

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

LÉLIA CRISTINA DA ROCHA SOARES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA PLUMA DE BENZENO EM
FASE DISSOLVIDA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA SOB A INFLUÊNCIA
DO SISTEMA DE REMEDIAÇÃO INTEGRADO: *INJEÇÃO DE AR* E
EXTRAÇÃO DE VAPORES DO SOLO, NO MUNICÍPIO DE
CUBATÃO-SP**

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Rio Claro - SP
2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

LÉLIA CRISTINA DA ROCHA SOARES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA PLUMA DE BENZENO EM
FASE DISSOLVIDA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA SOB A INFLUÊNCIA
DO SISTEMA DE REMEDIAÇÃO INTEGRADO: *INJEÇÃO DE AR E
EXTRAÇÃO DE VAPORES DO SOLO*, NO MUNICÍPIO DE
CUBATÃO-SP**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Rio Claro - SP
2012

551.49 Soares, Lélia Cristina da Rocha
S676e Estudo do comportamento da pluma de benzeno em fase dissolvida na
 água subterrânea sob a influência do sistema de remediação integrado :
 injeção de ar e extração de vapores do solo, no município de Cubatão - SP
 / Lélia Cristina da Rocha Soares. - Rio Claro : [s.n.], 2012
 148 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots.

 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de
 Geociências e Ciências Exatas
 Orientador: Chang Hung Kiang

 1. Águas subterrâneas. 2. Contaminação. 3. Benzeno. 4. Remediação.
 5. AS/SVE. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Chang Hung Kiang
Orientador
UNESP – Rio Claro/SP

Dra. Sílvia Maria Ferreira
FUNDUNESP – Rio Claro/SP

Dr. Fernando Krahenbul
Petrobras – São Paulo/SP

Rio Claro, 18 de maio de 2012.

RESULTADO: APROVADO

Dedicatória

Dedico às pessoas importantes
em minha vida que
tornaram esta dissertação possível:

Pai Sebastião Soares

Mãe Aparecida da Glória Pereira Soares

Jone Geraldo Ferreira

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação para o Desenvolvimento da UNESP (FUNDUNESP), a qual disponibilizou seus recursos, pelos convênios realizados, o Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC) e o Laboratório de Remediação de Áreas Impactadas por Hidrocarbonetos (RAIH).

Ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang, pela oportunidade oferecida e orientação.

À Prof^a Dra Maria Rita Caetano-Chang pela revisão e orientação em parte deste caminho.

Ao Márcio Alberto Costa pelo incentivo, oportunidade, amizade, revisão e orientação.

Ao Elias Teramoto pelas brigas e discussões que resultaram em valiosas contribuições, amizade e incentivo.

À Sílvia Ferreira pela amizade, compreensão e sugestões durante o desenvolvimento da dissertação.

Ao Marco Pede pela amizade e sugestões durante o desenvolvimento da dissertação.

Com carinho aos desenhistas e estagiários Rachila, Celine e Vinicius pela grande dedicação dada a mim durante a execução desta dissertação.

Aos amigos do RAIH: Davi Romualdo, Eduardo Patrício, Elias Isler e Patrícia Totti, pelo companheirismo e colaborações na dissertação.

Ao Miguel Alfaro pelas sugestões dadas durante a qualificação.

À Eliana que conseguiu reaver os resultados de análises granulométricas, que foram muito valiosas para as discussões desta dissertação.

A todos do LEBAC/RAIH não citados, mas que de alguma forma fizeram parte em momentos diversos como em ouvir sobre as minhas aflições.

Ao Sidney Lopes pelas discussões, amizade e auxílio com algumas informações.

À Wanessa Peixoto pela sua amizade e por dispor do seu tempo para procurar informações importantes para esta dissertação.

Aos amigos do Instituto Juventude Interativa e Núcleo de Consciência Negra que não participaram deste momento, mas são pessoas que sempre estarão presentes, pois me deram e me dão base para continuar com os meus objetivos, que são: Fernanda Lopes, Rosângela Malachias, Leandro Santos, Kátia Silva e Dona Zumira.

À minha irmã Layza Soares e a toda a minha família que de algum modo me ajudou.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. MATERIAIS E MÉTODOS	6
4. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO SVE E AS.....	7
5. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE OS PROCESSOS QUE ENVOLVEM A REMEDIAÇÃO POR SVE/AS.....	20
6. CARACTERÍSTICAS DO BENZENO.....	30
7. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
8. IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS DE REMEDIAÇÃO SVE/AS	68
9. MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DO SISTEMA SVE/AS.....	87
10. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	95
11. EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE BENZENO NO SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	101
12. CONCLUSÕES	118
13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123

RESUMO

Estudo do Comportamento da Pluma de Benzeno em Fase Dissolvida na Água Subterrânea Sob a Influência do Sistema de Remediação Integrado: Injeção de Ar e Extração de Vapores do Solo, no Município de Cubatão-SP

Dentre as diversas tecnologias para remediação na água subterrânea contaminada por hidrocarbonetos, a Injeção de Ar ou *Air Sparging* (AS) e a Extração de Vapores do Solo ou *Soil Vapor Extraction* (SVE) vêm se destacando no Brasil, principalmente no estado de São Paulo, por serem alternativas consideradas econômicas e com eficiência satisfatória para remediação de compostos orgânicos voláteis ou biodegradáveis presentes na zona saturada e não saturada, a depender das condições físicas e químicas do meio. Portanto, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento da pluma de fase dissolvida de benzeno cuja remediação foi realizada pelas técnicas de remediação AS/SVE em área no município de Cubatão-SP. Com os resultados pode-se averiguar que a pluma de benzeno diminuiu consideravelmente com a atuação integrada dessas técnicas, porém, após a finalização da operação do sistema de remediação, as concentrações desse contaminante voltaram a aumentar. Isso pode estar relacionado a uma possível presença de fase residual na zona saturada, que faz com que ocorra uma contínua dissolução do composto na água subterrânea.

Palavras - chave: contaminação, benzeno, remediação, água subterrânea e AS/SVE.

ABSTRACT

Study of the Behavior of the Benzene Plume in Dissolved Phase in the Groundwater Under the Influence of Integrated Remediation System: Air Injection and Soil Vapor Extraction, in Cubatão-SP

Among the various treatment technologies to remediate groundwater contaminated by hydrocarbons, the Air Sparging (AS) and Soil Vapor Extraction (SVE) techniques have been emerging in Brazil, mainly in São Paulo state, for being considered economical alternatives and of satisfactory efficiency for the remediation of volatile organic and biodegradable compounds present in the saturated zone, depending on the physical and chemical conditions of the medium. Therefore, this research has as main objective to evaluate the behavior of the dissolved benzene plume, which one the remediation has been processed by the AS and SVE techniques in the study area in Cubatão-SP. With the results it was possible to state that the benzene plume had diminished considerably with the integrated use of both techniques, although, after the system's operation had ended, the concentrations of this contaminant turned to raise. That could be related to a possible presence of residual phase in the saturated zone, which causes a continuous dissolution of the compound in the groundwater.

Key-words: Contamination, benzene, remediation, groundwater and AS/SVE.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
3. MATERIAIS E MÉTODOS	6
4. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO SVE E AS	7
4.1. Técnica de Extração de Vapores em Solo	7
4.1.1. Características do fluxo de ar induzido.....	10
4.2. Técnica de Air Sparging.....	14
5. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE OS PROCESSOS QUE ENVOLVEM A REMEDIAÇÃO POR SVE/AS.....	20
5.1. Transferência de massa do contaminante da fase líquida para gasosa 21	
5.1.1. Pressão de vapor.....	21
5.1.2. Solubilidade	22
5.1.3. Constante de Henry.....	22
5.1.4. Coeficiente de adsorção	23
5.2. Propriedades físicas do meio que influenciam na eficiência e eficácia da SVE/AS.....	25
5.2.1. Características da zona não saturada	25
5.2.2. Características da zona saturada	26
5.2.3. Fatores climáticos e características do vazamento	28
6. CARACTERÍSTICAS DO BENZENO.....	30
7. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
7.1. Histórico da área	33
7.2. Características regionais.....	37
7.2.1. Hidrogeologia Regional	37

7.2.1.1. Rede Hidrográfica	37
7.3. Geologia Regional.....	37
7.3.1. Unidades Geológicas.....	37
7.4. Hidrogeologia Regional	44
7.4.1. Unidades/Sistemas Hidrogeológicos	44
7.4.1.1. Sistema Aquífero Cristalino.....	44
7.4.1.2. Sistema Aquífero Sedimentar Litorâneo	45
7.5. Caracterização geológica e hidrogeológica da área de estudo.....	46
7.5.1. Unidade I - Aterro	46
7.5.1.1. Índices físicos do solo na zona não saturada - Unidade I	47
7.5.2. Unidade II – Areias	53
7.5.3. Unidade III – Silte argiloso a argila siltosa	57
7.5.4. Condutividade hidráulica	59
7.5.5. Potenciometria e pluviometria.....	61
8. IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS DE REMEDIAÇÃO AS/EVS	68
8.1. Instalação dos poços de extração e injeção.....	69
8.2. Equipamento e instrumentos utilizados na remediação pelas técnicas AS/EVS	70
8.2.1. Equipamentos referentes a parte instrumental do sistema de remediação AS/SVE	70
8.2.1.1. Filtros de carvão.....	72
8.2.2. Equipamentos para o monitoramento e acompanhamento da eficácia do AS/SVE.....	73
8.3. Informações básicas sobre os ensaios-pilotos	73
8.3.1. Extração de vapores de solo – SVE	73
8.3.2. Injeção de ar	79

9. MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DO SISTEMA AS/SVE	
87	
10. CARACTERÍSTICAS FÍSICO–QUÍMICAS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	95
11. EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE BENZENO NO SOLO E	
ÁGUA SUBTERRÂNEA	101
11.1. Solo.....	101
11.2. Água subterrânea	104
11.2.1. Relação da oscilação do nível d'água com as concentrações de	
benzeno na água subterrânea.....	114
12. CONCLUSÕES	118
13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Técnicas de remediação implementadas no estado de São Paulo (adaptado de CETESB, 2011).....	3
Figura 3. Esquema típico dos componentes de um sistema de extração de vapor (adaptado de SUTHERSAN, 1999).	8
Figura 5. Mecanismos de transporte de vapores no solo/sedimentos pela técnica SVE (modificado de US ARMY, 1995).....	10
Figura 6. Típicos poços de extração de vapores de solo: (A) vertical (B) horizontal (adaptado de USEPA, 2004).	11
Figura 7. Esquema típico de fluxo de ar e distribuição de vácuo durante a operação do SVE (SUTHERSAN, 1999).....	13
Figura 8. Esquema de um sistema <i>Air Sparging</i> com associação de SVE. (adaptado de USEPA, 2004).....	15
Figura 9. Padrões de fluxo de ar ocasionados pela injeção de ar.	17
Figura 10. Coeficiente de adsorção de contaminantes em função do teor de umidade no solo (US ARMY, 1995).	25
Figura 11. Influência da heterogeneidade litológica na abrangência de aplicação da técnica de injeção de ar (adaptado de SUTHERSAN, 1999).	27
Figura 12. Fatores que influenciam o movimento de gases em subsuperfície. (adaptado de HIRATA, 1990).....	29
Figura 13. Estrutura molecular do benzeno.....	30
Figura 14. Cronologia das ações tomadas na área.	34
Figura 15. Localização das instalações na área de estudo.	36
Figura 16. Localização das instalações na área de estudo.	38
Figura 17. Mapa geológico regional (CPRM, 2001).....	39
Figura 18. Seção hidrogeológica A-B.	48

Figura 19. Seção hidrogeológica C-D.....	49
Figura 20. Curvas granulométricas representativas da unidade I - Aterro.....	50
Figura 21. Mapa de localização das amostras indeformadas.....	52
Figura 22. Detalhe da areia fina a média da Unidade II.	54
Figura 23. Curvas granulométricas representativas da Unidade II.....	55
Figura 24. Detalhe da argila Unidade III.....	57
Figura 25. Curvas granulométricas representativas da Unidade III.....	58
Figura 26. Mapas potenciométricos (agosto/2009 e dezembro/2009).....	63
Figura 28. Perfis esquemáticos dos poços de extração (PEV) e injeção (PAS).	71
Figura 29. Disposição dos poços de monitoramento convertidos a poços de observação próximos ao PEV-01.....	75
Figura 30. Disposição dos poços de monitoramento convertidos a poços de observação próximos ao PEV-03.....	76
Figura 31. Pressão de vácuo nos poços de monitoramento (outubro/2008, janeiro/2009 e abril/2009).....	89
Figura 32. Pressão de vácuo nos poços de monitoramento (agosto/2009 e dezembro/2009).	90
Figura 33. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-28.....	91
Figura 34. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-27.....	91
Figura 35. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-03A.....	91
Figura 36. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PZ-01A.	92
Figura 37. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-23.....	92

Figura 38. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-24.....	92
Figura 39. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PZ-02A.	93
Figura 40. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-26.....	93
Figura 41. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PZ-07A.	93
Figura 42. Variação da média dos valores do parâmetro OD.....	98
Figura 43. Variação da média dos valores do parâmetro pH.....	98
Figura 44. Variação da média dos valores do parâmetro CE.	99
Figura 45. Variação da média dos valores do parâmetro Temperatura.....	99
Figura 46. Variação da média dos valores do parâmetro Eh.....	100
Figura 47. Ocorrências de benzeno no solo em 2006 e 2010.	103
Figura 48. Evolução da pluma de benzeno em planta (maio/2006, outubro/2008, janeiro/2009 e abril/2009).....	106
Figura 49. Evolução da pluma de benzeno em planta (agosto/2009, dezembro/2009, maio/2010 e dezembro/2010).....	107
Figura 50. Evolução da pluma de benzeno representada em seções (maio/2006 e outubro/2008).	108
Figura 51. Evolução da pluma de benzeno representada em seções (janeiro/2009 e abril/2009).....	109
Figura 52. Evolução da pluma de benzeno representada em seções (agosto/2009 e dezembro/2009).	110
Figura 53. Evolução da pluma de benzeno representada em seções (maio/2010 e dezembro/2010).	111
Figura 54. Amostra de solo com iridescência – sondagem ao lado poço PZ-02A.....	113

Figura 54. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno <i>versus</i> nível d'água no poço PM-03.	114
Figura 55. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno <i>versus</i> nível d'água no poço PM-26.	115
Figura 56. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno <i>versus</i> nível d'água no poço PZ-7A.....	115
Figura 57. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno <i>versus</i> nível d'água no poço PZ-2A.....	116
Figura 58. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno <i>versus</i> nível d'água no piezômetro PZ-7B.....	116
Figura 59. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno <i>versus</i> nível d'água no poço PZ-3B.....	117

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Equações para estimar K_{oc} a partir de K_{ow}	24
Tabela 2. Características físico-químicas do composto Benzeno.....	32
Tabela 3. Tipos litológicos presentes na Serra de Cubatão (IPT, 2002).....	40
Tabela 4. Valores de granulometria da unidade I – Aterro.....	51
Tabela 5. Parâmetros físicos do solo.....	51
Tabela 6. Granulometria	51
Tabela 7. Valores de granulometria da Unidade II.....	56
Tabela 8. Valores de granulometria da Unidade III.....	59
Tabela 9. Resultados dos ensaios <i>slug tests</i> realizados nos poços de monitoramento.	60
Tabela 10. Resultados dos monitoramentos de nível d’água e de cálculo da carga hidráulica.....	62
Tabela 11. Precipitação total mensal (mm) na região de Cubatão-SP.	66
Tabela 12. Medição de nível d’água (m) nos poços de monitoramento.....	67
Tabela 13. Características construtivas dos poços de extração (PEV) e injeção (PAS).....	70
Tabela 14. Poços de monitoramento convertidos a poços de observação próximos ao PEV-01.	75
Tabela 15. Poços de monitoramento convertidos a poços de observação próximos ao PEV-03.	76
Tabela 16. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de extração PEV-01.	77
Tabela 17. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de extração PEV-03.	78
Tabela 18. Cronograma de execução do ensaio-piloto do AS.....	80
Tabela 19. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de injeção PAS-02 (pressão de injeção 4,5 psi e frequência 30Hz).	82

Tabela 20. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de injeção PAS-02 (pressão de injeção 6,0 psi e frequência 30Hz).	83
Tabela 21. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de injeção PAS-02 (pressão de injeção 8,0 psi e frequência 30Hz).	84
Tabela 22. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de injeção PAS-02 com ativação de poços de extração (PEV-03, PEV-04, PEV-05, PEV-06 e PEV-07).	85
Tabela 23. Resultados do ensaio piloto a partir dos poços de injeção PAS-01 e PAS-02 com ativação de todos os poços de extração.	86
Tabela 24. Somatória mensal das medições de benzeno na entrada do tanque de vácuo.....	94
Tabela 25. Medições de parâmetros físico - químicos <i>in situ</i> na água subterrânea.	97
Tabela 26. Concentrações de benzeno ($\mu\text{g/L}$) na água subterrânea.....	112

1. INTRODUÇÃO

A contaminação de solos/sedimentos e águas subterrâneas está relacionada à presença de substâncias nocivas ao meio ambiente e à saúde humana, que por sua vez foram dispostas em locais inapropriados devido ao desconhecimento, em épocas passadas, de procedimentos seguros para o manejo de substâncias perigosas, ao desrespeito a esses procedimentos e à ocorrência de acidentes ou vazamentos durante o desenvolvimento dos processos produtivos, de transporte ou ainda de armazenamento de matérias primas e produtos.

Compostos orgânicos como os hidrocarbonetos de petróleo e os solventes clorados têm despontado como grandes problemas ambientais, devido à toxicidade associada a inúmeros destes compostos. Esses produtos químicos são utilizados na produção de automóveis, transformadores, no tratamento de madeira, em indústrias metalúrgicas, exploração de minas, na agricultura, na indústria petroquímica e farmacêutica, dentre outros.

A contaminação de solos/sedimentos e água subterrânea por petróleo e seus derivados tem sido um dos principais problemas ambientais das últimas décadas, tendo em vista a complexidade desses compostos e a dificuldade de remediação dos mesmos.

As informações básicas que determinam a seleção do processo de remediação são o tipo de contaminante e o meio impactado (características litológicas e hidrogeológicas). As técnicas de remediação se diferenciam basicamente em: medidas de segurança (remanejamento, barreiras, imobilização) e ações de recuperação ou remediação (ações que removem e/ou tratam as substâncias nocivas).

Dentre as diversas tecnologias para remediação da água subterrânea por hidrocarbonetos, a Injeção de Ar ou *Air Sparging* (AS) e a Extração de Vapores do Solo ou *Soil Vapor Extraction* (SVE) vêm se destacando no Brasil como alternativa de remediação de baixo custo e relativa eficiência, uma vez que podem ser integradas a outros métodos de remediação e o tempo de tratamento é relativamente curto – entre 1 e 3 anos, sendo que em condições favoráveis este período pode chegar a menos de 1 ano.

O gráfico da **Figura 1** apresenta informações publicadas por CETESB (2011), em relação às técnicas de remediação já implementadas em áreas contaminadas do estado de São Paulo. Dentre elas têm-se a conjugação das técnicas de Extração de Vapores, com 251 casos, e o Air sparging, com 146 casos.

Como essas técnicas vêm sendo amplamente utilizadas para remediação de áreas contaminadas, principalmente no estado de São Paulo, é necessário que se compreendam seus processos, principalmente quanto ao comportamento em contexto geológico heterogêneo, que é um dos principais fatores que influenciam na eficiência do sistema de remediação.

Esta pesquisa contempla o estudo de um caso de remediação em área situada no Pólo Industrial de Cubatão, no município de Cubatão-SP (**Figura 02**), que utiliza as técnicas AS/SVE para a remoção de benzeno dissolvido na água subterrânea. Esse hidrocarboneto é um composto orgânico derivado do petróleo, que apresenta alta mobilidade na água e solo, porém é de fácil biodegradação e muito volátil (FETTER, 1999).

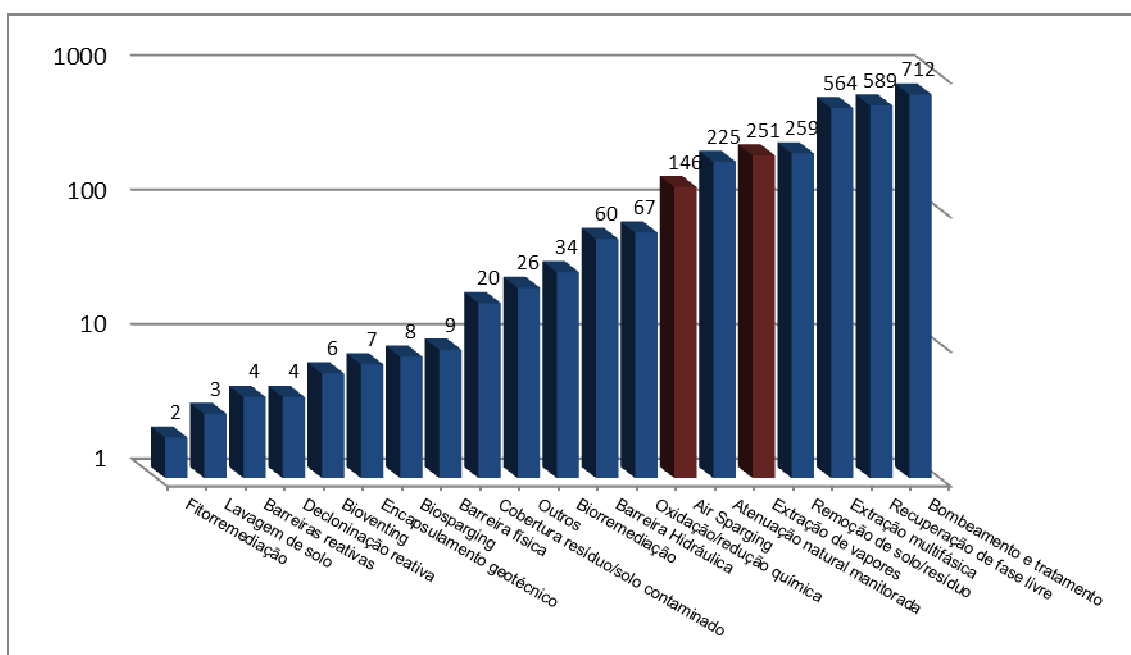


Figura 1. Técnicas de remediação implementadas no estado de São Paulo (adaptado de CETESB, 2011).

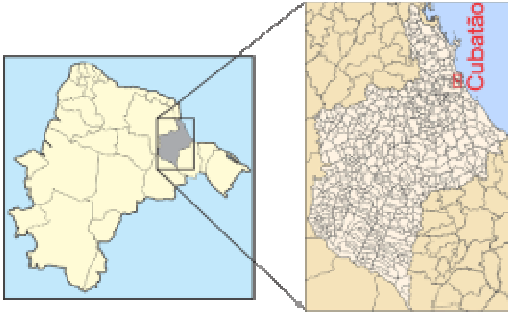
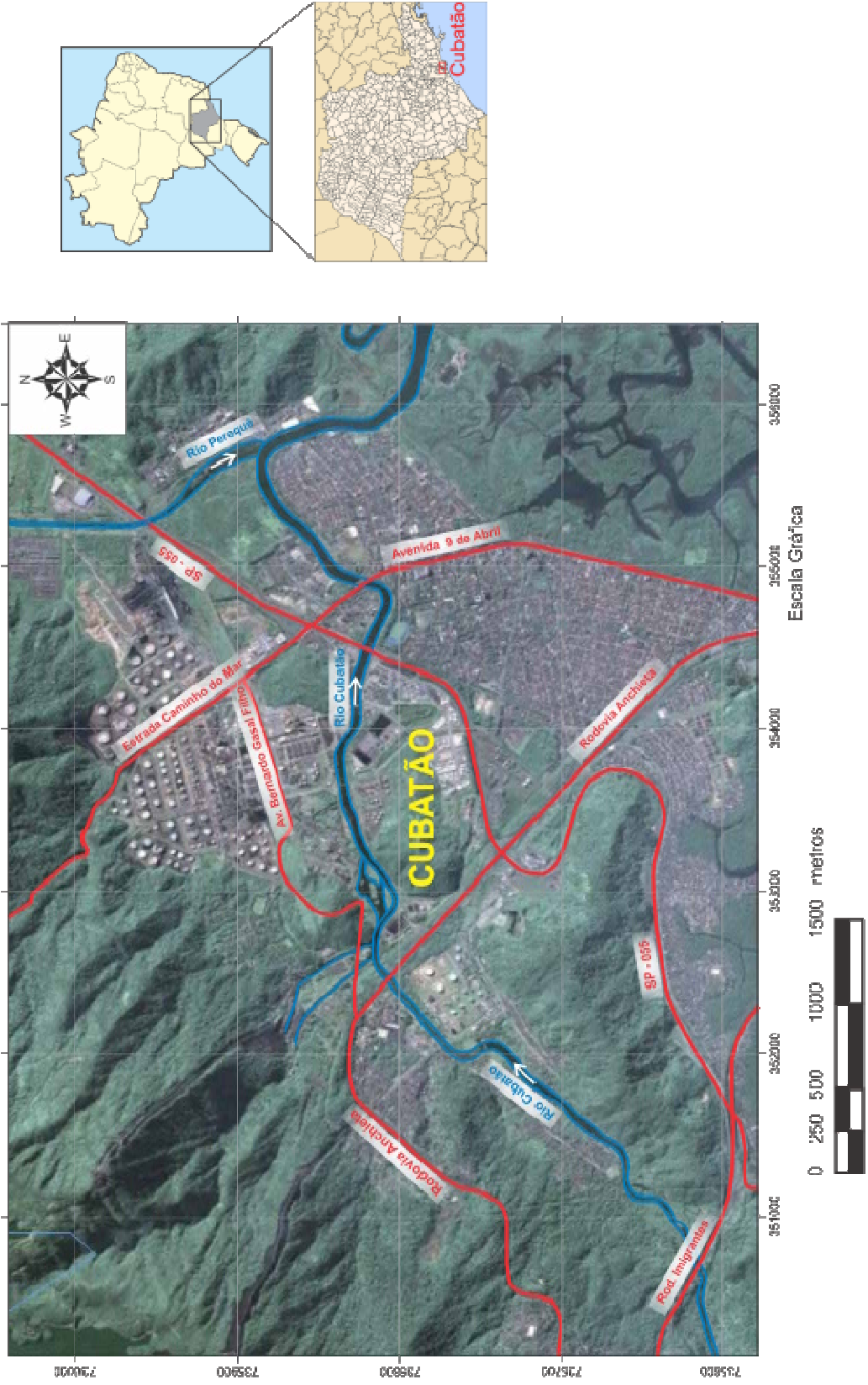


Figura 2. Localização da área de estudo.

2. OBJETIVOS

A pesquisa tem como principal objetivo avaliar o comportamento de uma pluma de benzeno em fase dissolvida, sob a influência de um sistema de remediação integrado, composto pela operação conjunta de extração de vapores do solo (SVE) e injeção de ar (AS).

Ainda, tem como objetivo avaliar as interferências do meio físico, ou seja, das características geológicas e hidrogeológicas da área de estudo, no processo de remediação e no comportamento desta pluma de benzeno.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos desta pesquisa foram utilizados os seguintes métodos:

- Levantamento bibliográfico para a fundamentação teórica do funcionamento e de aspectos operacionais de um sistema de remediação integrado, composto pelas técnicas SVE/AS;
- Análise e compilação das informações de trabalhos de investigação ambiental e remediação executados na área, que se basearam em técnicas diretas como a execução de sondagens, instalação de poços de monitoramento e piezômetros multiníveis;
- Análise e compilação dos resultados de análises químicas e físico-químicas de amostras de solo e água subterrânea; e
- Interpretação dos resultados.

4. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO SVE E AS

4.1. Técnica de Extração de Vapores em Solo

A Extração de Vapores em Solo, ou *Soil Vapor Extraction* (SVE), é uma técnica que se aplica à remediação de solos e águas subterrâneas contaminados por compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis, que apresenta muitas vantagens que a torna aplicável em várias áreas, como:

- trata-se de uma técnica que pode ser implementada sem muitos problemas de operação;
- é satisfatória na remoção de massa de compostos voláteis presentes na zona não saturada;
- tem bom potencial para tratamento de um grande volume de solo, a um custo razoável;
- o sistema pode ser instalado e mobilizado rapidamente; e

- pode ser integrada a outras técnicas para aumentar a efetividade da remediação de uma área.

O processo de extração da técnica SVE envolve a indução do fluxo de ar em subsuperfície, através da zona não saturada, com a aplicação de vácuo que, conseqüentemente, aumenta a volatilização *in situ* dos contaminantes, conforme ilustrado na **Figura 3**.

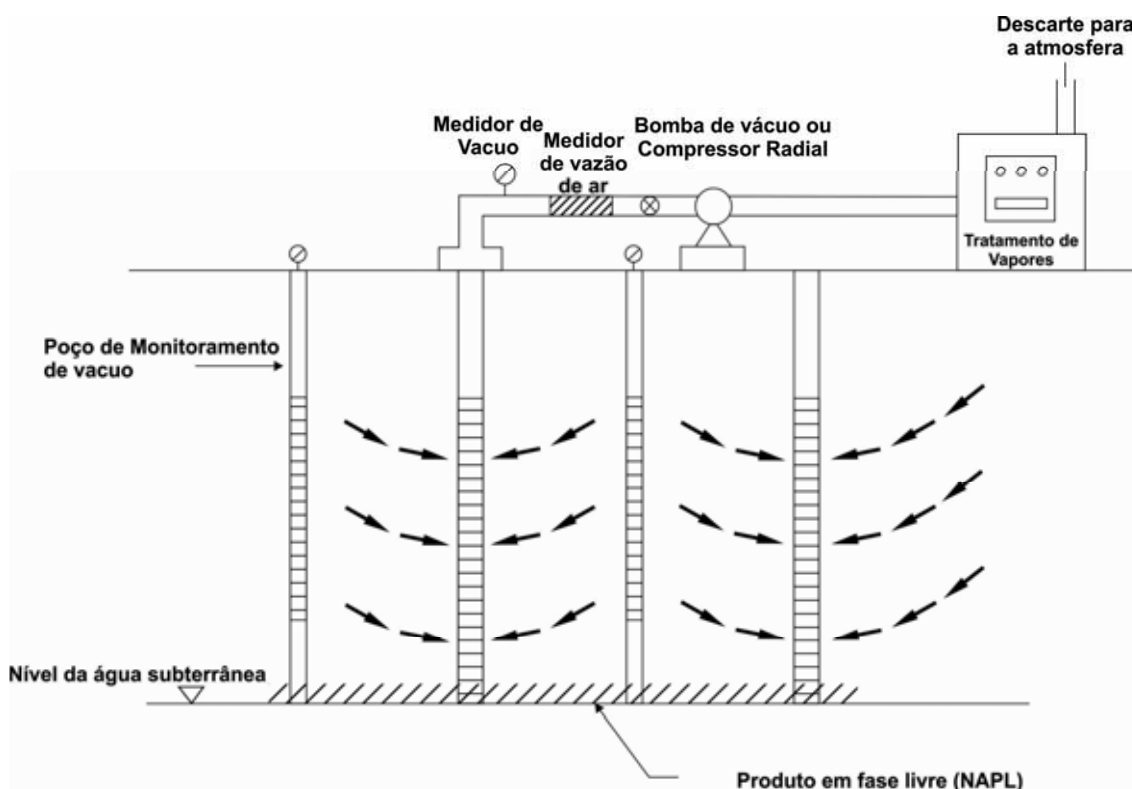


Figura 3. Esquema típico dos componentes de um sistema de extração de vapor (adaptado de SUTHERSAN, 1999).

Desta forma, a técnica SVE possibilita que haja transferência de massa, ou seja, particionamento de um composto presente na matriz do solo em fase líquida para fase vapor. Esse composto pode estar presente na matriz do solo/sedimentos conforme representação na **Figura 4** e descrito a seguir:

- adsorvido ao solo;
- na fase residual, imiscível (*Non-Aqueous Phase Liquid* - NAPL), nos poros do solo;
- como vapor nos poros; e
- dissolvido na água dos poros.

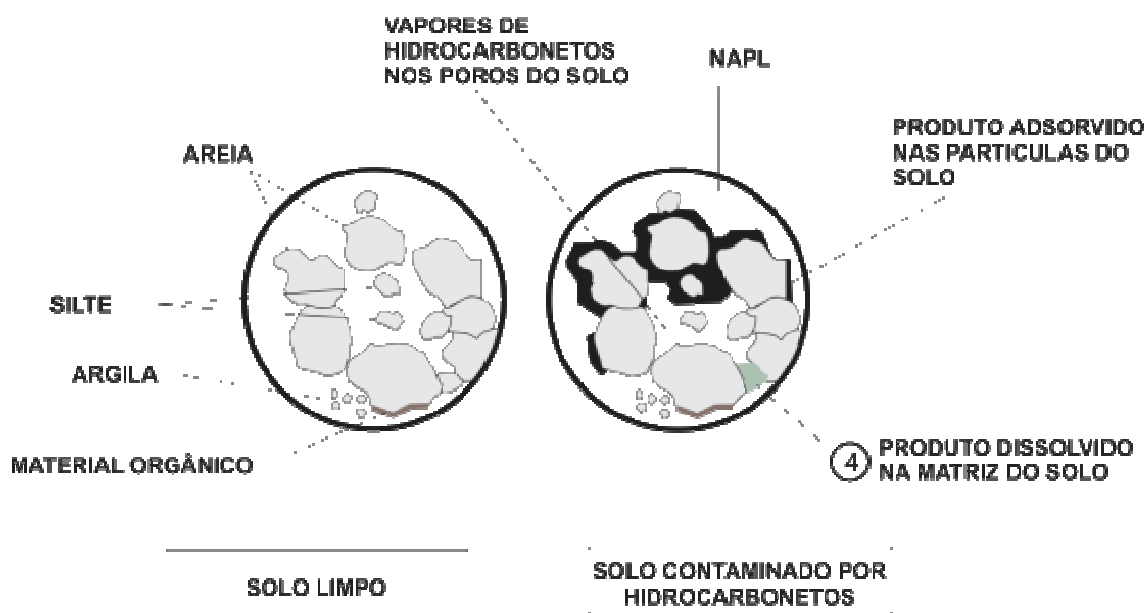


Figura 4. Fases dos contaminantes presentes na matriz do solo (adaptado de SUTHERSAN, 1999).

Conforme US ARMY (1995), os mecanismos de transporte e remoção de contaminantes da matriz do solo/sedimentos através da técnica SVE incluem a volatilização, advecção, dessorção e difusão, ilustrados na **Figura 5**.

Portanto, para a compreensão do funcionamento, alcance e restrição à efetividade da técnica, é necessário analisar os aspectos básicos sobre os processos de transferência de massa de compostos voláteis da fase líquida à fase gasosa, movimento de gases/vapores na zona não saturada e perda para a atmosfera.

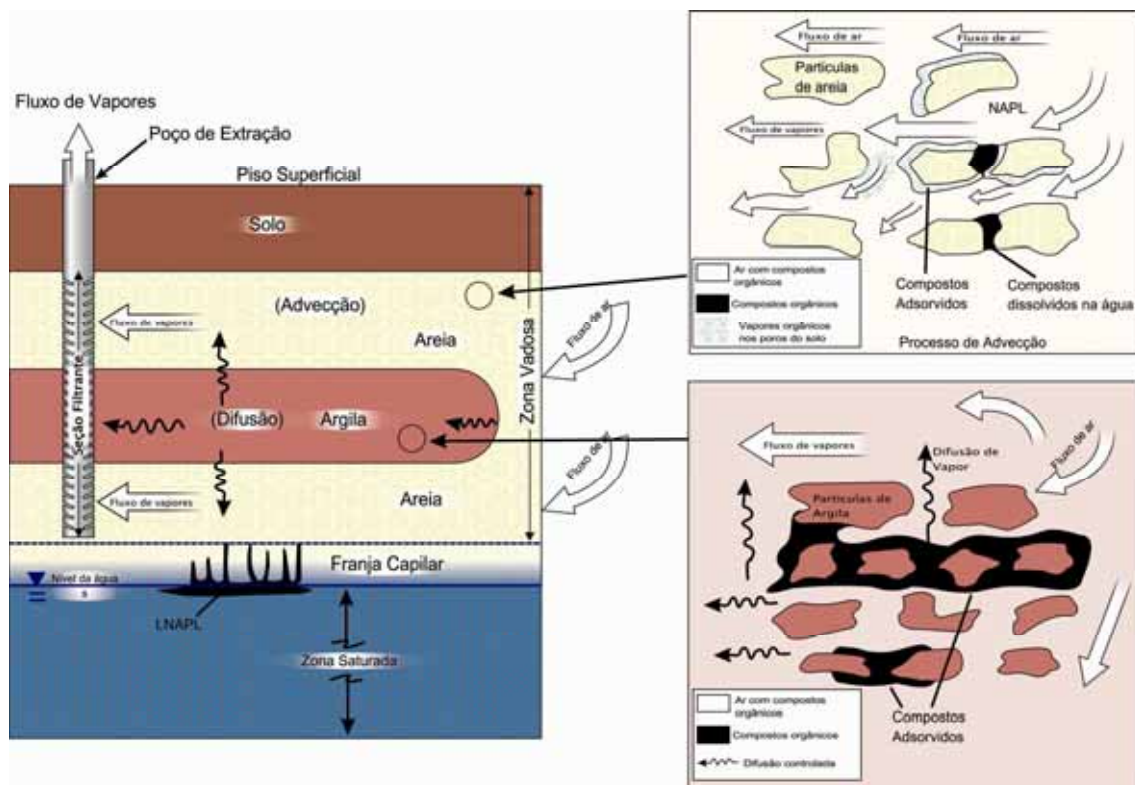


Figura 5. Mecanismos de transporte de vapores no solo/sedimentos pela técnica SVE (modificado de US ARMY, 1995)

4.1.1. Características do fluxo de ar induzido

Dependendo da espessura da zona não saturada, a extração de ar pode ser realizada por meio de poços verticais ou tubos horizontais (**Figura 6**). Conforme USEPA (2004), esses poços/tubos devem ser instalados considerando-se as seguintes recomendações:

- o poço vertical deve ser instalado nas condições em que a contaminação encontre-se em profundidades entre 1,5 m e 30,0 m e o nível d'água ser superior a 3,0 m de profundidade;
- o tubo horizontal deve ser instalado quando a contaminação presente no solo encontra-se em profundidade inferior a 3,0 m, ou em caso da contaminação estar confinada a uma unidade estratigráfica.

