

Rhodia Poliamida e Especialidades Ltda.
(Solvay)
Antiga USA Chemicals
Av. Doutor Osvaldo Valter Avancini, s/n.
Bairro Palmital, Porto Feliz - SP

Atualização do Modelo Conceitual e Modelagem Hidrogeológica

Agosto, 2018

Referência: 0420000

Verificado por: Rogério Dudas

Coordenador do Projeto

Assinatura: _____

Autorizado por: Christopher Wilson

Sócio Responsável pelo Projeto

Assinatura: _____

Environmental Resources Management
Av. Eng. Luís Carlos Berrini, 105
Conj. 171 - Thera Corporate
Cidade Monções - São Paulo - SP - Brasil
(11) 5095-7900
www.erm.com

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	OBJETIVOS	3
1.2	LOCALIZAÇÃO	3
1.3	USO E OCUPAÇÃO DA ÁREA DO ENTORNO	4
1.4	HISTÓRICO DA ÁREA	4
1.5	HISTÓRICO AMBIENTAL DO SITE	6
2	MODELO CONCEITUAL	12
2.1	ASPECTOS HIDROLÓGICOS	13
2.2	GEOLOGIA	13
2.3	HIDROGEOLOGIA	15
2.4	CENTROS DE MASSA E SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS DE INTERESSE	17
2.5	RESUMO DO MODELO CONCEITUAL	21
3	MODELO DE FLUXO	23
3.1	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL	24
3.2	MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL	25
3.3	RESULTADOS DO MODELO TRIDIMENSIONAL DE FLUXO	32
3.4	SIMULAÇÕES DE CAMINHAMENTO DE PARTÍCULAS PARA DEFINIÇÃO DE ROTAS DE MIGRAÇÃO PREFERENCIAIS E ZONAS DE CAPTURA DE POÇOS	37
3.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DE FLUXO	47
3.6	RESUMO E CONCLUSÕES DO MODELO DE FLUXO E TRANSPORTE DE PARTÍCULAS	51
4	SIMULAÇÕES DE TRANSPORTE DE COMPOSTOS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA	52
4.1	PROGRAMAS UTILIZADOS	52
4.2	CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DAS LINHAS DE FLUXO E DOS COMPOSTOS	53
4.3	SIMULAÇÕES AO LONGO DE UMA LINHA DE FLUXO (BIOCHLOR)	56
4.4	SIMULAÇÕES DE REMEDIAÇÃO (PREMCHLOR)	69
5	CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES	75
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXO A	FIGURAS	
ANEXO B	INFORMAÇÃO TÉCNICA - CETESB	
ANEXO C	MODELO CONCEITUAL 3D	
ANEXO D	PERFIS LITOLÓGICOS POÇOS SIAGAS	
ANEXO E	TABELAS	
ANEXO F	PERFIS LITOLÓGICOS E CONSTRUTIVOS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO	
ANEXO G	DADOS HISTÓRICOS LINHAS DE FLUXO (1 E 5)	
ANEXO H	ART	
ANEXO I	DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE	
ANEXO J	PROCURAÇÃO	

INTRODUÇÃO

A ERM BRASIL LTDA. (ERM) foi contratada pela Rhodia Poliamida e Especialidades Ltda (SOLVAY) para elaborar a Atualização do Modelo Conceitual e Modelagem Hidrogeológica para a área onde, no passado, estava instalada a antiga USA Chemicals Indústria e Comércio Ltda. (USA Chemicals), localizada na Avenida Doutor Osvaldo Valter Avancini, s/n, Bairro Palmital, município de Porto Feliz, estado de São Paulo, Brasil.

Em termos gerais, o presente trabalho visa complementar os estudos realizados na área, fornecendo subsídios adicionais para melhor avaliação do projeto e tomada de decisões adequadas e eficientes para as etapas futuras. Dessa forma, nesse documento são apresentados os resultados da modelagem hidrogeológica computacional de fluxo e de transporte de solventes clorados em água subterrânea, assim como do refinamento do modelo conceitual, principalmente através da elaboração do modelo conceitual 3D e inclusão dos dados dos poços de captação d'água da região.

A modelagem hidrogeológica computacional é uma ferramenta bastante utilizada para se conhecer de forma mais assertiva o comportamento do fluxo de águas subterrâneas de uma região, permitindo também verificar como se comportam as substâncias químicas de interesse que eventualmente existam dissolvidas no aquífero em questão.

O modelo conceitual 3D utilizado para a atualização do modelo conceitual foi elaborado no programa MVS (*Mining Visualization System*), a partir das informações coletadas nos trabalhos ambientais realizados na área até o momento pela SOLVAY, assim como dos dados de poços tubulares de captação d'água da região, obtidos nas Informações Técnicas da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e/ou em banco de dados de órgãos públicos. O modelo conceitual 3D permite uma compreensão mais ampla e precisa das camadas geológicas, fluxo hidrogeológico e consequente alterações na qualidade dos meios envolvidos (vapor, solo e água subterrânea).

As atividades ambientais conduzidas na área onde se instalava a antiga USA Chemicals em Porto Feliz estão relacionadas aos Processos CETESB PA 61/00035/14 e visam atender as exigências do Despacho da CETESB, nº 356/CAAA/17, de 18/09/2017. Adicionalmente, o escopo do trabalho descrito no presente relatório foi apresentado e acordado com a CETESB em reunião realizada no dia 20 de setembro de 2017, com a presença de representantes da CETESB, SOLVAY e ERM.

1.1

OBJETIVOS

A atualização do modelo conceitual da área, através da criação do modelo conceitual 3D e inclusão dos dados dos poços tubulares de captação d'água do entorno da área, tem como objetivo integrar todos os dados coletados até o momento, para auxiliar a compreensão mais ampla e precisa da geologia, Fluxo hidrogeológico e conseqüentemente dos impactos presentes, reunindo em uma única plataforma todas as informações coletadas ao longo dos trabalhos ambientais efetuados na área pela SOLVAY e CETESB, facilitando sua visualização e auxiliando a tomada de decisões para etapas futuras.

A elaboração do modelo numérico de fluxo e transporte para a área em questão teve como principais objetivos:

- Reproduzir o padrão de fluxo das águas subterrâneas, em regime permanente, na área da antiga USA *Chemicals* e seu entorno;
- Estimar caminhos preferenciais dos compostos de interesse na água subterrânea a partir das fontes conhecidas e entender possíveis conexões com poços profundos na região;
- Estimar concentrações de compostos de interesse em receptores potenciais de interesse (rios e poços) no futuro, segundo linhas de fluxo definidas no modelo 3D (MODFLOW/MODPATH); e
- Avaliar e estimar os possíveis efeitos de medidas de remediação das áreas fontes nas concentrações futuras em receptores de interesse.

