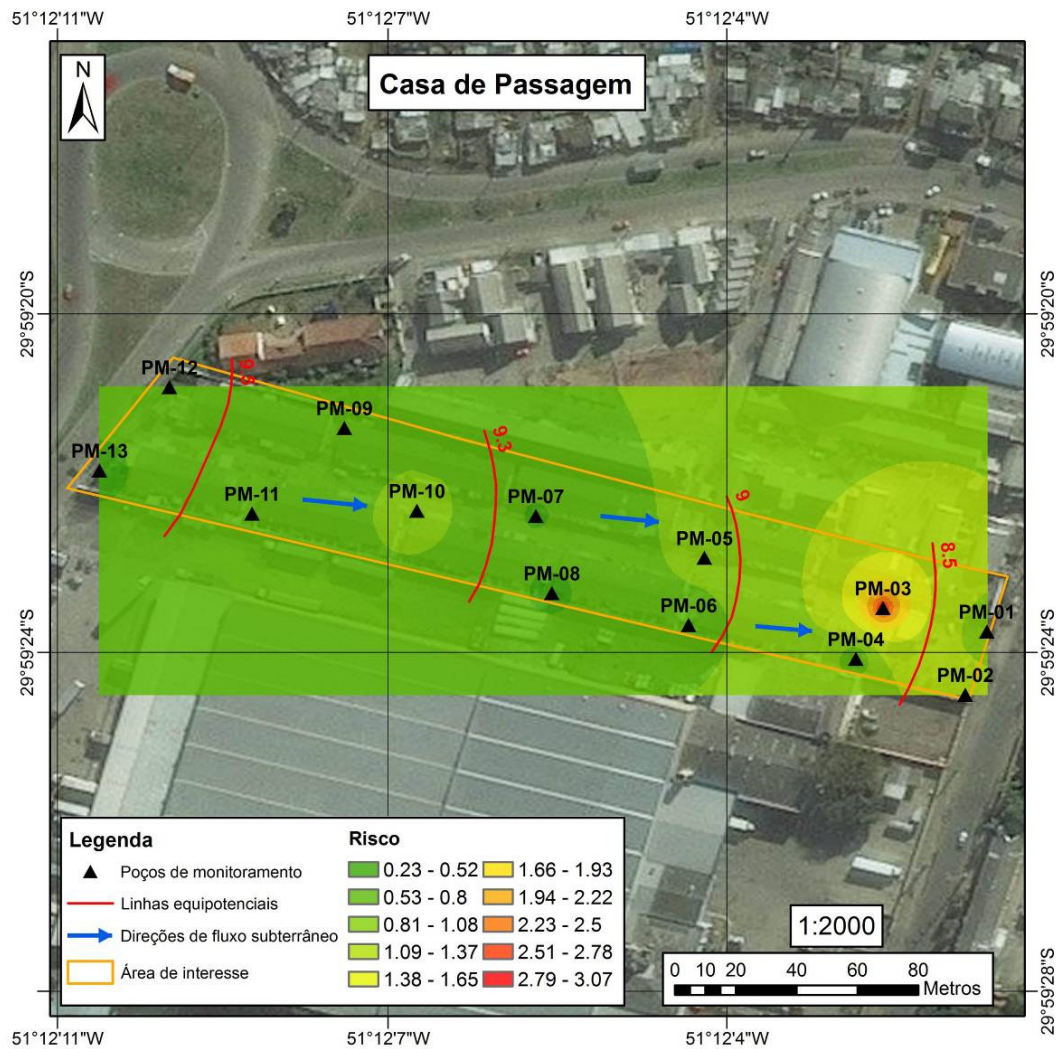


Figura 18 – Mapa da Casa de Passagem, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d'água subterrânea local.

Dado o fluxo preferencial da Casa de Passagem, nota-se que os altos teores encontrados para bário, boro, cobalto, ferro e manganês provavelmente não são devidos à presença do Aterro Benópolis (já que, a princípio, não haveria transporte de contaminantes oriundos do aterro), e sim à mineralogia local e às diversas atividades humanas desenvolvidas na área.

4.3.5. Loteamento 14

Os riscos totais calculados para o Loteamento 14 (Tabela 15) apresentam valores acima da unidade (HI>1) em três dos vinte e cinco poços avaliados (20% do total), sendo o elemento que mais contribui para tais resultados o manganês.

Um poço (PM-15) demonstra HI ainda mais elevado (HI>2), denotando então a péssima qualidade d'água ali presente e o alto risco à eventual ingestão desse recurso hídrico.

Tabela 15 – Cálculo referente à análise de risco para o Loteamento 14, exibindo os *Hazard Quotient* (HQ) para cada elemento em cada poço, e os *Hazard Index* (HI) para cada poço.

| | Bário | Boro | Ferro | Manganês | Níquel | |
|-------|-----------------------------|-------|-------|----------|--------|--------------|
| | <i>Hazard Quotient</i> (HQ) | | | | | HI |
| PM-01 | - | - | 0.263 | 0.920 | 0.030 | 1.213 |
| PM-02 | - | - | - | 0.093 | - | 0.093 |
| PM-03 | - | - | - | 0.618 | - | 0.618 |
| PM-04 | - | - | - | 0.232 | - | 0.232 |
| PM-05 | - | - | - | 0.463 | - | 0.463 |
| PM-07 | - | - | - | 0.151 | - | 0.151 |
| PM-08 | - | - | - | 0.093 | - | 0.093 |
| PM-09 | - | - | - | 0.348 | - | 0.348 |
| PM-10 | - | - | - | 0.529 | - | 0.529 |
| PM-11 | - | - | - | 0.440 | - | 0.440 |
| PM-12 | - | - | - | 1.427 | - | 1.427 |
| PM-13 | - | - | - | 0.180 | - | 0.180 |
| PM-14 | - | - | - | 0.217 | - | 0.217 |
| PM-15 | - | - | - | 2.240 | - | 2.240 |
| PM-16 | - | - | - | 0.153 | - | 0.153 |
| PM-17 | - | - | - | 1.023 | - | 1.023 |
| PM-18 | - | - | - | 0.134 | - | 0.134 |
| PM-19 | - | - | - | 0.150 | - | 0.150 |
| PM-23 | - | - | - | 0.108 | - | 0.108 |
| PM-24 | - | - | - | 0.040 | - | 0.040 |
| PM-25 | 0.105 | - | - | 0.245 | - | 0.350 |
| PM-26 | - | - | - | 0.472 | 0.031 | 0.503 |
| PM-27 | - | - | - | 1.064 | - | 1.064 |
| PM-28 | - | - | - | 0.361 | - | 0.361 |
| PM-29 | 0.157 | 0.076 | - | 0.519 | - | 0.753 |

Analisando a espacialização dos resultados obtidos, é possível notar que os poços que apresentam os HIs mais elevados distribuem-se de maneira irregular, ocorrendo tanto na porção nordeste como sudoeste do terreno. É necessário considerar que o fluxo de água subterrânea local possui uma tendência anômala (de modo geral, em direção ao aterro), pela grande presença de resíduos da construção civil (tijolos, calça, madeiras) na posição dos PM-23 e PM-24, que elevam o nível d'água localmente (Figura 19). Dado o fluxo preferencial do Loteamento 14, nota-se que os altos teores encontrados para bário, boro, ferro, manganês e níquel provavelmente são devidos à mineralogia local e às diversas atividades humanas desenvolvidas na área.