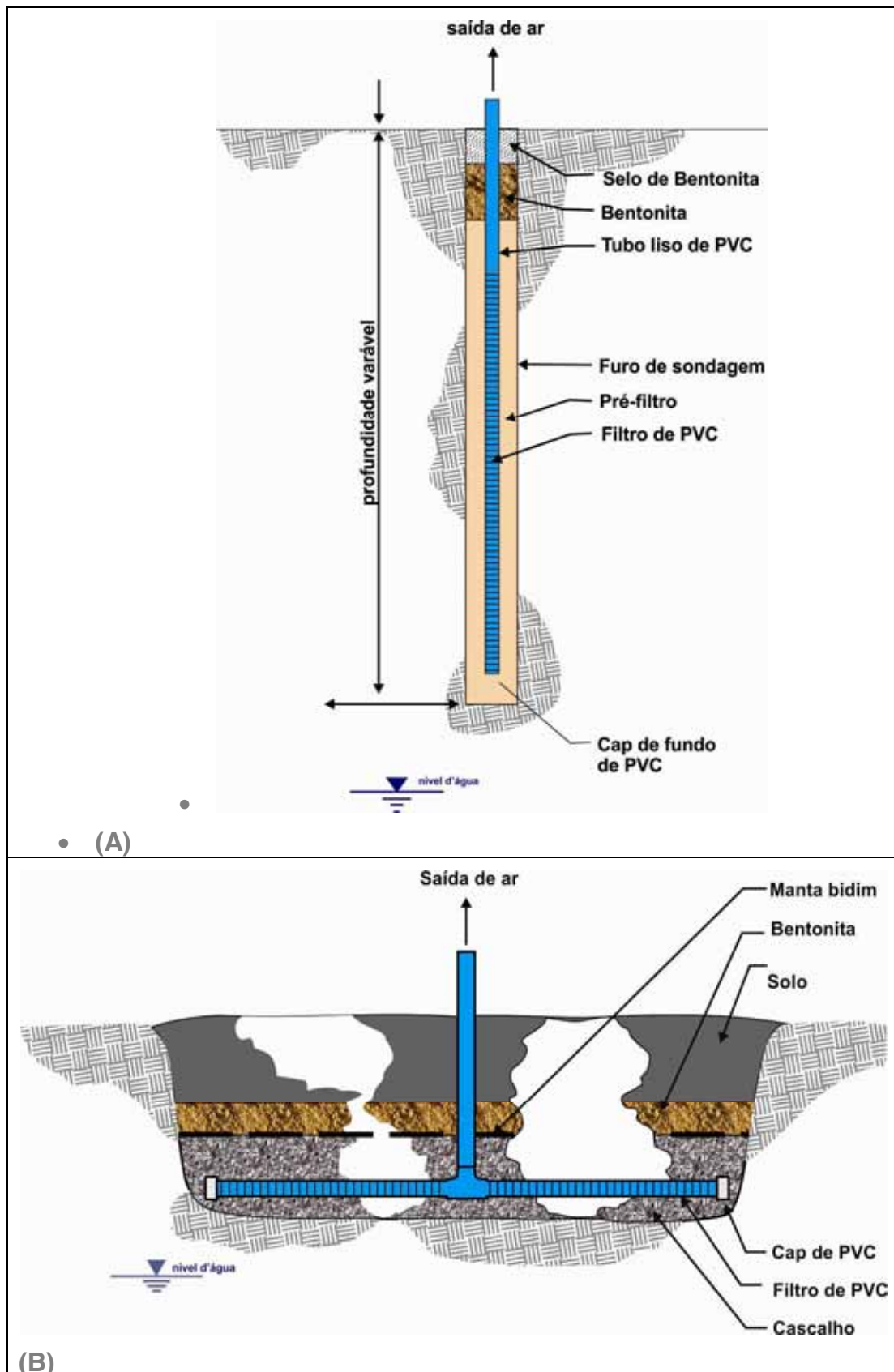


Figura 6. Típicos poços de extração de vapores de solo: (A) vertical (B) horizontal (adaptado de USEPA, 2004).

O fluxo de ar é induzido em subsuperfície por um gradiente de pressão negativa, por meio de vácuo aplicado no poço de extração, gerado por uma bomba de vácuo ou compressor radial, causando a movimentação de ar nos poros do solo através desses poços/tubos (**Figura 7**). Cabe destacar, que os caminhos do fluxo de ar em subsuperfície e as vazões de extração devem ser definidos através dos estudos das características texturais e estruturais do solo/sedimentos ou rocha e da realização de ensaios de permeabilidade.

O desenvolvimento do fluxo de ar depende de muitos fatores, dentre eles:

- a quantidade de vácuo aplicado;
- o intervalo da seção filtrante presente na zona não saturada;
- permeabilidade do solo ao ar;
- a profundidade da água subterrânea;
- presença ou ausência de cobertura impermeabilizante na superfície;
- teor de umidade;
- a presença ou ausência de vazamento em superfície; e
- a presença de interferências subterrâneas.

Conforme Suthersan (1999), três equações básicas podem ser consideradas para descrever o fluxo de ar: equações do balanço de massa de ar no solo, de fluxo devido aos gradientes de pressão e geral dos gases ideais.

O balanço de massa de ar no solo pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\Phi_a \frac{\partial \rho_a}{\partial t} = \nabla \rho_a \cdot V \quad (\text{Eq. 1})$$

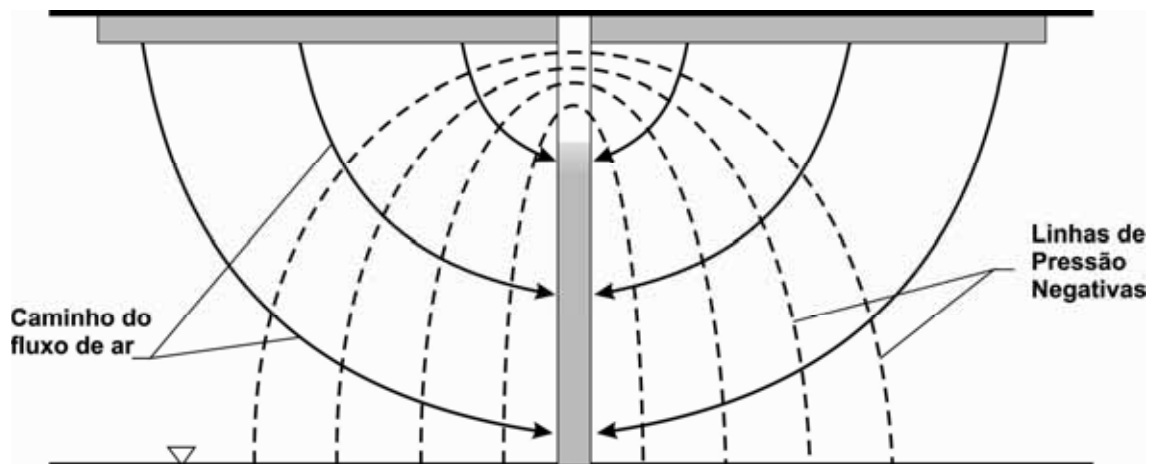


Figura 7. Esquema típico de fluxo de ar e distribuição de vácuo durante a operação do SVE (SUTHERSAN, 1999).

Onde Φ_a é a porosidade do solo, ρ_a é a densidade e V é o vetor de velocidade do fluxo de ar.

A velocidade do fluxo de ar, devido ao gradiente de pressão, pode ser expressa pela lei de Darcy em condições onde o fluxo é considerável, principalmente em areia e cascalho, sendo representada do seguinte modo:

$$V = \frac{K_a}{\mu_a} \cdot \nabla p \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde K_a é a permeabilidade do ar, μ_a é a viscosidade do ar e p é a pressão.

A densidade do ar depende da pressão e temperatura. A relação entre estes parâmetros é expressa pela equação dos gases ideais, a qual pode ser utilizada tendo em vista que a pressão de operação de extração de vapores é próxima ou abaixo da pressão do ambiente:

$$\rho_a = \frac{p \cdot (MW)}{RT} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde MW é o peso molecular, R é a constante da lei de gás ideal, T é a temperatura e p é a pressão.

Combinando as equações 1, 2 e 3, a equação geral de fluxo de ar no solo pode ser obtida por meio de:

$$\Phi_a \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{p(MW)}{RT} \right\} = \nabla \cdot \left\{ \frac{\rho_a K_a}{\mu_a} \cdot \nabla p \right\} \quad (\text{Eq. 4})$$

4.2. Técnica de Air Sparging

A injeção de ar, ou *Air Sparging* (AS) é uma técnica que tem sido utilizada, desde 1985, para remediação de compostos orgânicos voláteis dissolvidos na água subterrânea, adsorvidos ou aprisionados nos poros do solo, na zona saturada. Essa técnica tem como vantagens:

- facilidade na instalação dos equipamentos;
- tratamento da fase dissolvida a um tempo relativamente curto, entre 1 e 3 anos, ou inferior;
- não requer o tratamento, armazenamento ou re-injeção de contaminante na água subterrânea; e
- pode associar-se a técnica SVE para maior efetividade na remoção dos contaminantes.

A técnica consiste na injeção de ar em um ou mais pontos da zona saturada. Sendo assim, pode-se gerar bolhas de ar, a depender da litologia, e até fazer com que o ar flua por canais de ar contínuo. Esta técnica é frequentemente utilizada em conjunto com a técnica SVE, para maior eficácia na remoção de contaminantes presentes na zona saturada, que é uma das fontes da fase vapor para a zona não saturada (**Figura 8**) (SUTHERSAN, 1999).

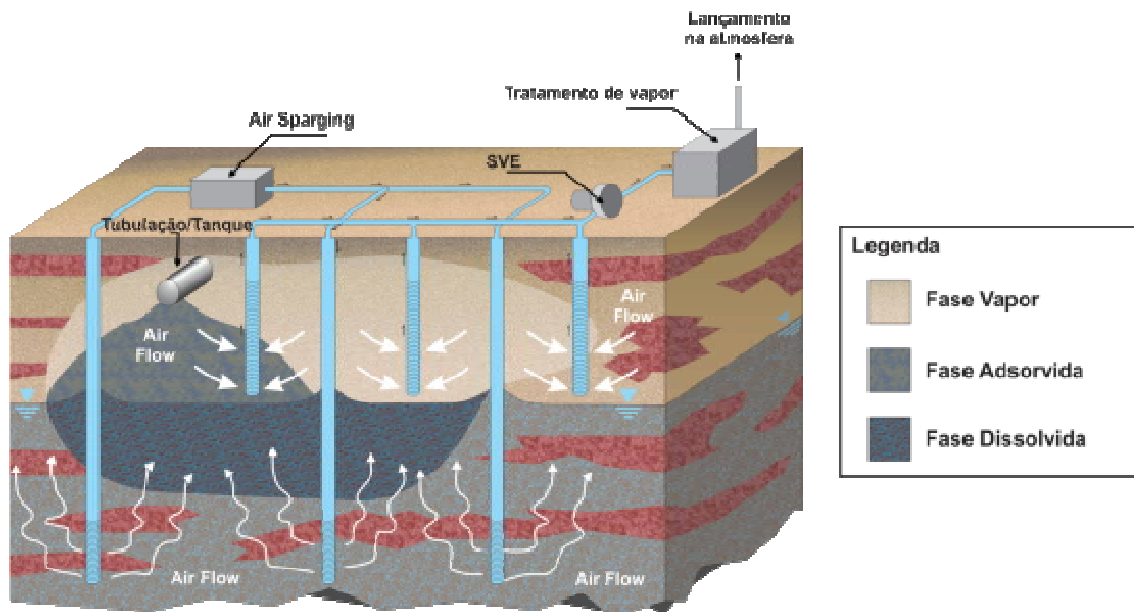


Figura 8. Esquema de um sistema *Air Sparging* com associação de SVE. (adaptado de USEPA, 2004)

O mecanismo de injeção de ar ocasiona o particionamento dos contaminantes voláteis da fase líquida para a fase gasosa e a transferência de oxigênio do ar injetado para a fase líquida, que tem por conseqüência o aumento da degradação microbiana aeróbica na zona saturada e da volatilidade destes produtos (US ARMY, 2008). Esta técnica pode ser utilizada para:

- Tratamento de contaminação na zona saturada no caso de NAPL;
- Tratamento de fase dissolvida;
- Contenção de uma pluma de fase dissolvida; e
- Imobilizar contaminantes por meio de alterações químicas.

Os processos que governam a eficácia desta técnica são a presença e distribuição das principais vias do fluxo de ar, o grau de mistura das águas subterrâneas, e a presença de compostos inorgânicos.

Conforme Suthersan (1999), parte do fluxo de ar é influenciada pela pressão, pelo volume de ar injetado, pela profundidade da injeção, e pela estratificação do solo na zona saturada, que pode ser um fator predominante.

Desta forma, Suthersan (1999) cita que os parâmetros importantes para a concepção de um sistema de AS são:

- zona de influência;
- profundidade de injeção;
- pressão do ar injetado e volume do fluxo;
- modo de injeção (contínuo ou intermitente);
- construção do poço de injeção; e
- tipo de contaminante e sua distribuição.

Conforme Suthersan (1999), o processo de remoção de massa de contaminantes durante a injeção de ar envolve a transferência, *in situ*, dos compostos orgânicos dissolvidos na água para o ar (*in situ air stripping*), a volatilização dos compostos orgânicos em fase adsorvida e/ou “trapeada” na zona saturada e na franja capilar, e a biodegradação aeróbica do contaminante em fase dissolvida e/ou adsorvida, conforme detalhados a seguir.

➤ ***Air stripping in situ.***

Entre os três mecanismos de remoção de contaminantes, através da técnica AS, citados acima, o *air stripping in situ* pode ser o processo dominante, pois durante a injeção de ar ocorre a formação de padrões de fluxo de ar (**Figura 9**) que ajudam na transferência de massa líquido – ar e na dissolução de contaminantes na fase residual na zona saturada. Os padrões de fluxos de ar podem ser descritos do seguinte modo:

- formação de bolhas, que ocorrem em solo/sedimentos com granulometria acima de 1 mm ou 2 mm de diâmetro, ou seja em areia e cascalho, conforme modelo de Ji *et al* (1993);
- formação de canais que ocorrem em solo/sedimentos mais finos (silte a argila), conforme modelo de Ji *et al* (1993); e
- conforme modelo definido por Peterson *et al* (2001), a forma de fluxo câmara, ou *Chamber flow*, que ocorre em solo/sedimento com granulometria de 0,2 mm.

Cabe destacar que o padrão *Chamber flow* se difere dos demais devido: presença de componentes de fluxo de ar horizontais e de uma região delimitada com a ocorrência de fluxo de ar difundido, distinto e de forma irregular

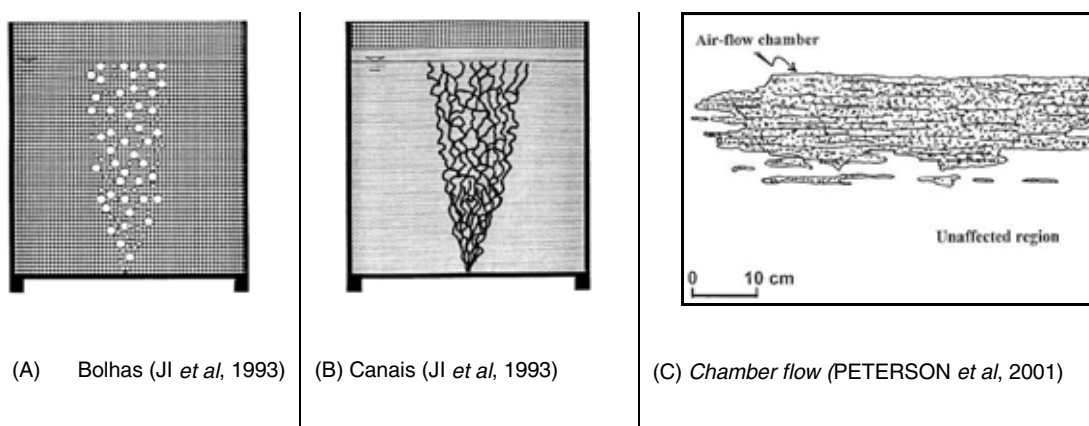


Figura 9. Padrões de fluxo de ar ocasionados pela injeção de ar.

Portanto, esses padrões de fluxo de ar são importantes na remoção dos contaminantes, pois é através deles que se terá uma área de superfície interfacial disponível o suficiente para a realização das transferências de massa.

➤ **Volatilização direta**

Durante o *air sparging*, a volatilização direta dos contaminantes adsorvidos e presentes na fase residual ocorre nas zonas de fluxo de ar.

Em áreas com níveis significativos de contaminantes em fase residual, presentes na zona saturada, a volatilização pode ser um mecanismo importante na remoção de massa onde o ar está fluindo. Isto é evidenciado pelo aumento das concentrações de compostos orgânicos voláteis observadas na extração de vapores.

➤ **Biodegradação**

A injeção de ar na água subterrânea contaminada também estimula a biodegradação aeróbica de muitos contaminantes voláteis e semi-voláteis, como por exemplo, benzeno, tolueno, dentre outros, através da indução de misturas entre ar e água que conseqüentemente poderá aumentar a taxa de oxigênio dissolvido.

No entanto, como a solubilidade do oxigênio do ar é bastante baixa, variando entre 8,0 ppm a 25°C e 13 ppm a 5°C, a taxa de oxigênio que pode ser dissolvido na água subterrânea é muitas vezes mais lenta do que a taxa de consumo de oxigênio realizada pela população microbiana. Desta forma, para o dimensionamento do sistema de remediação é necessário considerar o seguinte, conforme US ARMY (2008):

- o cálculo da massa relativa de oxigênio necessária para ser injetada e se dissolver na água subterrânea; e
- o valor da massa de contaminante presente em fases dissolvida e adsorvida, para se calcular a massa de oxigênio necessária para que ocorra a biodegradação.

Estudos realizados por Johnson (1994) sugerem que a biodegradação contribui significadamente na remoção de massa de compostos orgânicos voláteis aerobicamente degradáveis quando as concentrações de contaminantes são inferiores a 1 mg/L, caso contrário, a volatilização será dominante.

5. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE OS PROCESSOS QUE ENVOLVEM A REMEDIAÇÃO POR SVE/AS

Para o entendimento do funcionamento, do alcance e da restrição das técnicas de remediação SVE/AS, é necessário analisar os seguintes aspectos básicos:

- particionamento dos compostos voláteis da fase líquida para gasosa;
- movimento de gases/vapores na zona não saturada (para SVE);
- propriedades físicas do meio:
 - características da zona não saturada;
 - propriedades hidrodinâmicas do aquífero;
 - características da zona saturada (para o AS);
 - aspectos climáticos; e
 - características do acidente.

5.1. Transferência de massa do contaminante da fase líquida para gasosa

Um dos processos envolvidos nas técnicas de remediação SVE/AS é a volatilização dos compostos orgânicos, que é um fenômeno físico-químico em que um determinado composto se perde para a atmosfera na forma de gases. Os mecanismos que envolvem a volatilização de uma substância compreendem uma complexa interação de fatores, função das propriedades do contaminante e do meio.

A taxa de volatilização de compostos orgânicos no solo é afetada pelos seguintes fatores: pressão de vapor do contaminante, solubilidade em água; constante da lei de Henry, e coeficiente de adsorção.

5.1.1. Pressão de vapor

A pressão de vapor é definida como a pressão exercida por um gás em equilíbrio com sua fase líquida, a uma determinada temperatura. Em uma mistura, a pressão de vapor de um determinado composto é menor que no composto puro e pode ser representada pela Lei de *Raoult*:

$$P_{a,ef} = X_a P_a \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde $P_{a,ef}$ é a pressão de vapor efetiva (atm) do composto “a”, X_a é a fração molar do composto “a” na mistura e P_a é a pressão de vapor (atm) do composto puro “a” a uma determinada temperatura.

5.1.2. Solubilidade

A solubilidade pode ser definida como a massa máxima que pode ser dissolvida na água, a uma determinada temperatura. A solubilidade nas misturas é uma das mais importantes propriedades que afetam o transporte dos compostos químicos no meio ambiente e também pode ser determinada por outra forma da Lei de Raoult:

$$S_{aef} = X_a S_a \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde S_{aef} é a solubilidade efetiva do composto “a” na mistura (mg/L), X_a é a fração molar do composto “a” na mistura e S_a é a solubilidade do composto puro “a” (mg/L).

5.1.3. Constante de Henry

A volatilização de um composto dissolvido em água é regida pela Lei de Henry, que descreve a tendência relativa de um composto em uma solução se particionar para a fase vapor. Sendo assim, a constante da lei de Henry é expressa da seguinte forma:

$$K_H = \frac{C_v}{C_l} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde K_H é a constante da Lei de Henry, C_v é a concentração do composto na fase vapor e C_l e a concentração do composto no líquido.

5.1.4. Coeficiente de adsorção

A adsorção de contaminantes nas partículas do solo é afetada pelo teor orgânico e a capacidade mineral de adsorção das partículas do solo.

Desta forma, o coeficiente de adsorção (K_d) é regido pela quantidade de carbono orgânico total (COT) - f_{oc} , devido a natureza apolar da maioria dos contaminantes orgânicos

Sendo assim, o coeficiente de partição pode-ser expresso pela seguinte equação:

$$K_d = f_{oc} \times k_{oc} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde K_d é o Coeficiente de partição, f_{oc} é fração de carbono orgânico no solo (%), e k_{oc} é o Coeficiente de partição de carbono orgânico.

Pesquisadores avaliaram uma série de parâmetros para estimar os valores de K_{oc} , sendo o mais utilizado o coeficiente de partição octanol-água (K_{ow}), onde algumas das equações para a estimativa de K_{oc} são apresentadas na **Tabela 1**.

Tabela 1. Equações para estimar K_{oc} a partir de K_{ow} .

Número da Equação	Equação	Compostos	Referência
(Eq. 9)	$\log K_{oc} = 0,52 \log K_{ow} + 0,62$	72 pesticidas substituídos de benzeno	Briggs, 1981
(Eq. 10)	$\log K_{oc} = 1,00 \log K_{ow} - 0,21$	alguns hidrocarbonetos poliaromáticos	Karickhoff, Brown, and Scott, 1979
(Eq. 11)	$\log K_{oc} = 0,544 \log K_{ow} + 1,377$	45 compostos orgânicos, na maioria pesticidas	Kenaga and Goring, 1980
(Eq. 12)	$\log K_{oc} = 0,989 \log K_{ow} - 0,346$	alguns hidrocarbonetos poliaromáticos	Karickhoff, 1981
(Eq. 13)	$\log K_{oc} = 0,937 \log K_{ow} - 0,006$	Aromáticos, poliaromáticos, triazinas	Lyman, 1982
(Eq. 14)	$\log K_{oc} = 0,904 \log K_{ow} - 0,779$	Benzeno, benzenos clorados, PCBs	Chiou, Porter, and Schmedding, 1983
(Eq. 15)	$\log K_{oc} = 0,72 \log K_{ow} + 0,49$	Benzenos, metilados e clorados	Schwarzenbach and Westall, 1981
(Eq. 16)	$\log K_{oc} = 1,00 \log K_{ow} - 0,317$	22 aromáticos pulmonoculares	Hassett <i>et al</i> , 1980

Fonte: adaptada de Fetter (1999)

5.2. Propriedades físicas do meio que influenciam na eficiência e eficácia da SVE/AS

5.2.1. Características da zona não saturada

As características da zona não saturada têm efetiva influência na atuação da técnica SVE, pois o solo/sedimentos deve ser visto como um meio onde ocorre o fluxo dos vapores. Neste sentido, a porosidade torna-se um dos principais parâmetros para análise, pois, é através dos poros que ocorre a condução dos gases/vapores. Desta forma, os poros ainda devem ser caracterizados quanto ao tamanho, forma e continuidade.

A umidade do meio, uma vez que participa no preenchimento dos espaços vazios e na obstrução de canais, também deve ser considerada, pois a quantidade de água tem efeitos sobre a permeabilidade do ar no solo, conseqüentemente terá um efeito sobre as características de adsorção dos compostos orgânicos. Desta forma, a diminuição da umidade do solo permite maior adsorção do contaminante à sua matriz, o que torna mais proeminente a transferência de massa de contaminante durante a ação do SVE. A **Figura 10** mostra um gráfico de relação entre o teor de umidade e o coeficiente de adsorção (K_d).

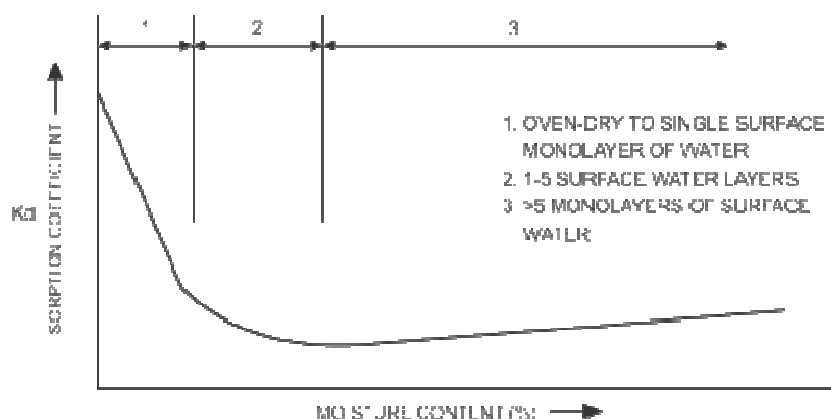


Figura 10. Coeficiente de adsorção de contaminantes em função do teor de umidade no solo (US ARMY, 1995).

A profundidade da água subterrânea, por sua vez também é considerada importante, uma vez que, quanto maior a distância entre o aquífero e a superfície, maior é o tempo de trânsito dos vapores. Da mesma forma, os contaminantes que percorrem maiores distâncias estão sujeitos a processos de difusão, diluição e degradação. A zona não saturada, sobretudo a camada de solo biologicamente ativa, possui a capacidade de reter quantidades apreciáveis de vapores de diversos contaminantes.

Ainda, as oscilações do nível d'água também devem ser consideradas, uma vez que devido a essas flutuações, parte do solo contaminado pode submergir, muitas vezes tornando-o indisponível para o fluxo de ar (USEPA, 2004).

As características das unidades geológicas quanto à estratificação ou mesmo a homogeneidade litológica são importantes para a eficácia do SVE, pois, podem afetar o fluxo de vapores no solo, de modo a possibilitar a ocorrência de micro-fraturamento, principalmente em solo/sedimento argiloso. Ainda, a estratificação do solo com permeabilidades diferentes pode aumentar o fluxo lateral de vapores no solo no estrato mais permeável ao mesmo tempo reduzindo o fluxo de vapor do solo do estrato menos permeável. Assim, o comportamento desses fluxos preferenciais pode levar à ineficácia ou ao acréscimo do tempo de remediação pela técnica SVE.

Cabe destacar que é importante a impermeabilização do solo e selagem dos poços de extração, de modo a evitar que ocorram caminhos de fluxo de ar preferenciais próximos ao poço, onde o gradiente de pressão é alto, de modo a impedir que o fluxo atinja uma área maior em subsuperfície.

5.2.2. Características da zona saturada

As características da zona saturada têm efetiva influência na atuação da técnica AS. A efetividade do *air sparging* quanto ao alcance e distribuição de ar depende também das condutividades vertical e horizontal para a condução do ar, reflexo direto da maior ou menor heterogeneidade litológica. Por exemplo, uma camada com baixa permeabilidade pode dificultar a passagem de ar, e

uma camada com alta permeabilidade pode ocasionar um maior espalhamento horizontal do ar, conforme mostrado na **Figura 11**.

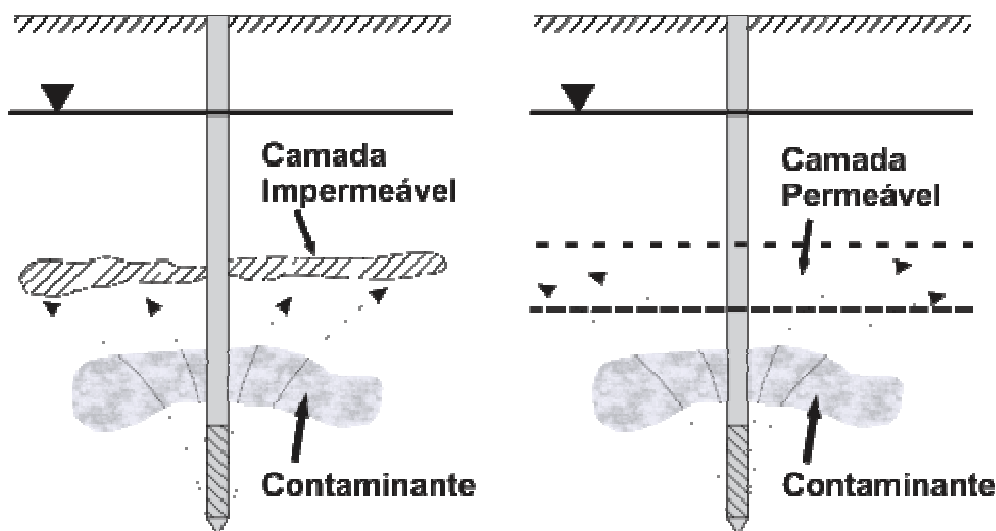


Figura 11. Influência da heterogeneidade litológica na abrangência de aplicação da técnica de injeção de ar (adaptado de SUTHERSAN, 1999).

Segundo Suthersan (1999), a condição ideal para a injeção de ar na zona saturada se dá em materiais com condutividades hidráulicas maiores que 10^{-3} cm/s. Uma condição contrária a essa impede que o fluxo se dissipe e atue na pluma de contaminantes. Ainda, as melhores condições geológicas ocorrem quando a permeabilidade do solo aumenta em direção à superfície, ou seja, acima do ponto de injeção.

Dependendo da taxa de injeção de ar em local raso, ou seja, próximo ao nível d'água, pode ocorrer a perda por coesão do solo, a depender das condições geológica, em torno do ponto de injeção e, assim, a perda de controle do ar injetado.

Quando o ar é injetado, pode ocorrer o deslocamento da água subterrânea, tanto na componente vertical, ocasionando a ascensão do nível d'água, como o movimento lateral, podendo ocasionar o espalhamento da pluma, ocasionando o fenômeno denominado *mounding*. Este fenômeno é importante, pois também pode ser utilizado para inferir o raio de influência.

A magnitude do efeito *mounding* depende das condições geológico-hidrogeológicas do local e da localização dos poços de observação em relação à injeção, onde pode variar de insignificante a vários metros de magnitude.

5.2.3. Fatores climáticos e características do vazamento

Outros fatores podem influenciar no funcionamento da técnica de remediação SVE/AS, como os climáticos e características do vazamento.

Os aspectos climáticos (**Figura 12**) são importantes, pois, como por exemplo, as chuvas participam infiltrando-se no solo, gerando umidade e diminuindo a porosidade disponível aos gases.

Outro aspecto climático importante é o efeito de ventos e da pressão barométrica, que influenciam na chegada de vapores de produtos voláteis à superfície e perdas à atmosfera, onde se observa que as maiores concentrações de contaminantes em superfície estavam associadas a esses fenômenos, conforme Hirata (1990).

Por fim, a descrição do acidente ambiental auxiliará em muito os procedimentos e o estabelecimento da estratégia de implementação da remediação. A localização exata do vazamento, a forma, a intensidade e as quantidades de contaminantes envolvidas, bem como as substâncias associadas permitirão a escolha adequada e a conveniência do uso desta ou de outras técnicas.

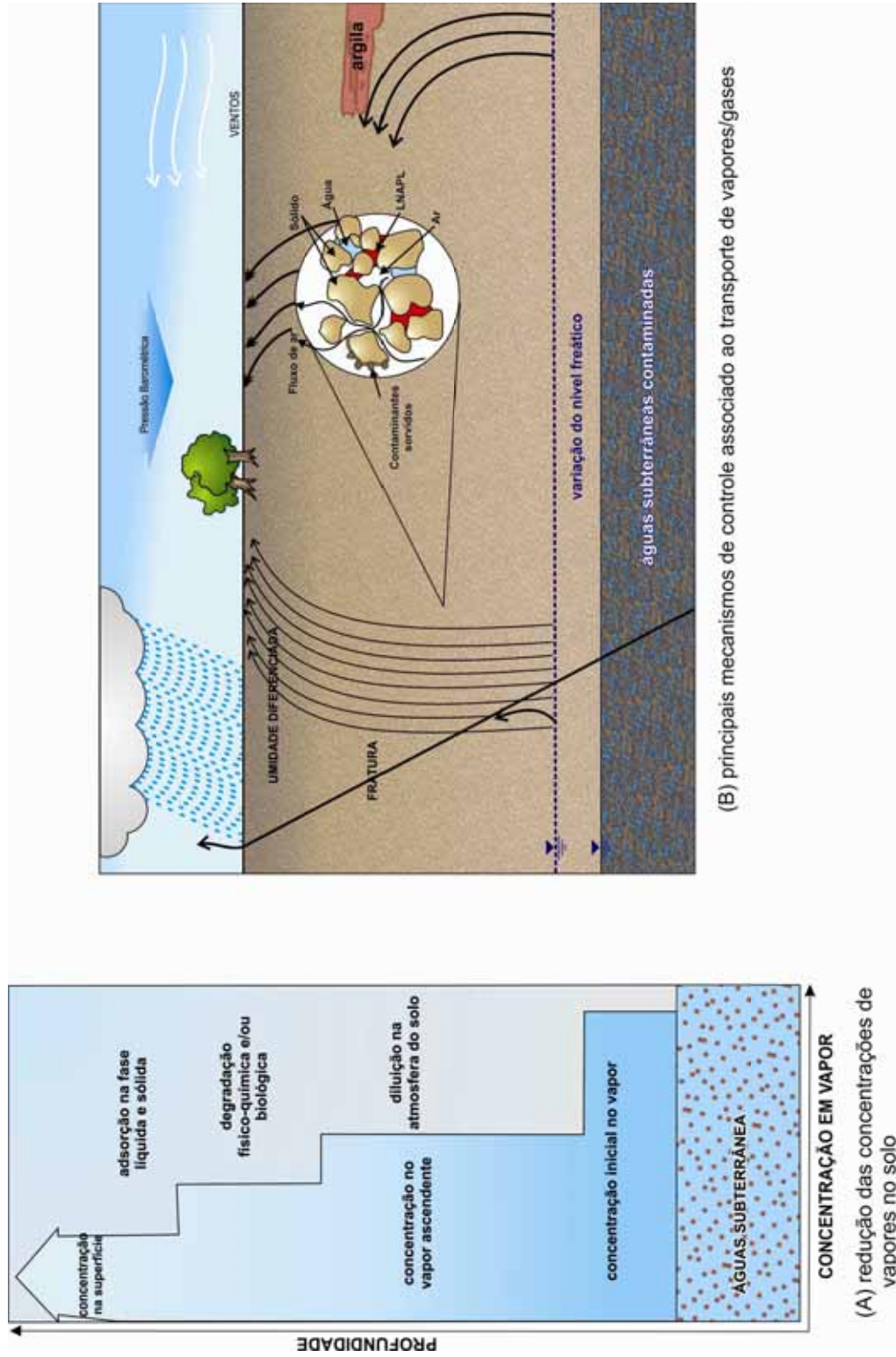


Figura 12. Fatores que influenciam o movimento de gases em subsuperfície. (adaptado de HIRATA, 1990).

6. CARACTERÍSTICAS DO BENZENO

O benzeno, que é o contaminante presente na área de estudo, trata-se de um líquido incolor, altamente inflamável, que apresenta alta taxa de evaporação. Faz parte do grupo de hidrocarbonetos aromáticos, cuja fórmula da molécula é C_6H_6 e estrutura molecular apresentada na **Figura 13**.

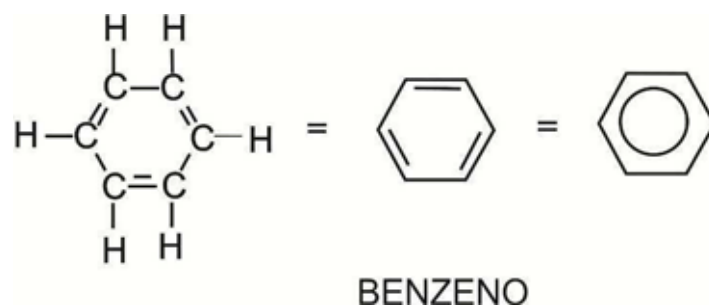


Figura 13. Estrutura molecular do benzeno.

A composição comercial do benzeno, conforme a Companhia Chevron Phillips (2003) *apud* Montgomery (2007) contém os seguintes componentes: tiofeno (≤ 1 mg/Kg), enxofre (≤ 1 mg / kg), tolueno ($\leq 0,10\%$ em peso), tolueno + metilciclohexano (≤ 150 mg / kg), metilciclopentano (≤ 100 mg / kg), n-hexano (≤ 80 mg / kg), e hidrocarbonetos não aromáticos ($\leq 0,15\%$ em peso).

O composto é utilizado principalmente como intermediário da síntese de produtos químicos tais como, estireno, detergentes, pesticidas, aditivo de combustível, solvente para extração industrial, solvente de indústria de borracha e na preparação de tintas. Também é um componente da gasolina, uma vez que ocorre naturalmente no petróleo bruto e é um subproduto dos processos do seu refino.

O benzeno é classificado por FETTER (2001) como contaminante de alta mobilidade na água e solo, e quando comparado aos demais compostos BTEX, o tolueno e o *o*-xileno estão classificados com moderada mobilidade, o etilbenzeno, *p*-xileno e *m*-xileno, estão classificados como baixa mobilidade no solo e água subterrânea. As propriedades físico-químicas desse composto podem ser observadas na **Tabela 2** cujas referências foram citadas por Montgomery (2007), com exceção da CETESB (2012).

Devido à ação carcinogênica do benzeno, no Brasil considera-se para as águas subterrâneas, o padrão de potabilidade da Portaria nº 36 de 1990, revogada pela Portaria nº 518 de 25/05/2004, e atualizado pela Portaria nº 2.914 de 12/12/2011 do Ministério da Saúde, que estabelece uma concentração máxima de 5 $\mu\text{g/L}$.

As principais vias de exposição humana e animal ao benzeno são por inalação e ingestão através do consumo de água e alimentos contaminados (CETESB, 2001).

Tabela 2. Características físico-químicas do composto Benzeno.

Parâmetro	Valor	unidade	Condições	Fonte
Peso molecular	78,11	---	---	---
Solubilidade em água	1780	mg/L	25 °C	shake flask-GLC, Maraça <i>et al</i> (1998)
Solubilidade em água	1800	mg/L	25 °C	CETESB (2012)
Densidade	0,8728	g/cm ³	25 °C	Aminabhavi and Banerjee (1999a)
Densidade do vapor	3,19	g/L	26 °C	Groundwater Chemicals
Pressão de vapor	95,2	mmHg	25 °C	Mackay and Leinonen (1975)
	100	mmHg	26,1 °C	CETESB (2012)
Constante da Lei de Henry	5,56	$\times 10^{-3}$ atm·m ³ /mol	25 °C	Vitenberg <i>et al.</i> , 1975; Mackay <i>et al</i> (1979)
Viscosidade	0,61	cp		CETESB (2012)
Taxa relativa de evaporação	2,8			CETESB (2012)
Ponto de fusão	5,533	°C		Standen (1964)
Ponto de Ebulição	80,09	°C		Kurihara <i>et al</i> (2000)
Difusividade em água	1,09	$\times 10^{-5}$ cm ² /sec	25 °C	Gustafson and Dickhut (1994)
Constante de dissociação	37	---	---	Gordon and Ford (1972)
Tensão interfacial com água	28,7	dyn/cm	25 °C	Murphy <i>et al</i> (1957)
	33,63	dyn/cm	25 °C	Janczuk <i>et al</i> (1993)
Coef Partição carbono-água Koc	1,92			Schwarzenbach and Westall (1981)
Coef part octanol-água	1,98		25 °C	Schantz and Martire (1987)

7. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

7.1. Histórico da área

Na região industrial de Cubatão, Estado de São Paulo, foi constatado vazamento de produto de benzeno devido ao rompimento de uma tubulação que o conduzia. Esta tubulação, de 3" de diâmetro, encontrava-se a cerca de 2,0 m de profundidade, ou seja, abaixo a aproximadamente 0,5 m do nível d'água, e estava submetida à pressão de aproximadamente 20,0 kgf/cm², conforme informações do operador da tubulação.

Desde a detecção do vazamento, em dezembro de 2003, vêm sendo realizados trabalhos na área com vistas à solução do problema. Inicialmente, foram tomadas medidas para a contenção do vazamento e, posteriormente, procedeu-se à avaliação do impacto e, na sequência, as ações de remediação do benzeno.

Tendo em vista que este contaminante atingiu os sedimentos e água subterrânea, foram necessárias essas medidas para evitar riscos à saúde humana.

A Figura 14 apresenta a evolução temporal das atividades desenvolvidas na área, desde a detecção do vazamento.