Vale ressaltar que além de atender as requisições da CETESB, efetuadas através do Despacho nº 356/CAAA/17, de 18/09/2017, conforme supracitado, os resultados do presente trabalho serão utilizados futuramente também como base para a elaboração do Plano de Intervenção para a área de interesse.

1.2

LOCALIZAÇÃO

A área da antiga USA *Chemicals* localiza-se a sudeste da cidade de Porto Feliz, na Avenida Doutor Osvaldo Valter Avancini, s/n, Bairro Avccuia, município de Porto Feliz, a 110 km da cidade de São Paulo.

O acesso à área pode ser feito pela Rodovia Marechal Rondon, Km 130, sentido Porto Feliz - Itu, de onde se toma um acesso por rua de terra, com cerca de 70 metros de extensão, até a Avenida Doutor Osvaldo Valter Avancini.

A Figura 01, Anexo A apresenta a localização da área de estudo.

A ocupação do entorno da área na qual era instalada a antiga *USA Chemicals* é de uso misto. As propriedades adjacentes e o uso do solo no entorno são descritos abaixo:

- Norte: áreas residenciais/rurais - (Chácara Estrela imediatamente a Norte, enquanto que as Chácaras Paula e Deck encontram-se do outro lado da Rodovia Marechal Rondon);
- Noroeste: área comercial (Galpão comercial atualmente desocupado/Antiga Chácara Ilhabela) e áreas residenciais/rurais (Antiga Chácara Casarão/atual São Francisco);
- Oeste: Galpão industrial (Porto Feliz 5/A)
- Sudoeste: área sem ocupação, com disposição de entulho;
- Sul: áreas residenciais/rural (Chácara da Vovó, Sítio Marabó, Recanto Güilger, Chácara Tomeyko) e afluente do Ribeirão Avecuia; e
- Leste: áreas residenciais/rurais (Chácara São Roque).

A Figura 02 (Anexo A) apresenta a ocupação do entorno imediato da área de interesse.

HISTÓRICO DA ÁREA

O histórico da área foi definido a partir das informações apresentadas nos relatórios elaborados pela *Sanifox* para os trabalhos realizados na área e entorno.

A antiga empresa *USA Chemicals* foi estabelecida na cidade de Porto Feliz em meados de 1982, em uma área na qual já existiam três tanques aéreos instalados na porção sul do *site*, cada um com capacidade de 500 metros cúbicos (m³), que, segundo informações obtidas pela *Sanifox* (*Sanifox* 2014a), eram utilizados para armazenamento de álcool etílico. A principal atividade declarada pela *USA Chemicals* para a área era a compra, estocagem e revenda de solventes orgânicos. A Licença de Instalação da CETESB (LI N° 031.059) foi obtida em 04 de novembro 1982, porém, para atividade de comércio de produtos de limpeza, óleos, solventes, tambores e produtos químicos, com a exigência de implantação de sistema de segurança para área de armazenagem. A Licença de Operação do empreendimento nunca foi emitida pela CETESB (*Sanifox*, 2017a).

Segundo dados obtidos pela *Sanifox* durante a Avaliação Preliminar (*Sanifox*, 2014a), a *USA Chemicals* ampliou o volume de tançagem da área para 13

tanques de armazenamento obtendo uma capacidade total de armazenamento de 3.950 m³ em 1983, instalada na região sul do *site*. Os tanques eram utilizados para armazenamento de produtos descritos como “hidrocarbonetos clorados leves e pesados”.

Em 25 de abril de 1983 a CETESB recebeu uma denúncia contra a USA *Chemicals*, sendo relatado que a mesma armazenava hidrocarbonetos clorados e álcool etílico em sua área, em tanques com capacidade variando entre 70 m³ e 400 m³. Na mesma data houve a constatação de morte de peixes no lago da Chácara Aricoan (atual Chácara da Vovó), localizada a sudeste da área ocupada pela USA *Chemicals*, na sub-bacia do ribeirão Aveçuia. Conforme relatado, a morte dos peixes foi associada a produtos químicos da USA *Chemicals*, devido ao odor característico observado na área e também pela identificação de “produtos polimerizados” aflorando em taludes da Chácara Aricoan. Após esta ocorrência, a Prefeitura de Porto Feliz solicitou providências junto a USA *Chemicals*, visto que as substâncias manipuladas pela mesma estavam atingindo as águas superficiais do manancial de abastecimento da cidade (Sanifox, 2017a).

Em 31 de maio 1983, após a ocorrência de uma forte chuva na região, houve um vazamento de produto estocado, devido a um choque de um caminhão com a válvula de um dos tanques aéreos. Segundo relatos e documentos, o volume deste vazamento variou entre 400 e 500 m³ e ocorreu na parte sul do *site*, com escoamento superficial para noroeste, em direção aos corpos d’água superficiais da antiga Chácara Casarão e Chácara Paula. O atendimento emergencial foi realizado pela CETESB, sendo possível a recuperação de aproximadamente 200 m³ de produto. Para tanto, foi construído na parte central do *site* um pequeno aterro revestido para a colocação do material contaminado, incluindo o solo retirado das drenagens por onde o produto escorreu e o lodo do fundo do açude da antiga Chácara Casarão.

A Figura 3 (Anexo A) apresenta a localização aproximada da antiga área de tancagem e do caminhamento superficial do produto no acidente ocorrido em 1983.

O volume total de resíduos estocado nos tanques da USA *Chemicals* de Porto Feliz em junho de 1983 (após o acidente de maio) era de aproximadamente 2.695 m³. Após ocorrência do vazamento, a CETESB, em conjunto com a Prefeitura de Porto Feliz e a Defesa Civil Municipal informaram à população vizinha e também às indústrias locais sobre o acidente ocorrido e a provável contaminação do afluente do Ribeirão Aveçuia e Ribeirão Pinheirinho. Outras medidas de segurança emergenciais foram tomadas para evitar um dano ainda maior, visto que água superficial do afluente do Ribeirão Aveçuia era utilizada para captação e abastecimento da cidade de Porto Feliz (Sanifox, 2017a).

A totalidade dos produtos armazenados na área foi removida em 07 de junho de 1985, após recebimento de diversas autuações e multas. Em vistoria da

CETESB realizada na área em 26 de novembro de 1985, foi verificada a total desmobilização dos tanques da *USA Chemicals*, no entanto, ainda restavam os tanques vazios do proprietário da área, que foram removidos posteriormente (Sanifox, 2017a).