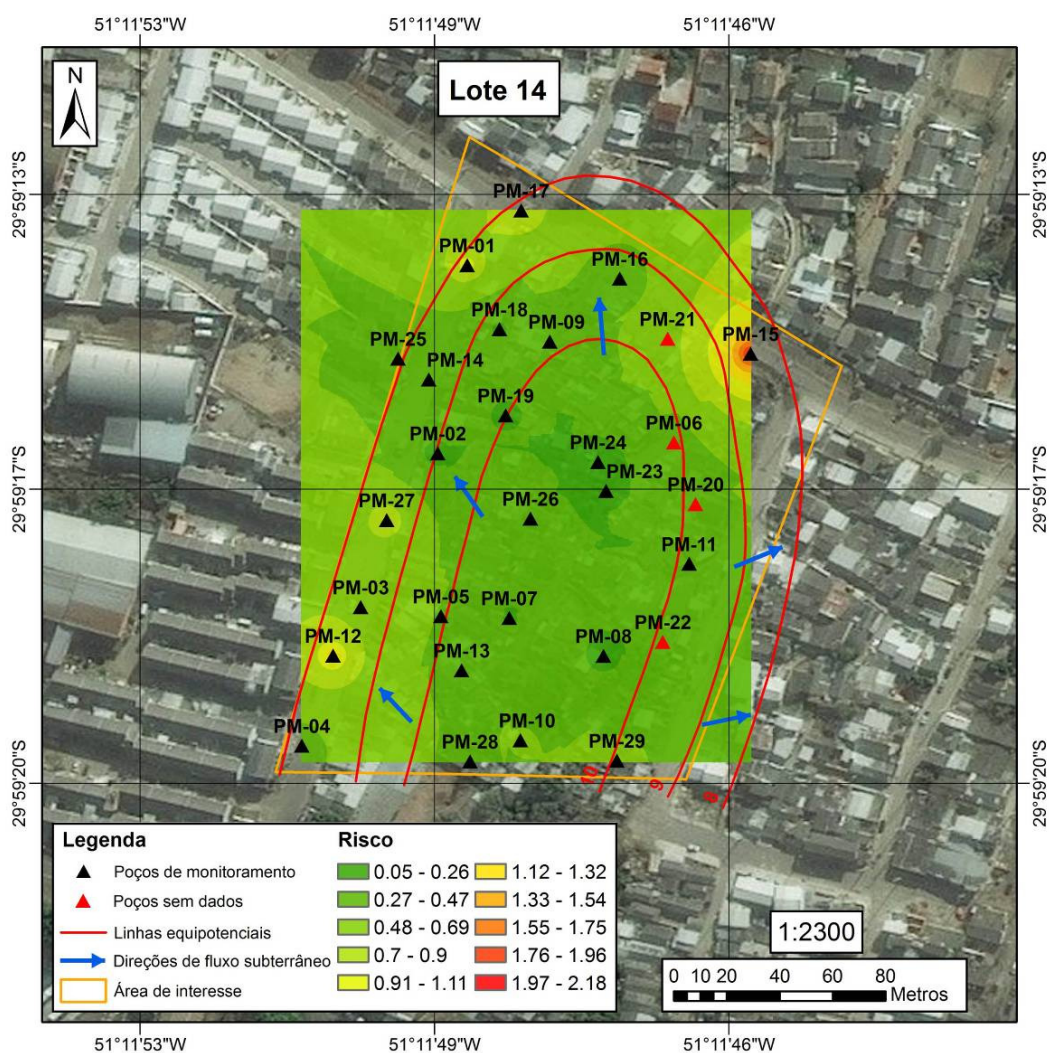


Figura 19 – Mapa do Loteamento 14, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo de água subterrânea local.

4.3.6. Loteamento Vila Dona Teodora

Os riscos totais calculados para o Loteamento Vila Dona Teodora (Tabela 16) apresentam valores acima da unidade ($HI > 1$) em dois dos vinte e três poços avaliados (20% do total), sendo os elementos que mais contribuem para tais resultados o manganês e o bário.

Um poço (PM-22) demonstra HI ainda mais elevado ($HI > 2$), denotando então a péssima qualidade d'água ali presente e o alto risco à eventual ingestão desse recurso hídrico.

Tabela 16 – Cálculo referente à análise de risco para o Loteamento Vila Dona Teodora, exibindo os *Hazard Quotient* (HQ) para cada elemento em cada poço, e os *Hazard Index* (HI) para cada poço.

| | Bário | Boro | Ferro | Manganês | |
|-------|-----------------------------|-------|-------|----------|--------------|
| | <i>Hazard Quotient</i> (HQ) | | | | HI |
| PM-01 | 0.114 | 0.079 | - | 0.192 | 0.385 |
| PM-02 | - | - | - | 0.087 | 0.087 |
| PM-03 | - | - | - | 0.634 | 0.634 |
| PM-04 | - | - | - | 0.084 | 0.084 |
| PM-05 | - | - | - | 0.089 | 0.089 |
| PM-06 | - | - | - | 0.106 | 0.106 |
| PM-07 | - | - | - | 0.055 | 0.055 |
| PM-08 | 0.124 | - | - | 0.264 | 0.388 |
| PM-09 | - | - | - | 0.100 | 0.100 |
| PM-11 | - | - | - | 0.207 | 0.207 |
| PM-12 | - | - | - | 0.085 | 0.085 |
| PM-13 | - | - | 0.186 | 0.665 | 0.851 |
| PM-14 | 0.123 | 0.074 | - | 1.545 | 1.742 |
| PM-15 | - | - | - | 0.279 | 0.279 |
| PM-16 | - | - | - | 0.123 | 0.123 |
| PM-17 | 0.196 | - | - | 0.501 | 0.697 |
| PM-18 | - | - | - | 0.499 | 0.499 |
| PM-19 | 0.178 | 0.148 | - | 0.467 | 0.794 |
| PM-20 | 0.098 | - | - | 0.256 | 0.354 |
| PM-22 | - | - | 0.805 | 1.490 | 2.295 |
| PM-23 | 0.139 | 0.104 | 0.276 | 0.329 | 0.848 |
| PM-24 | 0.129 | - | - | 0.389 | 0.518 |
| PM-25 | - | - | - | 0.108 | 0.108 |

Analisando a espacialização dos resultados obtidos, é possível notar que os poços que apresentam os HIs mais elevados distribuem-se na porção leste do terreno. É necessário considerar que o fluxo de água subterrânea local possui uma tendência anômala (de modo geral, em direção tangencial ao aterro), pela grande presença de resíduos da construção civil (tijolos, calça, madeiras) na posição dos PM-08 e PM-12, que elevam o nível d'água localmente (Figura 20). Dado o fluxo preferencial do Loteamento Vila Dona Teodora, nota-se que os teores de metais obtidos provavelmente são devidos à mineralogia local e às diversas atividades humanas desenvolvidas na área.