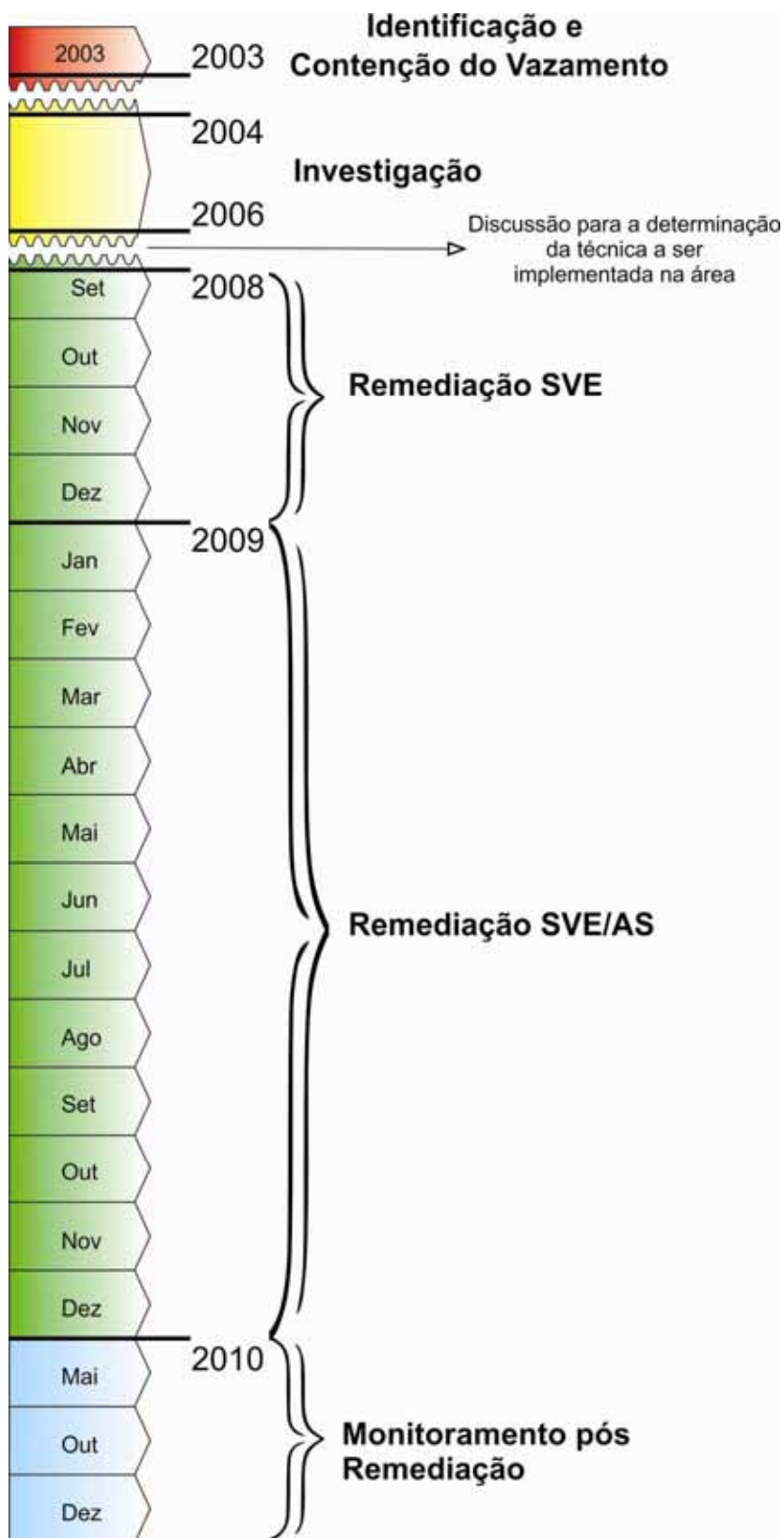


Figura 14. Cronologia das ações tomadas na área.

As medidas de contenção do vazamento realizadas imediatamente após a detecção foram:

- purga e raqueteamento (vedação) da tubulação;
- pressurização da tubulação com N₂ gasoso; e
- medições diárias de concentração de benzeno e explosividade na atmosfera e em interferentes subterrâneos como galerias de dutos pluviais, telefonia, etc.

Ainda, para avaliação do impacto ocasionado pelo vazamento, a partir de 2004 foram realizados trabalhos de investigação que contemplaram a execução de sondagens, instalação de poços de monitoramento, amostragem de solo e água subterrânea para análises químicas, e ensaios hidrogeológicos. Além disso, como foi detectado risco à saúde humana, foi implementado um sistema de remediação que contemplou a aplicação da conjugação das técnicas SVE e AS.

A **Figura 15** apresenta a localização da tubulação de benzeno, dos poços de monitoramento, dos poços de extração de vapor e dos poços de injeção de ar na área de estudo.

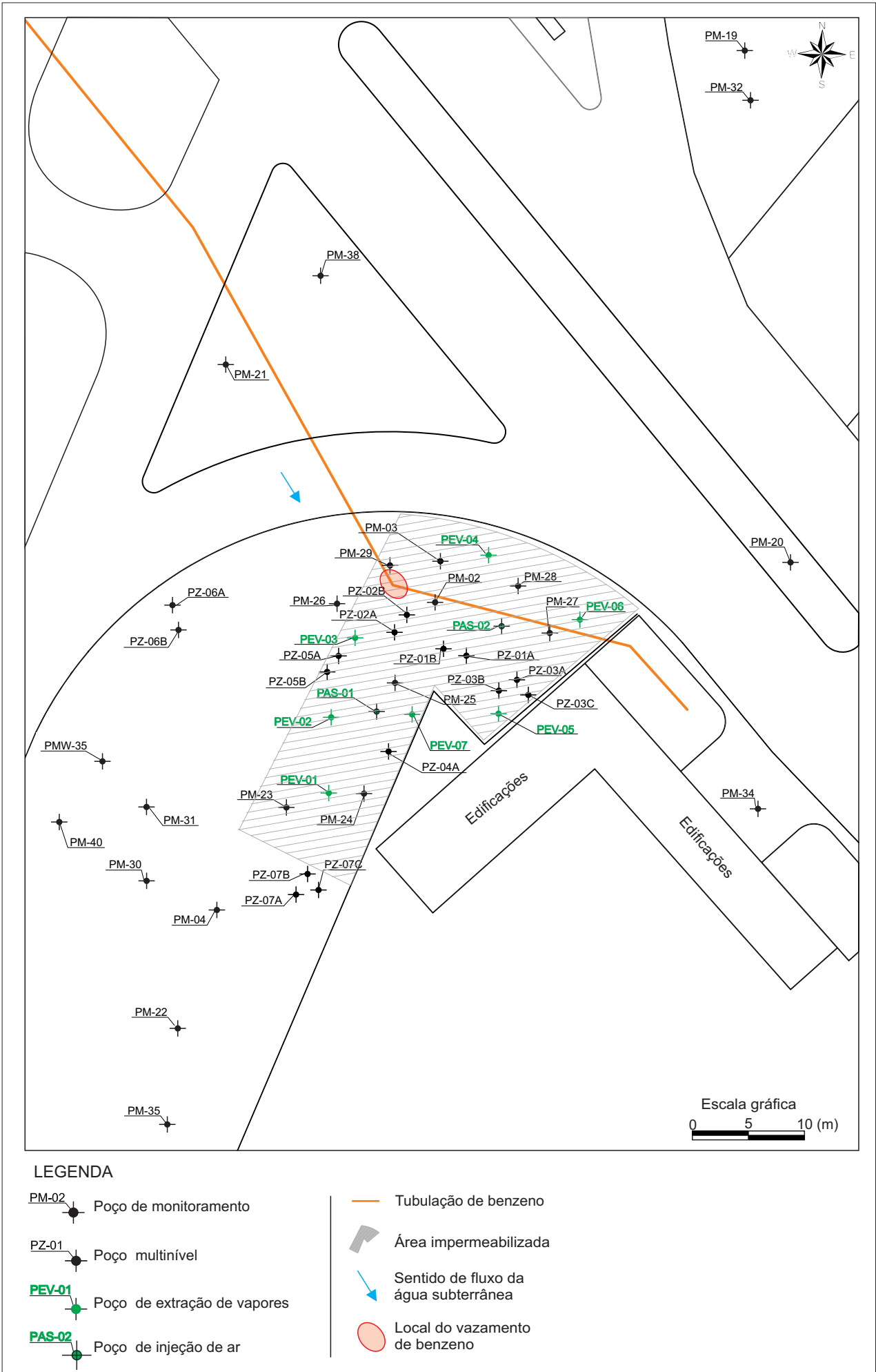


Figura 15. Localização das instalações na área de estudo

7.2. Características regionais

7.2.1. Hidrografia Regional

7.2.1.1. Rede Hidrográfica

Situada na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 7 (UGHRI 7) da Baixada Santista (Decreto no 10.755/1977; CETEC, 2002), a área de estudo está inserida na bacia do rio Cubatão (Classes 1 e 2, segundo CONAMA nº 357), com área de 175,55 km². Os afluentes mais importantes são: Cubatão de Cima, Passareuva, Pilões, Perequê e Mogi, todos na margem esquerda do rio Cubatão.

Este complexo hidrográfico tem como desembocadura o Complexo Estuarino de Santos - São Vicente no Largo do Caneu (**Figura 16**).

7.3. Geologia Regional

7.3.1. Unidades Geológicas

As unidades geológicas existentes na área, segundo Suguio & Martin (1994), são representadas por rochas do *Embasamento Cristalino* e por *Sedimentos Terciário-Quaternários* (**Figura 17**).

As rochas do Embasamento Cristalino são representadas por conjuntos litológicos diversos, separados em dois conjuntos, ambos de idade Pré-Cambriana, denominados de *Complexo Piaçaguera* (Hasui & Sadowski, 1976) e *Grupo Paraíbuna*, que, predominantemente, ocorrem nas áreas das encostas da Serra do Mar e nos morrotes dispersos pela Planície Sedimentar. Também são consideradas as rochas granitóides do Paleozóico e as rochas básicas do Mesozóico.

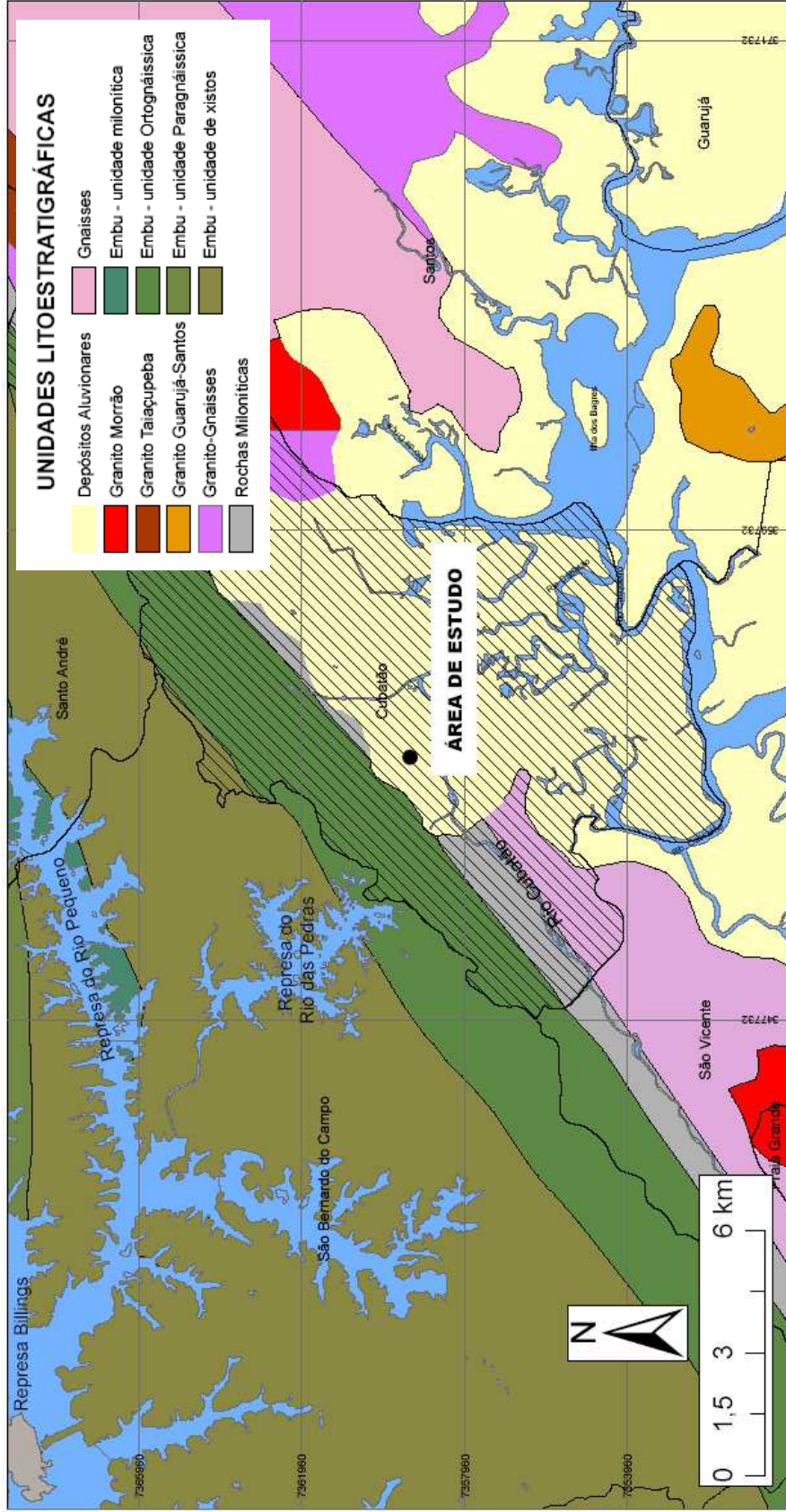


Figura 17. Mapa geológico regional (CPRM, 2001).

Ainda compondo o Embasamento Cristalino, são observados pequenos corpos granitóides intrusivos.

Os litotipos que compõem as escarpas da Serra do Mar são apresentados na **Tabela 3**.

Tabela 3. Tipos litológicos presentes na Serra de Cubatão (IPT, 2002).

UNIDADE	DESCRIÇÃO
Rochas metamórficas migmatizadas de fácies anfibolito	Biotita gnaisses e micaxistos com lentes de quartzito e anfibolitos (Cgx)
	Migmatitos homogêneos (Cgm)
Ectinitos e migmatitos de fácies xisto verde a anfibolito	Xistos e gnaisses migmatizados (Axm)
	Micaxistos e filitos (Ax)
	Quartzitos e quartzitos impuros (Aq)
	Rochas cálcio-silicáticas e anfibólio-xistos (Ac)

Os produtos de alteração das rochas do Embasamento Cristalino, o manto de alteração, estão associados à composição litológica da Serra do Mar e às características climáticas da região, onde se observa intensa precipitação e temperaturas altas. O clima subtropical gera intenso intemperismo, e consequente manto espesso de solos (IPT, 2002).

Segundo IPT (1991), os principais materiais que constituem este manto de alteração estão divididos em tálus, solos coluvionar, solo saprolítico e saprólito.

- **Tálus:** são constituídos por depósitos de blocos matriz-suportados, caracterizados por:
 - Matriz - material predominantemente argiloso a arenoso, com constituição e granulometria bastante heterogêneas, muitas vezes saturados por água;

- Blocos - seixos, matacões e fragmentos de rochas diversas, desde bastante alterados a praticamente são, imersos na matriz em proporções variadas, com posicionamento totalmente caótico; devido à deposição diferencial ou pela posterior lixiviação, esses blocos podem encontrar-se acumulados na base dos depósitos de tálus.

Conforme descrito por IPT (1986), os depósitos de tálus apresentam duas fases de formação, sendo que os mais antigos apresentam maior compactação, alteração e laterização que os depósitos similares mais recentes. Os depósitos de tálus são constituídos por matacões, blocos e seixos, polimíticos, angulosos a subarredondados, com distribuição caótica no depósito. A matriz dos depósitos de tálus é reduzida em relação aos rudáceos, tendo sua composição variada em função das litologias proximais. Podem ter espessuras de 6 a 10 m.

- **Solo coluvionar** (ou solo superficial): pode apresentar textura arenosa, quando se encontra em regiões onde ocorrem rochas gnáissicas a graníticas, principalmente naquelas em que há predominância de migmatitos homogêneos ou oftalmíticos de neossoma dominante; são classificados como areias argilosas pouco siltosas. Onde ocorre predomínio de rochas xistosas, como migmatitos embrechíticos com paleossoma de xistos dominante, o solo coluvionar apresenta textura argilosa a siltosa. Por vezes, apresenta-se com processo de laterização ou já laterizados. IPT (1991) divide os solos coluvionares em dois horizontes:
 - Horizonte superficial (espessura da ordem de 0,5 m), caracterizado pela densa fixação de raízes da vegetação;
 - Horizonte inferior (0,5 m a 1,5 m de espessura) - compreende porção com poucas raízes, predominando as características acima apresentadas.

- **Solo saprolítico** (ou solo residual): formado essencialmente *in-situ*, podendo ser movimentado por processos da dinâmica superficial das encostas; apresenta vestígios da rocha original, como xistosidade, fraturas e núcleos menos intemperizados, com estrutura maciça, apesar desses vestígios originais. Assim como para os solos coluvionares, estes apresentam textura areno-argilosa nas regiões onde predominam as unidades gnáissicas a graníticas, e silto-argilo-arenosas para as regiões de rochas xistosas. Possui espessura errática, podendo atingir vários metros, porém predominam espessuras entre 1,0 m a 3,0 m; por vezes este solo está ausente e, muitos locais, apresenta uma dezena de metros. Pode apresentar cores nas tonalidades avermelhadas e arroxeadas.
- **Saprolito** (zona de blocos ou de transição): representa a transição entre os materiais terrosos e rochosos, predominando blocos de rocha, desde totalmente alterados a quase integralmente preservados. A presença de trincas é intensa, as quais podem apresentar-se abertas ou preenchidas por material de alteração ou por materiais das unidades sobrejacentes.
- **Rocha**: compreende o maciço rochoso subjacente, sendo que nos primeiros 10 m apresenta grande erraticidade em termos de grau de alteração e fraturamento, com alteração diferencial devido às foliações, bandeamento e faixas de diferentes composições (granito-gnáissicas a xistosas), e aos próprios fraturamentos. O topo rochoso é extremamente irregular, apresentando fraturas abertas intercomunicantes, com alternância de zonas mais e menos intemperizadas.

Sobrepondo os conjuntos do Embasamento Cristalino são observadas unidades cenozóicas, representadas por:

- Sedimentos Cenozóicos (formações Sete Barras e Pariquera-Açu);
- Sedimentos Quaternários (formações Morro de Icapara, Cananéia e Ilha Comprida) e;
- Sedimentos Aluvionares e Coluvionares e depósitos de movimentação de massa recentes.

Segundo IPT (1986), os cones de dejeção se caracterizam por serem depósitos de sopé das encostas, geralmente associadas às calhas de drenagens, sendo estreitos à montante, com alargamento para sua porção frontal (ou jusante) na forma de leques, interdigitando-se com os depósitos aluvionares das drenagens principais.

Similares a esses, porém, com extensões bem mais pronunciadas, ocorrem os depósitos de corridas de detritos ou de massa, composto por uma mistura de blocos de rochas, solos (cascalho, areia e lama), material orgânico (galhos e troncos de árvores) e quantidades variáveis de água (IPT, 2002).

As condições favoráveis à ocorrência de *debris flows* são a presença de material inconsolidado em abundância, encostas íngremes, fonte abundante de água, e vegetação esparsa. A movimentação ocorre ao longo dos canais de drenagens, na forma de ondas e pulsos.

Os depósitos alveolares formam-se ao longo dos principais canais de drenagens, desenvolvendo-se à montante de soleiras litológicas, constituindo-se por acumulações de blocos e matações de composição variada, tendo aumento de matriz para o topo (IPT, 1986).

7.4. Hidrogeologia Regional

7.4.1. Unidades/Sistemas Hidrogeológicos

Segundo CETEC (2002), a água subterrânea é dividida em dois sistemas principais: (i) Sistema Aquífero Cristalino (SAC) e (ii) Sistema Aquífero Sedimentar Litorâneo (SASL).

Essas denominações foram praticamente mantidas por DAEE/IG/IPT/CPRM (2005), os quais intitularam o primeiro de Aquífero Cristalino e o segundo de Aquífero Litorâneo.

7.4.1.1. Sistema Aquífero Cristalino

Na região de estudo, é mais importante o fluxo da água nas porções alteradas do Embasamento Cristalino, e apresentam condutividade hidráulica (K), da ordem de 10^{-4} a 10^{-6} cm/s, tanto para solos de natureza coluvionar como para solos residuais IPT (1991).

Na caracterização dos horizontes de alteração do Embasamento Cristalino o estudo de IPT (1991) mostrou que os solos residuais apresentaram resquícios das feições das rochas originais, de modo que podem ter comportamento hidrogeológico drenante, apresentando alta permeabilidade nas porções fraturadas, ligeiramente superior ao horizonte sobrejacente dos solos coluvionares. Esse estudo mostrou ainda que zona de blocos, apresenta condutividade hidráulica muito mais elevada do que os solos sobrejacentes, em virtude da alternância do sistema de juntas com os blocos preservados (essencialmente impermeáveis).

Ainda referente aos solos residuais ou coluvionares, Wolle (1981) e Hessing (1976 apud Machado Filho, 2000) descrevem que este solo tem porosidade elevada, o que lhes confere alta permeabilidade.

Quanto aos solos saprolíticos, IPT (2002) descreve que estes apresentam permeabilidade da ordem de 10^{-4} cm/s, seja pela presença do sistema de descontinuidades presentes, como por sua matriz, conferindo a esta unidade condutividade hidráulica elevada.

Ao maciço rochoso é atribuída elevada permeabilidade, devido à presença de fraturas abertas, podendo constituir drenos para os horizontes superiores (IPT, 1991). As fraturas abertas e intercomunicantes, descritas por Wolle & Carvalho (1989), fazem com que essas rochas apresentem alta capacidade drenante, com aumento da condutividade hidráulica com a profundidade.

7.4.1.2. Sistema Aquífero Sedimentar Litorâneo

Segundo DAEE/IG/IPT/CPRM (2005), o SASL apresenta distribuição irregular ao longo da costa paulista, segmentado pelas rochas do Embasamento Cristalino, desde a região de Cananéia até Caraguatatuba/Ubatuba.

É caracterizado por depósitos da planície sedimentar da Planície Litorânea, chegando até a 70 km de largura nas planícies do Vale do rio Ribeira de Iguape, com redução para nordeste, a partir de Itanhaém, Santos e Bertioga, apresentando então pequenos bolsões isolados de cerca de 300 m de extensão (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

O SASL apresenta porosidade granular, livre, de extensão limitada e transmissividade média a elevada, com camadas de areia formando aquíferos lenticulares, quando intercalados às camadas argilosas e siltosas. Pode apresentar influência oceânica pela intrusão de águas salobras e até mesmo da presença de cunha salina, por canais de maré e braços de mar (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

A superfície potenciométrica apresenta-se entre 0 e 20 m acima do nível do mar, com valores mais elevados próximos às escarpas da Serra do Mar, e linhas de fluxo indicando sentido de escoamento da água subterrânea para o oceano, exceto quando interceptadas pelas drenagens (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

7.5. Caracterização geológica e hidrogeológica da área de estudo

Para a caracterização geológica e hidrogeológica da área de estudo foram utilizadas as informações obtidas nos trabalhos de investigação conduzidos no local, tais como: descrições de testemunhos de sondagens e resultados de análises granulométricas.

Durante os trabalhos de investigação não foi possível a visualização de estruturas sedimentares nos testemunhos, devido à limitação da técnica de trado manual, utilizada para a execução das sondagens. Essas características forneceriam maiores informações sobre a dinâmica do processo sedimentar, permitindo uma análise mais acurada do ambiente deposicional.

Sendo assim, as interpretações basearam-se nas descrições de campo fornecidas pelas empresas que executaram os trabalhos de investigação na área de estudo, nos resultados de análise granulométrica de amostras de solo e nas características geológicas e geomorfológicas regionais. Desta forma, foi possível distinguir três unidades na área:

- Unidade I – Aterro;
- Unidade II – Areias; e
- Unidade III – Silte argiloso a argila siltosa.

A disposição dessas unidades pode ser observada nas seções hidrogeológicas A-B (**Figura 18**) e C-D (**Figura 19**).

7.5.1. Unidade I - Aterro

A Unidade I é formada por uma camada de aterro que recobre toda a área, sendo caracterizada pela presença de brita, pequenos blocos de rocha e entulhos diversos.

Este material apresenta grande variação textural, conforme pode ser observado nas curvas granulométricas da **Figura 20** e na **Tabela 4**. Contudo, apresenta predominância de areia siltosa, podendo ocorrer pedregulhos. Tem coloração avermelhada.

Na base do aterro ocorrem camadas de argila siltosa, localmente arenosas, de coloração avermelhada.

Para a terraplanagem da área com esse aterro, provavelmente foram utilizados materiais provindos do solo de alteração das rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino, assim como de desmonte de blocos das escarpas rochosas da Serra do Mar.

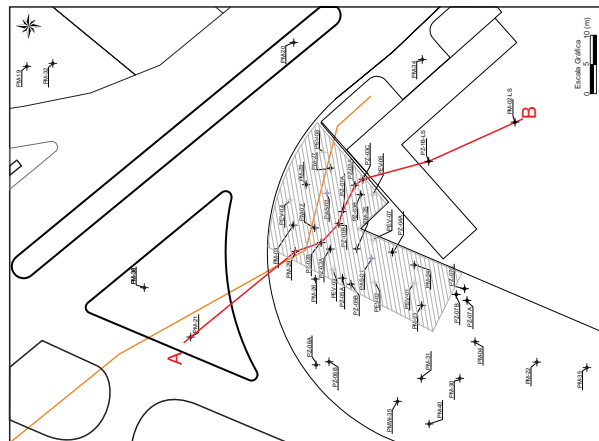
A espessura média de aterro observada é de cerca de 2,0 m, podendo alcançar até 3,0m.

7.5.1.1. Índices físicos do solo na zona não saturada - Unidade I

Durante a fase de campo de uma das campanhas de investigação efetuada, foram coletadas quatro amostras indeformadas de solo para a determinação dos parâmetros físicos do solo na Unidade I (Aterro), cujos dados foram utilizados na avaliação de risco a saúde humana. A localização e os resultados das análises dessas amostras estão apresentados, respectivamente, na **Figura 21** e **Tabela 5 e 6**.

A análise dos parâmetros físicos do solo incluiu a determinação da granulometria, das densidades aparente e real, das porosidades efetiva e total, da umidade, bem como do percentual de matéria orgânica e do teor de Carbono Orgânico Total (COT) das amostras coletadas nos pontos AI-04, AI-05, AI-06 e AI-7.

Mapa Índice



LEGENDA

- | | | |
|-------------|--|--|
| Unidade I | | Aterro - Areia siltosa a argila siltosa avermelhada |
| Unidade II | | Areia fina siltosa |
| | | Areia fina a média cinza |
| | | Areia média com pedregulho a areia grossa com pedregulho cinza |
| Unidade III | | Silte argiloso a argila siltosa cinza |
| | | Silte argiloso a argila siltosa cinza com detritos vegetais e matéria orgânica |

- Poços
- Continuação da sondagem
- Tubulação de benzeno
- Sem informação
- PM xx / PZ xx** Poços de monitoramento / multiníveis
- PAS xx** Poço de injeção
- PEV xx** Poço de extração

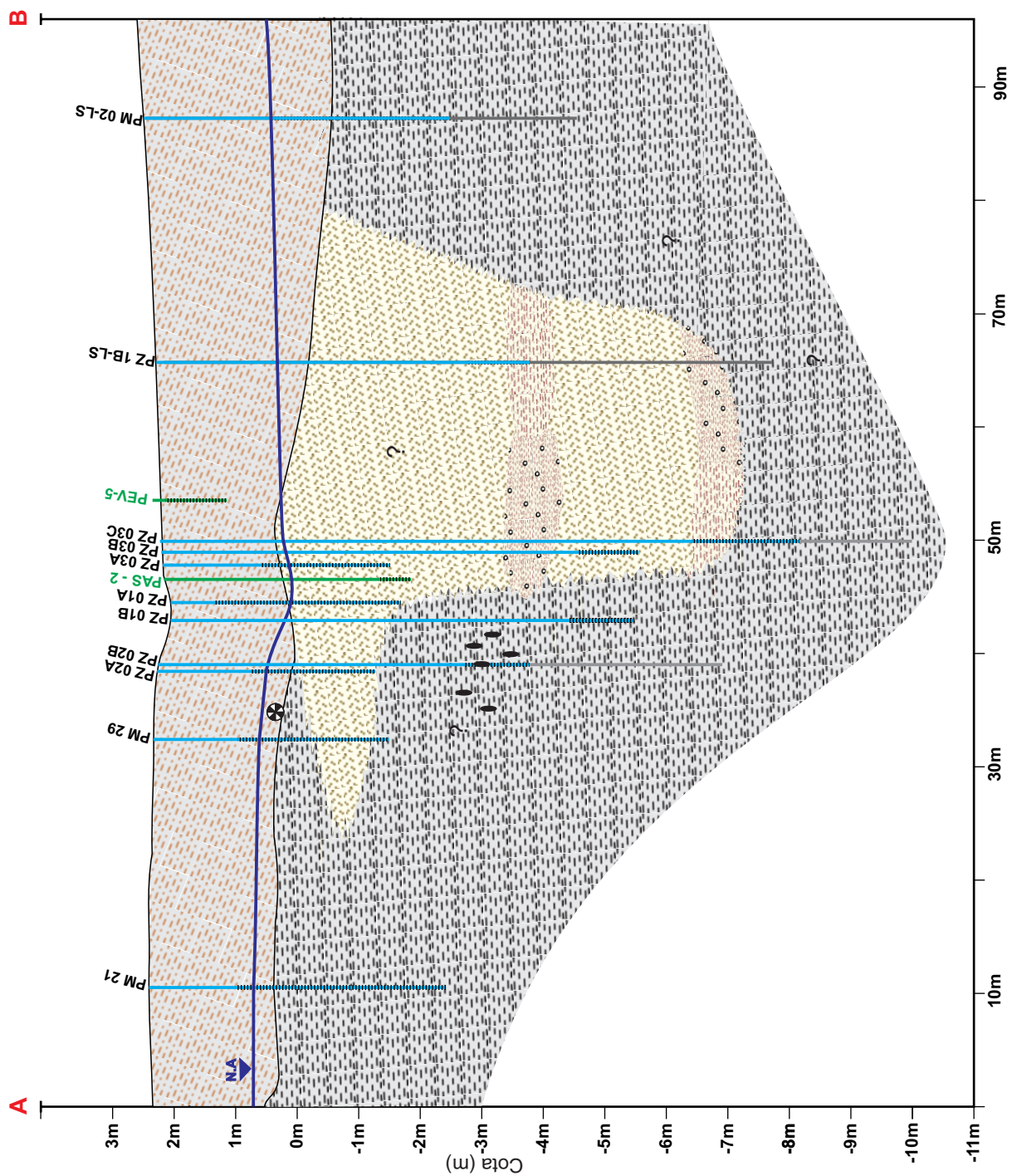
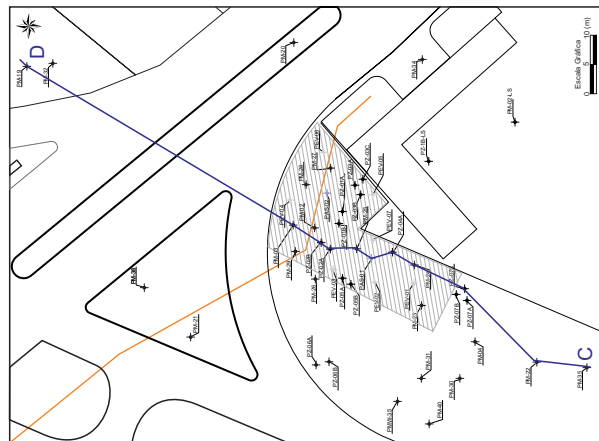


Figura 18. Seção hidrogeológica A-B.

Mapa Índice



LEGENDA

- | | | |
|-------------|--|--|
| Unidade I | | Aterro - Areia siltosa a argila siltosa avermelhada |
| Unidade II | | Areia fina siltosa |
| | | Areia fina a média cinza |
| | | Areia média com pedregulho a areia grossa com pedregulho cinza |
| Unidade III | | Silte argiloso a argila siltosa cinza |
| | | Silte argiloso a argila siltosa cinza com detritos vegetais e matéria orgânica |
| | | Poços |
| | | Continuação da sondagem |
| | | Tubulação de benzeno |
| | | Sem informação |
| | | Poços de monitoramento / multiníveis |
| | | Poço de injeção |
| | | Poço de extração |

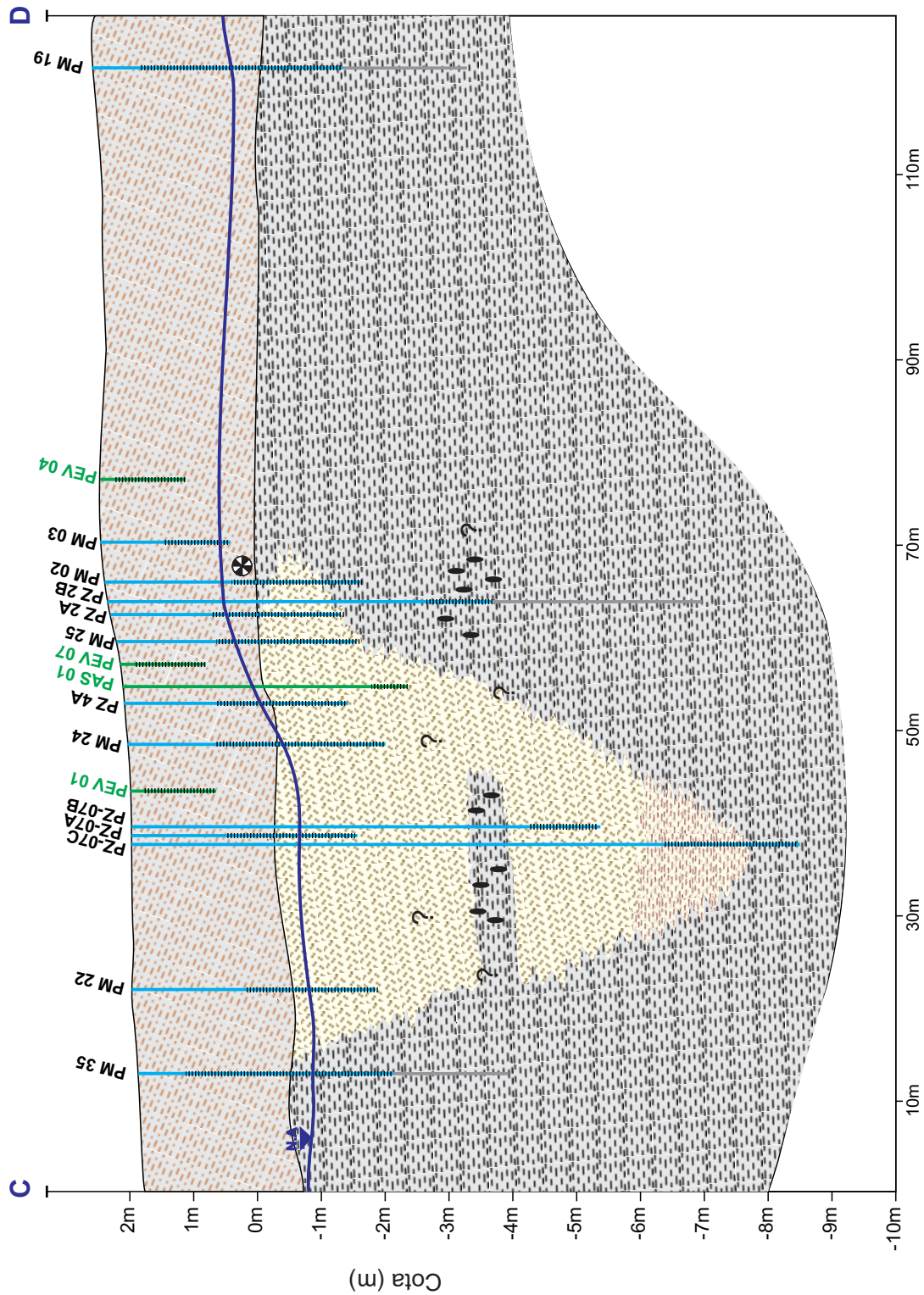


Figura 19. Seção hidrogeológica C-D.

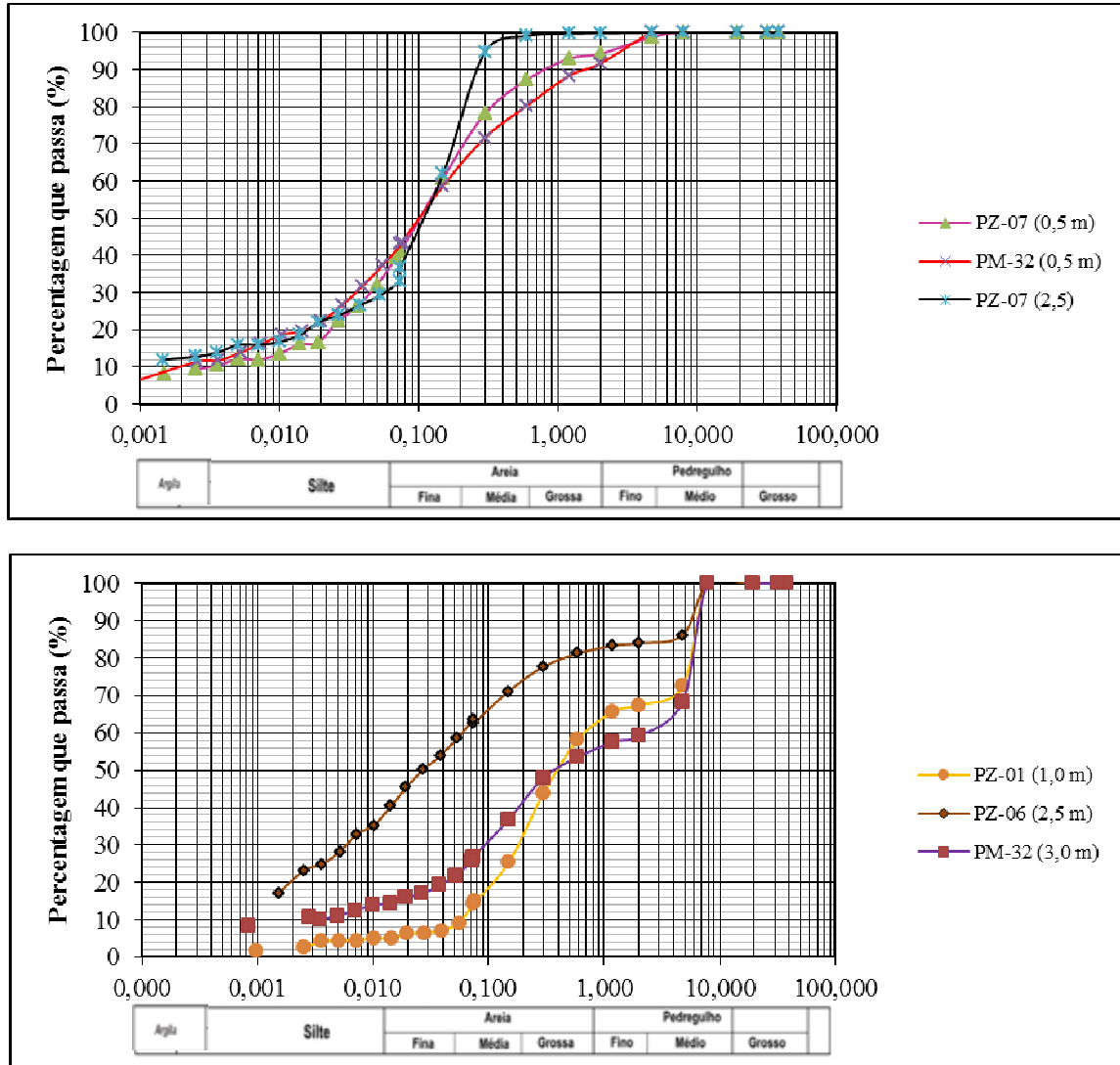


Figura 20. Curvas granulométricas representativas da unidade I - Aterro.