Adicionalmente, vale a pena mencionar registros da existência, no passado, de um antigo poço tubular na área, localizado na antiga área de tancagem, o qual possivelmente funcionou como um caminho preferencial de impacto para o subsolo local. A existência desse poço tubular é citada na Tese de Mestrado Amostradores de Vapores do Solo (AVS): Desenvolvimento de uma Técnica para a Detecção de Águas Subterrâneas Contaminadas por Solventes Orgânicos Voláteis: Estudo de Caso de Porto Feliz – São Paulo, Universidade de São Paulo, Hirata (Hirata, 1990), sendo indicado nesse mesmo documento que a sua profundidade total era de 80 metros.

1.5

HISTÓRICO AMBIENTAL DO SITE

Os trabalhos ambientais na área da antiga *USA Chemicals* foram iniciados pela *Solvay* em outubro de 2013 e contemplaram desde a realização de avaliação ambiental preliminar e etapas de investigações confirmatórias e consequentes detalhadas em área interna e externa, até a avaliação de risco à saúde humana e estudos de intrusão de vapores nas chácaras do entorno.

Adicionalmente, a região de interesse também foi alvo de teses de mestrados e campanhas de monitoramento realizados pela CETESB, os quais são listados abaixo:

- Tese de Mestrado: Amostradores de Vapores do Solo (AVS): Desenvolvimento de uma Técnica para a Detecção de Águas Subterrâneas Contaminadas por Solventes Orgânicos Voláteis: Estudo de Caso de Porto Feliz – São Paulo, Universidade de São Paulo, Hirata (1990);
- Tese de Mestrado: Aplicação do Método *Phytoscreening* para Determinação de Hidrocarbonetos Clorados no Município de Porto Feliz – SP, Universidade Estadual Paulista, Ferraz (2013); e
- Campanhas de monitoramento realizadas pela CETESB no entorno da área da antiga *USA Chemicals*, realizadas em caráter preventivo, visando a identificação de impactos em pontos de captação de água para consumo humano, assim como subsidiar as ações de controle ambiental na região. Essas campanhas de monitoramento tiveram início em 1983, quando foi constatada alteração de qualidade no aquífero local, decorrente de acidente com vazamento e infiltração de solventes organoclorados (maio/1983), que eram armazenados/manipulados na área da Antiga *USA Chemicals*. No início, esses monitoramentos eram realizados anualmente, tendo sido alterados para periodicidade trimestral a partir de 2009 e semestral entre 2011 e 2013. Entre 2013 e 2015 os monitoramentos foram paralisados

temporariamente, devido aos trabalhos realizados pela SOLVAY no local. Os resultados dessas campanhas de amostragem são apresentados pela CETESB através de Informativos Técnicos a Agência Ambiental de Itu.

O Anexo B apresenta Informação Técnica mais recente elaborada pela CETESB, onde constam maiores informações sobre os pontos de captação d'água monitorados pela CETESB.

A Tabela 1.1 apresenta um resumo de todos os estudos realizados pela SOLVAY na área. Maiores detalhes dos resultados observados nesses estudos são também fornecidos a seguir.

Tabela 1.1 *Sumário do Estudos Ambientais Realizados na Antiga USA Chemicals*

Ano	Estudo	Resumo
Jan/2014	Avaliação Ambiental Preliminar Área da Antiga USA Chemicals em Porto Feliz - SP	Definição do histórico da antiga USA Chemicals e do modelo conceitual inicial, com identificação de 3 APCs (Área com Potencial de Contaminação): APC 01 - Porção central do terreno (valas com resíduos); APC 02 - Porção sul do terreno (antiga área de tancagem); APC 03 - Antigo poço tubular na antiga área de tancagem
Set/2014	Investigação Confirmatória Área da Antiga USA Chemicals em Porto Feliz - SP	Realização de 226 sondagens (3 m); 3 sondagens rotativas com testemunhos; 11 poços de monitoramento, incluindo 4 pares de multinível. Presença de VOC nas medições de vapores do solo e nas amostras de solo coletadas nas APC-02 e 03, sendo as mesmas reavaliadas como AC-01 (Área Contaminada). Presença de VOCs em concentrações superiores aos padrões de referência em grande parte dos poços de monitoramento instalados na área.
Jul/2015	Investigação Detalhada Antiga USA Chemicals em Porto Feliz - SP Área Interna	Foram realizadas 240 sondagens na AC-01 (que inclui APC 02 e 03) e coleta de 76 amostras de solo; 08 sondagens rotativas com testemunhos; instalação de 18 poços de monitoramento, incluindo 06 pares multiníveis. Foram detectados vapores no solo e maiores concentrações de VOCs na água subterrânea nas antigas áreas de tancagem. Presença de VOCs no solo em concentrações acima dos padrões de referência (AC-01). Os centros de massa das plumas de fase dissolvida estão restritas a antiga área de tancagem (AC-01).
Mai/2016	Investigação Detalhada com Integração da Área Externa Antiga USA Chemicals em Porto Feliz - SP	O escopo incluiu amostragem passiva por Beacon em 51 pontos; instalação de 10 poços de monitoramento de gases; 26 sondagens para reconhecimento geológico e análise de vapores; instalação de 10 poços de monitoramento de água subterrânea; ensaios de condutividade hidráulica. Na área externa, não foi verificado impacto no solo, porém foram detectados VOCs originários principalmente de contaminação da água subterrânea.
Dez/2016	Investigação Detalhada Complementar da Área Externa Antiga USA Chemicals em Porto Feliz - SP	Foi realizada amostragem passiva por Beacon; instalação de 20 poços de monitoramento, incluindo multiníveis, na área externa; amostragem de 04 pontos de água superficial do afluente do Ribeirão Avecuia. Na área externa, foi confirmada a existência de dois centros de massa isolados (PM-31 e PM-21)
Abr/2017	Investigação Detalhada Complementar das Zonas Norte e Sul na Área Externa e Respostas ao Despacho n.333/CAAA/16	O objetivo deste estudo foi ampliar a investigação da amostragem passiva por Beacon a norte da área. Foram instalados 03 poços de monitoramento na porção norte e 04 na porção sul. Não foi verificada contaminação por vapor na área norte, com exceção do ponto 22 que apresentou detecção de PCE, e os pontos 34 e 39 que apresentaram clorofórmio. Foi identificado centro de massa na área do PM-01, a noroeste do terreno, ainda na área interna.

Em janeiro de 2014 foi realizada pela Sanifox a Avaliação Ambiental

Preliminar na qual foi definida, de forma detalhada, o histórico da antiga USA Chemicals de Porto Feliz, incluindo a delimitação da área ocupada pela empresa e também a área do terreno usado como antiga área de tancagem, além de ter sido estabelecido um modelo conceitual inicial do site (relatório PR-94-13 – Avaliação Ambiental Preliminar – Antiga USA Chemicals em Porto Feliz, SP – Sanifox do Brasil, janeiro/2014). Neste estudo, apesar da ausência de registros de trabalhos ambientais anteriores, foi identificada a existência de 03 poços de monitoramento na área. A partir desse trabalho foram definidas 03 Áreas com Potencial de Contaminação (APCs), relacionadas a atividades pretéritas realizadas no local: APC 01 – Porção central do terreno (valas com resíduos); APC 02 – Porção sul do terreno (antiga área de tancagem); APC 03 – Antigo poço tubular na antiga área de tancagem.