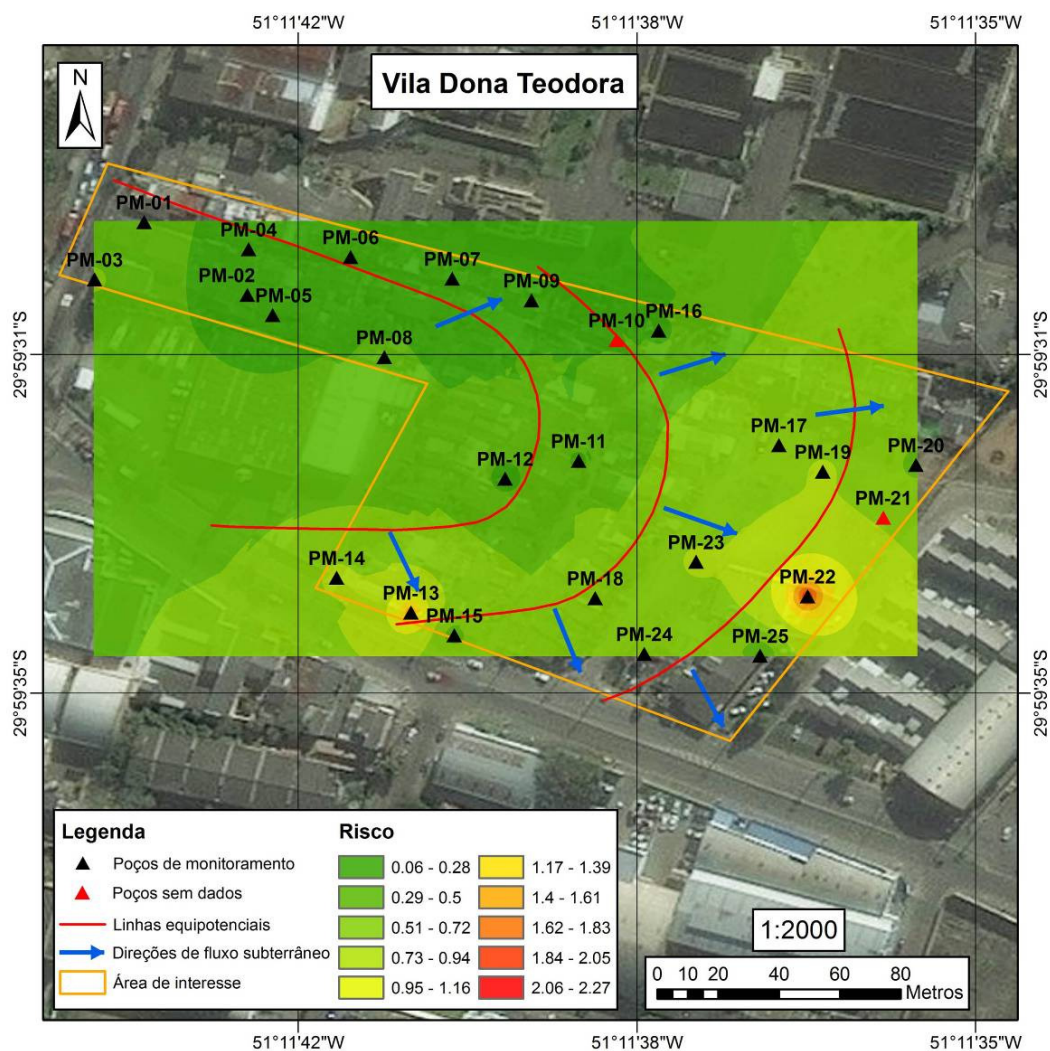


Figura 20 – Mapa do Loteamento Vila Dona Teodora, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d'água subterrânea local.

4.3.7. Cooperativa Santo Antônio

Os riscos totais calculados para a Cooperativa Santo Antônio (Tabela 17) apresentam valores acima da unidade ($HI > 1$) em seis dos vinte poços avaliados (30% do total), sendo o elemento que contribui exclusivamente para tais resultados o manganês.

Um poço (PM-01) demonstra HI ainda mais elevado ($HI > 2$), denotando então a péssima qualidade d'água ali presente e o alto risco à eventual ingestão desse recurso hídrico.

Tabela 17 – Cálculo referente à análise de risco para a Cooperativa Santo Antônio, exibindo os *Hazard Quotient* (HQ) para cada elemento em cada poço, e os *Hazard Index* (HI) para cada poço.

| | Manganês | | | Manganês | |
|-------|----------|--------------|-------|----------|--------------|
| | HQ | HI | | HQ | HI |
| PM-01 | 2.766 | 2.766 | PM-12 | 0.163 | 0.163 |
| PM-02 | 1.583 | 1.583 | PM-13 | 0.350 | 0.350 |
| PM-03 | 0.271 | 0.271 | PM-14 | 1.029 | 1.029 |
| PM-04 | 1.727 | 1.727 | PM-15 | 0.105 | 0.105 |
| PM-05 | 0.274 | 0.274 | PM-16 | 0.182 | 0.182 |
| PM-06 | 0.371 | 0.371 | PM-17 | 0.179 | 0.179 |
| PM-07 | 0.258 | 0.258 | PM-18 | 0.111 | 0.111 |
| PM-08 | 1.235 | 1.231 | PM-20 | 0.094 | 0.094 |
| PM-09 | 0.613 | 0.613 | PM-21 | 0.084 | 0.084 |
| PM-10 | 1.944 | 1.944 | PM-24 | 0.465 | 0.465 |

Analisando a espacialização dos resultados obtidos, é possível notar que os poços que apresentam os HIs mais elevados distribuem-se nas porções leste e norte do terreno. É necessário considerar que o fluxo de água subterrânea local possui sentido sudeste-noroeste, em direção ao aterro (Figura 21). Dado o fluxo preferencial da Cooperativa Santo Antônio, nota-se que os altos teores encontrados de manganês provavelmente não são devidos à presença do Aterro Benópolis (já que, a princípio, não haveria transporte de contaminantes oriundos do aterro), e sim à mineralogia local e às diversas atividades humanas desenvolvidas na área.