Tabela 4. Valores de granulometria da unidade I – Aterro

Identificação	Profundidade	Pedregulho Grosso	Pedregulho Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	Classificação
	(m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
PM 32	0,5	0,0	8,4	11,4	15,7	25,5	29,0	10,0	Areia fina siltosa
PM 32	3,0	31,6	9,2	5,7	12,0	18,0	13,5	10,0	Pedregulho grosso arenoso
PZ-07	0,5	1,2	4,5	7,1	19,2	32,5	27,0	8,5	Areia fina a média siltosa
PZ-07	2,5	0,0	0,2	0,8	22,1	46,0	18,5	12,5	Areia fina a média siltosa
PZ-06	2,5	13,9	2,2	2,8	7,2	14,0	40,0	20,0	Silte areno-argiloso
PZ-01	1,0	27,5	5,0	9,3	25,2	22,0	9,0	2,0	Areia média a fina com pedregulho grosso

Tabela 5. Parâmetros físicos do solo

Amostra	Profundidade (m)	Densidade Aparente (g/cm ³)	Densidade Real (g/cm ³)	Matéria Orgânica (mg/kg)	Porosidade Efetiva (%)	Porosidade Total (%)	Carbono Orgânico (mg/kg)	Umidade (%)
AI-04	1,0	1,4	2,5	4194	33,5	55,2	2433	15,1
AI-05	1,0	1,7	2,4	8367	26,3	35,4	4853	13,6
AI-06	1,0	1,2	2,3	857	42,5	57,1	4,7	19,6
AI-07	1,0	1,35	2,71	2229	5,1	50,92	1293	24,2
Média	---	1,41	2,48	3911,75	26,85	49,66	2145,93	18,13

Tabela 6. Granulometria

Amostra	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
AI-04	84,5	7,9	7,6
AI-05	80,2	9,7	10,1
AI-06	68,7	20,4	10,9
AI-07	80,5	12,2	7,3

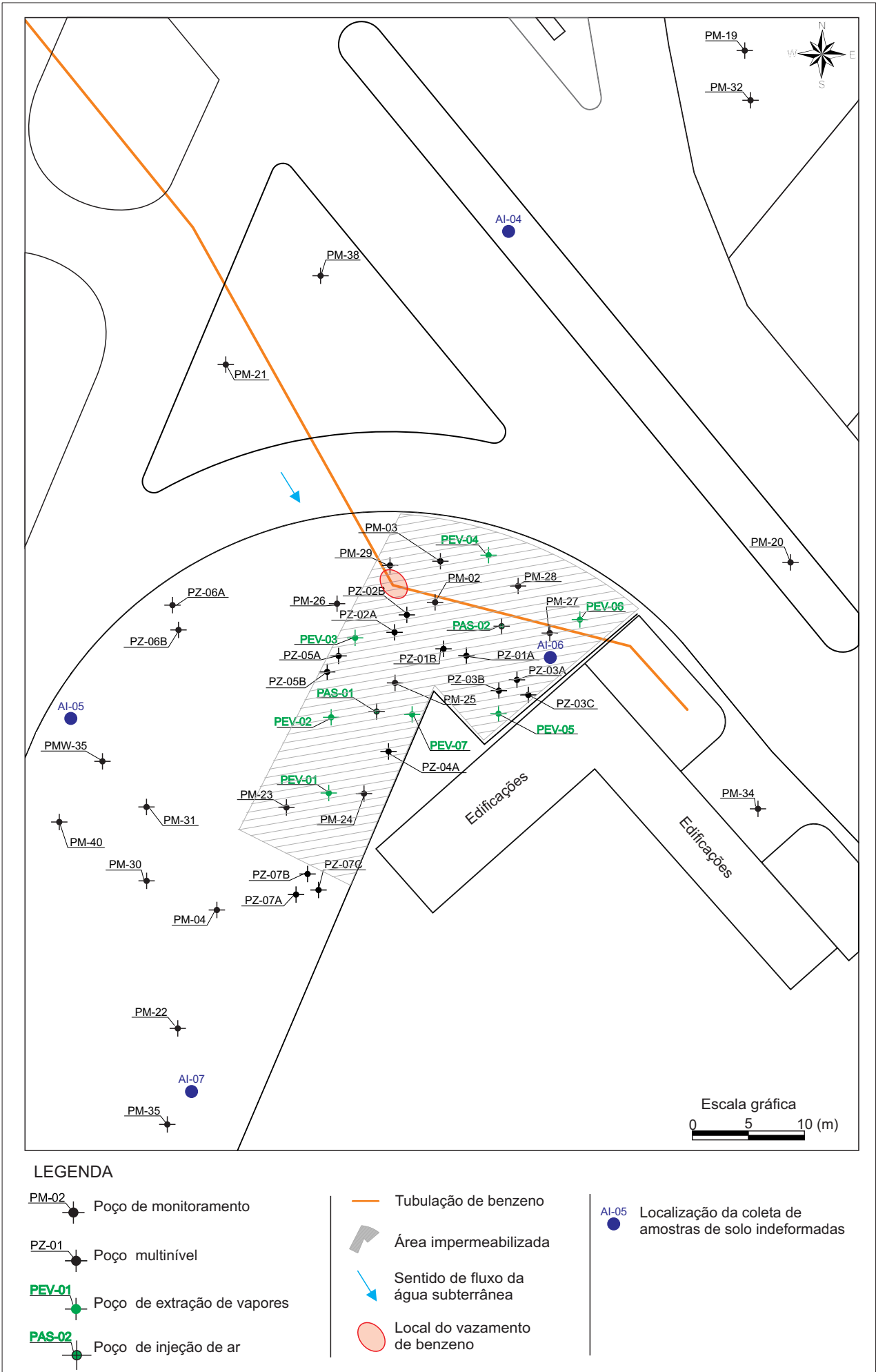


Figura 21. Mapa de localização das amostras indeformadas.

Os parâmetros físicos encontrados confirmam a textura areno-siltosa do aterro (Unidade I). Esse material apresenta concentrações elevadas de matéria orgânica e de carbono orgânico, principalmente nas regiões SW, SE e NE da área de estudo.

Em relação à questão do carbono orgânico/matéria orgânica, dá pra dizer que estas altas concentrações podem contribuir significativamente para a sorção dos compostos orgânicos.

De maneira geral, as porosidades efetivas obtidas são bastante altas, em função do material utilizado para o aterro e do arranjo dos materiais no momento da compactação, porém, a amostra AI-07 é bastante divergente das demais, podendo representar uma porção com menor porção de entulhos e fragmentos utilizados.

7.5.2. Unidade II – Areias

Esta unidade é caracterizada pela predominância de areia fina a média (**Figura 22**), pouco a muito siltosa, de coloração cinza; localmente, ocorrem lentes de silte arenoso.

Esta unidade pode estar associada a uma sucessão de barras fluviais, essencialmente arenosas, com pequena contribuição pelítica.

Na seção hidrogeológica A-B da **Figura 18**, a cerca de 6,0 m de profundidade, entre os poços PZ-03C e PZ-1B-LS ocorre camada de areia fina siltosa que pode representar a parte superior de um depósito de barra, e lateralmente areia média com pedregulho que pode representar a parte inferior de uma barra. Esta situação se repete entre 7,0 e 8,0 m de profundidade, no entanto a granulometria dos materiais do poço PZ-1B-LS passa a ser areia grossa, com pedregulho.

Na seção hidrogeológica C-D da Figura 19, no mesmo horizonte (6,0 m), em meio a sedimentos arenosos, ocorre uma lente de argila com presença de detritos orgânicos, que pode ser associada a depósitos de planície de inundação.

A distribuição granulométrica das amostras desta unidade é representada na **Figura 23** e na **Tabela 7**.



Figura 22. Detalhe da areia fina a média da Unidade II.

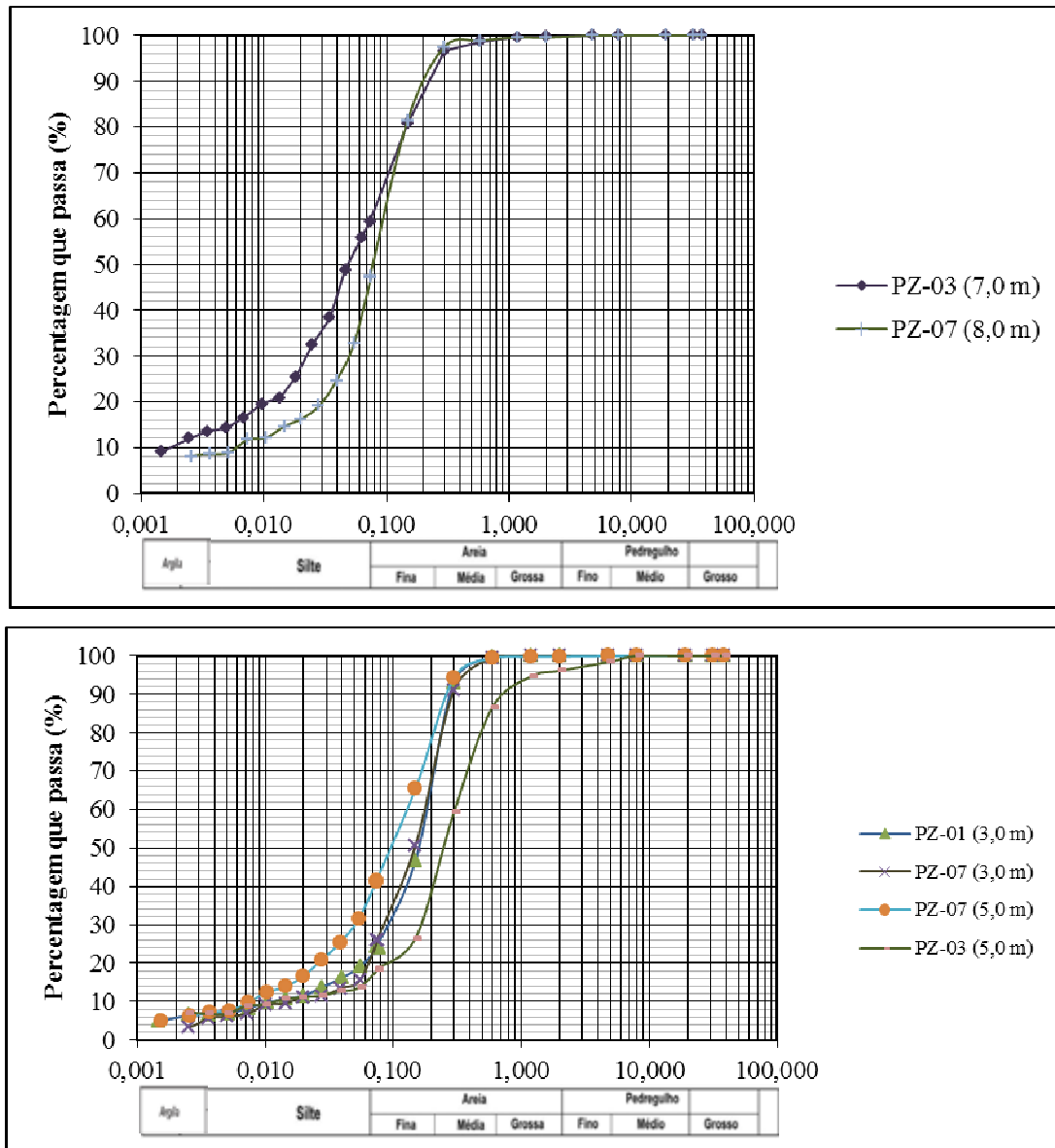


Figura 23. Curvas granulométricas representativas da Unidade II.

Tabela 7. Valores de granulometria da Unidade II.

Identificação	Profundidade	Pedregulho Grosso	Pedregulho Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	Classificação
	(m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
PZ-07	3,0	0,0	0,0	0,6	32,4	49,0	15,0	3,0	Areia fina a média
PZ-07	5,0	0,0	0,1	0,5	22,4	42,0	30,0	5,0	Areia fina a média siltosa
PZ-07	8,0	0,0	0,4	0,7	10,9	52,0	30,0	6,0	Areia fina siltosa
PZ-01	3,0	0,0	0,0	0,3	33,7	46,0	15,0	5,0	Areia fina a média
PZ-03	5,0	1,6	2,2	9,7	47,5	24,0	9,0	6,0	Areia média a fina
PZ-03	7,0	0,0	0,2	1,2	11,7	31,5	44,5	11,0	Silte com areia fina

7.5.3. Unidade III – Silte argiloso a argila siltosa

Esta unidade é constituída por silte argiloso, sendo que na parte basal ocorre argila siltosa (**Figura 24**), ambas litologias de coloração cinza-esverdeada a cinza-escura. Localmente, também pode ocorrer silte areno-argiloso. A distribuição granulométrica desta unidade é representada na **Figura 25** e na **Tabela 8**.

Os sedimentos desta unidade são característicos de planície de inundação, com textura pelítica e abundância de matéria orgânica e detritos vegetais.

Esta unidade está presente em toda a área de estudo, no entanto, o topo encontra-se mais raso (3,0 m) na região central e N-NW, e mais profundo (8,0 m) a S-SW e S-SE da área.



Figura 24. Detalhe da argila Unidade III.

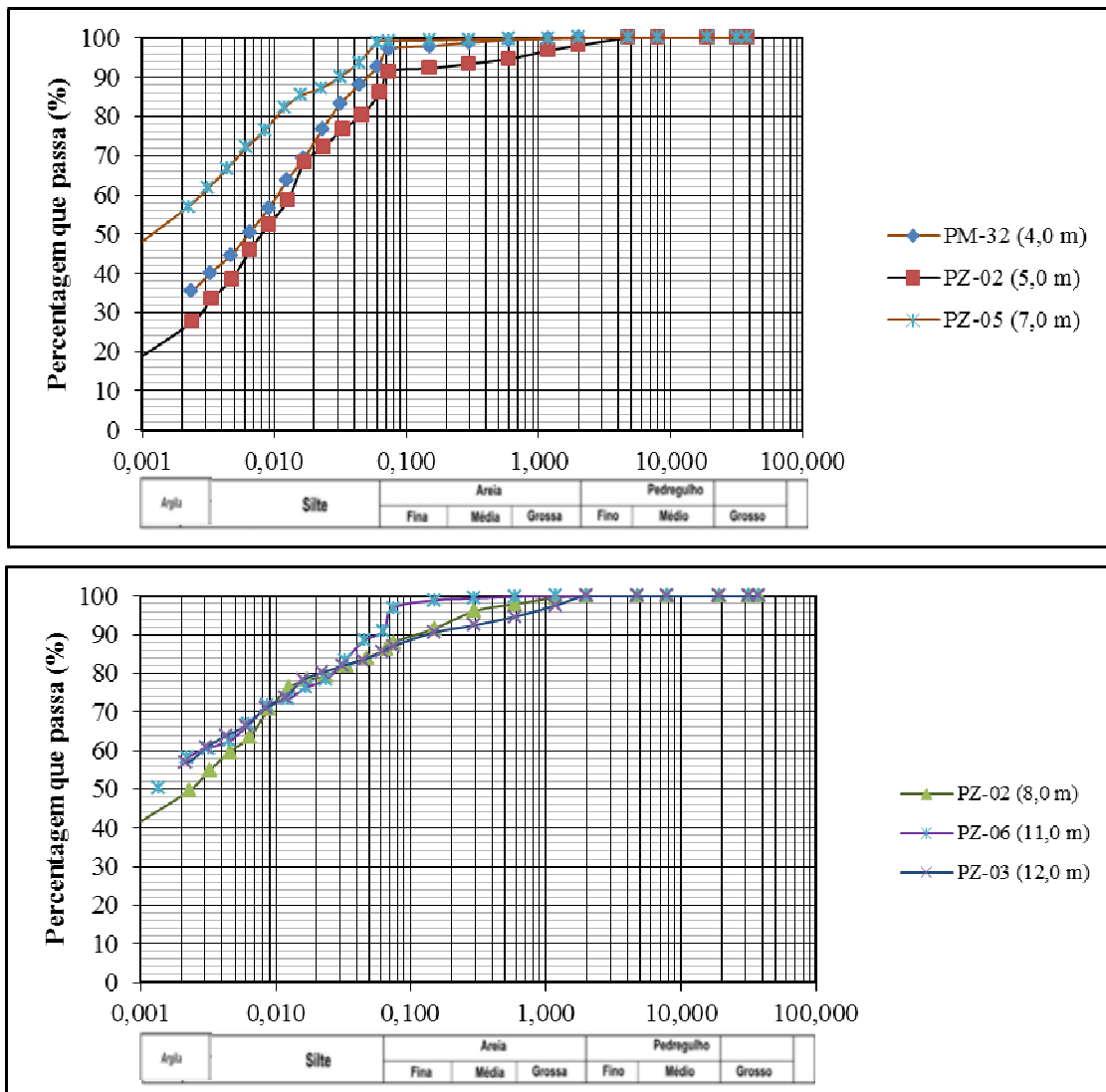


Figura 25. Curvas granulométricas representativas da Unidade III.

Tabela 8. Valores de granulometria da Unidade III.

Identificação	Profundidade	Pedregulho Grosso	Pedregulho Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	Classificação
	(m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
PM-32	4,0	0,0	0,0	0,5	1,5	5,5	58,0	34,5	Silte argiloso
PZ-05	7,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,6	43,9	55,0	Argila siltosa
PZ-06	11,0	0,0	0,0	0,1	0,9	8,0	35,5	55,5	Argila siltosa
PZ-02	5,0	0,0	1,9	3,4	1,7	8,0	60,0	25,0	Silte argiloso
PZ-02	8,0	0,0	0,0	2,1	3,9	9,0	37,0	48,0	Argila siltosa
PZ-03	12,0	0,0	0,0	5,3	2,7	6,4	29,6	56,0	Argila siltosa

7.5.4. Condutividade hidráulica

Os ensaios hidrogeológicos, tipo *slug test*, realizados na área de estudo foram utilizados para determinar a condutividade hidráulica da zona saturada, onde o intervalo testado é correspondente ao da seção filtrante do poço de monitoramento ou piezômetro ensaiado.

Em função da heterogeneidade dos estratos sedimentares da área, os ensaios executados acabaram, por vezes, refletindo o comportamento hidráulico de uma ou mais unidades hidrogeológicas, conforme pode ser observado na **Tabela 9**.

A condutividade hidráulica para as Unidades I e II, em conjunto ou isoladamente, varia de 10^{-5} cm/s a 10^{-3} cm/s.

A caracterização da condutividade hidráulica da Unidade III apresenta valores da ordem de 10^{-5} cm/s a 10^{-6} cm/s.

Tabela 9. Resultados dos ensaios *slug tests* realizados nos poços de monitoramento.

Poço	Condutividade Hidráulica (cm/s)	Unidade	Poço	Condutividade Hidráulica (cm/s)	Unidade
PM-02	$1,50 \times 10^{-3}$	I, II e III	PM-38	$5,6 \times 10^{-5}$	I e III
PM-03	$1,57 \times 10^{-3}$	I e III	PM-40	$7,02 \times 10^{-5}$	I e III
PM-04	$3,50 \times 10^{-5}$	I e III	PZ-01B	$1,40 \times 10^{-5}$	III
PM-20	$1,40 \times 10^{-4}$	I	PZ-02A	$4,95 \times 10^{-5}$	I e II
PM-22	$1,73 \times 10^{-3}$	I e II	PZ-03A	$4,79 \times 10^{-5}$	I e II
PM-23	$1,35 \times 10^{-4}$	I e II	PZ-03B	$4,14 \times 10^{-5}$	II
PM-24	$3,2 \times 10^{-4}$	I e II	PZ-04A	$5,30 \times 10^{-5}$	I e II
PM-25	$6,00 \times 10^{-5}$	II e III	PZ-05A	$4,45 \times 10^{-5}$	I e II
PM-26	$2,05 \times 10^{-4}$	I e II	PZ-05B	$2,63 \times 10^{-5}$	III
PM-27	$1,25 \times 10^{-3}$	I e II	PZ-06A	$1,44 \times 10^{-5}$	I e II
PM-28	$2,05 \times 10^{-3}$	I e II	PZ-06B	$2,83 \times 10^{-5}$	III
PM-29	$1,60 \times 10^{-3}$	I e II	PZ-07A	$4,34 \times 10^{-5}$	I e II
PM-30	$4,15 \times 10^{-4}$	I e III	PZ-07B	$9,15 \times 10^{-5}$	II
PM-31	$7,00 \times 10^{-5}$	I e III	PZ-07C	$2,63 \times 10^{-6}$	II e III
PM-32	$1,46 \times 10^{-4}$	I e III			
PM-34	$8,03 \times 10^{-5}$	I e III			
PM-35	$1,37 \times 10^{-4}$	I e II			

7.5.5. Potenciometria e pluviometria

A superfície potenciométrica de uma unidade aquífera mostra as principais direções que o fluxo da água subterrânea toma em seu percurso, desde as zonas de recarga até as de descarga. Evidentemente, esta situação pode se tornar bastante complexa devido às heterogeneidades geológicas do meio constituinte do aquífero e às variações sazonais do nível d'água.

Neste contexto, a avaliação do quadro hidrodinâmico apresentado para a área de estudo deve considerar sua marcante heterogeneidade litológica, apesar de sua pequena extensão.

A partir das leituras das profundidades dos níveis d'água nos poços de monitoramento, nos dias 05 de agosto e 01 de dezembro de 2009, foram elaborados os mapas potenciométricos, por meio do cálculo da carga hidráulica (**Tabela 10**), e apresentado o comportamento hidráulico predominante entre as unidades hidroestratigráficas que ocorrem na área, para os dois diferentes períodos sazonais (**Figura 26**), quando os sistemas de remediação SVE e AS encontravam-se em operação.

Para a elaboração dos mapas potenciométricos foram consideradas as leituras efetuadas nos poços de monitoramento onde o nível d'água estava no intervalo correspondente à seção filtrante, tendo sido descartados os piezômetros multiníveis, que apresentam seção filtrante somente na zona saturada, e aqueles poços que apresentam nível d'água abaixo do topo da seção filtrante.

Comparando-se as superfícies regional e local, verifica-se concordância das principais direções de fluxo, condicionadas pela presença do rio Cubatão, a sul da área, considerada a feição regional de descarga das águas subterrâneas (ALBERTO, 2010).

As inflexões verificadas e os diferentes gradientes observados entre os mapas elaborados podem ser explicados pelas diferentes condutividades hidráulicas das litologias, função da heterogeneidade litológica da área, bem como pelo fato de vários poços apresentarem seções filtrantes em duas unidades.

Tabela 10. Resultados dos monitoramentos de nível d'água e de cálculo da carga hidráulica.

Poço	Cota (m)	Data do monitoramento			
		05/08/2009		01/12/2009	
		Nível d'água (m)	Carga hidráulica (m)	Nível d'água (m)	Carga hidráulica (m)
PM-02	2,339	0,96	1,38	0,99	1,35
PM-03	2,393	1,15	1,24	1,17	1,22
PM-04	1,904	1,34	0,56	1,58	0,32
PM-15	2,835	1,17	1,67	1,00	1,84
PM-19	2,614	0,77	1,85	0,43	2,19
PM-20	2,094	1,18	0,91	0,92	1,17
PM-21	2,349	1,34	1,01	1,43	0,92
PM-22	1,937	1,57	0,37	1,79	0,15
PM-23	1,989	1,21	0,77	1,33	0,65
PM-24	2,006	nm	nm	1,24	0,77
PM-25	2,037	1,20	0,84	1,18	0,86
PM-26	2,249	1,00	1,25	1,00	1,25
PM-27	2,226	1,30	0,93	1,31	0,92
PM-28	2,343	1,25	1,09	1,23	1,11
PM-29	2,31	1,02	1,30	0,98	1,34
PM-30	1,99	1,35	0,65	1,65	0,35
PM-31	2,13	0,84	1,29	0,75	1,38
PM-34	2,18	0,66	1,52	0,81	1,37
PM-35	1,91	1,42	0,49	1,73	0,18
PM-38	2,60	0,87	1,73	0,95	1,65
PM-40	2,11	1,04	1,07	1,34	0,77
PZ-01A	2,05	1,07	0,98	1,18	0,87
PZ-02A	2,24	0,93	1,31	1,11	1,13
PZ-03A	2,11	1,07	1,04	1,14	0,97
PZ-04A	2,06	nm	nm	1,96	0,10
PZ-05A	2,18	0,82	1,36	0,80	1,38
PZ-06A	2,55	1,20	1,35	0,84	1,71
PZ-07A	2,02	1,13	0,89	1,34	0,68

nm = não monitorado

LEGENDA

PM-02
00 Poço de monitoramento
Carga hidráulica (m)
* dado não utilizado

PZ-01 Poço multivivél

PEV-01 Poço de extração de vapores

PAS-02 Poço de injeção de ar

Tubulação de benzeno

Área impermeabilizada

Linhas equipotenciais (m)

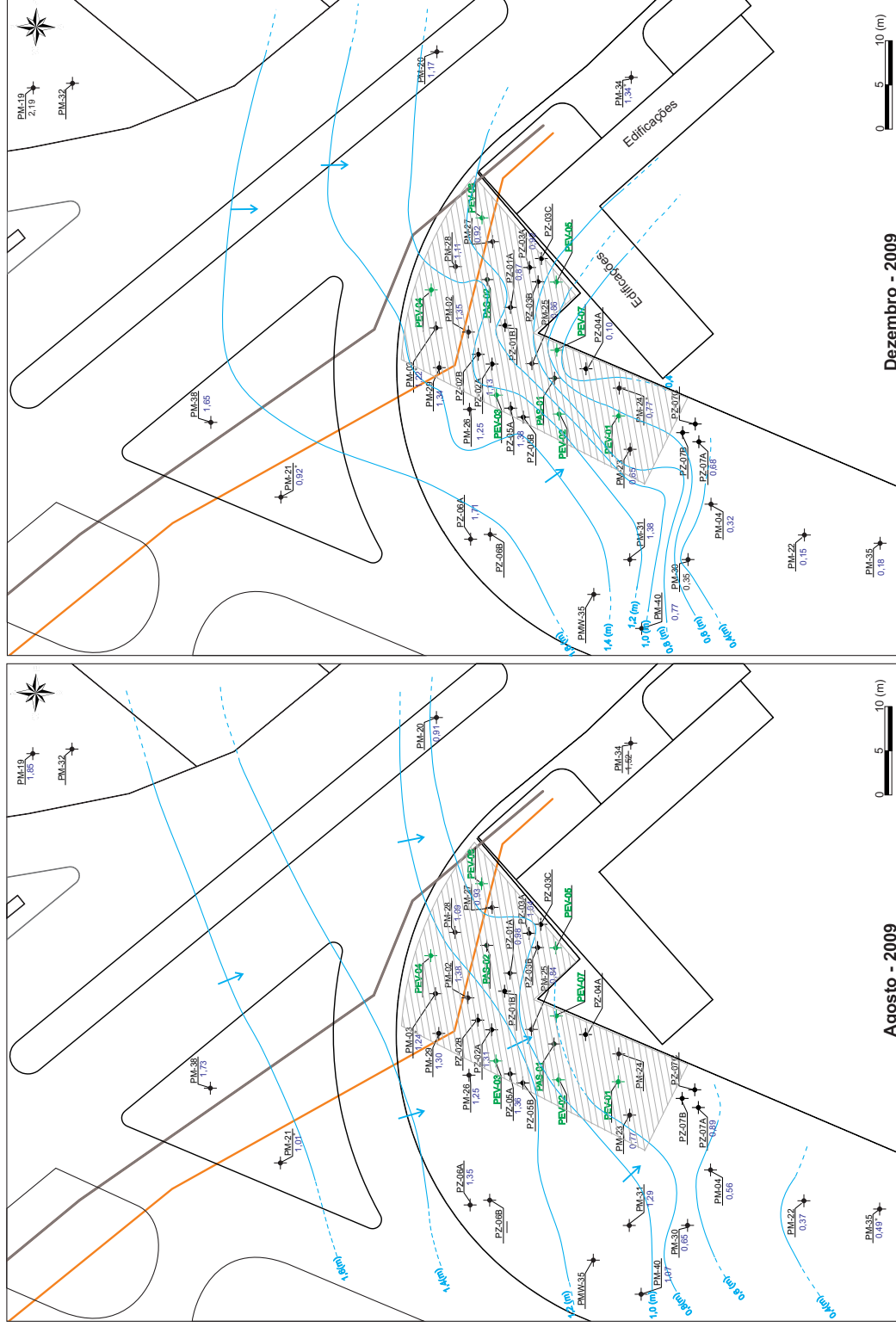


Figura 26.

Mapas Potenciométricos (agosto/2009 e dezembro/2009)

A **Figura 27** e a **Tabela 11** apresentam os resultados da variação pluviométrica mensal entre os anos de 2007 e 2010, com base nos registros obtidos nos bancos de dados oficiais do órgão fiscalizador dos recursos hídricos do Estado de São Paulo (DAEE/SP – Departamento de Águas e Energia Elétrica), referente à estação pluviométrica Humaitá/E3-228 (São Vicente-SP). Salienta-se que não ocorrem registros pluviométricos para março de 2009 e dezembro de 2010.

Pode-se verificar que as maiores precipitações ocorrem nos meses de janeiro, e as menores entre junho e agosto.

Também, na **Figura 27** está representada a variação média mensal do nível d'água nos poços de monitoramento da área de estudo durante a operação do sistema de remediação e pós-remediação (maio/2010). Verifica-se que o nível d'água estava mais profundo no mês de maio/2009 devido à diminuição da recarga do aquífero, evidenciada pela diminuição na precipitação mensal, e em fevereiro e outubro de 2009 apresenta nível mais raso.

A **Tabela 12** apresenta os valores de medições do nível d'água no período de investigação, remediação e pós remediação na área de estudo.

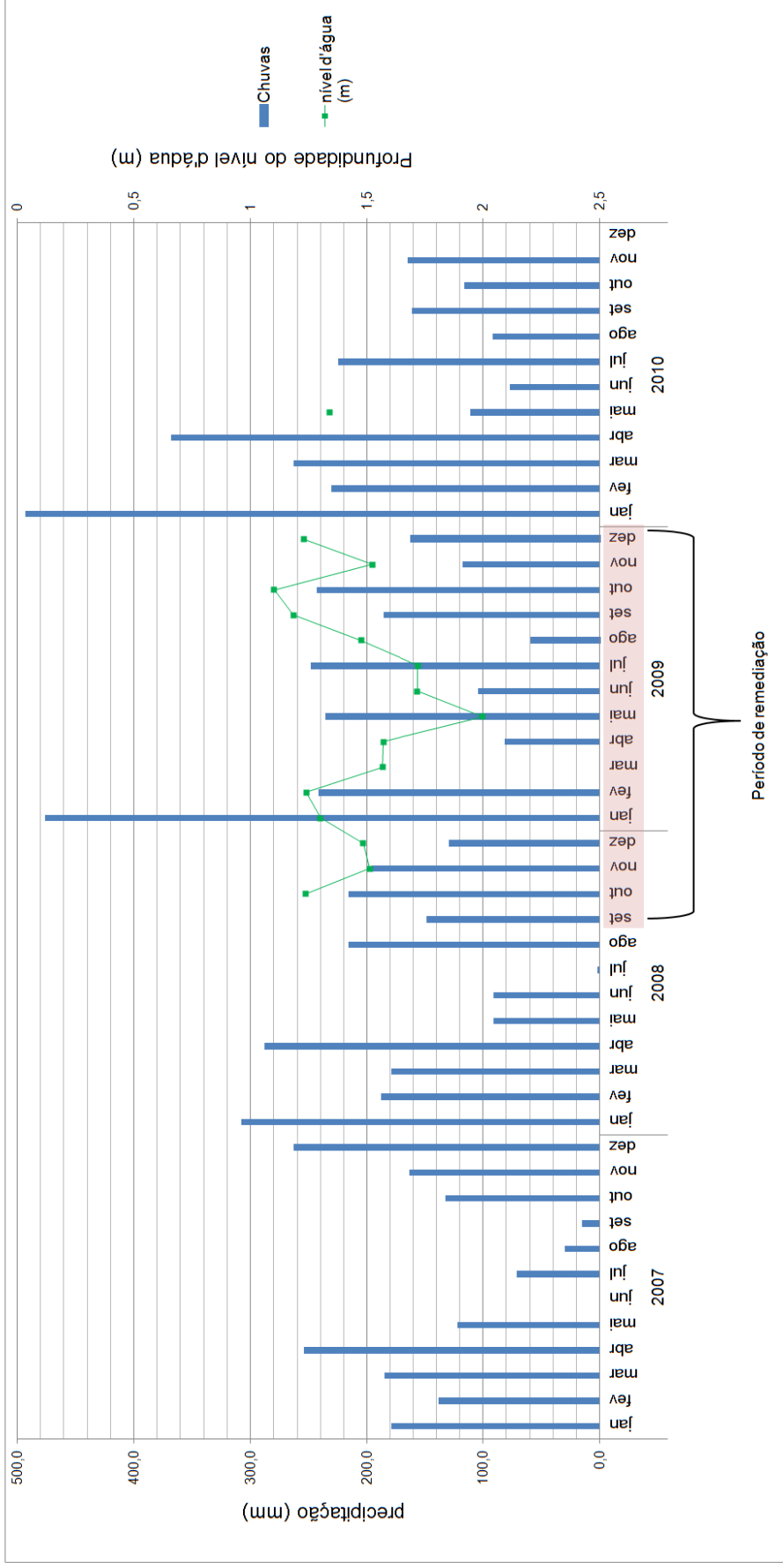


Figura 27. Gráfico de precipitação mensal versus variação média do nível d'água nos poços de monitoramento.

Tabela 11. Precipitação total mensal (mm) na região de Cubatão-SP.

Ano	Mês	Precipitação (mm)	Total anual (mm)	Ano	Mês	Precipitação (mm)	Total anual (mm)
2007	Janeiro	179,0	1552,00	2009	Janeiro	476,0	2155,50
	Fevereiro	138,0			Fevereiro	242,0	
	Março	185,0			Março	---	
	Abril	254,0			Abril	81,3	
	Maio	122,0			Maio	236,0	
	Junho	55,1			Junho	104,2	
	Julho	71,0			Julho	248,0	
	Agosto	30,0			Agosto	59,6	
	Setembro	15,0			Setembro	185,5	
	Outubro	132,0			Outubro	243,2	
	Novembro	163,0			Novembro	117,7	
	Dezembro	263,0			Dezembro	162,0	
2008	Janeiro	308,0	2052,00	2010	Janeiro	492,80	2300,20
	Fevereiro	188,0			Fevereiro	230,40	
	Março	179,0			Março	263,00	
	Abril	288,0			Abril	367,90	
	Maio	91,0			Maio	110,90	
	Junho	91,0			Junho	76,90	
	Julho	2,0			Julho	224,80	
	Agosto	216,0			Agosto	92,10	
	Setembro	148,0			Setembro	161,10	
	Outubro	216,0			Outubro	116,10	
	Novembro	196,0			Novembro	164,20	
	Dezembro	129,0			Dezembro	---	

--- sem informação

Tabela 12. Medição de nível d'água (m) nos poços de monitoramento.

Poços	Período de investigação		Remediação SVE						Remediação AS/SVE												Monitoramento pós remediação	
	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Mai					
	13/9/2006	31/10/08	28/11/08	30/12/08	30/1/09	27/2/09	31/3/09	30/4/09	27/5/09	29/6/09	22/7/09	20/8/09	24/9/09	30/10/09	27/11/09	18/12/09	28/5/10					
PM-02	1,59	1,00	1,26	1,14	0,99	0,92	1,24	1,20	1,55	1,30	1,21	1,10	0,90	0,72	1,15	0,90	1,27					
PM-03	1,59	1,08	1,26	1,25	1,14	1,07	1,32	1,30	1,54	1,32	1,29	1,22	1,09	0,94	1,25	1,06	1,34					
PM-04	1,67	1,40	1,63	1,67	1,42	1,32	1,80	1,76	1,20	2,08	1,89	1,55	1,32	0,96	1,75	1,25	1,53					
PM-15	2,30	1,10	1,12	1,10	0,97	0,85	1,47	1,29	2,18	1,39	1,40	1,46	1,05	0,70	1,26	1,13	1,57					
PM-19	1,83	0,70	1,17	0,84	0,46	0,44	1,02	1,00	2,08	0,90	0,55	0,84	0,46	0,43	0,54	0,42	0,55					
PM-20	1,96	1,15	1,43	1,51	1,15	1,16	1,50	1,48	1,80	1,70	1,44	1,31	1,13	0,85	1,42	1,10	1,47					
PM-21	1,90	1,16	1,44	1,48	1,31	1,32	1,59	1,57	2,05	1,71	1,55	1,54	1,26	0,92	1,55	1,22	1,53					
PM-22	1,75	1,43	1,85	1,88	1,56	1,60	1,90	1,90	nm	2,28	2,08	1,81	1,49	1,00	1,95	1,40	1,67					
PM-23	2,53	1,12	1,53	1,64	1,33	1,32	1,78	1,75	2,23	2,02	1,85	1,80	1,09	1,06	1,75	1,17	1,53					
PM-24	2,37	1,38	1,67	1,70	1,32	1,20	1,77	1,70	2,25	2,10	1,84	1,66	1,30	1,24	1,75	1,33	1,61					
PM-25	2,37	1,07	1,40	1,46	1,11	1,00	1,53	1,56	2,00	1,78	1,60	1,46	0,95	0,86	1,48	1,03	1,42					
PM-26	2,11	0,99	1,20	1,18	0,95	0,82	1,34	1,30	1,66	1,48	1,33	1,20	0,83	0,63	1,20	0,91	1,25					
PM-27	1,79	1,16	1,40	1,42	1,29	1,13	1,48	1,50	1,70	1,55	1,45	1,38	1,27	1,09	1,43	1,22	1,37					
PM-28	1,95	1,12	1,31	1,35	1,19	0,99	1,37	1,31	1,56	2,28	1,38	1,25	1,19	1,09	1,32	1,15	1,38					
PM-29	1,76	0,90	1,15	1,16	1,00	0,87	1,30	1,24	1,53	2,02	1,22	1,15	0,91	0,61	1,17	1,00	1,24					
PM-30	1,67	1,61	1,69	1,72	1,44	1,48	1,84	1,81	2,28	2,10	1,90	1,64	1,33	0,92	1,81	1,28	1,70					
PM-31	2,41	0,80	1,22	1,08	0,59	0,50	1,54	1,30	1,99	1,78	1,54	1,25	0,39	0,33	1,45	0,80	1,20					
PM-34	1,19	0,73	0,88	0,87	1,10	0,70	1,01	0,95	1,29	1,55	0,93	0,76	0,68	0,44	0,88	0,89	0,90					
PM-35	1,38	1,41	1,75	nm	1,12	1,57	1,90	1,96	2,35	1,90	1,99	1,70	1,40	0,90	1,86	0,90	1,77					
PM-38	2,43	0,78	0,98	0,99	0,74	0,60	1,11	1,16	1,42	1,38	1,08	0,77	0,80	0,32	1,04	1,00	1,05					
PM-40	1,28	1,05	1,32	1,44	1,32	1,43	1,46	1,49	1,92	2,22	1,60	1,31	1,03	0,70	1,46	0,95	1,22					
PZ-01A	2,05	1,02	1,26	1,26	1,12	0,99	1,25	1,44	1,84	1,86	1,42	1,24	1,05	1,80	1,35	1,00	nm					
PZ-01B	1,99	0,91	0,84	0,88	0,85	0,78	0,78	1,00	1,93	1,20	2,09	0,82	0,82	1,51	1,79	0,78	nm					
PZ-02A	1,93	0,73	1,14	1,17	0,84	0,98	1,26	1,26	1,58	1,16	1,23	1,22	0,94	0,92	1,19	0,89	1,34					
PZ-02B	1,72	2,12	2,07	2,31	1,44	2,10	2,02	1,24	3,54	2,22	3,52	1,00	2,71	1,13	1,32	0,90	1,40					
PZ-03A	2,00	1,02	1,26	1,30	1,11	1,03	1,33	1,39	1,76	1,27	1,41	1,24	1,04	0,85	2,00	1,00	1,36					
PZ-03B	1,91	1,58	1,81	1,95	3,54	1,80	1,94	2,96	2,24	1,81	2,02	3,77	1,17	1,52	1,96	1,61	1,81					
PZ-03C	2,45	1,70	2,51	2,57	1,81	2,61	2,47	2,94	3,45	1,60	3,72	2,04	1,90	3,32	2,04	3,50	nm					
PZ-04A	2,48	1,53	1,88	2,02	1,73	1,84	2,04	1,97	2,54	1,13	2,08	0,79	1,76	1,56	1,13	1,65	1,64					
PZ-05A	2,02	0,80	1,10	1,11	0,86	0,71	1,28	1,14	1,65	1,48	1,27	1,12	0,70	0,67	0,88	0,74	1,00					
PZ-05B	1,77	0,69	1,81	0,85	0,80	0,73	0,76	0,82	0,96	1,14	0,95	nm	0,83	0,50	0,88	0,71	0,79					
PZ-06A	1,36	0,81	1,05	0,88	0,72	0,75	1,02	0,83	1,39	1,12	0,84	0,90	0,68	0,50	0,88	0,70	nm					
PZ-06B	1,40	0,98	1,15	0,77	0,75	0,71	1,67	1,61	0,76	0,72	1,57	0,76	0,70	0,98	0,72	0,61	0,80					
PZ-07A	1,26	1,13	1,42	1,50	1,11	1,12	1,58	1,60	1,99	1,82	1,63	1,45	1,11	0,92	1,53	1,03	1,45					
PZ-07B	2,11	2,31	3,82	2,73	2,52	2,51	2,59	2,63	2,88	2,72	2,68	2,51	2,88	2,25	2,70	2,31	nm					
PZ-07C	2,93	4,00	2,62	3,75	4,10	3,66	3,12	3,18	4,85	3,20	4,40	4,57	2,47	4,49	4,96	4,74	nm					
Média / Mês	1,92	1,24	1,51	1,48	1,30	1,24	1,57	1,57	2,00	1,72	1,72	1,47	1,18	1,10	1,52	1,23	1,34					

nm - não monitorado

8. IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS DE REMEDIAÇÃO SVE/AS

A implantação do sistema de remediação com as técnicas SVE e AS de forma integrada, teve como objetivo a remoção de benzeno em fase dissolvida, com início em abril de 2008, que contemplou:

- instalação de 07 poços de extração (PEV-01 a PEV-07);
- instalação de 02 poços de injeção de ar (PAS-01 e PAS-02);
- interligação dos poços (PEV e PAS) por meio de tubulações subterrâneas; e
- impermeabilização da área de atuação do sistema de remediação.