Entre janeiro e junho de 2014 foi realizada uma **Investigação Ambiental Confirmatória** na área, com base nos resultados obtidos na Avaliação Ambiental Preliminar (Sanifox, 2014) (relatório PR-101-13 – Investigação Confirmatória – Antiga USA Chemicals em Porto Feliz, SP – Sanifox do Brasil, setembro/2014). Nesse trabalho foram realizadas 226 sondagens até 3,0 metros de profundidade para coleta de amostras de solo e medições de vapores no solo a cada metro através do PID, 03 sondagens rotativas com testemunhos de rocha e instalados 11 poços de monitoramento, compreendendo 04 pares de poços multinível e 03 poços simples. Na APC-01 não foi observada a existência de resíduo durante as sondagens realizadas, tampouco a presença de VOC nas medições de vapores no solo e alteração na qualidade das amostras de solo coletadas. Nas APC-02 e 03 foi detectada presença de VOC nas medições de vapores no solo nas 03 profundidades avaliadas, em pontos coincidentes com a antiga área de tancagem, onde ocorreu o acidente em 1983. Adicionalmente, os resultados analíticos das amostras de solo nessas APCs indicaram a presença de VOCs em concentrações acima dos padrões de referência comparados, entre os quais se destacaram o 1,1,2,2-tetracloroetano, 1,1,2-tricloroetano e 1,2-dicloroetano. Na água subterrânea coletada dos poços de monitoramento instalados foi detectada a presença de VOCs em concentrações acima dos padrões de referência distribuídas por quase toda a área, destacando-se o 1,1,2,2-tetracloroetano (1,1,2,2-PCE), 1,1,2-tricloroetano (1,1,2-TCE), 1,1-dicloroetano (1,1-DCE), 1,1-dicloroetano (1,1-DCE), 1,2-dicloroetano (1,2-DCE), benzeno, cis/trans-1,2-dicloroetano (cis-1,2-DCE e trans-1,2-DCE), cloreto de vinila (CV), clorofórmio, tetracloreto de carbono (TC), tetracloroetano (PCE) e tricloroetano (TCE). O modelo conceitual inicial para a área interna da antiga USA Chemicals foi atualizado, sendo definida apenas uma AC (Área Contaminada), denominada AC-01 e localizada na porção sul do terreno, na antiga área de tancagem, onde também existia um antigo poço tubular (antigas APC-02 e 03).

A **Figura 3 (Anexo A)** apresenta a localização da AC-01-Antiga área de tancagem, onde se localizavam as APC-02 e 03.

Em julho de 2015 foi realizada pela Sanifox uma **Investigação Detalhada** na

área interna da antiga *USA Chemicals*, a qual compreendeu o detalhamento dos centros de massa dos compostos de interesse na AC-01 (relatório PR-116-14 - Investigação Detalhada - Antiga *USA Chemicals* em Porto Feliz, SP - Sanifox do Brasil, julho/2015). Nesta etapa foram executadas, na AC-01, 240 sondagens em malha regular de 5 m x 5 m, sendo selecionadas 76 amostras de solo para realização de análises químicas. Adicionalmente, foram realizadas 08 sondagens rotativas com recuperação de testemunho para descrição hidrogeológica detalhada e instalados 18 poços de monitoramento, dentre eles alguns pares de poços multiníveis. Os resultados analíticos das amostras de solo coletadas indicaram a presença de concentrações acima dos padrões de referência aplicáveis para os mesmos VOCs identificados na etapa anterior, confirmando que o impacto no solo no interior do *site* ocorre de forma restrita à antiga área de tancagem (AC-01). As amostras de água subterrânea indicaram que as maiores concentrações nesse meio e os principais centros de massa também estavam relacionadas à antiga área de tancagem. Nesse trabalho foi identificada, até aproximadamente 45 metros de profundidade, a existência de 03 níveis distintos do aquífero, denominados de Níveis A, B e C.

Entre dezembro de 2015 e maio de 2016 foi realizada uma nova **Investigação Detalhada** na área de interesse, no entanto, como foco na área externa (relatório PR-145-15 - Investigação Detalhada com Integração da Área Externa - Antiga *USA Chemicals* em Porto Feliz, SP - Sanifox do Brasil, maio/2016). Nesse trabalho foram executadas as seguintes etapas, nas áreas externas a norte/nordeste e a sul do site: amostragem passiva de vapores com método *PSC-Beacon* em 51 pontos; instalação de 10 poços de monitoramento de gases no solo para amostragem pelo método TO-17; sondagens para amostragem de solo e análises químicas laboratoriais; instalação de 10 poços de monitoramento de água subterrânea; amostragem pelo método TO-17 para avaliação de vapores no solo; amostragem de água subterrânea, e; ensaios de condutividade hidráulica. Os resultados das amostragens passivas de vapores pelo método *Beacon* e pelo método TO-17 indicaram que as anomalias obtidas de vapores são predominantemente originadas a partir da volatilização dos compostos de interesse na água subterrânea. As amostras de solo coletadas nas sondagens ST-02, 03, 04, 05, 06 e 17, localizadas a norte/noroeste do site detectaram a presença de 1,2-dicloroetano e cloreto de vinila em concentração acima dos padrões de referência para cenário industrial. Os resultados analíticos das amostras de água subterrânea indicam que as plumas avançam para a área externa, a norte e sul do site, e que 90% da massa de VOCs presente no aquífero está contido no Nível A.

No segundo semestre de 2016 foi realizada pela Sanifox uma **Investigação Detalhada Complementar** na área externa da antiga *USA Chemicals* (relatório PR-170-16 - Investigação Detalhada Complementar da Área Externa - Antiga *USA Chemicals* em Porto Feliz, SP - Sanifox do Brasil, dezembro/2016). Os trabalhos foram concentrados a noroeste, oeste e sul do *site*, sendo realizado o seguinte escopo: amostragem passiva de vapores com método *PSC-Beacon* em 40 pontos na área externa da porção sul do terreno; instalação de 20 novos poços de monitoramento de água subterrânea, incluindo-se poços na área

interna e externa; amostragem de água subterrânea em todos os poços de monitoramento da área, e; amostragem de água superficial em 04 pontos do córrego localizado ao sul do site (afluente do Ribeirão Avecunha). Os novos poços de monitoramento instalados indicaram a presença de 02 centros de massa pontuais localizados na área externa, sendo um na região do poço PM-31, a oeste da antiga USA *Chemicals*, e o outro na região do poço PM-21, ao sul da área. A amostragem de água do córrego localizado a sul do site indicou a presença de VOC no ponto intermediário PT-02, equivalente ao Ponto 49 monitorado pela CETESB, enquanto que, no ponto de amostragem PT-03 foram detectadas concentrações de 1,2-dicloroetano, tetracloreto de carbono, tetracloroeteno e tricloroeteno acima do padrão CONAMA 357 para água doce, classe 2. O ponto amostrado mais a jusante (PT-04) apresentou concentrações dentro dos padrões da Resolução CONAMA 357, água doce, Classe 2.