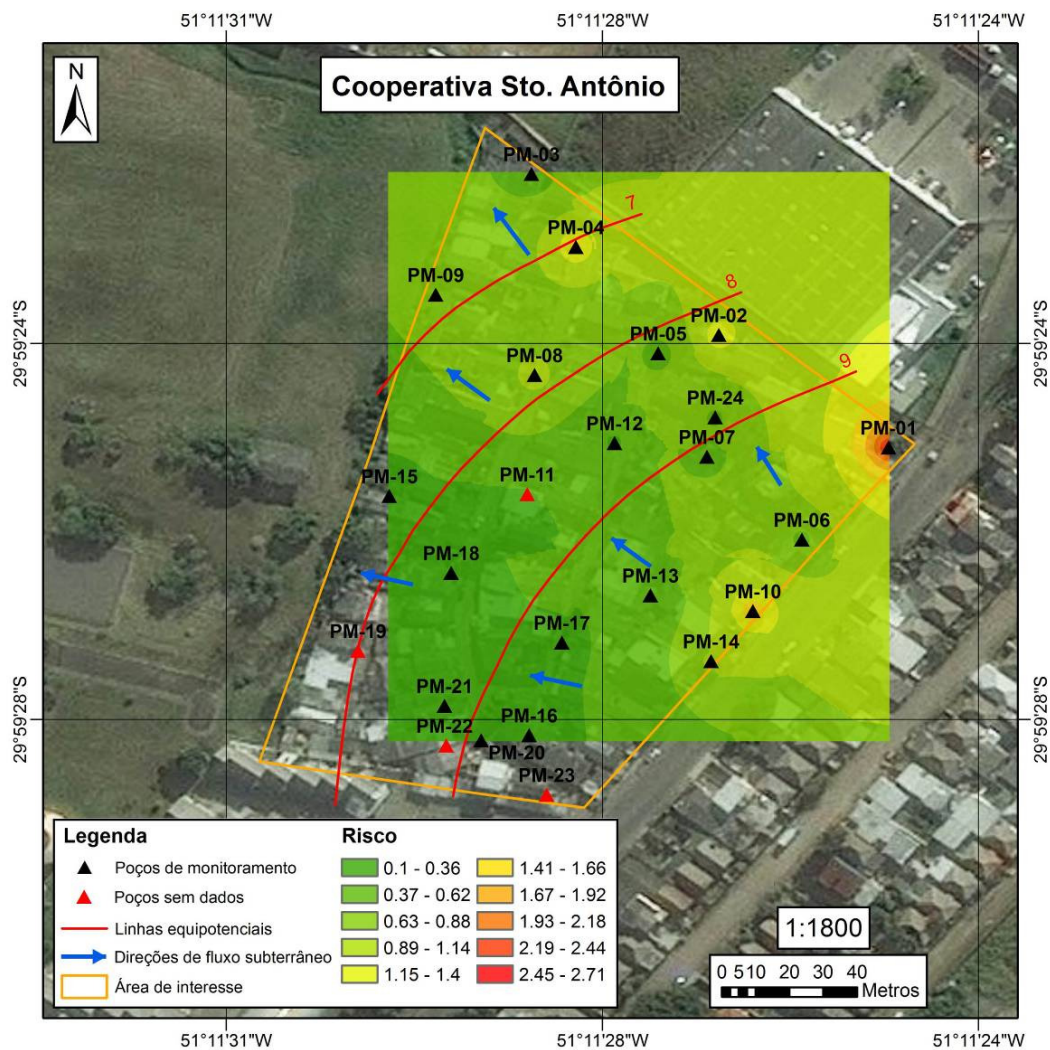


Figura 21 – Mapa da Cooperativa Santo Antônio, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d'água subterrânea local.

4.3.8. Vila dos Ferroviários

Os riscos totais calculados para a Vila dos Ferroviários (Tabela 18) apresentam valores acima da unidade ($HI > 1$) em todos os poços avaliados (100% do total), sendo os elementos que contribuem para tais resultados principalmente o manganês e o ferro.

Um poço (PM-02) demonstra HI ainda mais elevado ($HI > 4$), além de quatro poços (PM-01, PM-04, PM-05 e PM-06) exibindo $HI > 2$, denotando então a péssima qualidade d'água ali presente e o alto risco à eventual ingestão desse recurso hídrico.

Analisando a espacialização dos resultados obtidos, é possível notar que os poços que apresentam os HIs mais elevados distribuem-se na porção noroeste do terreno, mais próximo ao aterro. É necessário considerar que o fluxo de água subterrânea local possui sentido noroeste-sudeste, em direção contrária ao aterro (Figura 22).

Tabela 18 – Cálculo referente à análise de risco para a Vila dos Ferroviários, exibindo os *Hazard Quotient* (HQ) para cada elemento em cada poço, e os *Hazard Index* (HI) para cada poço.

| | Bário | Boro | Cobalto | Ferro | Manganês | |
|-------|-----------------------------|------|---------|-------|----------|--------------|
| | <i>Hazard Quotient</i> (HQ) | | | | | HI |
| PM-01 | - | - | - | 0.412 | 1.782 | 2.195 |
| PM-02 | - | - | 0.069 | 0.770 | 3.745 | 4.585 |
| PM-03 | - | - | - | 0.255 | 0.755 | 1.010 |
| PM-04 | - | - | - | 0.537 | 1.537 | 2.074 |
| PM-05 | - | - | - | 0.497 | 2.252 | 2.749 |
| PM-06 | - | - | - | 0.473 | 1.768 | 2.240 |