Após a construção dos poços, procedeu-se a instalação das tubulações subterrâneas para interligação dos poços de extração e de injeção ao sistema SVE/AS, as quais foram construídas com tubos e conexões de PVC marrom classe 10.

Os equipamentos e painel elétrico do sistema SVE/AS foram acondicionados em um *container* metálico.

Após a instalação foi realizado o comissionamento do sistema, para averiguação das condições de todos os equipamentos e instrumentos. Todos os ajustes foram efetuados neste teste, validando o funcionamento no início da operação. Ainda, foram realizadas campanhas de manutenção preventiva com periodicidade quinzenal e verificação por meio do CLP - Controlador Lógico Programável, com periodicidade semanal durante a operação do sistema.

8.1. Instalação dos poços de extração e injeção

As sondagens realizadas para a instalação dos poços de injeção e extração foram executadas com equipamento tipo trado manual, que é constituído por um trado tipo concha metálica dupla, acionada por hastes rosqueáveis e cruzetas.

Os poços foram construídos com tubo geomecânico do tipo nervurado, sendo que o filtro possui ranhuras transversais de 0,50 mm de espessura para a passagem de ar (injeção ou extração).

O espaço anelar entre o furo da sondagem e a parede externa do tubo de revestimento/filtro foi preenchido com pré-filtro, constituído por grãos de areia de granulometria variando de 1,0 a 2,0 mm.

Acima do pré-filtro, foi inserida bentonita e, acima desta, calda de cimento contemplando o espaço anelar até a superfície.

Os poços de extração de vapores e de injeção de ar têm como acabamento superior caixas em alvenaria construídas com manilhas e tampas reforçadas para tráfego pesado. O objetivo principal desta é abrigar e proteger o poço, bem como as conexões e mangueiras utilizadas na montagem da cabeça do poço que são interligadas ao sistema SVE/AS.

A **Tabela 13** apresenta as características construtivas dos poços e a **Figura 28** mostra, esquematicamente, os perfis construtivos dos poços de extração e injeção.

O critério de localização dos poços de extração e injeção foi estabelecido através dos raios de influência obtidos a partir dos resultados dos ensaios-piloto descritos nos itens a seguir.

Tabela 13. Características construtivas dos poços de extração (PEV) e injeção (PAS).

	POÇO	Sondagem		Construção dos poços		
		Profundidade de perfuração (m)	Diâmetro da perfuração (polegada)	Profundidade de instalação (m)	Diâmetro de instalação (polegada)	Profundidade da seção filtrante (m)
Poços de extração	PEV-01	1,6	6	1,3	4	0,30 - 1,30
	PEV-02	1,5	6	1,3	4	0,30 - 1,30
	PEV-03	1,3	6	1,2	4	0,20 - 1,20
	PEV-04	1,3	6	1,2	4	0,20 - 1,20
	PEV-05	1,2	6	1,1	4	0,20 - 1,20
	PEV-06	1,3	6	1,2	4	0,20 - 1,20
	PEV-07	1,2	6	1,2	4	0,20 - 1,20
Poços de injeção	PAS-01	3,8	4	3,7	2	3,2- 3,7
	PAS-02	3,8	4	3,7	2	3,2- 3,7

8.2. Equipamento e instrumentos utilizados na remediação pelas técnicas SVE/AS

8.2.1. Equipamentos referentes a parte instrumental do sistema de remediação SVE/AS

Bomba de vácuo

Para a geração de vácuo nos poços de extração, pode-se utilizar tanto uma bomba de vácuo quanto um compressor radial. A diferença entre eles é que a bomba de vácuo gera maiores pressões de vácuo, trabalhando com vazões menores de ar, enquanto que o compressor radial gera pressões de vácuo menores e maiores vazões de ar.

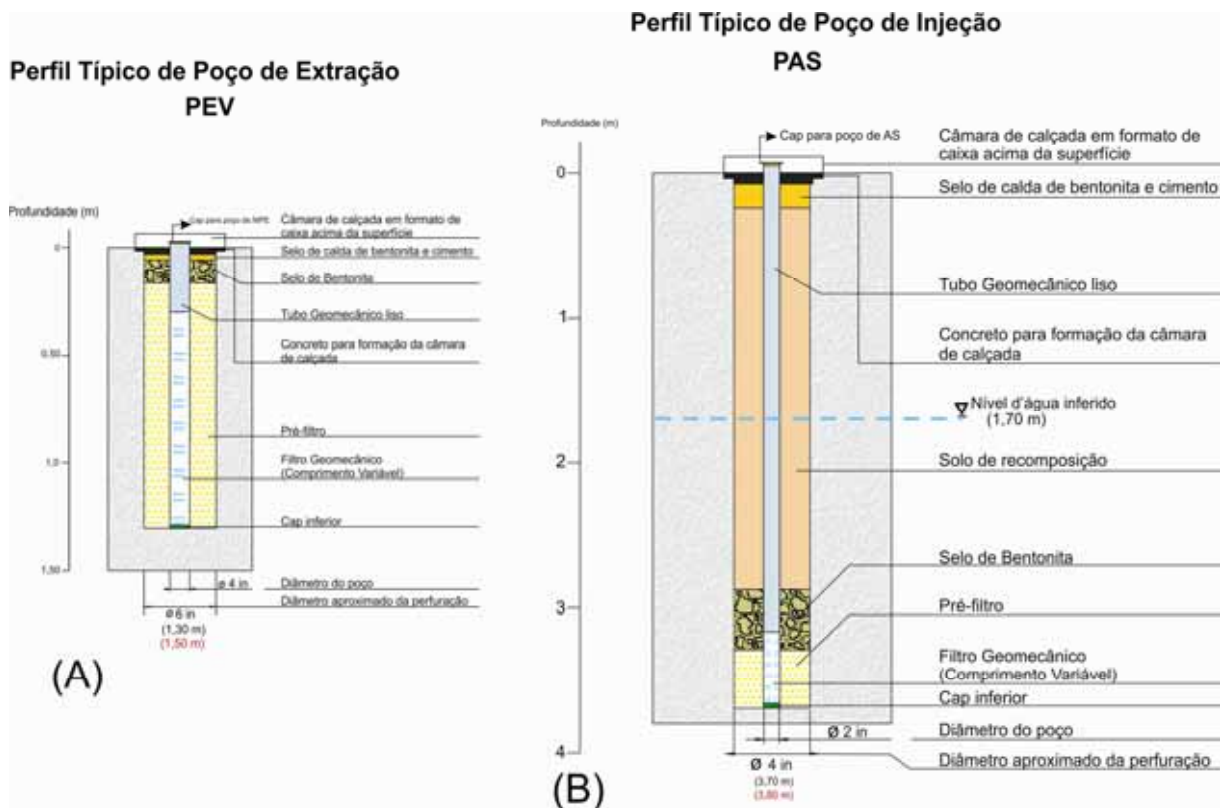


Figura 28. Perfis esquemáticos dos poços de extração (PEV) e injeção (PAS).

Para o sistema de remediação SVE implementado na área de estudo foi utilizada a bomba de vácuo SAH-155, que contém canal lateral de duplo estágio.

Compressor para injeção de ar

Consiste de um equipamento onde um motor elétrico trabalha movimentando um conjunto de pistões, que por sua vez impulsionam o ar atmosférico para o interior do cilindro. O ar injetado forçado neste cilindro, e tendo o seu volume reduzido, gera uma pressão positiva no interior do cilindro, até atingir uma pressão pré-estabelecida.

Para o sistema de remediação instalado na área de estudo, utilizou-se o compressor de palhetas a seco PICO DLT 25.

Tanque de vácuo

Consiste em um tanque normalmente constituído de algum material de alta resistência, por exemplo, aço inox ou fibra de vidro, capaz de resistir às pressões de vácuo, a serem aplicadas no sistema. Ele possui uma saída lateral conectada a uma bomba de vácuo (ou compressor radial), a qual gera uma pressão negativa no interior do mesmo. Este vácuo é então transferido para o sistema através de uma entrada superior, conectada diretamente ao poço de extração. Por esta entrada, a fase líquida (água subterrânea mais fase livre, se houver) mais os gases provenientes do meio entram no tanque. Os gases são então succionados através da saída lateral passando pelo interior do equipamento gerador de vácuo. A fase líquida é extraída por uma segunda saída do tanque, localizada na parte inferior do mesmo, pela bomba de transferência. No interior do tanque são instalados alguns sensores de nível para a água, os quais controlam os equipamentos elétricos.

Não foi obtida informação quanto ao tipo de material do tanque de vácuo instalado na área de estudo.

8.2.1.1. Filtros de carvão

Diversas técnicas podem ser utilizadas para o tratamento de vapores extraídos da zona não saturada contaminada por hidrocarbonetos de petróleo, de modo a evitar que sejam lançados na atmosfera, tais como: lavagem de gases, oxidação catalítica, e adsorção através de carvão ativado, que foi a utilizada no sistema de remediação da área de estudo.

No caso, o carvão ativado foi colocado no interior de um tambor confeccionado em aço-carbono galvanizado. Esse tambor possui tampa flangeada e volume interno de 200 L, capacidade para aproximadamente 100 kg de carvão ativado de granulometria 6 x 10.

8.2.2. Equipamentos para o monitoramento e acompanhamento da eficácia do SVE/AS

Medidores de gases

Estes equipamentos são utilizados para a medição de concentrações de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC), e frequentemente constituem-se de uma pequena bomba de vácuo que promove a sucção dos gases presentes no ambiente a ser monitorado, ocorrendo internamente uma queima desses gases. Esta queima gera uma diferença de potencial elétrico proporcional à concentração de VOC, que pode ser então expressa em partes por milhão (ppm) em volume, no caso de gases ou vapores, ou porcentagem do Limite Inferior de Explosividade ou *Lower Explosivity Limit* (%LEL).

Estes equipamentos foram utilizados para medições nos poços de monitoramento, entrada do sistema de tratamento de gases, entre as colunas de carvão ativado e na saída dessas.

Vacuômetros

Estes equipamentos são utilizados para a medição do vácuo (ou da pressão manométrica negativa) gerado para a extração de vapores e líquidos. Eles foram utilizados nas medições de vácuo no tanque de vácuo, nos poços de extração e de observação. Os equipamentos utilizados podem ser digitais ou analógicos.

8.3. Informações básicas sobre os ensaios-pilotos

8.3.1. Extração de vapores de solo – SVE

O ensaio-piloto para o sistema SVE teve como objetivo:

- avaliar a área de captação, de forma prática, levando em consideração as leituras de pressão negativa nos pontos de observação; e

- determinar os valores de vazão, pressão, bem como os demais parâmetros elétricos e mecânicos relacionados à operação do sistema.

Para a realização do ensaio-piloto para o sistema SVE, foram selecionados dois poços de extração (PEV-01 e PEV-03) e a utilização dos poços de monitoramento PM-24, PM-23, PZ-07A, PM-25, PM-03, PZ-01A, PZ-2A e PZ-05A em poços de observação, onde foram realizadas medições dos parâmetros de interesse indicados a seguir, para estimar o raio de atuação do sistema. As medições foram realizadas antes do início de operação do sistema e mais 8 medidas tomadas a cada uma hora.

Os parâmetros de interesse avaliados foram:

- VOC, com a inclusão e exclusão de metano;
- nível d'água; e
- pressão negativa nos poços de monitoramento /observação e poços de extração.

Os poços de monitoramento transformados em poços de observação foram aqueles que estão mais próximos aos poços de extração PEV-01 e PEV-03 utilizados no ensaio. As distâncias e a disposição dos pontos de medição são apresentadas nas **Tabela 14 e Tabela 15 e Figura 29 e 30.**

Além das medições desses parâmetros nos poços de extração e de observação, também foram efetuadas medidas de pressão negativa e do volume útil no tanque de vácuo, frequência das bombas de vácuo, VOC e temperatura entre os filtros de carvão ativado e na saída do tanque de vácuo.

A vazão média do sistema durante a realização do ensaio-piloto, e posteriormente aplicada ao sistema no período de remediação, foi de 260,0 m³/h, onde se obteve pressão negativa (vácuo), nos poços de extração (PE-01 ao PE-07), entre 20 e 40 mmHg.

Tabela 14. Poços de monitoramento utilizados como poços de observação próximos ao PEV-01.

Poço	Distância do PEV-01 (m)	Ângulo de disposição
PM-24	2,64	50°
PM-23	4,4	215°
PZ-07 A	7,6	270°

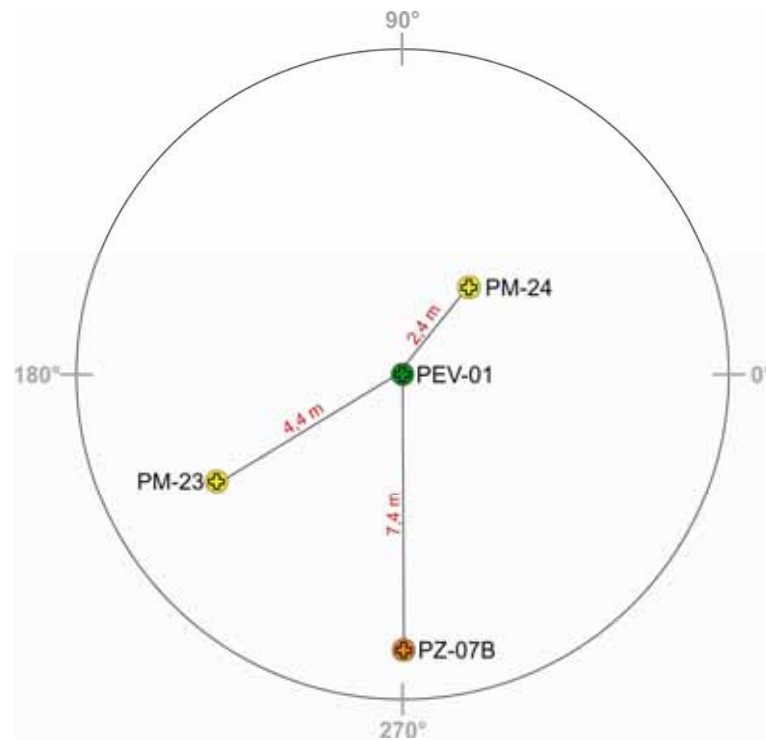
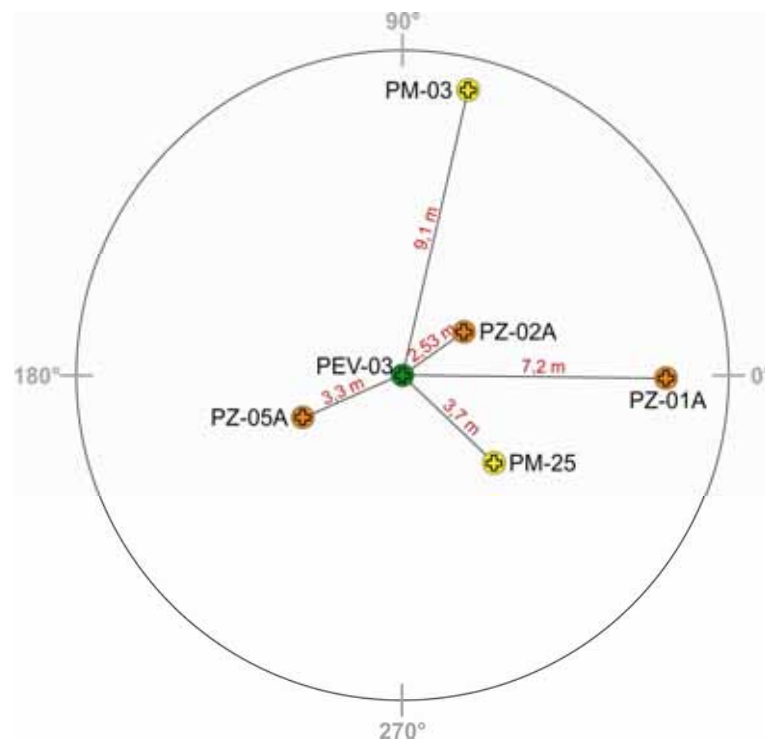


Figura 29. Disposição dos poços de monitoramento utilizados como poços de observação próximos ao PEV-01.

Tabela 15. Poços de monitoramento utilizados como poços de observação próximos ao PEV-03.

Poço	Distância do PEV-03 (m)	Ângulo de disposição
PM-25	3,7	320°
PM-03	9,1	80°
PZ-01 A	7,2	0°
PZ-02 A	2,53	30°
PZ-05 A	3,3	190°

**Figura 30.** Disposição dos poços de monitoramento utilizados como poços de observação próximos ao PEV-03.

Através dos resultados desse ensaio-piloto (**Tabela 16** e **Tabela 17**), foi inferido o raio de influência da extração de vapores de aproximadamente 6,0 m.

Tabela 16. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de extração PEV-01.

Parâmetros	Estático	Horário da medição							
		08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Pressão negativa no Tanque de Vácuo (mmHg)	-300	-280	-250	-250	-250	-240	-250	-240	-240
Frequência da Bomba de Vácuo(Hz)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Poço de observação PM-24 (2,64 m do PEV-01)									
Nível d'água (m)	2,44	2,44	2,54	2,54	2,53	2,53	2,54	2,55	2,54
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	80	0	0	0	0	0	0	0
Pressão (mmca)	0	-7,8	-6,8	-6,6	-8,9	-8,9	-9,1	-8,9	-8,9
Poço de observação PM-23 (4,4 m do PEV-01)									
Nível d'água (m)	2,5	2,5	2,58	2,57	2,58	2,57	2,57	2,58	2,57
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	80	20	10	0	0	0	0	0
Pressão (mmca)	0	-4,2	-4	-3,1	-3,3	-4	-4	-3,8	-3,8
Poço de observação PZ-07 A (7,6 m do PEV-01)									
Nível d'água (m)	2,27	2,36	2,36	2,35	2,36	2,35	2,35	2,35	2,36
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	1026	820	0	0	0	0	0	0
Pressão (mmca)	0	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3

Tabela 17. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de extração PEV-03.

Parâmetros	Estático	Horário da medição							
		08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Pressão negativa no Tanque de Vácuo (mmHg)	-250	-250	-250	-250	-250	-240	-250	-240	-240
Frequência da Bomba de Vácuo(Hz)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Poço de observação PM-25 (3,7 m do PEV-03)									
Nível d'água (m)	1,81	1,84	1,84	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86
VOC (ppm)	inclusão de CH4	620	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
Pressão (mmca)	0	-13,7	-4,05	-3,77	-2,67	-2,85	-5,8	-5,8	-5,8
Poço de observação PM-03 (9,1 m do PEV-03)									
Nível d'água (m)	1,3	1,4	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
Pressão (mmca)	0	0	-0,1	-0,1	-2,16	-2,17	-0,14	0,15	-0,15
Poço de observação PZ-02 A (2,53 m do PEV-03)									
Nível d'água (m)	1,47	1,47	1,47	1,47	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48
VOC (ppm)	inclusão de CH4	7280	3240	2940	1020	1020	1100	1000	1000
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
Pressão (mmca)	0	0	-0,11	0	0	-1,84	0	0	0
Poço de observação PZ-05 A (3,3 m do PEV-03)									
Nível d'água (m)	1,44	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
VOC (ppm)	inclusão de CH4	140	100	100	20	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
Pressão (mmca)	0	0	-0,12	0	0	0	-0,11	-0,11	-0,11
Poço de observação PZ-01 A (7,2 m do PEV-03)									
Nível d'água (m)	1,55	1,55	1,55	1,55	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
Pressão (mmca)	0	0	-2,7	-2,31	-2,31	-2,37	-3,15	-3,2	-3,2

8.3.2. Injeção de ar

O ensaio-piloto para a Injeção de Ar (AS) teve como objetivo avaliar o desenvolvimento desta técnica aplicada em conjunto com a extração de vapores.

Para a realização deste ensaio-piloto, foram selecionados dois poços de injeção PAS-02 e a utilização dos poços de monitoramento PM-02, PM-03, PM-28, PM-27, PZ-01A, PZ-02A e PZ-03A como poços de observação, visando ao monitoramento, principalmente, dos parâmetros VOCs, pressão e nível d'água.

As atividades executadas durante esse ensaio-piloto, no sistema de injeção de ar, foram realizadas em 5 dias, a contar a partir da injeção, e conduzida conforme detalhado no cronograma da **Tabela 18**:

- desativação, por 48 horas, do sistema de extração de vapores;
- ativação do sistema de injeção de ar no poço PAS-02 com pressão igual a 4,5 psi, durante 8 horas, e monitoramento dos parâmetros de interesse nos poços de observação;
- injeção de ar no poço PAS-02 com pressão de 6,0 psi durante 09 horas e monitoramento dos parâmetros de interesse nos poços de observação;
- injeção de ar no poço PAS-02 com 8,0 psi, durante 08 horas, e monitoramento dos parâmetros de interesse nos poços de observação;
- ativação do sistema de extração de vapores através dos poços de extração (PEV-03, PEV-04, PEV-05, PEV-06 e PEV-07) que atuam na área do PAS-02, por 09 horas, sendo também monitorados os poços PM-02, PM-03, PM-27, PM-28, PZ-01A, PZ-02A e PZ-03A; e
- ativação do sistema conjugado AS/SVE, por 09 horas, onde o teste foi composto por 07 poços de extração (PEV-01 ao PEV-07) e dois poços de injeção de ar (PAS-01 e PAS-02), acrescentando-se o monitoramento dos poços PM-02, PM-03, PM-23, PM-24, PM-25, PM-27, PM-28, PZ-01A, PZ-02A, PZ-03A e PZ-04A.

Tabela 18. Cronograma de execução do ensaio-piloto do AS.

Atividades executadas	1º Dia	2º Dia	3º Dia	4º Dia	5º Dia	6º Dia	7º Dia
Desativação do sistema SVE	48 horas						
Injeção de ar no poço PAS-02 (4,5 psi)			9 horas				
Injeção de ar no poço PAS-02 (6,0 psi)				9 horas			
Injeção de ar no poço PAS-02 (8,0 psi)					9 horas		
Ativação do SVE e injeção no poço PAS-02						9 horas	
Ativação do SVE e injeção nos poços PAS-01 e PAS-02							9 horas

As **Tabela 19** a **21** apresentam os resultados do ensaio para as medições, a cada hora, dos parâmetros de interesse nos poços de monitoramento/observação selecionados durante a atuação apenas do AS. Enquanto que as **Tabela 22** e **Tabela 23** mostram esses resultados, mas com a ativação do SVE em conjunto com a injeção de ar.

Verifica-se, então, que quando apenas se injetava ar através do poço PAS-02, a maioria dos poços de monitoramento apresentou pressão positiva, porém, na última fase do teste, onde se ativaram a injeção de ar e a extração de vapores conjuntamente, os poços passaram a apresentar pressão negativa e ainda houve uma elevação das concentrações de VOC na entrada do sistema demonstrando que as pressões de extração foram superiores às de injeção, evitando a emissão de vapores de contaminante para a atmosfera.

De acordo com os dados obtidos durante a realização do ensaio-piloto, o raio de atuação dos poços de injeção de ar foi estimado em 5,0 m.

Durante a realização do ensaio, também foram realizadas medições de VOC nas bocas de lobos (bueiros) presentes nas adjacências da área, onde não foi detectada qualquer concentração de VOC, o que indica não haver emissão fugitiva, considerando-se as pressões de injeção e extração utilizadas.

Tabela 19. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de injeção PAS-02 (pressão de injeção 4,5 psi e frequência 30Hz).

Data do ensaio: 19/01/2009		Horário da medição							
Parâmetros		08:00 (Estático)	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Poço de observação PM-27 (5,20 m do PAS-02)									
Nível d'água (m)		1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
VOC (ppm)	inclusão de CH4	40	40	>10000	>10000	>10000	>10000	5980	6780
	exclusão de CH4	0	0	0	80	60	0	0	20
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	0,51	0,53	0,15	0,09	0,59	0,3	0,33
Poço de observação PZ-03A (6,00 m do PAS-02)									
Nível d'água (m)		1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58
VOC (ppm)	inclusão de CH4	1620	840	800	>10000	>10000	>10000	>10000	>10000
	exclusão de CH4	0	0	20	80	40	180	0	40
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	0	0	0,66	0,32	0,46	0,50	0,51
Poço de observação PZ-01A (5,0 m do poço PAS-02)									
Nível d'água (m)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,52	1,5	1,5
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	1640	>10000	>10000	>10000	>10000	>10000
	exclusão de CH4	0	0	0	100	80	400	40	60
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	1,11	1,64	1,33	1,76	1,57	1,8	1,71
Poço de observação PZ-02A (7,0 m do poço PAS-02)									
Nível d'água (m)		1,38	1,39	1,39	1,39	1,39	1,41	1,4	1,4
VOC (ppm)	inclusão de CH4	>10000	8640	>10000	1380	6540	1680	1360	1420
	exclusão de CH4	0	0	0	900	720	1540	1070	1080
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	0	0	0,13	0	0,09	0,03	0,08
Poço de observação PM-02 (5,70 m do poço PAS-02)									
Nível d'água (m)		1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,34	1,34
VOC (ppm)	inclusão de CH4	580	180	100	0	150	80	300	260
	exclusão de CH4	100	60	0	0	0	60	0	0
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	-	-	0	-	-	0	0
Poço de observação PM-03 (5,40 m do PAS-02)									
Nível d'água (m)		1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	1180	1460	4740	3960	4100	2320	2480
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	0,35	0,34	0	0,21	0,35	0,13	0,11
Poço de observação PM-28 (2,5 m do poço PAS-02)									
Nível d'água (m)		1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	420	1060	400	680	420	180	200
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH ₂ O)		0	15,24	16,77	7,17	9,18	15,09	8,45	8,73

Tabela 20. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de injeção PAS-02 (pressão de injeção 6,0 psi e frequência 30Hz).

Data do ensaio: 20/01/2009		Horário da medição						
Parâmetros		08:00 (Estático)	09:00	10:00	11:00	13:00	14:00	16:00
Poço de observação PM-27 (5,20 m do PAS-02)								
Nível d'água (m)		1,65	1,52	1,62	1,62	1,61	1,62	1,54
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	1800	>10000	>10000	>10000	8120	>10000
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	120
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	0,27	0,65	0,62	0,33	0,48	0,76
Poço de observação PZ-03A (6,00 m do PAS-02)								
Nível d'água (m)		1,57	1,43	1,44	1,44	1,44	1,44	1,54
VOC (ppm)	inclusão de CH4	4180	3180	2060	>10000	3340	>10000	7740
	exclusão de CH4	0	0	0	160	120	0	860
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	0	0,52	0,38	0,71	0,24	1,11
Poço de observação PZ-01A (5,0 m do poço PAS-02)								
Nível d'água (m)		1,54	1,42	1,40	1,42	1,42	1,42	1,54
VOC (ppm)	inclusão de CH4	320	60	6920	>10000	>10000	3680	6740
	exclusão de CH4	0	0	100	2500	1680	2100	2860
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	1,82	1,86	1,88	1,88	2,01	2,13
Poço de observação PZ-02A (7,0 m do poço PAS-02)								
Nível d'água (m)		1,43	1,5	1,54	1,52	1,45	1,45	1,45
VOC (ppm)	inclusão de CH4	500	1180	20	480	340	380	1100
	exclusão de CH4	620	180	280	900	560	500	620
Pressão no poço (mmH ₂ O)		0	0	0,41	0	0	0	0,02
Poço de observação PM-02 (5,70 m do poço PAS-02)								
Nível d'água (m)		1,37	1,38	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
VOC (ppm)	inclusão de CH4	260	700	20	120	200	120	440
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH ₂ O)		0	0	0,04	0,12	0,03	0,11	0
Poço de observação PM-03 (5,40 m do PAS-02)								
Nível d'água (m)		1,47	1,46	-	-	1,48	1,48	1,49
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	2360	-	-	2620	1880	2480
	exclusão de CH4	60	0	-	-	0	0	0
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	0,30	-	-	0,27	0,37	0,47
Poço de observação PM-28 (2,5 m do poço PAS-02)								
Nível d'água (m)		1,52	1,50	1,50	1,51	1,5	1,52	1,52
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	400	740	320	480	620	1640
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	60
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	20,01	17,63	20,14	19,78	17,51	21,19

Tabela 21. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de injeção PAS-02 (pressão de injeção 8,0 psi e frequência 30Hz).

Data do ensaio: 22/01/2009		Horário da medição				
Parâmetros		10:00 (Estático)	11:00	13:00	16:00	17:00
Poço de observação PM-27 (5,20 m do PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,36	1,26	1,28	1,26	1,17
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	>10000	>10000	>10000	>10000
	exclusão de CH4	0	120	0	60	0
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	1,73	1,81	1,62	1,71
Poço de observação PZ-03A (6,00 m do PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,31	0,72	1,04	1,08	0,89
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	7380	1100	1100	3740
	exclusão de CH4	40	480	820	1480	1660
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	10,32	1,25	1,78	2,15
Poço de observação PZ-01A (5,0 m do poço PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,22	0,76	1	0,84	0,78
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	8180	2760	>10000	6780
	exclusão de CH4	0	4160	3120	5460	3210
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	5,89	12,46	5,23	7,04
Poço de observação PZ-02A (7,0 m do poço PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,16	1,18	1,13	1,17	1,12
VOC (ppm)	inclusão de CH4	280	1320	1020	640	1240
	exclusão de CH4	340	740	360	180	420
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	0,88	-0,13	0	0
Poço de observação PM-02 (5,70 m do poço PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,07	1,04	1,02	0,98	0,95
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	100	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	-18,69	-0,12	0	0
Poço de observação PM-03 (5,40 m do PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,22	1,21	1,19	1,17	1,13
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	>10000	>10000	6740
	exclusão de CH4	60	0	4420	3180	3120
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	0,07	-0,02	0	0
Poço de observação PM-28 (2,5 m do poço PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,27	1,25	1,19	1,22	1,16
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	>10000	360	6740	>10000
	exclusão de CH4	0	40	0	0	120
Pressão no poço (mmH ₂ O)		-	48,51	55,46	47,74	52,28

Tabela 22. Resultados do ensaio piloto a partir do poço de injeção PAS-02 com ativação de poços de extração (PEV-03, PEV-04, PEV-05, PEV-06 e PEV-07).

Data do ensaio: 23/01/2009		Horário da medição				
Parâmetros		10:00	11:00	13:00	14:00	17:00
Nível d'água (m)		1,28	1,27	1,26	1,26	1,24
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	40
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-25,35	-10,77	-23,32	-12,75	-11,98
Poço de observação PZ-03A (6,00 m do PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,22	1,16	1,16	1,17	1,22
VOC (ppm)	inclusão de CH4	180	40	0	20	0
	exclusão de CH4	120	0	60	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-0,12	-0,03	-0,07	-0,09	-0,05
Poço de observação PZ-01A (5,0 m do poço PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,1	1,1	1,06	1,09	1,08
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-6,94	-6,7	-0,11	-5,79	-4,92
Poço de observação PZ-02A (7,0 m do poço PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,09	0,93	1,07	1,09	1,09
VOC (ppm)	inclusão de CH4	300	400	160	100	120
	exclusão de CH4	1000	80	680	300	280
Pressão no poço (mmH2O)		0,2	0,02	0,11	0,1	-0,08
Poço de observação PM-02 (5,70 m do poço PAS-02)						
Nível d'água (m)		0,96	0,93	0,96	0,96	0,94
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	400	0	0	0
	exclusão de CH4	0	80	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-0,16	0,02	-0,08	-0,09	-0,04
Poço de observação PM-03 (5,40 m do PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,13	1,13	1,12	1,13	1,1
VOC (ppm)	inclusão de CH4	1820	620	160	0	0
	exclusão de CH4	1720	0	100	60	100
Pressão no poço (mmH2O)		-0,11	-0,05	-0,08	-0,06	-0,08
Poço de observação PM-28 (2,5 m do poço PAS-02)						
Nível d'água (m)		1,23	1,24	1,22	1,25	1,22
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		83,89	82,90	80,64	80,56	81,09

Tabela 23. Resultados do ensaio piloto a partir dos poços de injeção PAS-01 e PAS-02 com ativação de todos os poços de extração.

Data do ensaio: 26/01/2009		Horário da medição						
Parâmetros		09:00 (Estático)	10:00	11:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Poço de observação PM-28								
Nível d'água (m)		1,25	1,26	1,22	1,22	1,21	1,21	1,2
VOC (ppm)	inclusão de CH4	780	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	160	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-	49,01	48,24	47,4	48,17	47,94	48,36
Poço de observação PM-27								
Nível d'água (m)		1,33	1,32	1,32	1,32	1,32	1,3	1,3
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-	-21,11	-20,17	-21,56	-20,77	-19,48	-20,02
Poço de observação PM-25								
Nível d'água (m)		1,24	1,18	1,19	1,21	1,2	1,18	1,18
VOC (ppm)	inclusão de CH4	40	0	0	0	20	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-	-7,2	-13,73	-20,5	-17,43	-20,18	-14,51
Poço de observação PZ-2A								
Nível d'água (m)		1,08	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05
VOC (ppm)	inclusão de CH4	100	540	80	160	200	80	180
	exclusão de CH4	20	60	0	180	160	20	100
Pressão no poço (mmH2O)		-	-40,65	-1,08	-0,57	-0,49	-0,58	-1,21
Poço de observação PM-02								
Nível d'água (m)		-	-	-	0,96	0,93	0,96	0,96
VOC (ppm)	inclusão de CH4	-	-	-	0	400	0	0
	exclusão de CH4	-	-	-	0	80	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-	-	-	-0,16	0,02	-0,08	-0,09
Poço de observação PM-03								
Nível d'água (m)		-	-	-	1,13	1,13	1,12	1,13
VOC (ppm)	inclusão de CH4	-	-	-	1820	620	160	0
	exclusão de CH4	-	-	-	1720	0	100	60
Pressão no poço (mmH2O)		-	-	-	-	-	-	-
Poço de observação PZ-3A								
Nível d'água (m)		1,17	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-	-0,15	-0,18	-0,14	-0,14	-0,07	-0,13
Poço de observação PZ-1A								
Nível d'água (m)		1,16	1,14	1,15	1,15	1,14	1,13	1,13
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-	-5,25	-5,72	-5,37	-5,21	-5,04	-5,23
Poço de observação PM-23								
Nível d'água (m)		1,58	1,58	1,53	1,51	1,51	1,5	1,5
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-	-35,35	-34,8	-30,23	-33,42	-31,22	-32,08
Poço de observação PM-24								
Nível d'água (m)		1,52	1,5	1,5	14,49	1,49	1,49	1,49
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	20	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-	-9,06	-11,91	-17,03	-13,78	-13,28	-10,97
Poço de observação PZ-4A								
Nível d'água (m)		1,81	1,65	1,66	1,69	1,68	1,67	1,67
VOC (ppm)	inclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
	exclusão de CH4	0	0	0	0	0	0	0
Pressão no poço (mmH2O)		-	-0,18	-0,21	-0,18	-0,09	-0,15	-0,08

9. MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DO SISTEMA SVE/AS

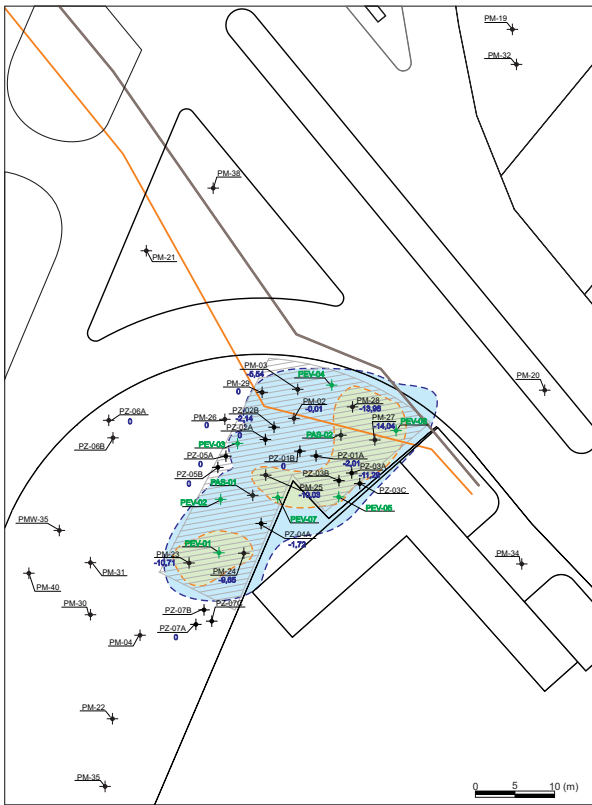
As **Figura 31** e **Figura 32** apresentam o contorno da influência do sistema através das médias mensais de pressões medidas nos poços de monitoramento em campo, onde se observa que os poços que tiveram maior influência, ou seja, pressões inferiores a -3,0 mmHg foram PM-28, PM-27, PZ-03A, PZ-01A, PM-23 e PM-24.