No primeiro semestre de 2017 foi realizada uma **Investigação Ambiental Complementar** na área externa, mais precisamente nas porções a noroeste e sul do site (apresentada no relatório PR-185-17 - *Investigação Detalhada Complementar das Zonas Norte e Sul na Área Externa e Respostas ao Despacho N 333/CAAAA/16 - Antiga USA Chemicals em Porto Feliz, SP - Sanifox do Brasil, abril/2017*). Essa investigação teve como objetivos: ampliar a investigação da área norte com a utilização de amostragem passiva de vapores (PSG) *Beacon* na faixa de servidão da rodovia Marechal Rondon e na Rua Batatais; delimitar as plumas na área ao norte do terreno da Antiga USA *Chemicals* (faixa de servidão da rodovia Marechal Rondon), e; delimitar as plumas na área da porção externa ao sul a jusante do poço PM-37. Segundo o relatório referente a esses serviços, as plumas de fase dissolvida foram delimitadas em todas as direções. Nesse estudo foram coletadas também amostras de água superficial nos mesmos pontos realizados na etapa anterior, sendo que não foram detectadas concentrações acima dos limites de quantificação do método utilizado pelo laboratório para todas as SQIs (substâncias químicas de interesse).

Em 2018 foi realizada pela ERM uma **Avaliação de Riscos à Saúde Humana (ARSH) e Estudo de Intrusão de Vapores (VI)** na área da antiga USA *Chemicals* e entorno (Avaliação de Riscos à Saúde Humana e Estudo de Intrusão de Vapores, ERM do Brasil, agosto, 2018). A ARSH I teve como objetivo quantificar os riscos potenciais à saúde humana, além de determinar as Concentrações Máximas Aceitáveis (CMAs) para os compostos de interesse, enquanto que o VI teve como objetivo avaliar a potencial volatilização e migração das SQIs do solo e da água subterrânea para o ar do ambiente interno das edificações existentes no entorno do *site*, tendo contemplado as seguintes áreas: (1) Galpão comercial (a noroeste); (2) Chácara Estrela (a norte); (3) Chácara da Vovó (ao sul), (4) Antiga Chácara Casarão; (5) Chácara Paula, e (6) Chácara Deck. Nessa campanha foram instalados 02 poços de monitoramento de vapores e 07 pontos de amostragem de vapores no contra-piso. Com base nos resultados da ARSH e VI, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Observa-se que para o cenário de ocupação hipotético comercial/industrial os riscos teóricos acima dos limites para as vias de exposição associadas ao solo encontram-se principalmente na região da antiga área de tancagem (AC01). Com relação a água subterrânea, os riscos teóricos acima dos limites para as vias de exposição associadas a água subterrânea abrangem as áreas sul, central e oeste do site;
- Para o cenário de ocupação hipotético residencial os riscos teóricos acima dos limites para as vias de exposição associadas ao solo encontram-se principalmente na região da antiga área de tancagem (AC01), e ao norte do site, além do ponto ST-58. Com relação a água subterrânea, os riscos teóricos acima dos limites para as vias de exposição associadas a água subterrânea abrangem as áreas sul, central e oeste do site, e ao norte no PM-01, além da área *off-site* ao sul que se encontra atualmente desocupada;
- O cenário de intrusão de vapores para estes receptores (Galpão comercial, Chácara Estrela – a norte, e Chácara da Vovó - a sul) foi avaliado a partir da instalação de pontos de amostragem de vapores sob o contra-piso (Galpão comercial, e Chácara da Vovó) ou de vapores do solo (Chácara Estrela) como parte do estudo de VI. Não foram detectadas concentrações das principais SQIs do site (CVOCs) e nenhuma concentração foi detectada acima dos valores de referência utilizados no Galpão e na Chácara da Vovó;
- Na Chácara Estrela apenas o benzeno foi detectado no ponto amostrado SG-01B, acima do valor de referência da USEPA (2018), porém abaixo do valor de referência determinado pela calculadora *on-line* (J&E Lite). Ressalta-se que não foi detectado benzeno nos poços de vapores instalados e amostrados pela Sanifox em 2016 (Sanifox, 2016, Ref.: PR-145-15), dessa forma, considera-se improvável que esta detecção seja proveniente da contaminação presente na área;
- Na Antiga Chácara Casarão não foram detectadas concentrações das principais SQIs do site (CVOCs) e nenhuma concentração foi detectada acima dos valores de referência. Na Chácara Deck não foram detectadas concentrações das SQIs acima dos valores da USEPA (2018) nem da calculadora *on-line* (J&E Lite); e
- A Chácara Paula também estava contemplada no escopo do estudo de VI, porém a instalação de pontos de amostragens nesta chácara não pode ser realizada por indisponibilidade dos proprietários da área, entretanto os resultados obtidos no estudo de VI não apontam para a necessidade de complementação do estudo nesta chácara.

Vale a pena mencionar também que foram realizadas no segundo semestre de 2017 e primeiro semestre de 2018, pela Sanifox, campanhas de amostragens de água subterrânea em toda a rede de poços de monitoramento da área, sendo os relatórios apresentados semestralmente pela SOLVAY.

A Figura 04, Anexo A, apresenta a localização das amostras de solo coletadas nos trabalhos acima, cujas concentrações ficaram acima dos padrões de referência comparados, enquanto que a Figura 05 (Anexo A) apresenta a malha de poços de monitoramento instalada no período de 2014 a 2017. Os poços de vapores instalados pela Sanifox e pela ERM na área e entorno são apresentados na Figura 06 (Anexo A).

A Figura 07, Anexo A, apresenta a rede de pontos de captação de água monitorados historicamente pela CETESB no entorno do *site*.