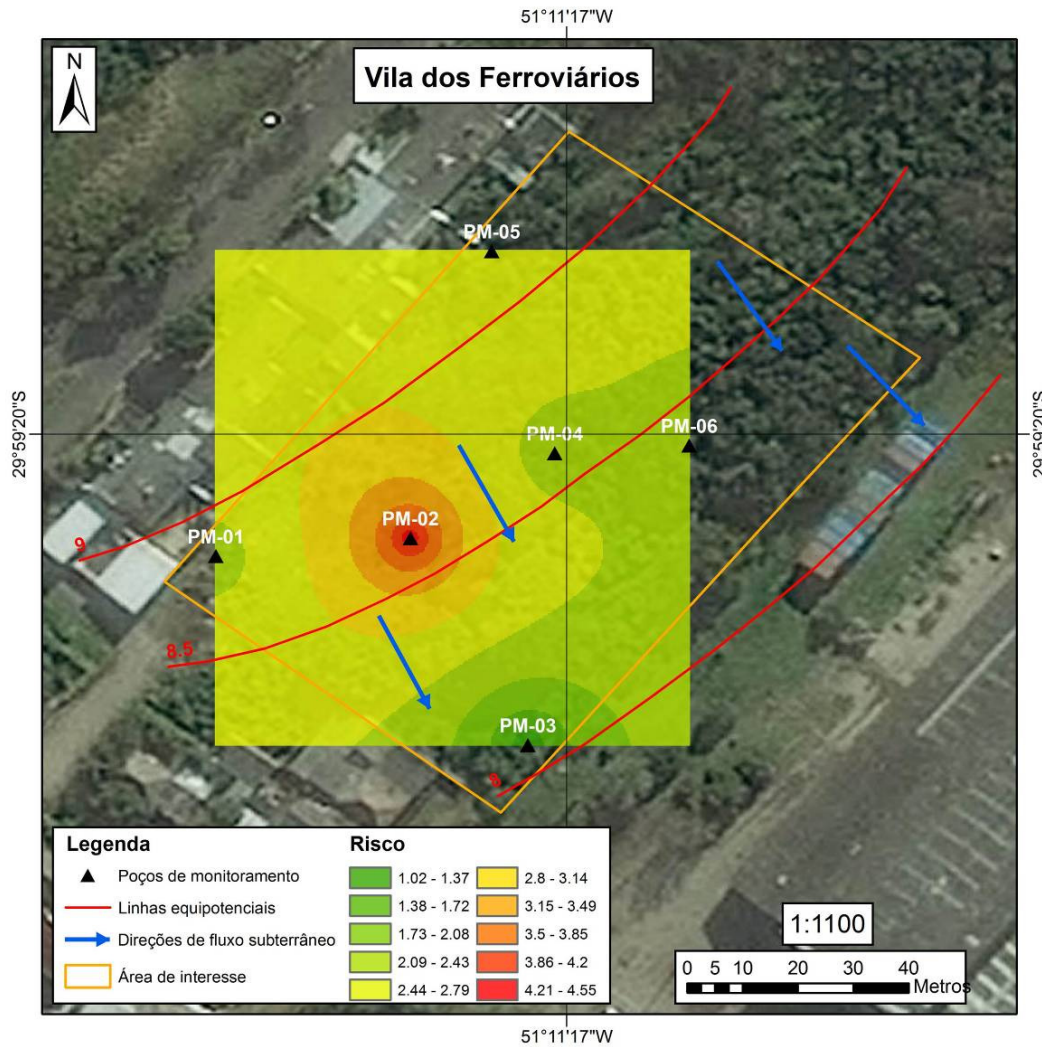


Figura 22 – Mapa da Vila dos Ferrovários, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d’água subterrânea local.

Dado o fluxo preferencial da Vila dos Ferrovários, nota-se que os altos teores encontrados para bário, boro, cobalto, ferro e manganês provavelmente são devidos à presença do Aterro Benópolis (eventualmente em conjunção com a mineralogia local e as atividades humanas desenvolvidas na área e em seu entorno).

4.3.9. Residencial Barcelona I e II

Os riscos totais calculados para o Residencial Barcelona I e II (Tabela 19) apresentam valores acima da unidade ($HI > 1$) em um dos sete poços avaliados (14,28% do total), sendo os elementos que contribuem para tais resultados principalmente o manganês e o ferro.

O supracitado poço (PM-02) demonstra $HI > 2$, denotando então a péssima qualidade d'água ali presente e o alto risco à eventual ingestão desse recurso hídrico.

Tabela 19 – Cálculo referente à análise de risco para o Residencial Barcelona I e II, exibindo os *Hazard Quotient* (HQ) para cada elemento em cada poço, e os *Hazard Index* (HI) para cada poço.

| | Boro | Ferro | Manganês | |
|-------|-----------------------------|-------|----------|--------------|
| | <i>Hazard Quotient</i> (HQ) | | | HQ |
| PM-01 | 0.081 | 0.273 | 0.465 | 0.818 |
| PM-02 | - | 0.625 | 1.625 | 2.249 |
| PM-03 | - | - | 0.184 | 0.184 |
| PM-04 | - | - | 0.711 | 0.711 |
| PM-06 | 0.073 | - | - | 0.073 |
| PM-07 | - | 0.201 | - | 0.201 |
| PM-08 | - | 0.271 | 0.403 | 0.674 |

Analisando a espacialização dos resultados obtidos, é possível notar que os poços que apresentam os HIs mais elevados distribuem-se na porção leste do terreno. É necessário considerar que o fluxo de água subterrânea local possui sentido sudeste-noroeste, em direção ao aterro (Figura 23).