Desta forma, foi realizada a comparação desses resultados com as concentrações de benzeno, durante a remediação, incluindo o período de investigação, onde pode-se observar o seguinte, conforme os gráficos das **Figura 33** a **Figura 41**:

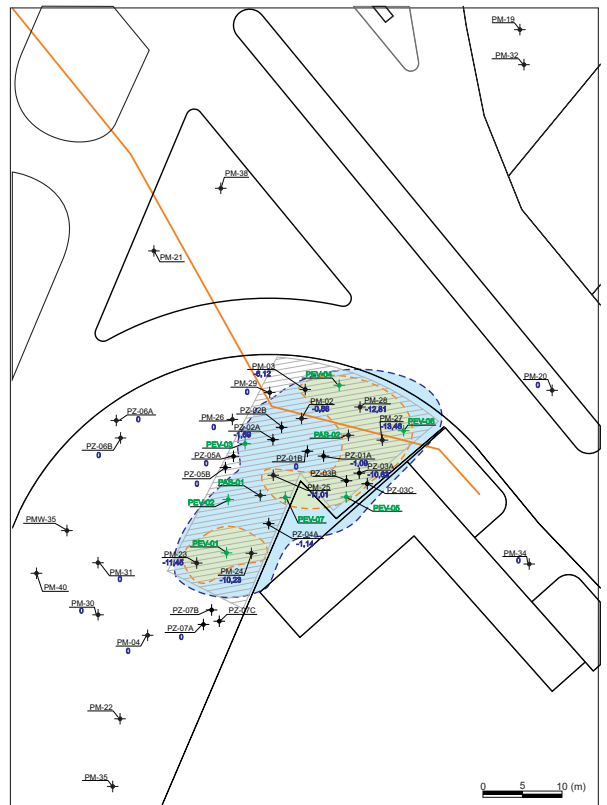
- os poços com maior influência do sistema PM-28, PM-27, PZ-03A, PZ-01A, PM-23 e PM-24 tiveram uma redução nas concentrações de benzeno;
- quanto aos poços com menor influência, como o PZ-02A, onde se observaram as maiores concentrações de benzeno, os valores tenderam a aumentar; e

- poços que estavam fora da abrangência de atuação do sistema e da área impermeabilizada, referente aos poços PM-26 e PZ-07A, não foi possível realizar qualquer relação com a atuação do sistema, quanto aos dados de pressão.

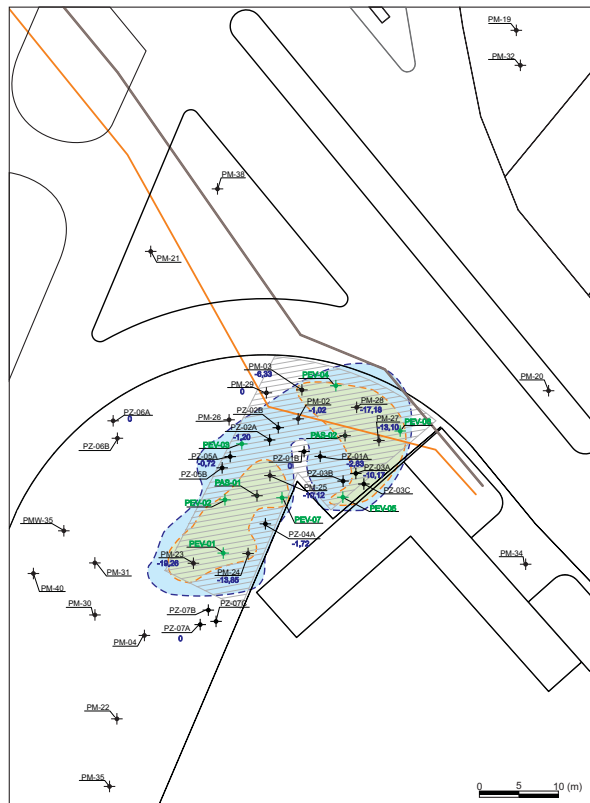
Outro aspecto importante refere-se às concentrações de benzeno na entrada do tanque de vácuo, cujas somas das medições diárias por mês estão apresentadas na **Tabela 24**, onde se obtiveram valores apenas no período de operação da técnica de SVE, e nos primeiros 4 meses de operação integrada das técnicas de AS/SVE. Verificou-se também, que a concentração máxima foi obtida no mês de janeiro/2009, quando se iniciou a operação do sistema AS.



Outubro de 2008
(Início da remediação -SVE)



Janeiro de 2009
(remediação AS/SVE)



Abril de 2009
(remediação AS/SVE)

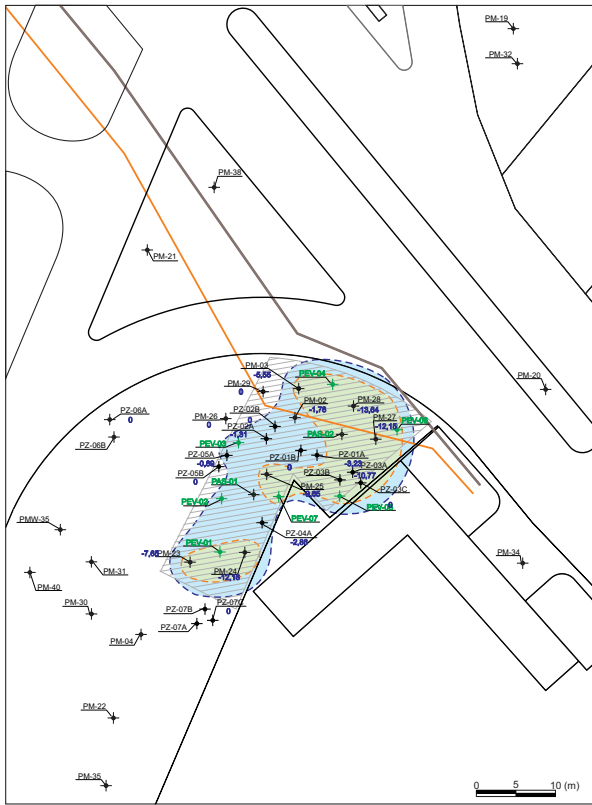
LEGENDA

- PM-02 Poço de monitoramento
- PZ-01 Poço multinível
- PEV-01 Poço de extração de vapores
- PAS-02 Poço de injeção de ar

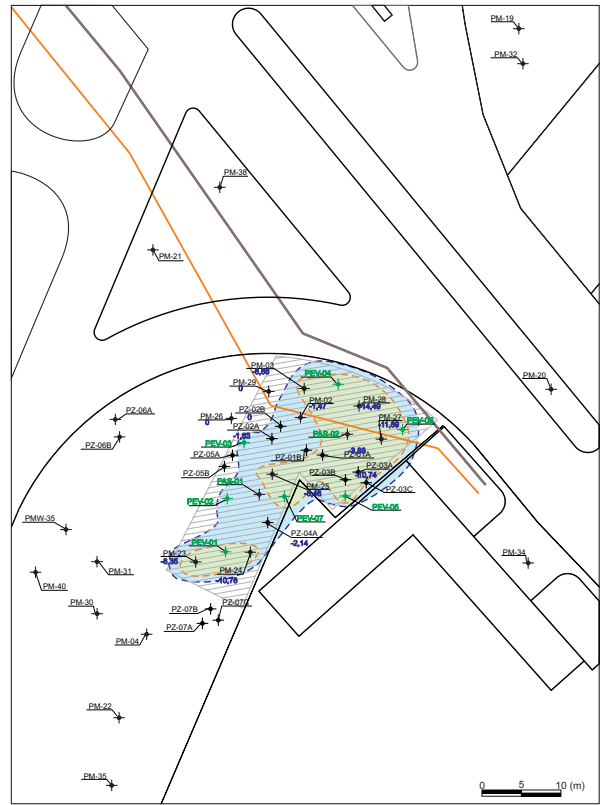
- Tubulação de benzeno
- Pressão nos poços (mmHg)
 - 0,001 a -3,0
 - < -3,0

Área impermeabilizada

Figura 31. Pressão de vácuo nos poços de monitoramento (outubro/2008, janeiro/2009 e abril/2009)



Agosto de 2009
(remediação AS/SVE)



Dezembro de 2009
(fim da remediação AS/SVE)

LEGENDA

- PM-02 Poço de monitoramento
- PZ-01 Poço multinível
- PEV-01 Poço de extração de vapores
- PAS-02 Poço de injeção de ar

- Tubulação de benzeno
- Pressão nos poços (mmHg)
- 0,001 a -3,0
- < -3,0

- Impermeabilização

Figura 32. Pressão de vácuo nos poços de monitoramento (agosto/2009 e dezembro/2009)

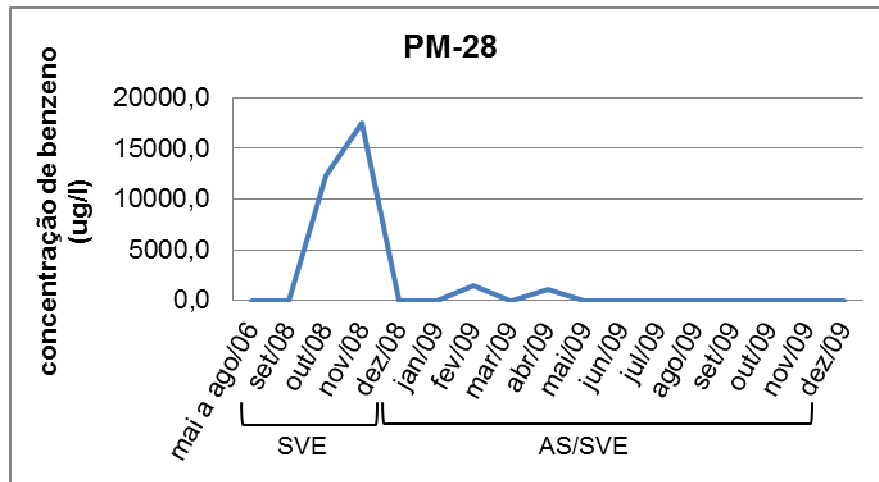


Figura 33. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-28.

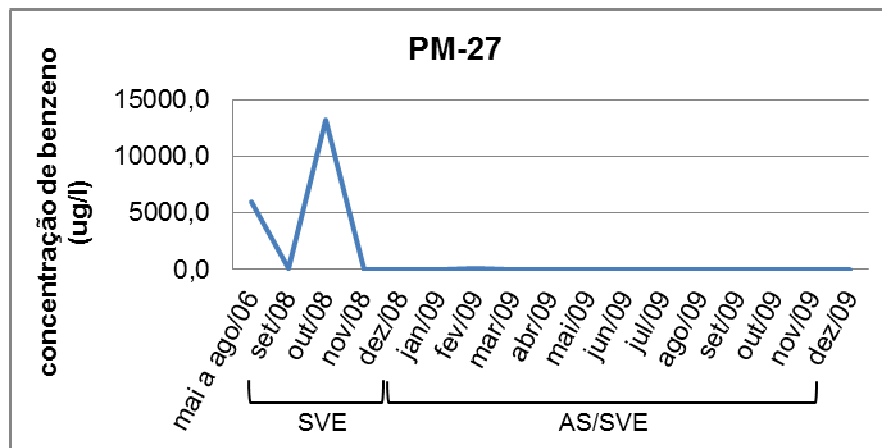


Figura 34. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-27.

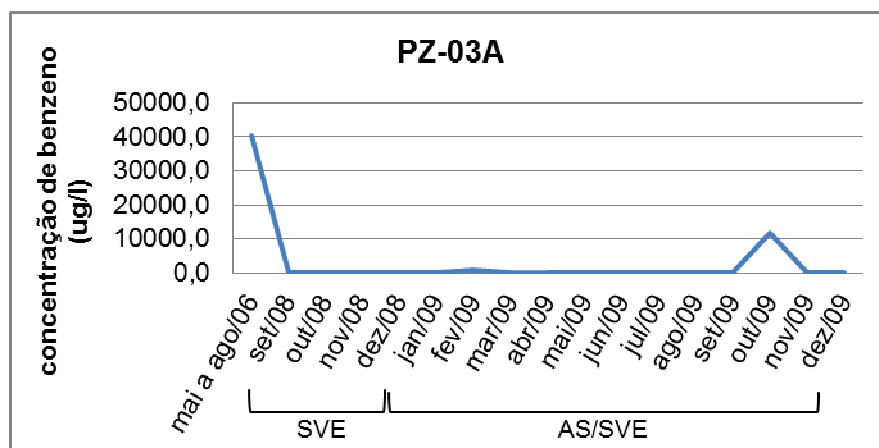


Figura 35. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-03A.

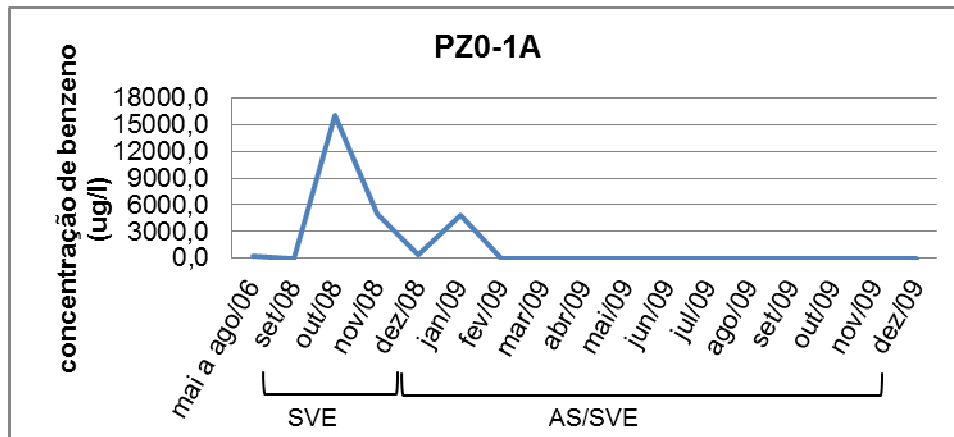


Figura 36. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PZ-01A.

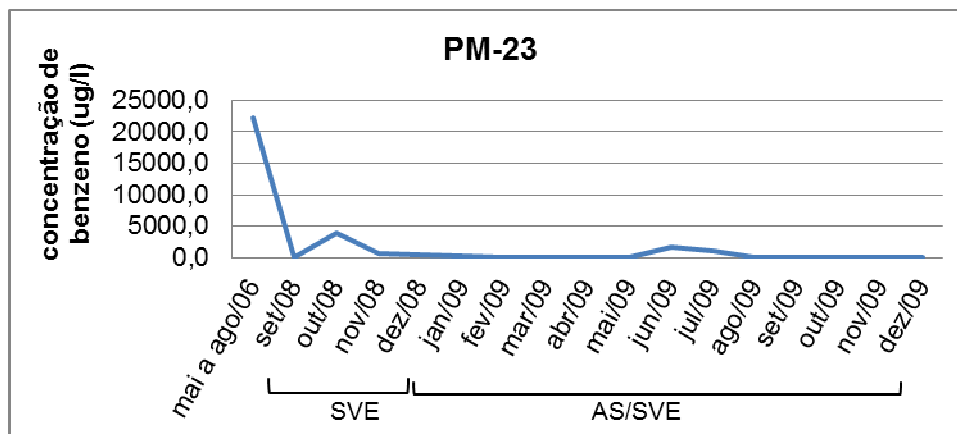


Figura 37. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-23.

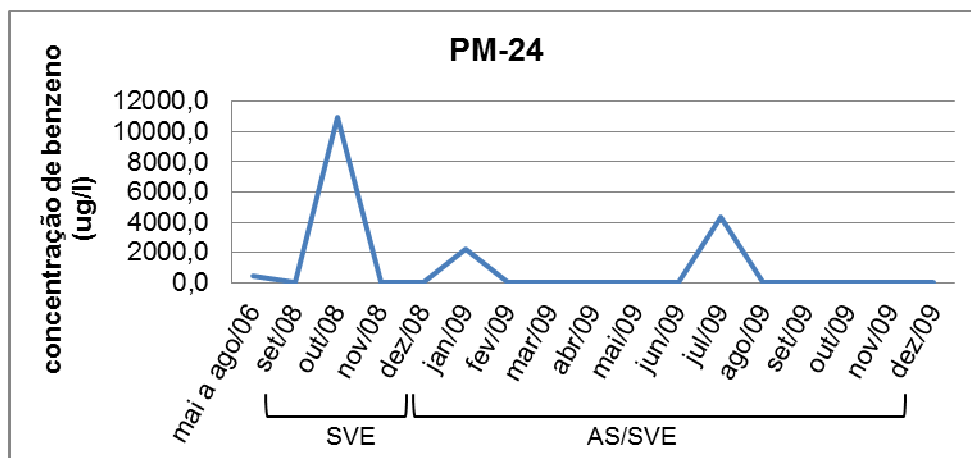


Figura 38. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-24.

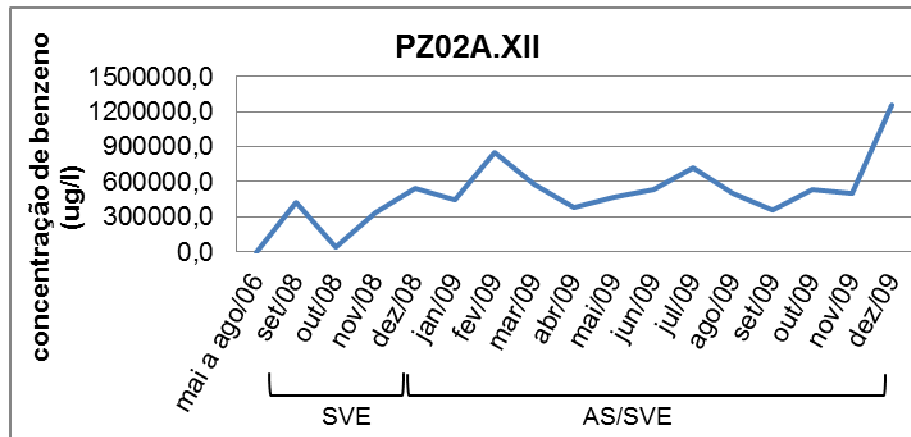


Figura 39. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PZ-02A.

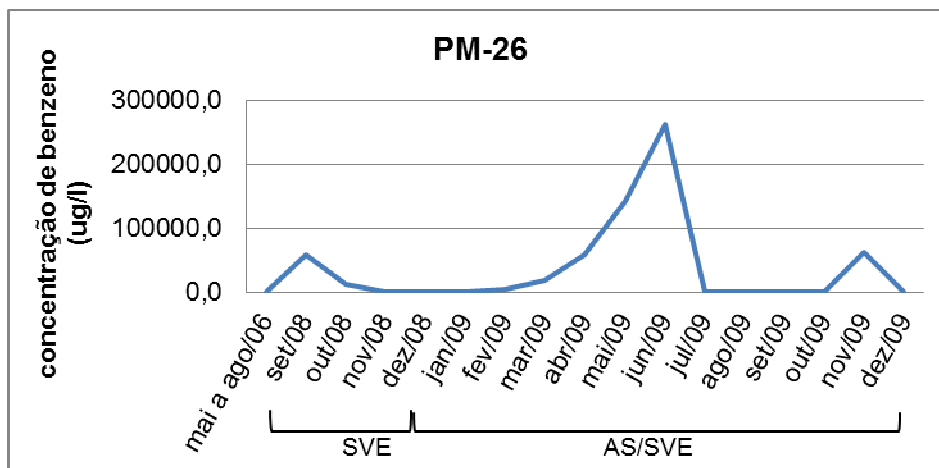


Figura 40. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PM-26.

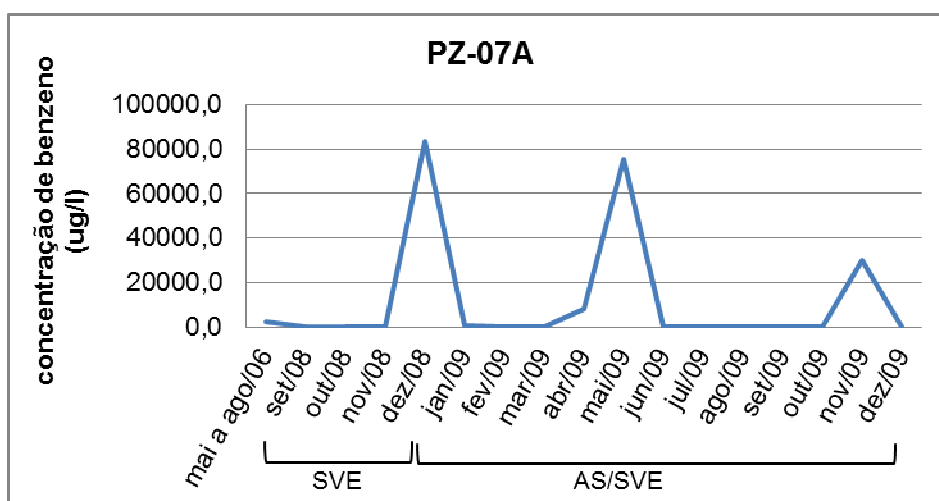


Figura 41. Gráfico de evolução da concentração de benzeno na água subterrânea do poço PZ-07A.

Tabela 24. Somatória mensal das medições de benzeno na entrada do tanque de vácuo.

	Mês	Somatória diária de benzeno (ppm)
Técnica SVE	outubro-08	0,005
	novembro-08	20,000
	dezembro-08	0,005
Técnica AS/SVE	janeiro-09	106,000
	fevereiro-09	0,005
	março-09	8,825
	abril-09	1,575
	maio-09	0,000
	junho-09	0,000
	julho-09	0,000
	agosto-09	0,000
	setembro-09	0,000
	outubro-09	0,000
	novembro-09	0,000
	dezembro-09	0,000

10. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Os resultados dos parâmetros físico-químicos da água subterrânea, medidos *in situ* durante os trabalhos de investigação e de remediação, podem ser observados na **Tabela 25**, onde constam a média, mínimo e máximo de cada parâmetro.

As **Figura 42** a **Figura 46** apresentam os gráficos com a representação da média de cada parâmetro por mês, onde se verifica o seguinte comportamento durante os monitoramentos realizados em 2006, e de setembro de 2008 a dezembro de 2009, ou seja, antes e durante a operação da remediação:

- o valor de Oxigênio Dissolvido (OD) diminuiu, de 2006 para 2009;
- pH e temperatura mantiveram-se constante, apesar de ocorrerem oscilações ao longo dos monitoramentos;
- o valor da Condutividade Elétrica (CE) também diminuiu, no entanto, houve uma queda brusca entre março e abril de 2009, definindo dois comportamentos distintos;

- Verifica-se que a linha de tendência da temperatura é praticamente constante, porém, nota-se a ocorrência de dois picos, sendo um com 25,9 °C, referente ao mês de março/2008, correspondente ao final do verão, e o outro com 22,9 °C, em setembro/2009, correspondente ao final do inverno.
- potencial oxi-redução (Eh) apresentou uma tendência crescente, desde o início das investigações em 2006, permanecendo durante a operação da remediação;

Tabela 25. Medições de parâmetros físico-químicos *in situ* na água subterrânea

Parâmetros	Estatística	Período de investigação	Remediação SVE												Remediação SVE/AS											
			set/08	out/08	nov/08	dez/08	jan/09	fev/09	mar/09	abr/09	mai/09	jun/09	jul/09	ago/09	set/09	out/09	nov/09	dez/09								
OD (mg/l)	média	1,23	0,57	0,93	0,60	0,80	0,42	0,44	0,47	0,24	0,44	0,55	0,50	0,24	0,39	0,26	0,30	0,23								
	minimo	0,31	0,24	0,26	0,13	0,06	0,18	0,13	0,10	0,01	0,34	0,21	0,07	0,14	0,11	0,09	0,11	0,09								
	maximo	4,30	1,42	4,57	3,09	1,97	2,02	1,61	0,71	2,55	0,93	2,26	0,58	1,78	0,56	0,60	1,50	1,50								
pH	média	5,85	7,93	8,19	8,41	8,56	8,79	9,50	9,09	5,88	6,37	7,38	7,60	7,85	7,74	7,81	7,43	7,50								
	minimo	4,88	7,13	7,15	7,60	6,44	6,33	8,94	6,65	3,65	3,87	6,79	2,29	6,69	6,86	6,73	6,52	6,62								
	maximo	9,88	8,52	8,75	9,09	9,48	9,93	10,22	9,94	8,52	7,82	8,00	8,71	8,89	8,91	8,87	8,55	8,28								
CE (uS/cm)	média	1251,69	1169,92	1215,46	1430,68	1473,42	1397,92	1365,59	1410,74	781,26	677,32	827,47	742,34	729,92	708,42	958,00	665,45	672,84								
	minimo	471,00	218,00	340,00	411,00	145,00	258,00	278,00	215,00	160,00	203,00	153,00	57,00	21,00	164,00	269,00	164,00	0,77								
	maximo	2346,00	1960,00	3020,00	4230,00	4190,00	3690,00	3120,00	4040,00	1463,00	2209,00	1498,00	1490,00	1480,00	1406,00	3090,00	1381,00	1383,00								
Temperatura (oC)	média	23,32	23,83	24,01	23,74	24,49	23,75	25,47	25,97	25,15	25,07	24,07	23,49	23,06	22,96	23,07	25,30	24,92								
	minimo	19,02	22,04	22,31	21,97	20,43	-1,00	24,03	24,03	23,81	23,34	22,21	21,69	21,52	21,38	22,00	23,26	23,57								
	maximo	27,74	29,85	28,03	27,18	31,91	26,68	28,28	27,97	27,22	29,94	25,76	25,63	25,43	26,68	24,40	28,00	26,64								
Eh (mV)	média	131,50	-161,65	-159,54	-161,95	-196,45	-188,84	-198,21	-197,25	-139,03	-238,13	-134,97	-131,24	-125,79	-107,71	-123,58	-147,39	-113,58								
	minimo	-21,30	-305,00	-282,00	-319,00	-1801,00	-377,00	-394,00	-314,00	-268,00	-476,10	-276,00	-293,00	-256,00	-227,00	-290,00	-326,00	-197,00								
	maximo	272,60	-27,00	23,00	25,00	78,00	102,00	33,00	283,00	-13,00	-33,00	-12,00	-1,00	24,00	1,00	34,00	49,00	42,00								

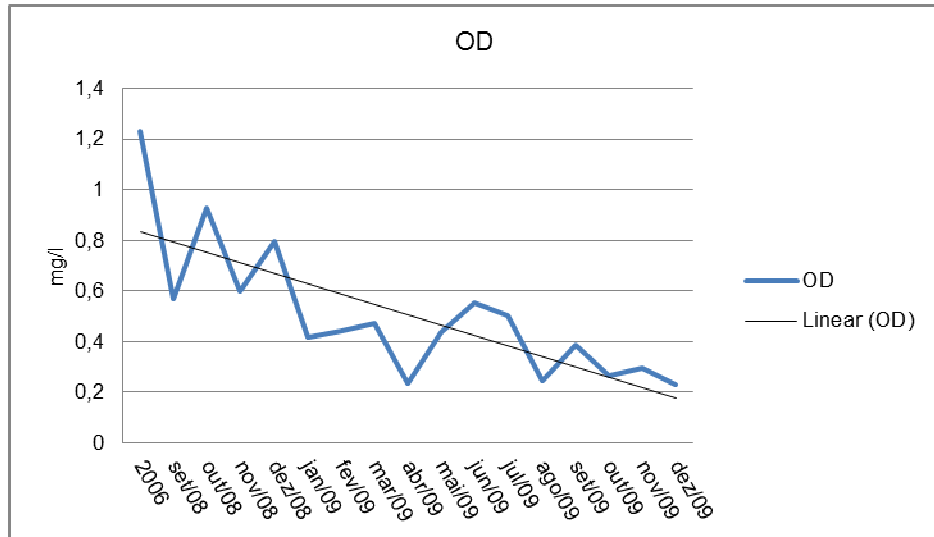


Figura 42. Variação da média dos valores do parâmetro OD.

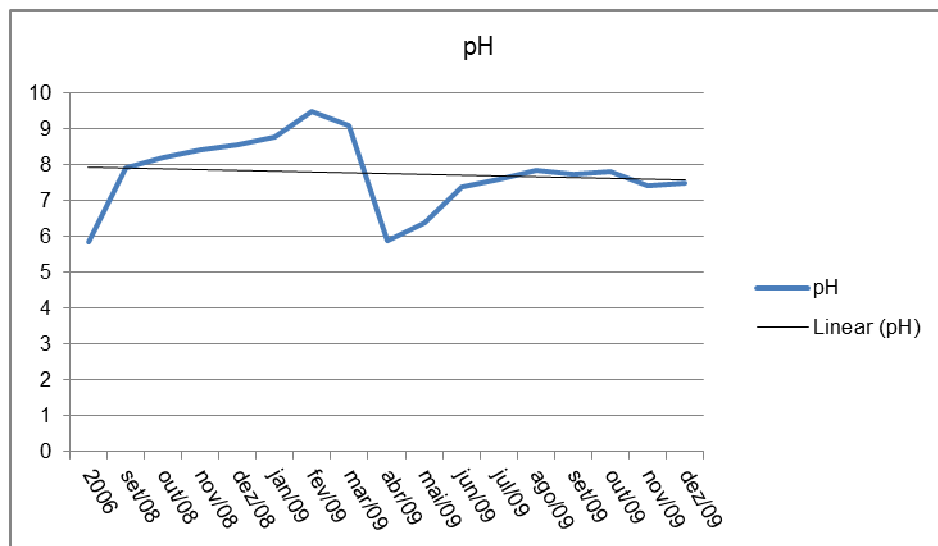


Figura 43. Variação da média dos valores do parâmetro pH.

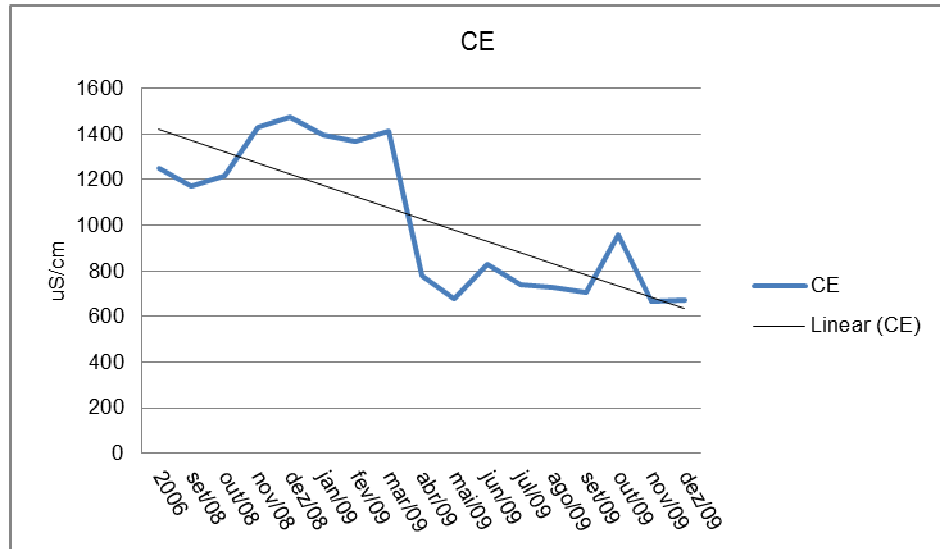


Figura 44. Variação da média dos valores do parâmetro CE.

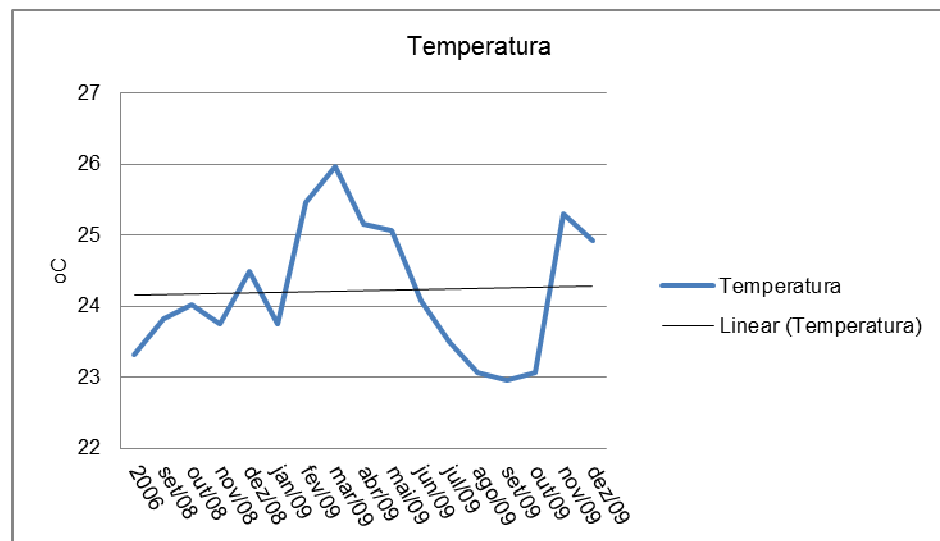


Figura 45. Variação da média dos valores do parâmetro Temperatura.

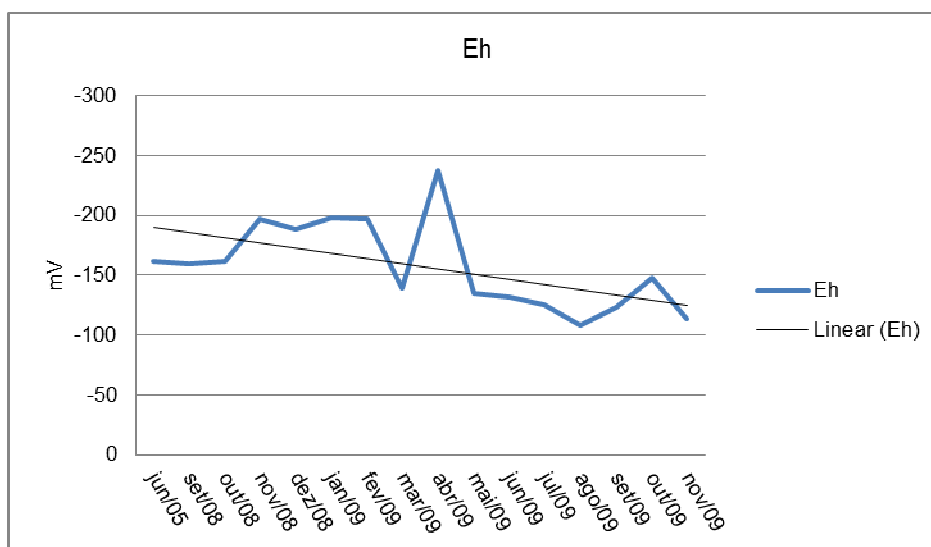


Figura 46. Variação da média dos valores do parâmetro Eh.

11.EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE BENZENO NO SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA

Como parâmetro de discussão e limite inferior para permitir as interpretações dos monitoramentos do benzeno, nos solos e águas subterrâneas da área, foram utilizados os valores estabelecidos no “Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo 2005” (Lista CETESB), que indicam o Valor de Intervenção (VI) para as concentrações de benzeno em água subterrânea de 5,0 µg/L e, para solo em área residencial, de 0,08 mg/Kg.

11.1. Solo

As amostragens de solo foram realizadas em dois períodos: um durante a investigação em 2006, e o outro pós-remediação em 2010. Essas amostras foram coletadas no intervalo de 0,5 m a 2,0 m de profundidade, correspondente à zona não saturada.

Comparando-se as áreas com ocorrências de benzeno no solo, nas duas campanhas de amostragem (**Figura 47**), verifica-se que, no intervalo de 0,5 m a 1,0 m, no entorno dos poços PM-30 e PM-23 não se identificou mais concentrações de benzeno na campanha de 2010. Em contrapartida, neste mesmo intervalo, na parte norte da tubulação, apenas na campanha de 2010 foram identificadas concentrações de benzeno com valor de 0,085 mg/Kg (S-23) e 3,710 mg/Kg (S-22).

Quanto aos resultados analíticos para o intervalo de 1,0 m a 2,0 m, também, verifica-se, de modo geral, que houve uma diminuição considerável nas concentrações de benzeno.

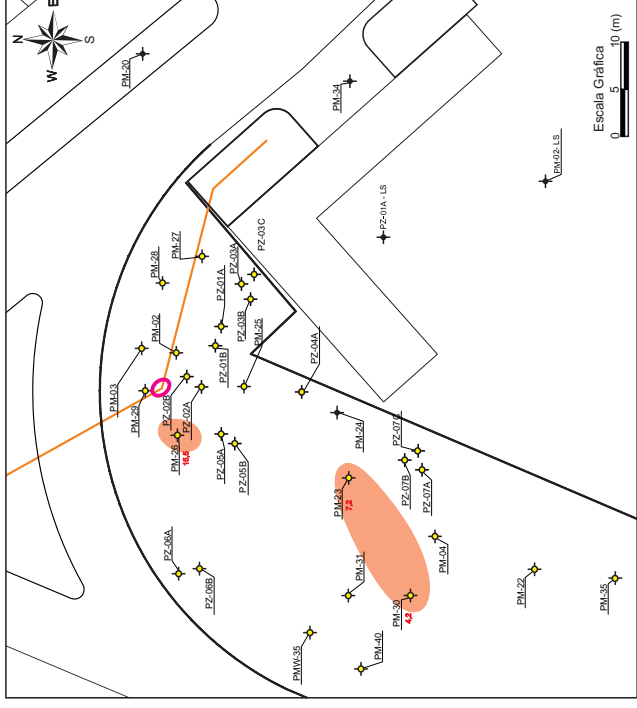
Na região dos poços PZ-02A e PZ-02B, as concentrações de benzeno em solo ainda permanecem altas em 2010, com valor de 97,3506 mg/Kg (S-14).

Desta forma, os resultados analíticos mostram que o solo na área de estudo ainda encontra-se impactado por benzeno, próximo ao local do vazamento, conforme evidenciam os resultados obtidos na campanha de 2010, indicando a permanência de fase residual.

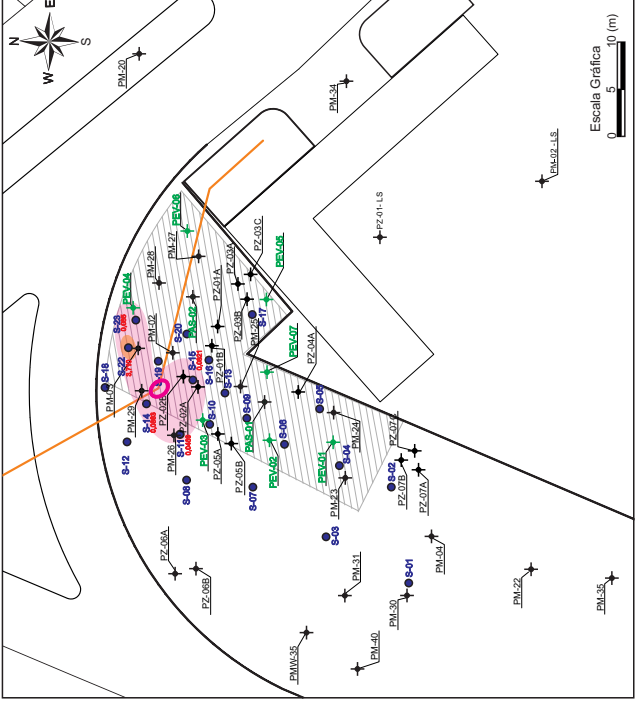
Por outro lado, na área onde se encontram instalados os poços de extração e injeção verifica-se que as considerações diminuíram consideravelmente, sendo que, em 2006, as concentrações atingiram o valor máximo de 2.194,0 mg/Kg no entorno do poço PM-28, enquanto que em 2010 o valor máximo foi de 97,35 mg/Kg (S-15) próximo ao PM-29, ou seja próximo ao local do vazamento.