2

MODELO CONCEITUAL

Essa seção apresenta um resumo do modelo conceitual da área, definido a partir dos trabalhos ambientais realizados pela Sanifox na área de interesse e entorno (Sanifox 2014b, 2015, 2016a, 2016b, 2017a e 2017b), e refinado através do desenvolvimento de um modelo tridimensional (3D). Para o modelo 3D foram considerados também os poços de captação d'água existentes no entorno do *site*, entre eles os poços cacimbas e tubulares das chácaras e indústrias, cujos dados foram obtidos através de bancos de dados de órgãos públicos (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) – Sistema de Informações de Água Subterrânea (Siagas)), das teses de mestrado e dos documentos da CETESB (Informações Técnicas referentes as campanhas de amostragem), citados anteriormente.

O modelo conceitual em 3 dimensões possibilita uma compreensão mais ampla e precisa das camadas geológicas, fluxo hidrogeológico e, conseqüentemente, dos impactos presentes na área.

Para a elaboração do modelo tridimensional foi utilizado o *software* MVS Pro®, desenvolvido pela empresa Ctech. Anteriormente ao início do modelo, foi obtida imagem aérea de alta resolução por meio de sobrevoo com *drone*, utilizada como base para a definição mais precisa da topografia da área de interesse, auxiliando a visualização detalhada dos estabelecimentos existentes no *site* e entorno imediato.

O Anexo C apresenta um relatório de figuras obtidas a partir do modelo conceitual 3D elaborado para a área através do MVS. As imagens desse anexo são ilustrativas e estáticas, de forma que para total compreensão do modelo conceitual recomenda-se a visualização dos resultados contidos nos arquivos com a extensão “.4d”, os quais estarão também disponíveis no Anexo C.

Ressalta-se que, para a visualização interativa dos modelos deve ser utilizado o *software* que se denomina ‘*Standalone 4DIM Player Installation*’, que é obtido através do seguinte link: <<https://client.ctech.com/>>.

Em termos hidrológicos, o rio Tietê é o principal curso d'água que atravessa o território de Porto Feliz, representando, portanto, o fluxo de base regional. O Município enquadra-se na Unidade de Recursos Hídricos Médio Tietê-Sorocaba (UGRHI - 10). O Ribeirão Avecuia, afluente do rio Tietê pela margem esquerda, é o único manancial superficial viável hoje em dia para o abastecimento de água para Porto Feliz (Plano Diretor de Porto Feliz, 2009).

A área de estudo está localizada no divisor de águas das sub-bacias do córrego Pinheirinhos, ao norte do empreendimento e de afluente do Ribeirão Avecuia (ao sul), ambos afluentes do rio Tietê.

Localmente, existem pequenos corpos d'água superficiais em algumas chácaras no entorno da área de interesse.

A Figura U3 (Anexo A) apresenta a localização dos principais corpos d'água superficiais existentes no entorno imediato da área.

Geologicamente a área encontra-se inserida na borda nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, Grupo Tubarão. O Grupo Tubarão é composto pelo Subgrupo Itararé e pelas Formações Tietê, Tatuí e pequenas áreas de sedimentos da Formação Irati, rochas básicas do Mesozóico e depósitos do Cenozóico.

O Grupo Tubarão apresenta testemunhos da glaciação ocorrida no permocarbonífero e de ingressões marinhas, sendo que os paleoambientes geradores desses depósitos apresentam muitas variações, tanto verticais como horizontais, o que torna a subdivisão do grupo muito difícil (IPT, 1981).

O Subgrupo Itararé apresenta-se em São Paulo como uma complexa associação de várias litofácies, quase todas detríticas, que se sucedem verticalmente e horizontalmente, de maneira mais ou menos rápida. (IPT, 1981). As litologias correspondem ao registro do período glacial permocarbonífero na Bacia do Paraná, que compreende ambientes terrestres a marinhos relativamente profundos, envolvendo processos geradores de diversas fácies sedimentares, que não possuem significativa continuidade lateral, fator este que contribui para a dificuldade de se estabelecer subunidades e correlações estratigráficas de grandes extensões na área (ARAB, et al. 2009).

São também característicos do Subgrupo Itararé os sedimentos rítmicos, em que se alternam em estratificação plano paralela, arenitos finos, siltitos cinza

claro e folhelhos cinza mais escuros, sendo referidos geralmente como varvitos, representando acúmulos em lagos com superfície periodicamente gelada (IPT, 1981).

A Figura 08, Anexo A, apresenta o mapa geológico regional.

2.2.2

Geologia Local

De acordo com as informações obtidas nos relatórios referentes as etapas de investigação conduzidas na área e entorno pela Sanifox, entre 2014 a 2018, é verificada no *site* a presença de afloramento de arenitos silto-argilosos de coloração vermelha e amarela e argilitos de cor cinza clara e médio, de forma fragmentada em superfície, em função de alteração intempérica.

Adicionalmente, as sondagens rotativas realizadas na área durante esses trabalhos indicam a grande complexidade/heterogeneidade da geologia local, sendo possível observar os seguintes litotipos na área, do topo para a base:

- Solo de alteração silte argiloso a silte arenoso, cor marrom, localmente argila siltosa com porções de silte marrom, em geral com espessura máxima 3,0 metros localmente na porção sudeste atingindo espessura máxima de até 18 metros;
- Argilito cinza claro a escuro muito compacto, alterado no topo, de cor bege, muitas vezes fraturado;
- Arenito siltoso amarelado com lentes centimétricas a decimétricas de argilito bege alterado, de espessura métrica;
- Arenito cinza claro com lentes argilosas subordinadas transitando para níveis mais arenosos, de textura movimentada e maciço na base, ora com estratificação plano paralela, de espessura superior a 10 metros;
- Arenito fino a médio bege claro a avermelhado, localmente pode ocorrer oxidado com porosidade e níveis centimétricos a decimétricos de areia média a grossa, friável e homogêneo. A espessura da camada é bastante variável, entretanto, geralmente é superior a 10 metros; e
- Localmente, mais precisamente na porção sul/sudeste da área (PM-22B e PM-33B) foi observada a presença de rocha pouca ou não alterada (provavelmente diabásio), sugerindo que essas sondagens interceptam rochas intrusivas básicas tabulares que ocorrem sotopostas aos arenitos da Formação Itararé. Fragmentos dessas rochas intrusivas básicas também foram observados em superfície, na porção sul-sudeste da área após um serviço de terraplenagem na área externa, sugerindo que nessa área já se observa o contato da base da Formação Itararé com as rochas da formação subjacente.