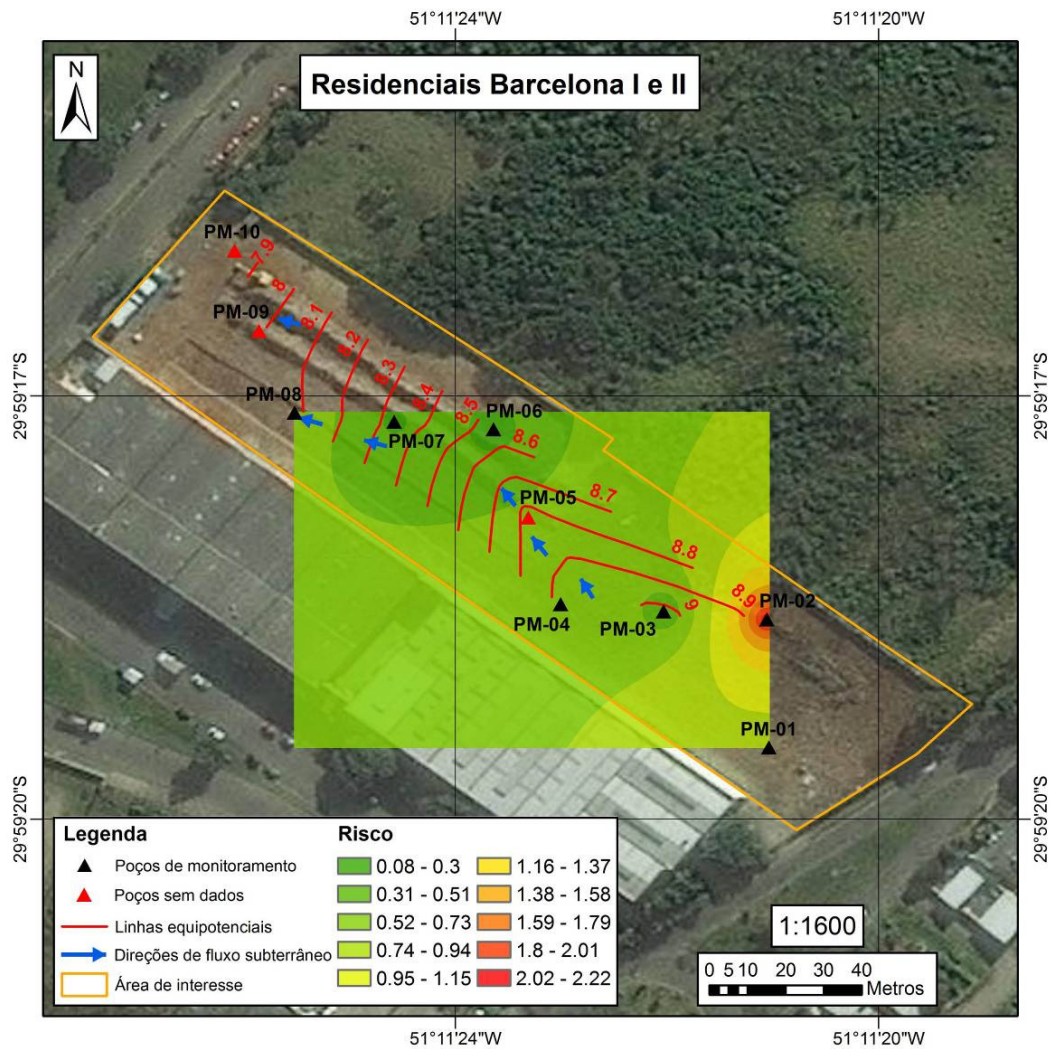


Figura 23 – Mapa do Residencial Barcelona I e II, apresentando a posição dos poços de monitoramento, seus valores de risco total (HI) e o fluxo d'água subterrânea local.

Dado o fluxo preferencial do Residencial Barcelona I e II, nota-se que os altos teores encontrados de boro, ferro e manganês provavelmente não são devidos à presença do Aterro Benópolis (já que, a princípio, não haveria transporte de contaminantes oriundos do aterro), e sim à mineralogia local e às atividades humanas desenvolvidas no entorno da área.

4.3.10. Análise dos resultados

A distribuição da contaminação das águas subterrâneas indica que provavelmente há na região uma composição litológica responsável pelos altos teores metálicos encontrados, associada à influência das diversas atividades humanas ali presentes (pequenos comércios e indústrias, metalurgia, disposição irregular de resíduos). Nota-se que elementos como ferro, manganês e boro estão frequentemente associados à composição natural do solo, enquanto outros, como cobalto, níquel e zinco, dependendo de suas concentrações, comumente possuem fontes antropogênicas.

Avaliando os resultados obtidos para os loteamentos estudados, constata-se que 35 dos 144 (aproximadamente 24% do total) poços analisados exibiram Índices de Risco (HI) mais elevados do que a unidade ($HI > 1$), enquanto 91% dos poços apresentaram teores acima do preconizado pela Resolução CONAMA 420 (o que indica águas impróprias para consumo). Tal discrepância se dá pelo fato de o método de avaliação de risco não utilizar os VIs previstos na legislação nacional, e sim doses de referência (RfDs) desenvolvidas pela USEPA (eventualmente adaptadas pela CETESB).

O fluxo preferencial de água subterrânea apresenta variação de loteamento para loteamento, o que pode ser explicado pelas diferentes épocas em que os níveis d'água foram medidos em cada loteamento (implicando variações pluviométricas e no nível do lago Guaíba), bem como pela eventual presença de camadas de resíduos em subsolo (RSU ou entulho de construção civil). De modo geral, nota-se que a maioria dos loteamentos possui fluxos preferenciais de água subterrânea com direção ao aterro, havendo duas exceções, Loteamento Frederico Mentz n.º 521 e a Vila dos Ferroviários, sendo que esta última é contígua ao antigo aterro e apresentou valores significativamente mais elevados de risco do que o restante. Assim, há indicação de que o Aterro Benópolis exerce potencial influência sobre a Vila dos Ferroviários.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

É necessário ressaltar que a metodologia da avaliação do risco à saúde humana possui algumas incertezas inerentes no seu processo, já que, na maioria dos casos, algumas informações são incompletas (como dados de amostragem, de toxicidade, forma de contato entre o indivíduo e a substância química, efeitos sinérgicos ao somar os quocientes de risco). Porém, tais incertezas diminuem à medida que a profundidade e abrangência dos estudos aumentam.

O Aterro Benópolis, ao longo dos anos (tanto em seu período ativo como desativado), provocou a contaminação de água e solo em seu entorno, ensejando assim o estudo do risco potencial não-carcinogênico relacionado à eventual ingestão de água de poços por adultos na referida área.

As entrevistas realizadas na área não permitiram constatar a presença de captações, sendo toda a região abastecida pelo DMAE. Assim, enquanto não houver receptor (indivíduo humano ou comunidade de indivíduos expostos direta ou indiretamente aos compostos químicos associados ao cenário de risco estudado), não se configura situação de risco, estritamente falando.

O aquífero da região é considerado livre, formado por camadas areno-siltosas e argilas orgânicas pouco compactas intercaladas, caracterizadas por uma água de baixa qualidade para consumo.

Quanto às análises físico-químicas, notou-se que os valores de pH sempre estiveram próximos à neutralidade, e que 91% dos poços avaliados apresentaram teores de metais acima do preconizado pela norma utilizada para comparação (Resolução CONAMA 420), caracterizando água imprópria para consumo humano nos mesmos. Tal resultado pode ser explicado tanto pelos altos teores naturais de certos metais na região, devido aos minerais que ali se encontram em abundância (biotita, hornblenda), como pelas diversas atividades humanas ali desempenhadas (incluindo pequenos comércios e indústrias, metalurgia e a disposição de resíduos sólidos). É necessário que se desenvolvam estudos mais detalhados a fim de avaliar a proporção da participação de cada agente (composição litológica e atividades antrópicas) nos teores de elementos químicos verificados, especialmente os que não são comumente associados à composição natural do solo, como cobalto, níquel e zinco.

Os resultados desse trabalho demonstraram a existência de risco não-carcinogênico potencial (já que, por conta do abastecimento do DMAE na região, não há população receptora) à população adulta da região, relacionado à ingestão de água subterrânea. Ao todo, 35 dos 144 poços avaliados (24% do total) apresentaram valores de HI acima da unidade ($HI > 1$). Tal resultado permite supor que o risco potencial oferecido à população infantil seja significativamente maior, por conta de a mesma apresentar menor peso corpóreo (assim, concentrando de maneira mais intensa os compostos químicos em seus tecidos).