Profundidade de 0,5m a 1,0m

2006

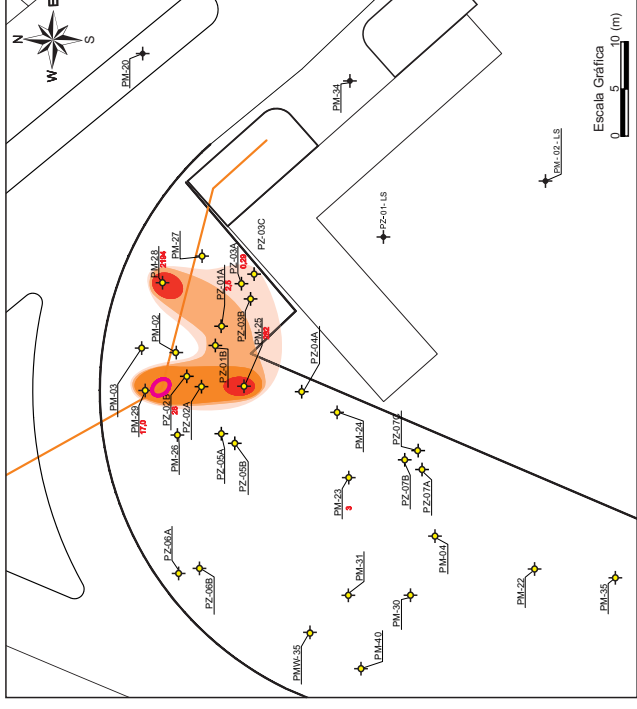


2010

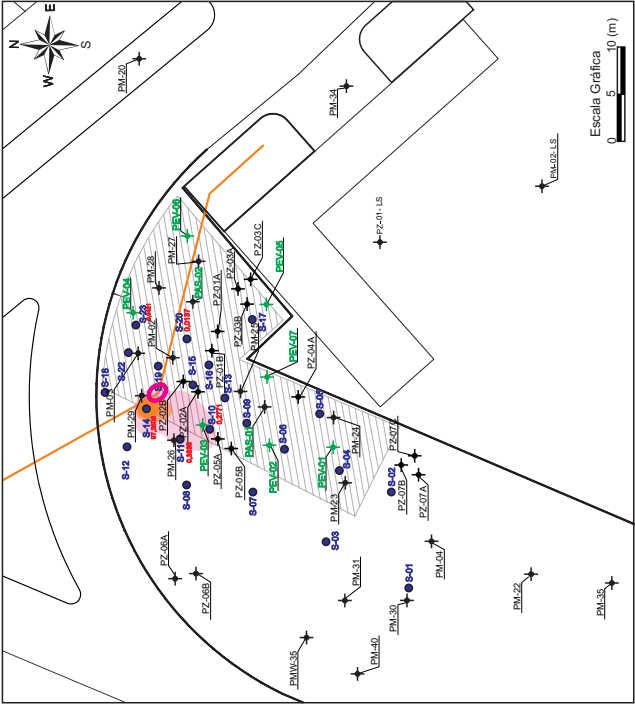


Profundidade de 1,0m a 2,0m

2006



2010



LEGENDA

- PM-02 Poço de monitoramento
- PZ-01 Poço multinível
- PEV-01 Poço de extração de vapores
- PAS-02 Poço de injeção de ar
- Tubulação de benzeno
- Área impermeabilizada
- PM-02 Pontos de amostragem de solo (2006)
- S-18 Pontos de amostragem de solo (2010)

Localização do vazamento de benzeno

- Concentração de Benzeno (mg/kg)
- 0,08 a 0,50
 - 0,50 a 10,00
 - 10,00 a 100,00
 - > 100

Figura 47: Ocorrência de benzeno no solo em 2006 e 2010

11.2. Água subterrânea

Posteriormente ao vazamento de benzeno, procederam-se diversas campanhas de amostragem de água subterrânea nos poços de monitoramento e piezômetros, com objetivo de avaliar o impacto causado e acompanhar a evolução da pluma deste contaminante durante e após a ação de remediação.

Analisando a evolução temporal da pluma de benzeno na água subterrânea, conforme apresentado em planta e em seções hidrogeológicas (**Figura 48 a Figura 53**), verificam-se três comportamentos distintos da pluma de benzeno:

Durante o período de investigação (2005 a 2006)

A pluma de benzeno se estendia por praticamente toda a área de estudo, sendo que as amostras de água subterrânea com concentrações de benzeno apresentaram mínimo de 9,0 µg/L (PM-04) e máximo de 666.860,0 µg/L (PZ-4A). Esta última concentração, em conjunto com concentrações acima de 1% da solubilidade máxima do composto (1.780.000 µg/L), ou seja, acima de 17.800 µg/L, pode indicar a existência de fase residual aprisionada na zona saturada, o que propicia a existência da fase dissolvida nas concentrações encontradas na área.

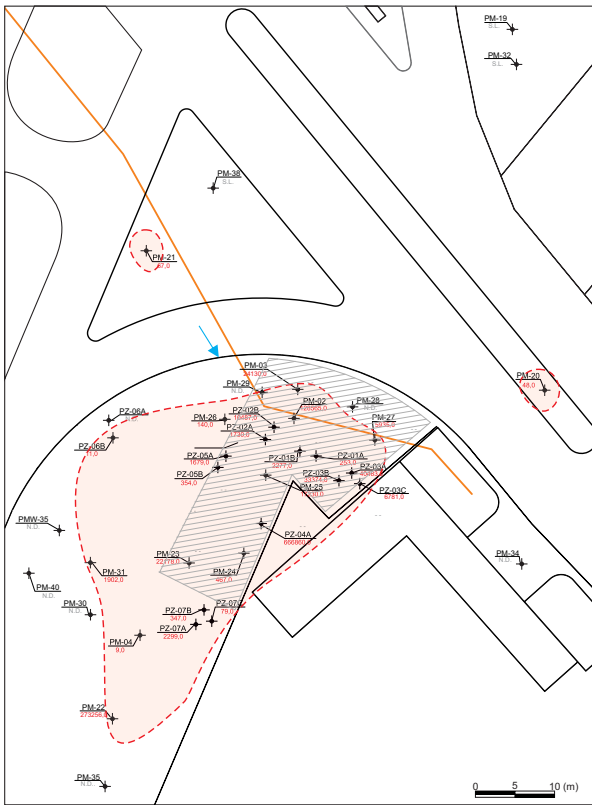
Durante o período de remediação (setembro/2008 a dezembro/2009)

Durante o período de remediação, observou-se diminuição da pluma de benzeno, conforme monitoramento de janeiro de 2009, quando a área estava sob ação de remediação apenas pela técnica extração de vapores (SVE). Com a posterior ação conjunta das técnicas de AS/SVE, a pluma apresentou maior diminuição.

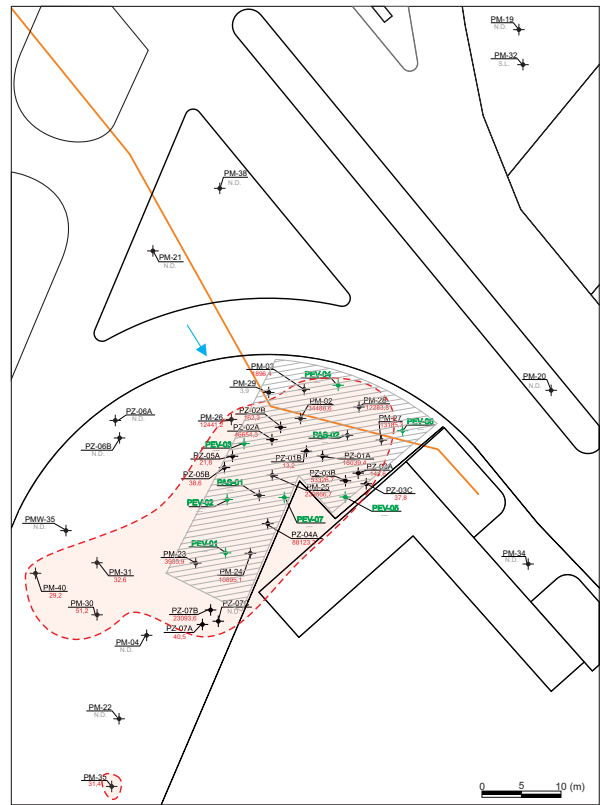
O único poço que apresentou concentrações acima do valor de intervenção, em todas as campanhas, foi o PZ-02A, que se encontra próximo ao local do vazamento,

conforme resultados apresentados na **Tabela 26**. Cabe destacar que essas concentrações podem estar relacionadas à presença de fase residual na área, como pode ser evidenciado pela presença de iridescência no solo a 3,0 m de profundidade, em sondagem executada ao lado poço PZ-2A (**Figura 54**).

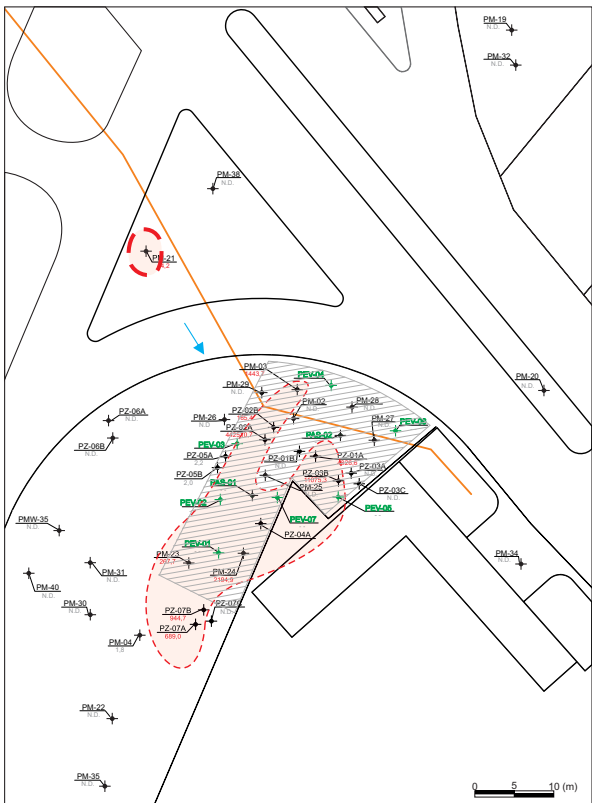
É importante destacar que o piezômetro PZ-7B, que apresenta seção filtrante entre 4,5 m e 5,5 m de profundidade, e localiza-se à jusante do local do vazamento, tem apresentado concentrações altas de benzeno na maioria das campanhas, exceto em novembro de 2008 (**Tabela 26**), sem explicações plausíveis.



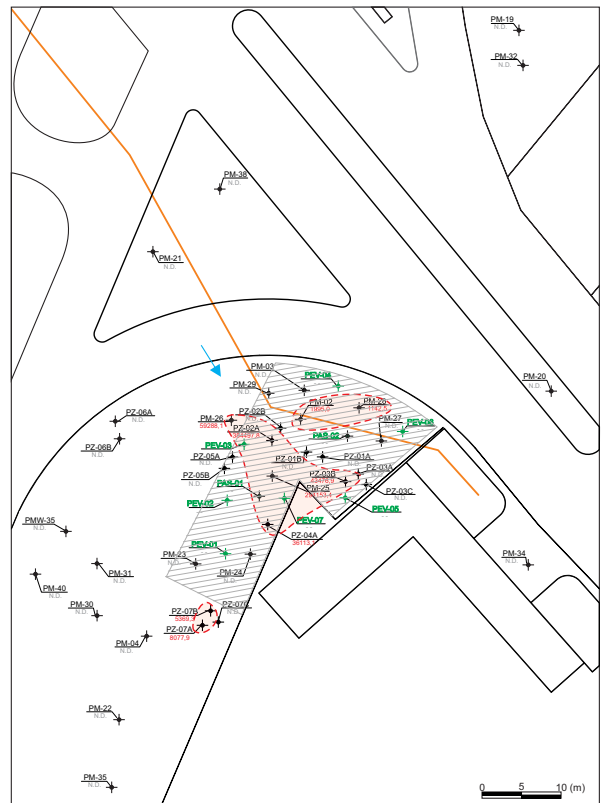
maio de 2006
(Investigação)



Outubro de 2008
(Remediação - SVE)



Janeiro de 2009
(Remediação - AS/SVE)



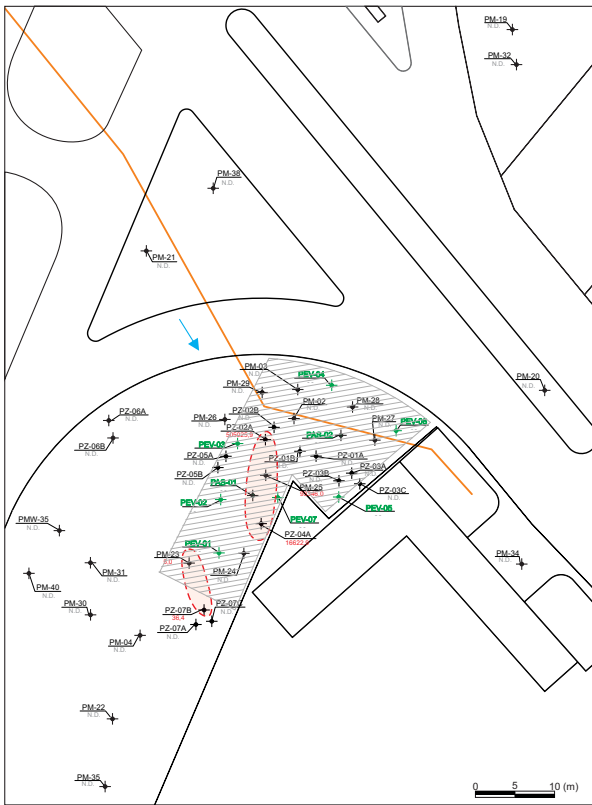
Abril de 2009
(Remediação - AS/SVE)

LEGENDA

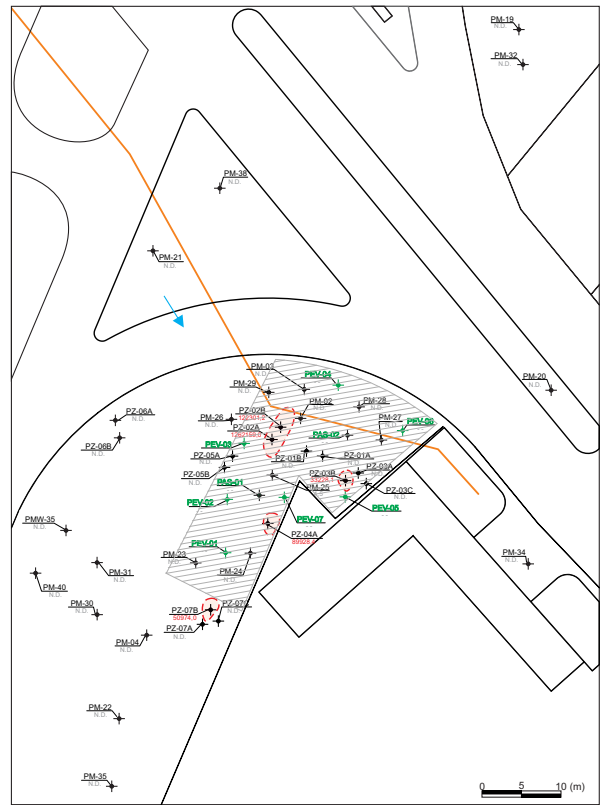
- PM-02**
xxx ● Poço de monitoramento
Concentração de benzeno (ug/L)
- PZ-01** ● Poço multinível
- PEV-01** ● Poço de extração de vapores
- PAS-02** ● Poço de injeção de ar

- Tubulação de benzeno
- Pluma de benzeno na água subterrânea
- Área impermeabilizada
- Sentido de fluxo da água subterrânea

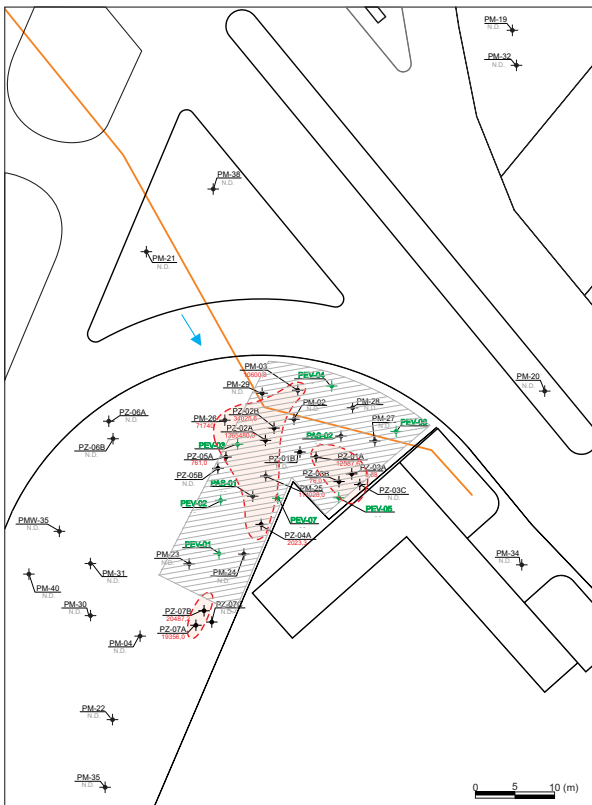
Figura 48. Evolução da pluma de benzeno em planta (maio/2006, outubro/2008, janeiro/2009 e abril/2009)



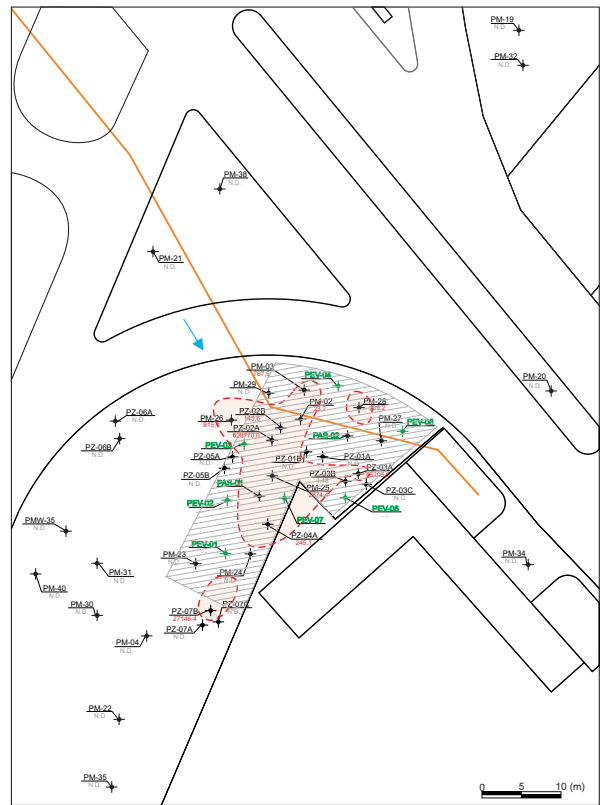
Agosto de 2009
(Remediação - AS/SVE)



Dezembro de 2009
(Remediação - AS/SVE)



Maio de 2010
(Pós-remediação)



Dezembro de 2010
(Pós-remediação)

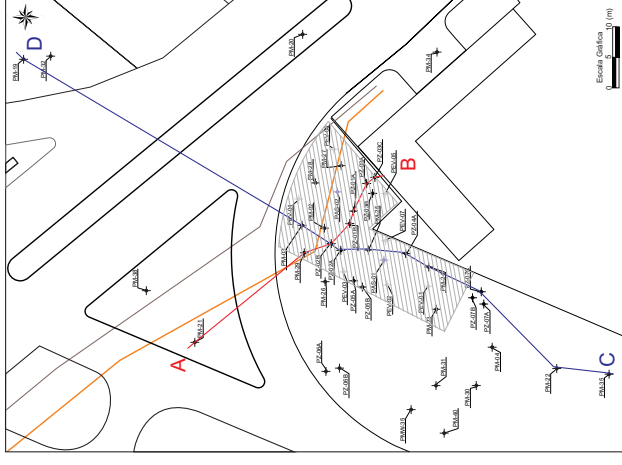
LEGENDA

- PM-02**
xxx ● Poço de monitoramento
Concentração de benzeno (ug/L)
- PZ-01** ● Poço multinível
- PEV-01** ● Poço de extração de vapores
- PAS-02** ● Poço de injeção de ar

- Tubulação de benzeno
- Pluma de benzeno na água subterrânea
- Área impermeabilizada
- Sentido de fluxo da água subterrânea

Figura 49. Evolução da pluma de benzeno em planta (agosto/2009, dezembro/2009, maio/2010 e dezembro/2010)

Mapa Índice



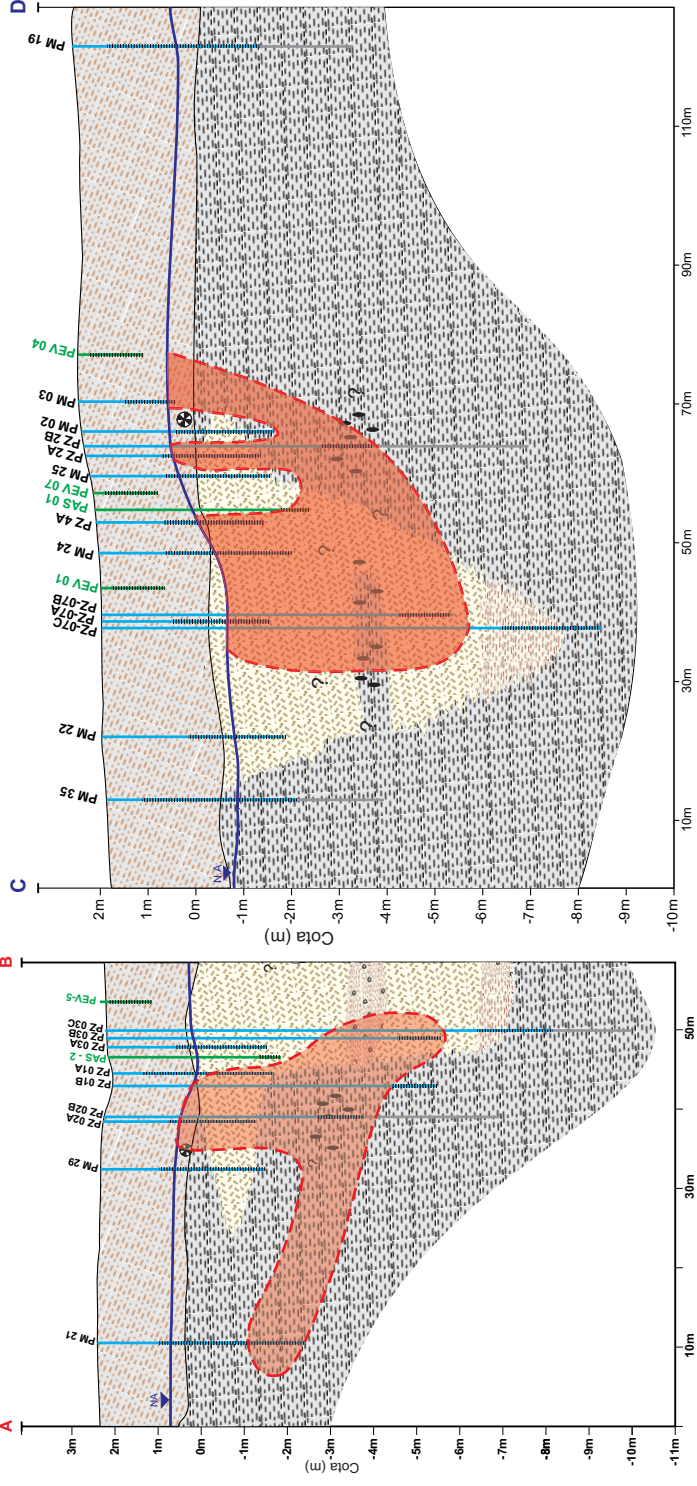
LEGENDA

- Unidade I
 - Alterro - Areia silteosa a argila silteosa avermelhada
- Unidade II
 - Areia fina silteosa
 - Areia fina a média cinza
 - Areia média com pedregulho a areia grossa com pedregulho cinza
- Unidade III
 - Silte argiloso a argila silteosa cinza
 - Silte argiloso a argila silteosa cinza com detritos vegetais e matéria orgânica
- Pluma de Benzeno
- Poços
 - Continuação da sondagem
 - Tubulação de benzeno
 - Semi informação
- PM xx / PZ xx Poços de monitoramento / multivíveis
- PAS xx Poço de injeção
- PEV xx Poço de extração

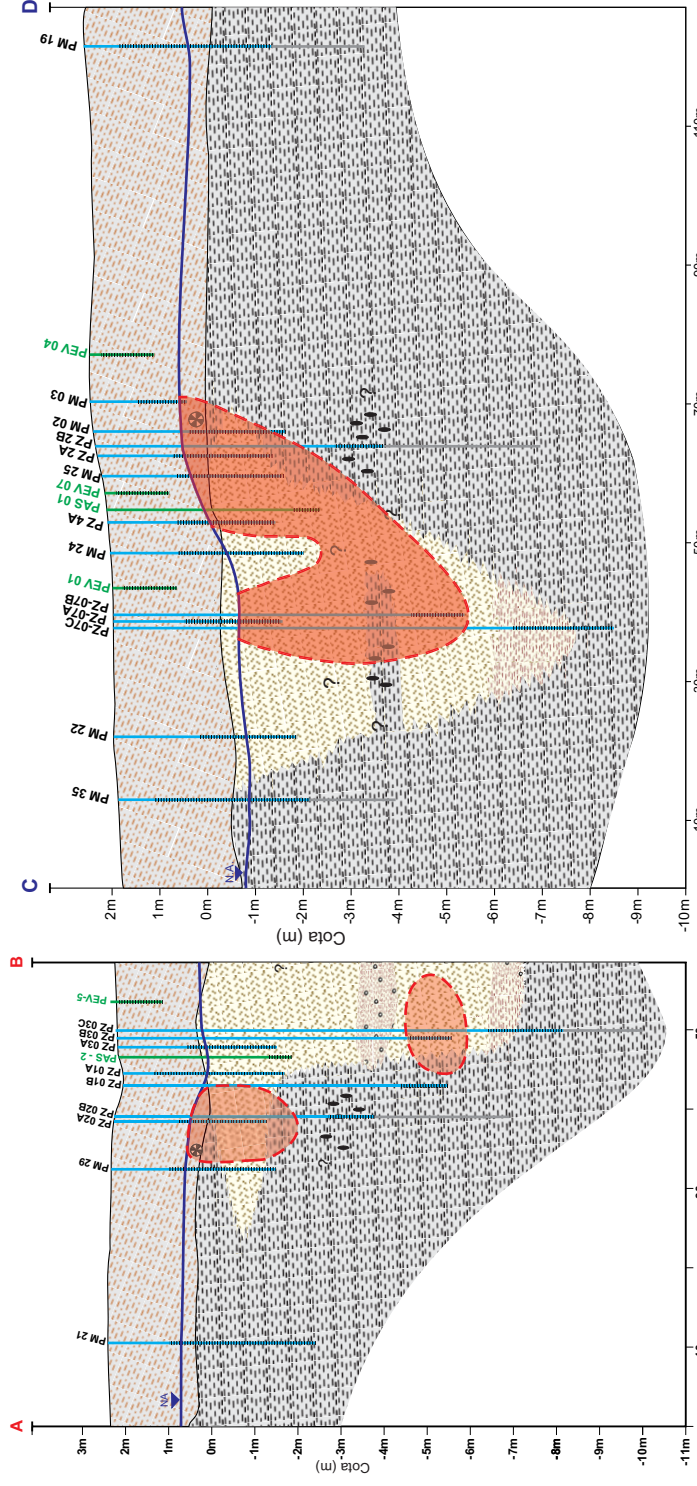
Figura 51

Evolução da pluma de benzeno representada em seções (janeiro/2009 e abril/2009)

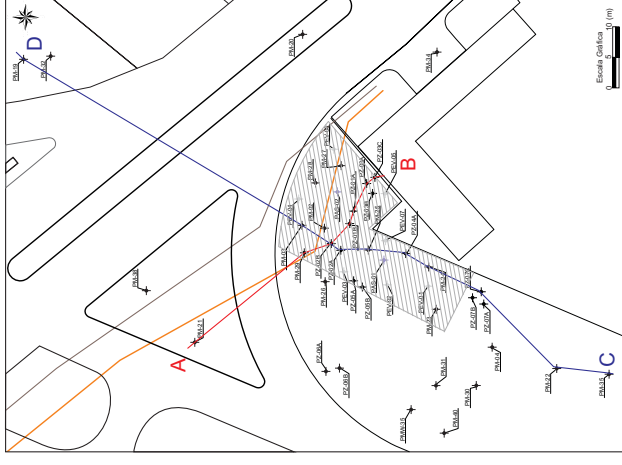
Janeiro/2009 - Remediação (AS/SVE)



Abril/2009 - Remediação (AS/SVE)



Mapa Índice

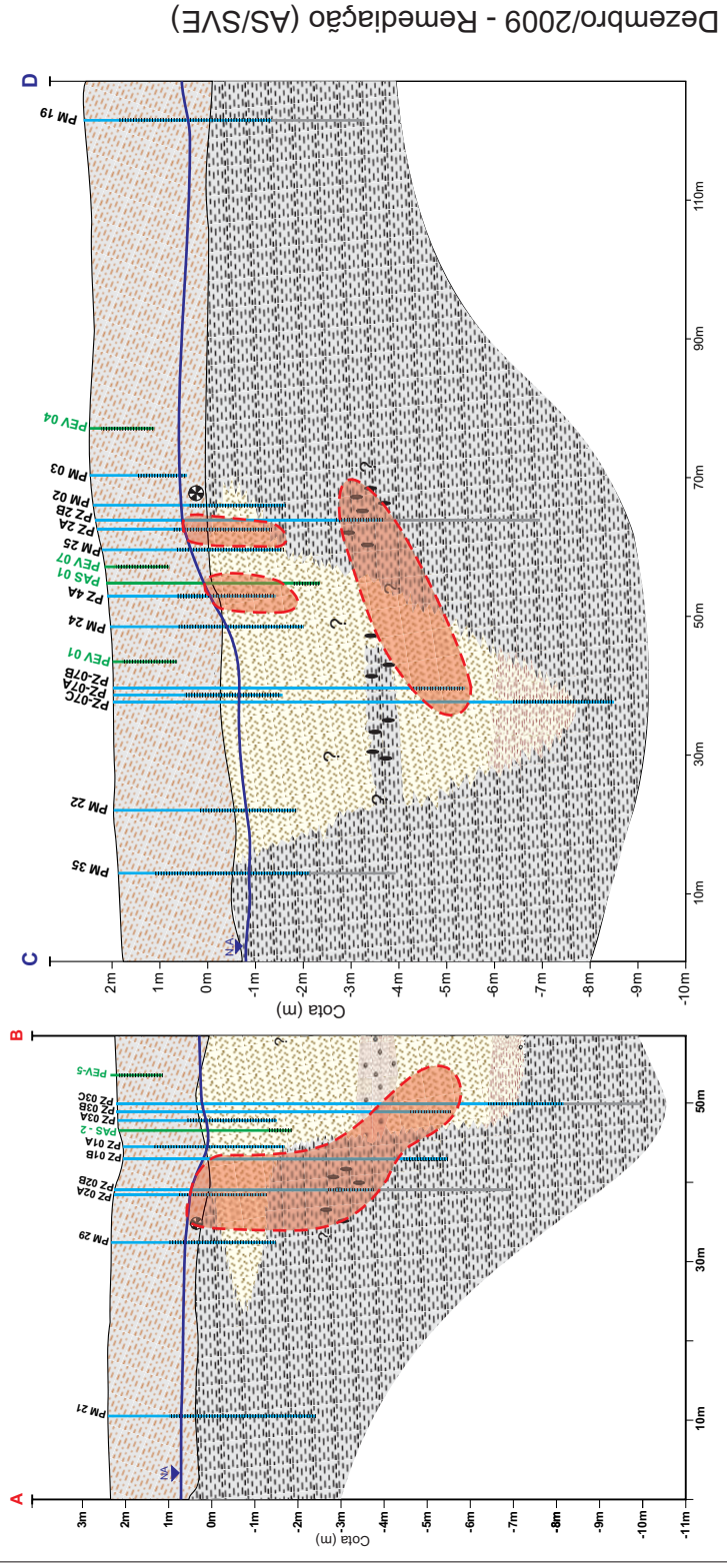
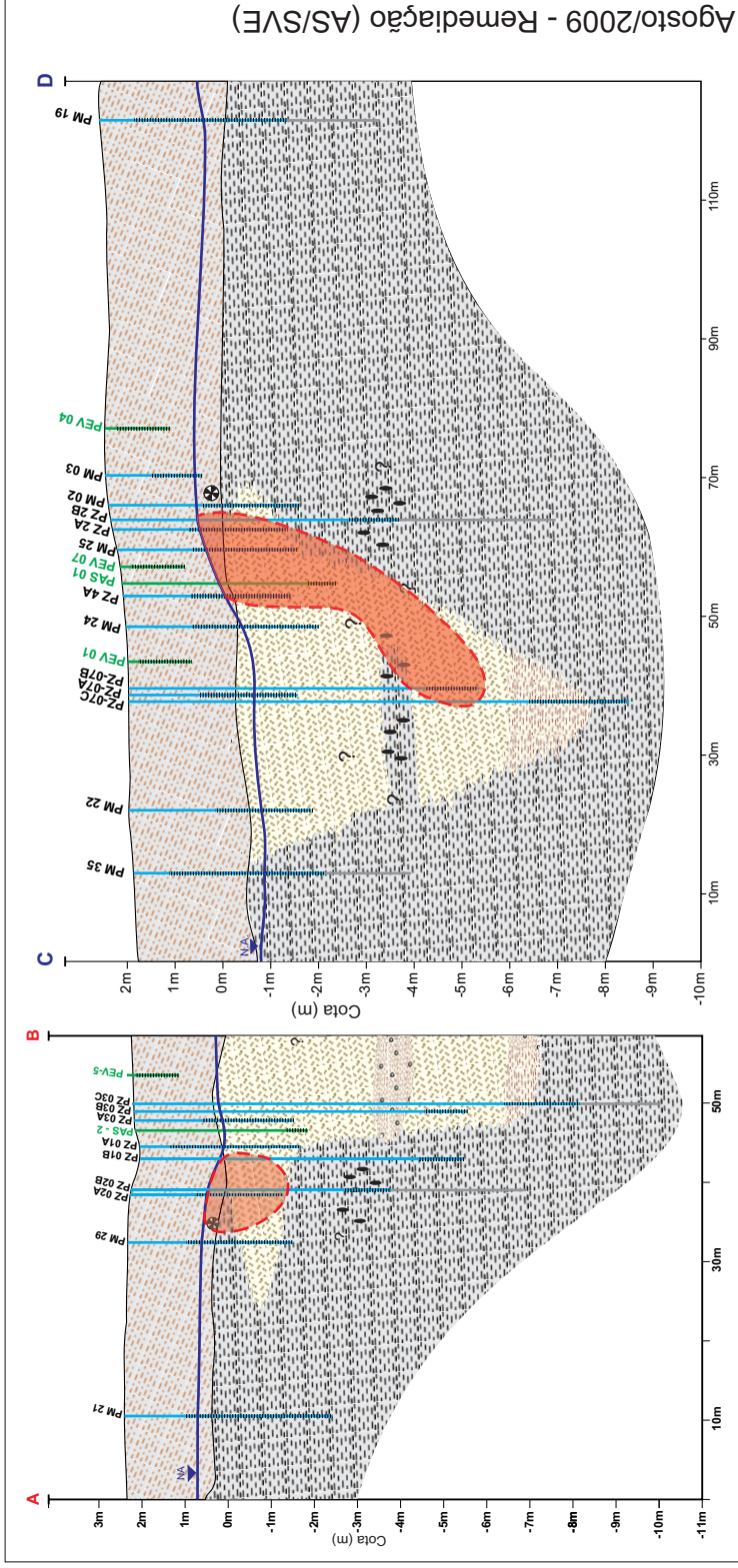


LEGENDA

- Unidade I
 - Alterro - Areia silteosa a argila silteosa avermelhada
- Unidade II
 - Areia fina silteosa
 - Areia fina a média cinza
 - Areia média com pedregulho a areia grossa com pedregulho cinza
- Unidade III
 - Silte argiloso a argila silteosa cinza
 - Silte argiloso a argila silteosa cinza com detritos vegetais e matéria orgânica
- Pluma de Benzeno
- Poços
 - Continuação da sondagem
 - Tubulação de benzeno
 - Semi informação
- PM xx / PZ xx Poços de monitoramento / multiníveis
- PAS xx Poço de injeção
- PEV xx Poço de extração

Figura 52

Evolução da pluma de benzeno representada em seções (agosto/2009 e dezembro/2009)



Mapa Índice



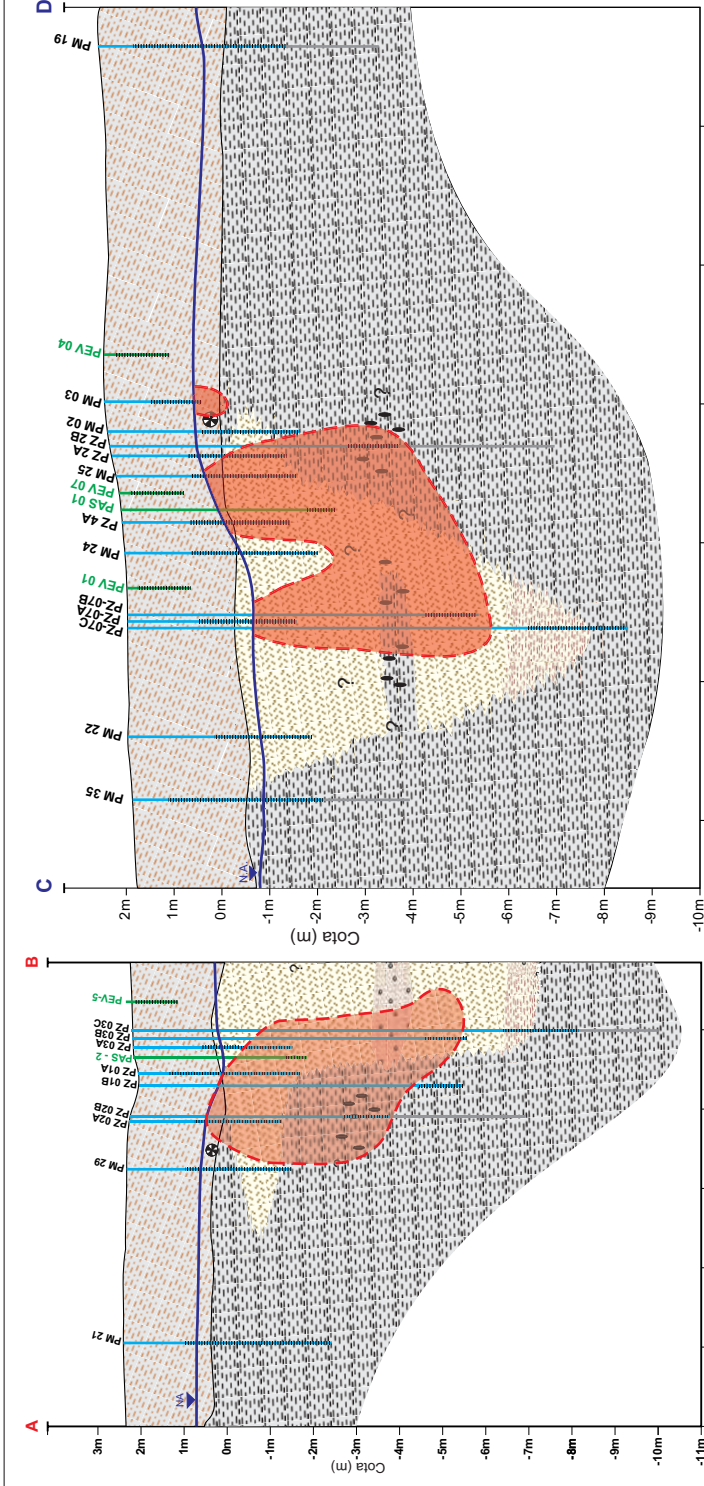
LEGENDA

- Unidade I
 - Alterro - Areia silteosa a argila silteosa avermelhada
- Unidade II
 - Areia fina silteosa
 - Areia fina a média cinza
 - Areia média com pedregulho a areia grossa com pedregulho cinza
- Unidade III
 - Silte argiloso a argila silteosa cinza
 - Silte argiloso a argila silteosa cinza com detritos vegetais e matéria orgânica
- Pluma de Benzeno
- Poços
 - Continuação da sondagem
 - Tubulação de benzeno
 - Semi informação
- PM xx / PZ xx Poços de monitoramento / multivíveis
- PAS xx Poço de injeção
- PEV xx Poço de extração