Conforme supracitado, as sondagens realizadas permitiram identificar a existência de fraturas nas rochas sedimentares existentes na área. Dessa forma, a Sanifox realizou avaliação das condições de circulação da água no maciço, sendo observados os tipos de porosidade, fraturamentos e diferentes tipos de fraturas. Nessa avaliação foi diferenciada, pela caracterização dos testemunhos de sondagem, a presença de quatro tipos de fraturas: fraturas sub horizontais, sub verticais, com preenchimento ou sem preenchimento. Usualmente as fraturas observadas com preenchimento por óxido de manganês são fraturas fechadas com baixa ou nenhuma circulação de água subterrânea ou de percolação. Em contrapartida, as fraturas com superfície bem definida sem impregnações ou oxidadas, são observadas geralmente abertas e permitem a circulação da água, favorecendo a formação de zonas de alteração evidentes (Sanifox, 2017a).

As Figuras 09 e 10 (Anexo A) mostram representações da geologia local por meio de seções geológicas elaboradas pela Sanifox e apresentadas no relatório PR-185-17 – Investigação Detalhada Complementar das Zonas Norte e Sul na Área Externa e Respostas ao Despacho N 333/CAAAA/16 – Antiga USA Chemicals em Porto Feliz, SP - Sanifox, abril/2017.

As informações de descrições geológicas dos poços tubulares existentes nos arredores da antiga USA Chemicals, obtidas junto ao CPRM indicaram que as rochas sedimentares ocorrem na região até uma profundidade de aproximadamente 450 metros, quando é encontrado o embasamento local, composto por granito. As rochas sedimentares são compostas basicamente por intercalação de espessas camadas horizontais a sub-horizontais de material mais permeável (arenitos) e camadas menos permeáveis (siltitos e argilitos). Destaca-se que não foram encontrados dados dos perfis construtivos e litológicos para todos os poços tubulares, dificultando a compreensão mais detalhada da geologia em maiores profundidades.

No Anexo C são apresentadas seções geológicas da área, obtidas no modelo tridimensional, com a representação da litologia dos poços de produção existentes no entorno. Os perfis, obtidos no site Siagas, são apresentados no Anexo D.

2.3 *HIDROGEOLOGIA*

2.3.1 *Hidrogeologia Regional e Local*

Em termos regionais, os sedimentos do grupo Itararé sustentam um aquífero de baixa potencialidade e grande heterogeneidade horizontal e vertical, sendo classificado como do tipo livre em algumas áreas e semi confinado em outras (Hirata,1990).

As investigações realizadas pela Sanifox mostraram que o terreno onde estava instalada a antiga USA Chemicals situa-se sobre um divisor de águas local, com vertentes para norte e sul. Os poços de monitoramento instalados apontam que, em geral, no interior da área, o aquífero apresenta baixas permeabilidades, armazenamentos localizados e uma alta complexidade em função das anisotropias causadas pelos fraturamentos e controle litológico. Na região a água flui pela porosidade primária geralmente associada aos sedimentos de granulação mais grosseira e friável (Sanifox, 2015), e pela porosidade secundária das rochas consolidadas em zonas de fraturamento mais intensos.

O aquífero local apresenta caráter semi confinado, sendo caracterizado por lentes de arenitos finos com pequenas espessuras (decimétricas a, no máximo, métricas), que encontram-se semi confinadas por camadas geralmente muito mais espessas, compostas por argilitos (Sanifox, 2014b). A partir do contexto hidrogeológico elaborado, foi possível estabelecer 03 níveis do aquífero até a profundidade investigada (aproximadamente 45 m), denominados de: raso (Nível A), intermediário (Nível B) e profundo (Nível C). Esses níveis possuem certa lateralidade na sua disposição, sendo, da base para o topo: Os arenitos finos a médios beges, ora homogêneos; os arenitos cinzas maciços na base; e os argilitos no topo.

Ainda segundo a Sanifox, de modo geral foi possível observar que as zonas de saturação ou níveis aquíferos principais estão colocados preferencialmente no topo dos arenitos cinzas (Nível A) e no topo dos arenitos beges (Nível B), sendo que este último nível apresentou uma maior densidade de fraturamento e ou indicação de movimentação de água.

Dados obtidos até o momento indicam que o Nível A possui nível d'água médio de 10 metros e características de um aquífero freático, com condicionamento suspenso e provável zona de descarga o córrego ao sul da área (afluente do Ribeirão Avecuia). A porção central da área, no nível A, aparece como um divisor hídrico das águas subterrâneas (Sanifox, 2017a). No nível intermediário (Nível B) a profundidade média do nível d'água é de 20 metros e na porção central da área ainda prevalece a feição do divisor de águas da área. Este nível possui características de um aquífero semi confinado a freático (Sanifox, 2017a). O nível C, representado até o momento apenas por um poço de monitoramento (PM-07C), apresenta nível d'água de 33,76 m (Sanifox, 2017a). Tal nível apresenta características semi confinantes na área de estudo.

A heterogeneidade/complexidade hidrogeológica da área de interesse pode ser verificada pela possível existência de descontinuidades nos sistemas aquíferos da região, onde, pontualmente, uma sondagem (SR-01) realizada pela Sanifox em 2015, no centro da área (porção mais elevada), perfurou toda a seção com 41,5 metros e não interceptou nenhum nível saturado o suficiente para a instalação de um poço. Apesar da identificação de fraturamentos a cerca de 27 metros de profundidade, com a presença de fraturas abertas, não

foi obtida a sustentação de níveis hidráulicos nesta posição (Sanifox, 2015).

Os níveis do aquífero supracitados são sustentados por rochas de consistência geralmente maciça. Testemunhos de sondagem de rocha demonstram a ocorrência de fraturas verticais ou sub-verticais descontínuas, em escala decimétrica e métrica, que condicionam o fluxo de água subterrânea. As fraturas horizontais predominam na área de interesse em relação às verticais, apresentam continuidade lateral limitada e configuram zonas de baixas permeabilidades ou até zonas sem fluxo, que tendem a formar zonas de contaminação mais concentrada com muito baixa mobilidade.

Ensaio de condutividade hidráulica (k) realizados pela Sanifox em novembro de 2016 mostram que os valores de k são, em média, em torno de $1,2 \times 10^{-4}$ cm/s para os arenitos (aquíferos) e de $1,2 \times 10^{-5}$ cm/s para os argilitos (aquitardes), mostrando uma diferença de apenas uma ordem de grandeza entre a formação mais permeável e a mais impermeável. Os resultados de condutividade hidráulica para cada poço analisado neste estudo são apresentados na Tabela 01, Anexo E.

O mapas potenciométricos dos dois níveis A e B, elaborados com os dados coletados na campanha de monitoramento realizada em março/abril de 2017 (Sanifox, 2017a), são apresentados nas Figuras 11 e 12 (Anexo A), respectivamente.

A interação dos níveis mais rasos do aquífero local, com os níveis mais profundos, cujas informações foram obtidas com os dados litológicos dos poços de produção do entorno, são descritas de forma mais detalhada nas seções de modelagem hidrogeológica de fluxo.