A discrepância entre a proporção de poços que apresentam teores acima do preconizado pela Resolução CONAMA 420 (91% do total) e dos poços que exibem HI acima de 1 (24% do total) se dá pelo fato de o método de avaliação de risco não utilizar os VIs previstos na legislação nacional, e sim doses de referência (RfDs) desenvolvidas pela USEPA (eventualmente adaptadas pela CETESB). Ressalta-se também que, se fosse realizado o cálculo de risco com a inclusão de todos os elementos avaliados (mesmo os que não ultrapassaram os limites legais), provavelmente os HI exibiriam valores consideravelmente mais elevados.

Apesar de todos os loteamentos apresentarem risco não-carcinogênico potencial à população adulta da região, relacionado à ingestão de água subterrânea, é notável que a Vila dos Ferroviários apresentou valores significativamente mais elevados que o restante, além de exibir resultados preocupantes em todos os poços. Tal fato pode ser devido ao local ser o único loteamento que recebe fluxo de água subterrânea diretamente do aterro (que parece funcionar, dados os fluxos estudados e sua morfologia típica de terras baixas, como uma área de acumulação de contaminantes), sendo contíguo ao mesmo. Assim, há indicação de que o Aterro Benópolis exerce potencial influência sobre a Vila dos Ferroviários.

Abordagens alternativas, que considerassem as doses de ingresso de contaminantes provindas de outros meios de exposição como solo, ar e águas superficiais, também seriam de grande importância para avaliação do risco à saúde, no entanto não foram avaliadas pela falta de informações acerca desses meios.

Recomenda-se o desenvolvimento de estudos que determinem a fonte (seja ela natural ou antrópica) dos teores de elementos químicos acima do preconizado pela legislação encontrados na área de estudo, já que não se pode refutar a influência do

antigo aterro sobre a região baseando-se somente nos resultados dos estudos potenciométricos.

Finalmente, recomenda-se estender a investigação a aquíferos mais profundos para avaliar a ocorrência de problemas de contaminação em outros estratos de subsolo, bem como avaliar os sentidos preferenciais de fluxo de água subterrânea na região de maneira mais detalhada (a fim de se obter uma melhor compreensão dos processos ali existentes).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos - Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.** Rio de Janeiro. 2010. 24 p.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos.** 120 p. Projeto REENGE. ISBN: 85-85205-27-X. . São Carlos: EESC/USP, 1999.

CETESB. **Água subterrânea e poços tubulares.** 482 p. 3ª ed. São Paulo.1978.

CETESB. **Planilhas para Avaliação de Risco em Áreas Contaminadas sob Investigação.** Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/planilhaspara-avalia%C3%A7%C3%A3o-de-risco/8-planilhas>>. Acesso em: 11 jun. 2015. São Paulo, 2009.

CETESB/GTZ (Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit). **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas.** Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/manual-de-gerenciamento-de-ACs/7->. Acesso em: 3 Jun. 2015. São Paulo, 2001.

CHRISTENSEN, T.; KJELDSSEN, P.; JENSEN, D. **Biogeochemistry of landill leachate plumes: review.** Applied Geochemistry, v. 16, n. 7-8, p. 659-718, 2001.

CONAMA. **Resolução 396 de 03/04/2008.** Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. 11 p.

CONAMA. **Resolução 420 de 28/12/2009.** 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 antrópicas. 20 p.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais; **Projeto Plano Diretor de Mineração da Região Metropolitana de Porto Alegre - PDM** (Mapa Geológico Integrado - escala 1:250.000). Porto Alegre, 2006.

CUTRIM, A.; CAMPOS, J. **Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH**. Geociências, UNESP, São Paulo. V39, p. 401-411. São Paulo, 2011.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS DE PORTO ALEGRE. DMAE. **Plano diretor de água (2008-2009)**. Disponível em: <<http://www.portoalegre.rs.gov.br/dmae/>>. Acesso em: 25 Abr. 2015. Porto Alegre, 2008.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

Environmental Systems Research Institute – ESRI (2011). **Desktop Help 10.0 - How IDW works**. Disponível em: <[http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_IDW_works/009z0000007500000000/](http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_IDW_works/009z000000750000000/)>. Acesso em: 7 Jun. 2015.

FERREIRA, A. G. **Estudo dos Lixiviados das Frações do Aterro Sanitário de São Carlos – SP por Meio da Caracterização Físico-Química**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

FINLEY, B. & PAUSTENBACH, D. **The benefits of probabilistic exposure assessment: three case studies involving contaminated air, water and soil**. *Risk Analysis*, v. 14, n. 1, p. 53-73.1994.

HASENACK, H. et al. (Coord.). **Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: Geologia, Solos, Drenagem, Vegetação/Ocupação e Paisagem**. 84 p. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2008.

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008**. Rio de Janeiro, 2008.

IRIS. **List of IRIS Substances**. Disponível em:< <http://www.epa.gov/IRIS/>>. Acesso em: 5 Jun. 2015. Estados Unidos, 2004

KOLLER, D. K. **Avaliação Do Risco À Saúde Humana Por Meio Do Consumo De Água Subterrânea Contendo Metais, Na Região De Palmares Do Sul, Litoral Do Rio Grande Do Sul**. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013.

LIVINGSTONE, S., FRANZ, T., GUIGUER, N.. **Managing Ground-water Resources Using Wellhead Protection Programs**. Geoscience Canada, North America, n. 22. Disponível em: <<http://journals.hil.unb.ca/index.php/GC/article/view/3879/4393>>. Acesso em: 24 Abr. 2015. 1995.

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia. **Água Subterrânea: Conhecer para Proteger e Preservar**. Disponível em: <http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/agua_subterranea>. Acesso em: 31 Mai. 2015. Portugal, 2010.

LOBO, F. **Metais Tóxicos e suas Consequências para a Saúde Humana**. EcoDebate: Cidadania & Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.ecodebate.com.br/2011/08/01/metais-toxicos-e-suas-consequencias-para-a-saude-humana-artigo-de-frederico-lobo/>>. Acesso em: 2 Jun. 2015. Goiânia, 2011.

LOUVAR, J.F. & LOUVAR, B.D. **Health and environmental risk analysis: fundamentals with applications**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR. 678 p. 1998.

MARTINS, I. & LIMA, I. V. **Ecotoxicologia do manganês e seus compostos**. Série Caderno de Referência Ambiental V.7. 121 p. Salvador, 2001.