Figura 53

Evolução da pluma de benzeno representada em seções (maio/2010 e dezembro/2010)

Maio/2010 - Pós-remediação



Dezembro/2010 - Pós-remediação

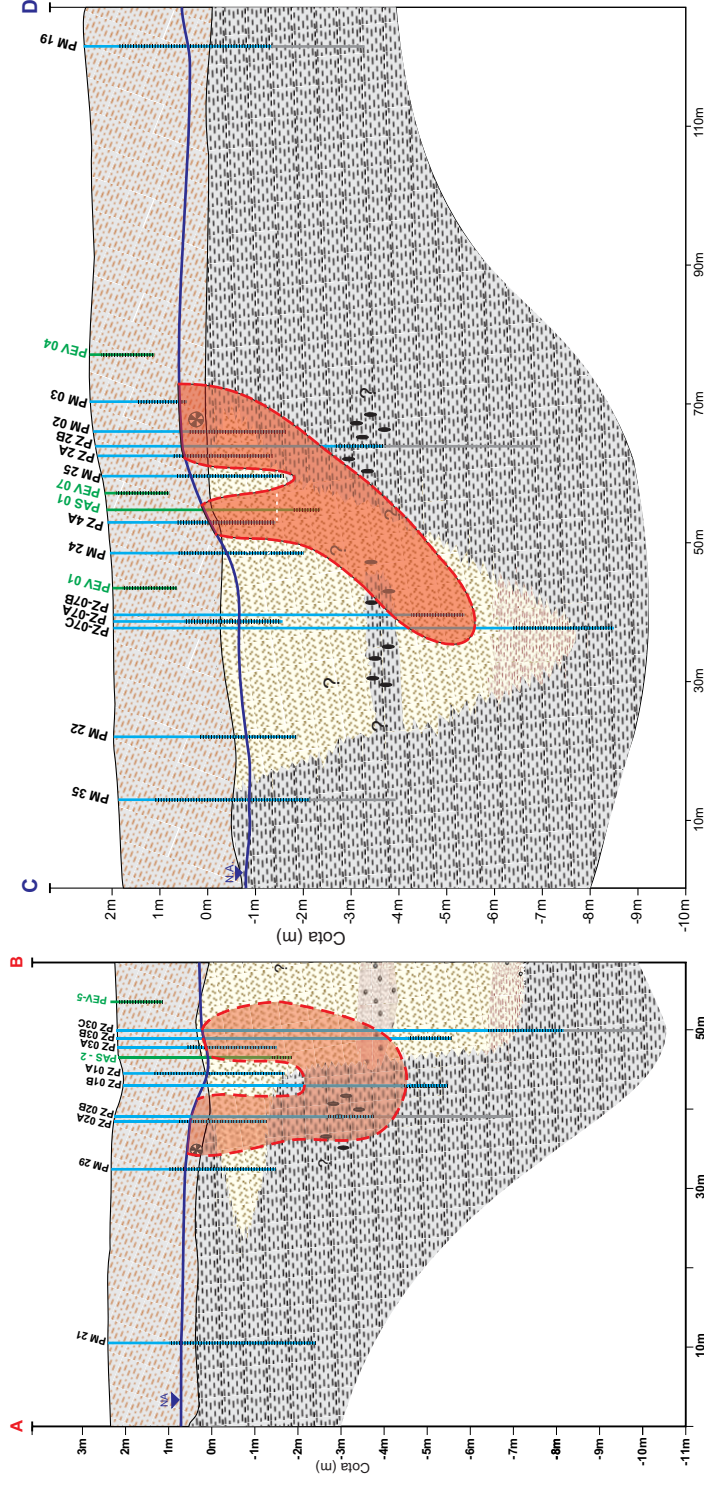


Tabela 26. Concentrações de benzeno (µg/L) na água subterrânea

POÇO	Período de Investigação				Remediação SVE												Monitoramento pós remediação				
	mai a ago/06	set/08	out/08	nov/08	dez/08	jan/09	fev/09	mar/09	abr/09	maio/09	jun/09	jul/09	ago/09	set/09	out/09	nov/09	dez/09	mai/10	jun/10	dez/10	
PZ-01A	253,0	nd	1639,4	4995,0	390,9	4826,6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1257,6	14,2	nd	
PZ-01B	227,0	nd	13,2	135,4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
PZ-02A	1730,0	42716,7	46654,3	33271,3	54566,8	442510,7	895106,0	593037,5	364497,6	47394,9	534054,4	718942,7	505025,9	362670,3	539053,4	49987,9	126215,9	1365480	469000	628770	
PZ-02B	10487,0	417,0	162,3	nd	50,4	185,4	118,9	903,6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	122001,2	34025,6	53,8	143,6	
PZ-03A	40483,0	130,2	144,6	36,9	31,8	967,9	nd	nd	43476,9	19323,4	53411,4	nd	nd	nd	11891	19662,8	8,88	nd	nd	65205	
PZ-03B	33374,0	14099,5	53326,7	31524,3	4890,2	11075,3	77698,1	nd	43476,9	19323,4	53411,4	nd	nd	nd	nd	33228,1	76	17,4	4,48	nd	
PZ-03C	6791,0	57,3	37,8	nd	23,3	nd	nd	51182,0	nd	8705,3	14164,4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PZ-04A	669690,0	5395,4	89123,3	nd	61376,7	272996,6	nd	36113,1	nd	27406,0	12196,8	24604,2	168622,9	nd	44805,4	29827,6	69928,4	2023,3	731	245,1	
PZ-06A	1679,0	1990,1	21,8	nd	7,9	2,2	nd	nd	nd	27406,0	12196,8	nd	nd	nd	nd	nd	nd	761	nd	nd	
PZ-06B	354,0	nd	38,6	nd	17,7	2,0	2,6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PZ-06A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	30,8	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PZ-06B	11,0	nd	nd	nd	nd	nd	29,4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PZ-07A	2299,0	78,4	40,5	nd	83746,5	689,0	nd	nd	8077,9	72952,2	nd	nd	nd	nd	nd	30102,2	19368	nd	nd	nd	
PZ-07B	347,0	12473,4	23093,6	nd	9832,5	944,7	60056,0	28505,4	5369,3	21277,0	3375,1	554,3	36,4	17342,0	22956,3	37913,0	50974	20487,2	21905	27146,4	
PZ-07C	79,0	11,2	nd	nd	6,9	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-02	128665,0	6,2	34488,6	28973,8	nd	nd	nd	nd	1995,0	3893,6	1683,1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	23,2	
PM-03	24130,0	9096,8	1886,4	991,6	nd	1443,7	1050,3	nd	nd	14045,4	32801,8	nd	nd	15459,0	nd	nd	10600,8	2075,7	767,5	nd	
PM-04	9,0	32,7	2,8	nd	nd	1,8	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-15	1734,0	13,2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-19	nd	9,4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-20	48,0	6,7	nd	nd	nd	14,2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-21	67,0	5,2	nd	28,2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-22	273256,0	4,1	nd	25,3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-23	22178,0	23,2	3965,9	621,4	397,7	267,7	nd	nd	nd	nd	1679,3	1088,3	5,0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-24	467,0	16,1	10895,1	2,1	nd	2194,9	nd	nd	nd	nd	nd	4322,5	nd	nd	nd	nd	nd	4,26	nd	nd	
PM-25	17230,0	369905,6	239866,7	47291,0	72779,0	nd	581132,3	765069,0	294153,4	164541,6	207702,2	23791,1	93346,0	nd	nd	121597,5	114029	nd	2974,4	nd	
PM-26	140,0	57666,6	52411,2	nd	nd	nd	4436,5	1883,4	58298,1	142249,5	262452,8	nd	nd	145,4	nd	61586	71740	nd	815,1	nd	
PM-27	5935,0	35,2	13185,3	nd	nd	74,1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-28	nd	11,2	12293,8	17485,2	nd	1448,4	nd	nd	1142,5	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	195,1	209,2	nd	
PM-29	nd	20501,5	3,9	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-30	nd	nd	51,2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-31	1902,0	nd	32,6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-32	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-34	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-35	nd	nd	31,4	44,1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-38	nd	nd	nd	44,3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PM-40	nd	nd	29,2	43,1	9,6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
PMW-35	nd	6,8	nd	nd	5,5	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	

nd = não detectado



Figura 54. Amostra de solo com iridescência – sondagem ao lado poço PZ-02A.

Pós-remediação (maio/2010 a dezembro/2010)

A principal observação referente a este período é que a pluma de benzeno passou a aumentar, ou seja, este composto passou novamente a ser observado na água subterrânea dos poços de monitoramento e piezômetros que não mais apresentavam concentrações, conforme mostram as **Figura 48** a **Figura 53**.

Verifica-se ainda que, na campanha realizada em maio de 2010, ou seja, quatro meses após a paralisação da remediação, os poços PZ-02A, PZ-3A, PZ-04A, PZ-07B, PM-25 e PM-26 continuaram a apresentar concentrações altas de benzeno (**Tabela 26**), enquanto que houve aumento das concentrações nos poços PZ-01A e PZ-05A, o que não ocorria há mais de 5 meses.

11.2.1. Relação da oscilação do nível d'água com as concentrações de benzeno na água subterrânea

A oscilação do nível d'água na área de estudo pode ter contribuído para os diferentes comportamentos das concentrações do contaminante ao longo das campanhas de monitoramento, onde pode-se observar as duas situações descritas a seguir:

- nos poços PM-03, PM-26, PZ-07A e PZ-02A, conforme o nível d'água tornou-se mais profundo, maior foi a concentração de benzeno na água subterrânea (**Figura 55 a Figura 58**), sendo este comportamento esperado para poços de monitoramento rasos, devido à baixa dissolução dos contaminantes visto que a água da chuva ao atingir o solo, tende a dissolver os contaminantes; e
- nos piezômetros PZ-07B e PZ-03B ocorreu o comportamento inverso, ou seja, conforme o nível d'água tornou-se mais profundo, menor foi a concentração de benzeno na água subterrânea (**Figura 59 e Figura 60**), sendo este comportamento característico de poços piezômetros, em maior profundidade (com seção filtrante entre 6,5 m e 7,5 m).

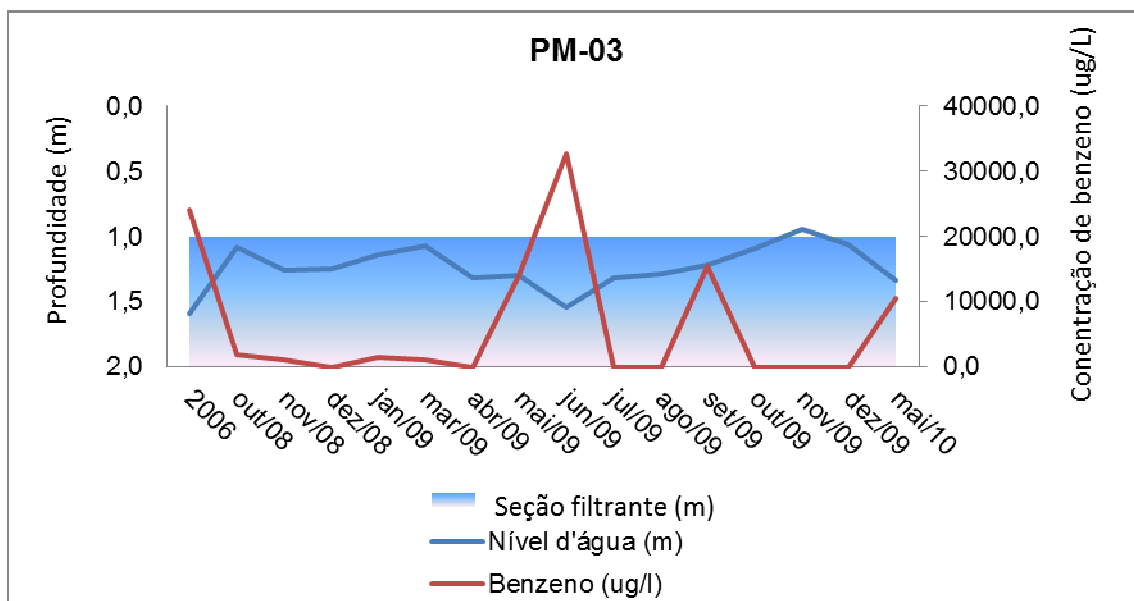


Figura 55. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno *versus* nível d'água no poço PM-03.

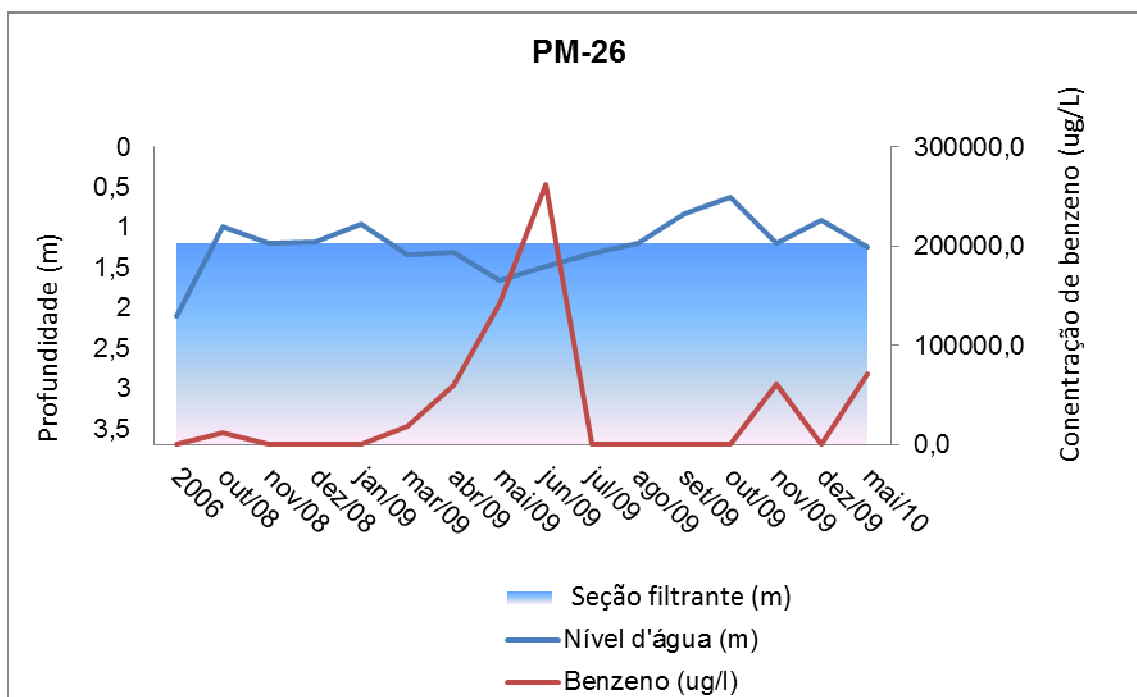


Figura 56. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno *versus* nível d'água no poço PM-26.

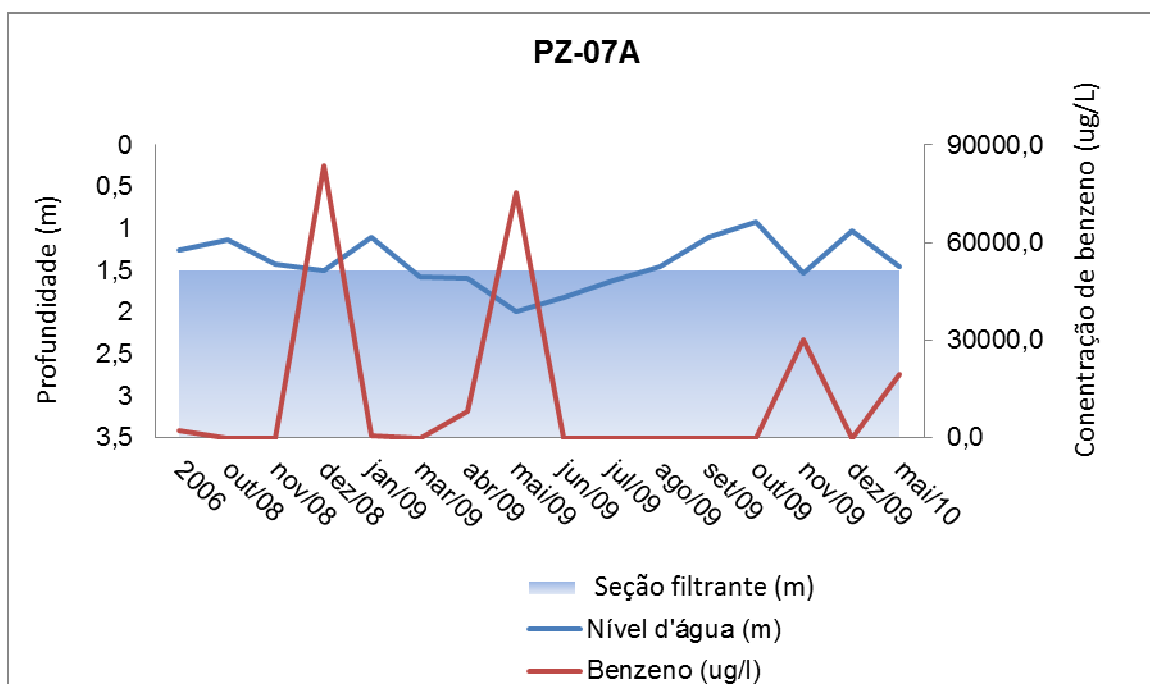


Figura 57. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno *versus* nível d'água no poço PZ-7A.

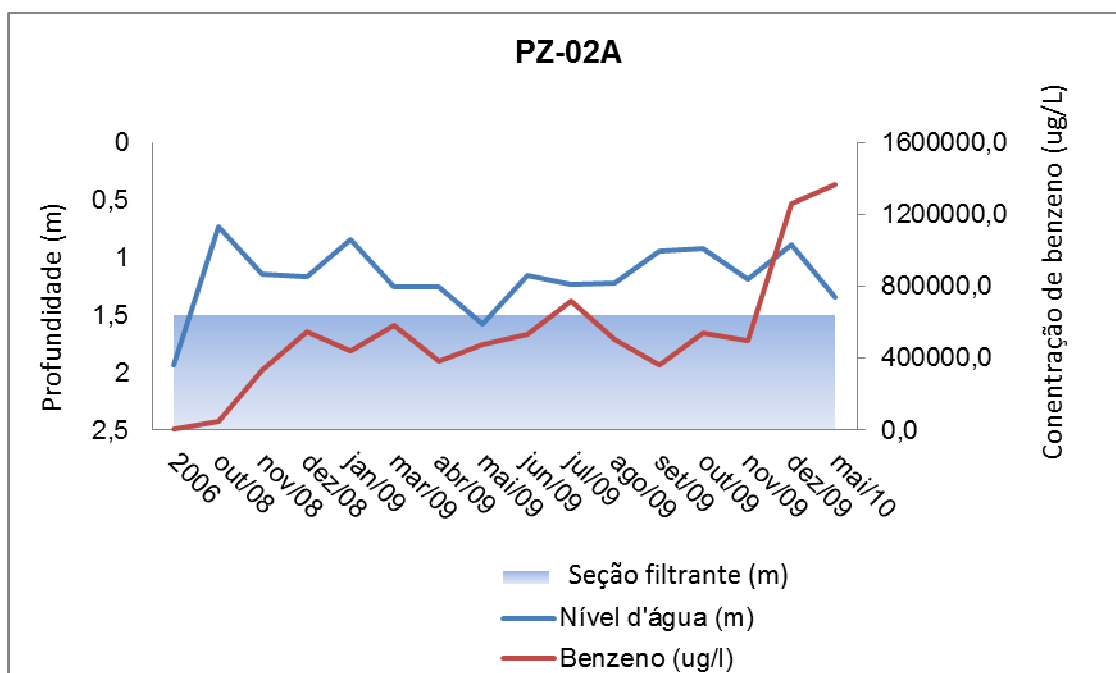


Figura 58. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno *versus* nível d'água no poço PZ-2A.

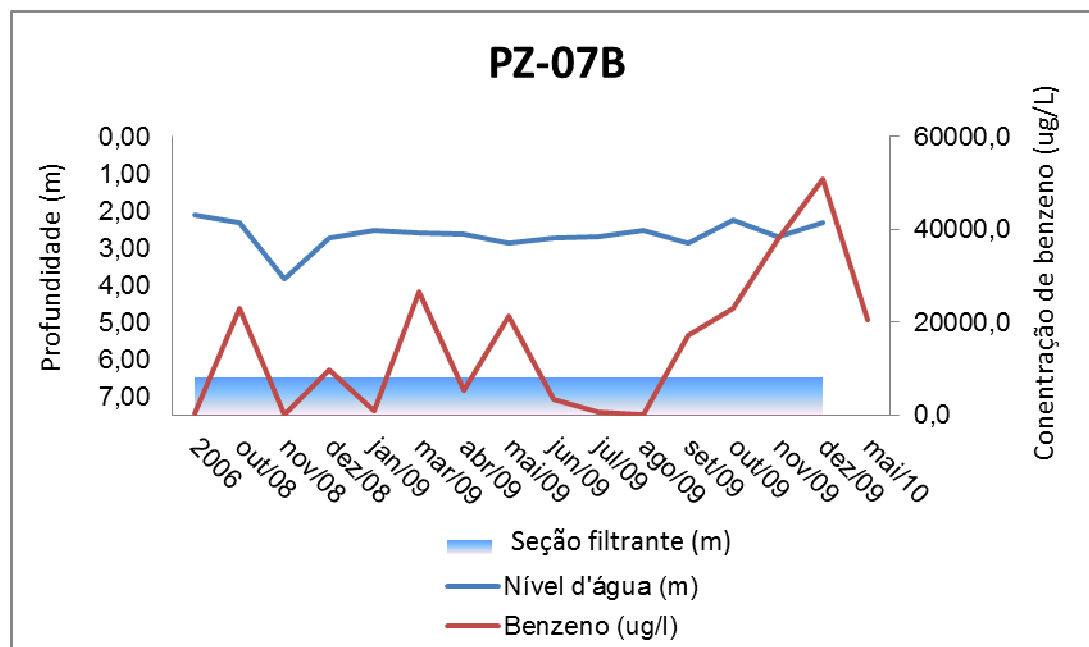


Figura 59. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno *versus* nível d'água no piezômetro PZ-7B.

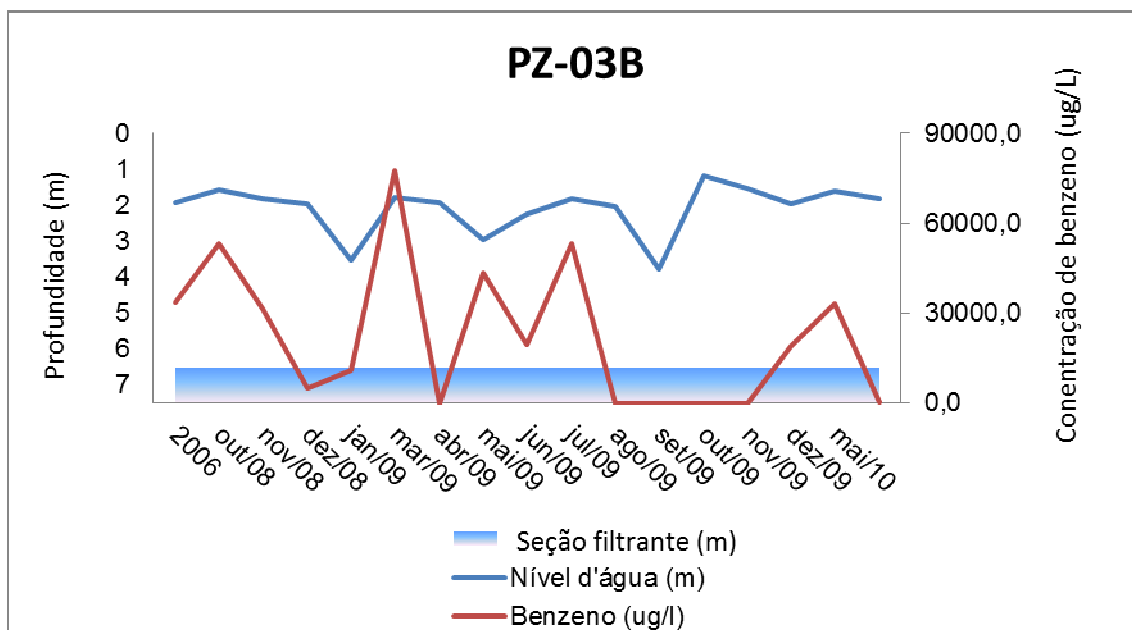


Figura 60. Gráfico de evolução das concentrações de benzeno *versus* nível d'água no poço PZ-3B.

12. CONCLUSÕES

O vazamento de benzeno ocorrido na área apresenta algumas particularidades que o difere das típicas fontes de contaminação em solo e água subterrânea. Geralmente, a contaminação ocorre por vazamento em tanque ou tubulação, subterrâneos, que se encontram na zona não saturada, onde a presença de produto no solo pode vir a formar fase livre que surge nos poços de monitoramento instalados.

Na área de estudo, a tubulação encontrava-se pressurizada e rompeu-se abaixo do nível d'água, como pode ser visto nas seções hidrogeológicas das **Figura 18** e **Figura 19**, fazendo com que o benzeno se espalhasse vertical (descendentemente) e horizontalmente na zona saturada, provavelmente, atingindo unidades arenosas, principais condutos do fluxo da água subterrânea.

Apesar de não se ter registros de fase livre nos poços, a evidência de ocorrência de fase residual na área, principalmente na zona saturada, pode ser confirmada devido às altas concentrações de benzeno em fase dissolvida, como por exemplo, no poço PZ-02A, que apresentou concentração de $1,37 \times 10^6$ µg/L, ou seja, próxima à da solubilidade máxima do contaminante ($1,78 \times 10^6$ µg/L). Uma outra evidência é a ocorrência de iridescência observada em amostra de solo a 3,0 m (**Figura 54**) de profundidade, ou seja, na zona saturada (Unidade II) e coletada ao lado do poço PZ-02A.

Ainda, as características do vazamento, associadas à heterogeneidade litológica da área, podem ter contribuído para a ocorrência de concentrações de benzeno relativamente altas, ou seja, aproximadamente 4,0 % da solubilidade deste composto em água, como registrado nos poços piezômetros PZ-07B e PZ-03B, cujas seções filtrantes estão entre 6,5 e 7,5 m de profundidade. É importante destacar que o poço PZ-07A, um dos pares de poços associados ao PZ-07B, porém, com seção filtrante mais rasa (entre 1,5 m e 3,5 m), apresentou concentração de benzeno em apenas 35% das campanhas realizadas, enquanto que o PZ-07B apresentou concentração em 95% das campanhas realizadas, o que indica fortemente a presença da fase residual, conforme citado anteriormente.

Cabe destacar que, ao longo do perfil desses poços (PZ-07A e PZ-07B), ocorrem lentes de argilas (Unidade III) que, devido à presença de fase residual, essas lentes contendo NAPL podem estar atuando como fonte contínua de benzeno para a água subterrânea, principalmente no poço PZ-07B.

Quanto à atuação do sistema de remediação na pluma de benzeno pode-se considerar que ocorre influência do sistema de remediação em alguns poços de monitoramento, pois, verifica-se que, nos poços com valores de vácuo, ocorre uma tendência decrescente das concentrações de benzeno, fazendo com que, conseqüentemente, a pluma apresente diminuição, em concentração e abrangência em área;

Entretanto, alguns fatores, podem ter prejudicado a eficiência da remediação, como por exemplo:

- a seção filtrante dos poços de extração de vapores encontra-se, por vezes, em parte na zona saturada, além de estar na franja capilar, zonas com umidade muito alta, desta forma, diminuindo a eficiência da captação de gases e a volatilização do benzeno; e
- os pontos de injeção ocorreram no meio da pluma de benzeno, fazendo com que não abrangesse toda a contaminação, e o oxigênio dissolvido fosse consumido antes de atingir outras zonas da pluma de contaminação.

Apesar de se ter identificado valores de vácuo em alguns poços de monitoramento, e dada as altas concentrações de benzeno na água subterrânea, assim como no solo, não foram constatadas concentrações de vapor de benzeno na entrada do tanque de vácuo. Desta forma, algumas considerações podem ser feitas:

- as concentrações de vapor de benzeno identificadas nos primeiros meses de remediação podem estar relacionadas à presença deste vapor nos poros do solo e podem ter sido removidas nesses primeiros meses, indicando que, mesmo com pressão de vapor alta do benzeno, as suas ocorrências em fase dissolvida e residual não apresentaram altas taxas de transferência de massa para a fase vapor;
- a concentração máxima de vapores orgânicos (106 ppm), detectada em janeiro/2009, quando se iniciou a injeção de ar, pode ter ocasionado a transferência instantânea de massa, não sendo este o processo dominante na diminuição da pluma de benzeno. Essa situação é ainda justificada pela ausência de concentrações de vapor na entrada do tanque de vácuo nos últimos meses de remediação.

A ausência de vapor de benzeno, porém, com a diminuição da pluma de fase dissolvida, sugere que as concentrações podem ter diminuído por influência da ação microbiana aeróbica, de modo que a injeção de ar pode ter ocasionado o aumento dessa população na área. Como a diluição do oxigênio dissolvido (OD) na água subterrânea é um processo lento, a proliferação microbiana pode ter feito com que esta passasse a consumir o OD disponível na água subterrânea.

A ausência de vapores de benzeno também pode estar relacionada:

- ao nível d'água raso, em média 1,5 m de profundidade;
- ao índice pluviométrico alto durante o período de remediação e, desta forma, tendo-se uma contribuição para o aumento do teor de umidade no solo, contribuindo para a inibição da volatilização e, conseqüentemente, da extração dos vapores; e
- pela ocorrência de tubulações subterrâneas, bem como de utilidades públicas (galerias pluviais, bocas de lobo, etc.) que podem ter servido de condutos preferenciais na migração dos vapores.

Quanto aos parâmetros físico-químicos da água subterrânea, não foi possível estabelecer uma relação entre os seus resultados e a operação do sistema de AS/SVE.

Com os resultados pode-se averiguar que a pluma de benzeno diminuiu consideravelmente com a atuação integrada dessas técnicas, porém, após a finalização da operação do sistema de remediação, as concentrações desse contaminante voltaram a aumentar.

Apesar da remediação não ter sido eficiente na remoção completa da pluma de fase dissolvida de benzeno na área de estudo, demonstrado pela persistência de altas concentrações na água subterrânea e no solo pós-remediação, durante o período de operação da remediação, a pluma de benzeno foi contida, minimizando os riscos de contaminação a possíveis bens a proteger.

Apesar disso, deve-se considerar que o vazamento na tubulação de benzeno se deu na zona saturada, e se espalhou sob pressão atingindo unidades geológicas com distintas condutividades hidráulicas, tornado-se difícil a remoção do contaminante, principalmente nas unidades que possuem valores baixos de condutividade, tais como a argila.

Com base nos resultados obtidos por este estudo, recomenda-se que seja realizado um estudo hidrogeológico minucioso, incluindo a descrição detalhada das unidades geológicas, com a realização de análises granulométricas em toda a sondagem para auxiliar nas descrições realizadas em campo, visando à definição das características hidráulicas e litológicas, destacando-se aquelas onde ocorrerá maior fluxo de vapores e melhor injeção de ar, e a presença de camadas confinantes ou argilosas, que influenciem no fluxo de vapores e de ar;

Além disso, recomenda-se a caracterização do cenário de contaminação da área de interesse, para que estas informações sejam interpretadas e utilizadas no projeto de implantação do sistema de remediação, de forma que o sistema seja eficiente e eficaz na remediação.

13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY – ATSDR. *Toxicological Profile for Benzene*. U.S. Department of Health and Human Services, p. 382. 2007.

ALBERTO, M.C. Heterogeneidades Geológicas e o Gerenciamento de Áreas Contaminadas em Local Situado na Interface da Serra do Mar com a Planície Aluvionar do Rio Cubatão (Cubatão/SP). Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita- *campus* Rio Claro – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2010. p. 213.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API, *Groundwater Remediation Strategies Toll*. Regulatory Analysis & Scientific Affairs Department, API Publication N°. 4730, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT/NBR 15495, Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados Parte 1: Projeto e construção. 2009.

BOULDING, J. R.; GINN, J. S. Practical Handbook of Soil, Vadose Zone, and Groundwater Contamination - Assessment, Prevention, and Remediation. New York: Lewis Publishers, 548p. 1995

BROWN, R.A., HINCHEE, R.E., NORRIS, R.D, and J.T. WILSON. Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons: A Flexible, variable speed technology. *Biorem.* no. 4:95 -108, 1996.

BRUSSEAU, M.L., ROHAY, V. and TRUEX, M.J. *Analysis of Soil Vapor Extraction Data to Evaluate Mass-Transfer Constraints and Estimate Source-Zone Mass Flux.* *Ground Water Monitoring&Remediation.* vol 30, no.3 , p. 57 – 64. 2010

CETEC. Diagnóstico da situação dos recursos hídricos do Tietê/Batalha – UGRHI-16. São Paulo, p. 13-16 e 22-25, 2002.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Convênio CETESB/GTZ, 1999/2001.

_____. Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Água Subterrânea no Estado de São Paulo. Relatório Final. São Paulo, 2001.

_____. TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Valores Orientadores para Solos e Água Subterrânea no Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria nº195-2005-E. São Paulo, 2005. 4 p.

_____. O Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo. São Paulo, 2009, 9p.

_____. Texto Explicativo - Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo, 2011.14p.

_____. Ficha Técnica do Benzeno disponível em: http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=BENZENO&cod=BENZENO . Acesso em 03.01.2012.

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica; IG - Instituto Geológico; IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Mapa das águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000 nota explicativa / [coordenação geral Gerôncio Rocha]. Obra em 3 v. Inclui CD-ROM e mapa escala, São Paulo, 2005.

DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F. W. (1990) – *Physical and Chemical Hydrogeology*. Canada, 1990. 823p.

FETTER, C. W. *Contaminant Hydrogeology*. 2.ed. New York, Macmillan, 1999, 500p.

FETTER, C.W. *Applied Hydrogeology*. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 598p.

HASUI, Y. & SADOWSKI, G.R. Evolução geológica do Pré-Cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências* v. 6(3): p.180-200, 1976.

HIRATA, R.C.A. Amostradores de Vapores do solo (AVS): Desenvolvimento de uma Técnica para a Detecção de Águas Subterrâneas Contaminadas por Solvestes Orgânicos Voláteis, Estudo de Caso de Porto Feliz – São Paulo. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, 1990. p. 113.

HESSING, J. Estudos geológicos geotécnicos no trecho serra da Rodovia dos Imigrantes. In: Seminário DERSA Rodovia dos Imigrantes, 1, São Paulo: Anais, São Paulo, DERSA, p. 31-46, 1976

HVORSLEV, M. J. *Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes*. U. S. Army Corps of Engineers. Waterways Experimental Station. Vicksburg, Mississippi, 1949.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Programa Serra do Mar– Estudos Geotécnicos dos Principais Mecanismos de Instabilização na Serra do Mar. Relatório nº 25.957, 1976.

_____. Levantamentos Básicos nas folhas de Santos e Riacho Grande. Relatório nº 23.394, 1986.

_____. Reconhecimento e Caracterização da Potencialidade de Instabilizações na Serra do Mar na Área de Influência do Sistema Anchieta-Imigrantes, Relatório Final. São Paulo-SP. (Relatório Técnico n. 63885), 2002.

JI, W, DAHMANI, M.A, AHLFELD, D.P, LIN, J.D, Hill E. *Laboratory study of air sparging: air flow visualization*. Ground Water Monitor Remediation. 13:115–126. 1993

JOHNSON, R.L. In *Air Sparging for Site Remediation*. Hinchee, R. E., Ed.; Lewis Publishers: Boca Raton, FL, p. 14-22. 1994

KRISHNA, R.R., SIDUJA, K., JINNAN, Z. *A Review of In-Situ Air Sparging for the remediation of VOC-Contaminated Saturated Soils and Groundwater*. Hazardous Waste & Hazardous Materials. Volume 12, number 2, 1995. 97-118p.

LASKOWSKI, D.A, GORING, C.A.F, McCALL, P.J., SWANN, R. *Terrestrial environment*. In: CONWAY, R.A.(ed) *Environmental risk analysis for chemicals*. New York. Van Nostrand Reinhold Co, 1992. 198-240p.

MACHADO FILHO, J.G. Estabilidade de encostas e condicionantes geológicos, geomorfológicos e estruturais num trecho da Serra de Cubatão, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências/USP, 172p., 2000.

MONTGOMERY, J.H. *Groundwater Chemicals – Desk Reference. Fourth edition*. CRC Press, 2007. 1701p.

PETERSON, J.W., MURRAY, K.S., TULU, Y.I., Peuler, B.D., WILKENS, D.A. Air-flow Geometry in Air Sparging of Fine-Grained Sands. *Hydrogeology Journal*, Vol. 9, pp. 168–176, 2001.

SUGUIO, K. & MARTIN, L. Geologia do Quaternário. In: FALCONNI, F.F. & NIGRO JR., A. Solos do Litoral Paulista. ABMS/São Paulo, p. 69-97, 1994.

SUTHERSAN, S.S. *Remediation Engineering Design Concepts*. CRC Press LLC, 1999. p 322.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Basics Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction. Publ. EPA542-97-007, 1997.

_____. *How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites -A Guide for Corrective Action Plan Reviewers*, 2004.

U.S. Army Corps of Engineers (USARMY). Engineering and Design – Soil Vapor Extraction and Bioventing. Department of the Army. Wahington, D.C. No. 1110-1-4001, 1995. 254p.

_____. Engineering and Design – In Situ Air Sparging. Department of the Army. Wahington, D.C. No. 1110-1-4005, 2008. 192p.

WOLLE, C.M. Microescorregamentos na Serra do Mar. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, Anais, v.1: p. 773-785, 1981.