MCBEAN, E.A.; ROVERS, F.A.; FARQUHAR, G.J. **Solid waste landfill engineering and design**. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1995.

MENEGAT, R.; PORTO, M.L.; CARRARO, C.C.; FERNANDES, L.A.D. **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS. 200p. 1998.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE URBANO. **Águas subterrâneas. Um recurso a ser conhecido e protegido**. Brasília: SHRU/MMA, 2007.

PALAGI, A. C. **Avaliação do Risco à Saúde Humana na Área do Antigo Aterro Benópolis no Município de Porto Alegre - RS**. 2014. 96 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

PORFIRIO, Bianca; GOMES, Julio; JANISSEK, Paulo Roberto. **Avaliação de risco à saúde humana do aterro controlado de Morretes**. In: Eng. Sanit. Ambient., Rio de

Janeiro, v.19, n. 4, p.441-452..Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141341522014000400441&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 07 Jun. 2015. Curitiba, 2014.

PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Departamento Municipal de Limpeza Urbana. **Processo Administrativo nº 005.000098.77.9**. Porto Alegre, 1977.

PROFILL (PROFILL Engenharia e Ambiente). **Investigação Ambiental Confirmatória de Solo e Água Subterrânea – Loteamento Liberdade**. 66 p. Porto Alegre, 2012a.

PROFILL (PROFILL Engenharia e Ambiente). **Investigação Ambiental Confirmatória de Solo e Água Subterrânea – Loteamento Frederico Mentz 303**. 45 p. Porto Alegre, 2012b.

PROFILL (PROFILL Engenharia e Ambiente). **Investigação Ambiental Confirmatória de Solo e Água Subterrânea – Loteamento Frederico Mentz 521**. 62 p. Porto Alegre, 2012c.

PROFILL (PROFILL Engenharia e Ambiente). **Investigação Ambiental Confirmatória de Solo e Água Subterrânea – Casa de Passagem**. 53 p. Porto Alegre, 2012d.

PROFILL (PROFILL Engenharia e Ambiente). **Investigação Ambiental Confirmatória de Solo e Água Subterrânea – Loteamento 14**. 49 p. Porto Alegre, 2012e.

PROFILL (PROFILL Engenharia e Ambiente). **Investigação Ambiental Confirmatória de Solo e Água Subterrânea – Loteamento Vila Dona Teodora**. 63 p. Porto Alegre, 2012f.

PROFILL (PROFILL Engenharia e Ambiente). **Investigação Ambiental Confirmatória de Solo e Água Subterrânea – Cooperativa Santo Antônio**. 59 p. Porto Alegre, 2012g.

PROFILL (PROFILL Engenharia e Ambiente). **Investigação Ambiental Confirmatória de Solo e Água Subterrânea – Vila dos Ferroviários**. 49 p. Porto Alegre, 2013.

SAPOTEC (Sapotec Sul Soluções Ambientais). **Plano de Intervenção Residencial Barcelona I e II – Quadra K**. Município de Porto Alegre/DEM HAB. 50 p. Porto Alegre, 2014.

QUADRADO, S., MARTINS, D. P. **Análise sobre as transformações ambientais do aterro sanitário Benópolis ao atual bairro Humaitá na cidade de Porto Alegre/RS.** In: IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2013. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/III-041.pdf> . Acesso em 15 Mai. 2015. Salvador, 2013.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). **Decreto Estadual nº 42.047, de 26 de dezembro de 2002.** Regulamenta disposições da Lei Nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994, com alterações, relativas ao gerenciamento e à conservação das águas subterrâneas e dos aquíferos no Estado do Rio Grande do Sul.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). **Decreto Nº 23.430, de 24 de outubro de 1974,** Aprova Regulamento que dispõe sobre a promoção, proteção e recuperação da Saúde Pública.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). **Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994,** Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul.

SANTOS, C.B. **Caracterização do Impacto na Qualidade das Águas Subterrâneas, Causado pela Disposição dos Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Municipal da Cidade de Feira de Santana – BA.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Meio Ambiente da Universidade Federal da Bahia. 125 p. Salvador, 2004.

SANTOS, F.V. dos ; BORGES, R. C. ; VIEIRA, P. da C. ; SIMOES FILHO, F. F. L. ; LAPA, C. M. F. . **Uso de SIG na Avaliação da Contaminação por Chumbo e Cobre no Canal do Cunha e no Oeste da Baía de Guanabara , Rio de Janeiro, RJ.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: MCT/INPE, 2013. p. 7904-7911.

SCHWARZBACH, M.S.R, MORANDI, I.C. **Avaliação da variabilidade temporal das características físico-químicas das águas subterrâneas dos poços tubulares profundos do município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.** In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 11, 2000. Disponível em:<<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24337/16341>>. Acesso em: 17 Jun. 2015.

SOUSA, H.A.; ROESER, H.M.; MATOS, A.T. **Métodos e técnicas aplicados na avaliação ambiental do aterro da BR-040 da prefeitura municipal de Belo Horizonte – MG.** *Revista da Escola de Minas*, v. 55, n. 4, p. 291-300. 2002.

SOUTO, G. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“stripping”).** 371 p. Tese Doutorado – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

TRINDADE, O. S.; FIGUEIREDO, M. A. R. **Aterro sanitário: aspectos estruturais e ambientais.** Porto Alegre: Pallotti, 1982.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., e VIGIL, S. **Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues**, 949 p. McGraw-Hill, Inc. New York, 1993.

USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). Risk Assessment Guidance for Superfund. **Human Health Evaluation Manual – Part A.** Washington, v. 1, Dec. 1989. EPA/540/1-89/002.

VIANA, D. B. **Avaliação de riscos ambientais em áreas contaminadas: uma proposta metodológica.** 2010. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-graduação em Engenharia em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

ZEKTSER, I. S. e EVERETT, L. G. (Eds.). **Groundwater Resources of the World and their Use.** IHP-VI, Series on Groundwater. No. 6. UNESCO. Paris. 2004.

APÊNDICE A – Registros Fotográficos

Fotografia 1 – Residencial Croma, área pertencente ao antigo aterro.



Fotografias 2a e 2b – Vila dos Ferroviários.



Fotografia 3 – Interior do Parque Mascarenhas de Moraes, área
pertencente ao antigo aterro.



Fotografia 4 – Rua General Marcos Kruchkin, bairro Farrapos, próximo
à Vila Dona Teodora.



Fotografia 5 – Rua Padre Blásio Vogel, localizado ao lado da Vila Dona Teodora.



Fotografia 6 – Vila Dona Teodora.



Fotografia 7 – Avenida A. J. Renner, próximo à Vila Dona Teodora.



Fotografia 8 – Condomínio Residencial Laçador, Avenida A. J. Renner.