2.4

CENTROS DE MASSA E SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS DE INTERESSE

Basicamente, de acordo com os trabalhos realizados pela Sanifox na área, o processo de infiltração dos produtos para a subsuperfície ocorreu primeiramente a partir da área de tancagem, denominada como AC-01, localizada na porção sul da área da antiga USA Chemicals, onde inclui-se o poço artesiano existente nessa área no passado. Infiltrações secundárias para a subsuperfície provavelmente aconteceram também nas áreas dos PM-01 e 31, devido a acumulo de produto na superfície no momento que foram realizadas as ações emergenciais de contenção do mesmo por conta do acidente ocorrido em 1983.

A Figura 03 (Anexo A) apresenta a localização aproximada da AC-01.

Vale destacar que, conforme indicado no histórico de trabalhos ambientais para a área, previamente a realização das sondagens e poços de monitoramento na área externa e na porção leste da área interna era efetuada uma amostragem passiva de vapores com metodologia da *Beacon*, visando

identificar preliminarmente a presença de VOCs em forma de vapor e direcionar a locação das sondagens e poços de monitoramento.

2.4.1

Solo

A partir dos resultados das investigações realizadas até o momento, foi verificado que os impactos em solo (industrial) se concentram, principalmente, na antiga área de tançagem (AC-01) e no limite norte do *site* (área interna e externa), em profundidades variando entre 1 e 3 metros. Adicionalmente, de forma pontual, concentrações acima dos padrões de referência (industrial) também ocorrem na porção central e leste da área. Os compostos detectados em concentrações acima dos padrões de referência são: alumínio, 1,1,2,2-tetracloroetano, 1,1,2-tricloroetano, 1,1-dicloroetano, 1,2-dicloroetano, 1,2-dicloroeteno (cis+trans), benzeno, clorofórmio, tetracloreto de carbono, cloreto de vinila, tetracloroeteno e tricloroeteno.

De acordo com a Avaliação de Risco à Saúde Humana, foram identificadas concentrações acima das concentrações máximas aceitáveis (CMAs) para os seguintes compostos:

- Cenário hipotético Comercial/Industrial *on site*:
 - 1,1,2-tricloroetano, 1,2-dicloroetano e clorofórmio - inalação de vapores em ambientes abertos e fechados.
- Cenário hipotético Residencial *on site*:
 - alumínio - ingestão de solo superficial; e
 - 1,1,2,2-tricloroetano, 1,1,2-tricloroetano, 1,2-dicloroetano e clorofórmio - inalação de vapores a partir do solo subsuperficial em ambientes abertos e fechados.

A Figura 13, Anexo A, apresenta as sondagens com amostras de solo com presença de compostos em concentrações acima dos padrões de referência. As sondagens destacadas tiveram concentrações de VOC maiores que os valores da lista de referência da CETESB (2016).

2.4.2

Água Subterrânea

De acordo com as campanhas de amostragem realizadas na área, as principais substâncias de interesse detectadas nas amostras de água subterrânea são: 1,1-dicloroetano, 1,1-dicloroeteno, 1,2-dicloroetano, 1,1,2-tricloroetano, 1,1,2,2-tetracloroetano, benzeno, cis/trans-1,2-dicloroeteno, cloreto de vinila, clorofórmio, tetracloreto de carbono, tetracloroeteno e tricloroeteno.

As plumas de fase dissolvida apresentam 04 centros de massa distintos, sendo 02 em área interna e 02 em área externa. Os centros de massa da área interna são localizados: 1) na antiga área de tancagem (AC-01), associadas as infiltrações ocorridas a partir de vazamentos ocorridos nesse local, e; 2) na região do PM-01, limite noroeste da área, associado a ações de contenção realizadas para impedir o escoamento superficial do produto durante os acidentes que ocorreram no passado, e que, no entanto, permitiram o acúmulo e infiltração de produto para a subsuperfície nesse local. Essa mesma ação de contenção de produtos em superfície é possivelmente responsável pelo centro de massa existente na região a oeste da área (PM-31), fora da área da Antiga USA Chemicals.

A localização aproximada dos centros de massa é apresentada na Figura 14 (Anexo A).

Com relação a distribuição espacial dos impactos em água subterrânea, é possível concluir que a massa de compostos de interesse em fase dissolvida no nível A é maior, se comparada aos níveis inferiores, sendo indicado em relatórios anteriores da Sanifox que o nível B do aquífero apresenta, em geral, concentrações até 90% menores que as observadas no nível superior.

De acordo com a Sanifox (2017a), a presença de impacto no poço PM-07C é decorrente da infiltração de produtos no antigo poço tubular, localizado na antiga área de tancagem (AC-01), que "funcionou" como um caminho preferencial, independentemente da predominância dos padrões de migração horizontal observados na área.

Os dados de campo obtidos nos trabalhos realizados, relacionados as amostragens de solo, sondagens rotativas e amostragem de água subterrânea não evidenciaram a presença de DNAPL (*Dense Non Aqueous Phase Liquid*) na área.

As plumas de compostos em fase dissolvida para 1,2 DCA, 1,1,2 TCA, clorofórmio e TCE, elaboradas pela Sanifox, para os níveis A e B do aquífero, com os dados de novembro de 2017, são apresentadas nas Figuras 15-18, Anexo A.

As campanhas de amostragem realizadas pela CHITESB em pontos de captação d'água localizados no entorno do site indicam a presença de alguns SQI em poços cacimba e tubulares de chácaras e indústrias amostrados. Desses poços, destacam-se os poços cacimbas da Chácara da Vovó, Chácara Estrela, Chácara Paula e Chácara Deck, e os poços tubulares da Antiga Chácara Casarão e da indústria Porto Feliz S/A. Segundo modelo conceitual, a presença de SQI nos poços das chácaras são decorrentes dos processos de migração das plumas de fase dissolvida nos níveis superiores do aquífero. No entanto, resultados da modelagem hidrogeológica realizados no presente trabalho e apresentado posteriormente no Item 3, indicam que processos naturais de movimentação das plumas de fase dissolvida não impactariam os poços tubulares profundos

da Porto Feliz S/A. Dessa forma, ainda de acordo com a modelagem hidrogeológica, uma possível explicação para a origem desses compostos na Porto Feliz S/A seria através do bombeamento das plumas de fase dissolvida em níveis rasos, aliados a migração descendente através desses poços tubulares para níveis mais profundos, atingindo assim os poços localizados nessa indústria. As associações das concentrações observadas nos poços de tubulares das áreas vizinhas ao site, com as plumas de fase dissolvida dos níveis rasos serão melhor discutidas na seção de modelagem hidrogeológica de fluxo.

Os resultados analíticos de TCE dos poços de monitoramento instalados pela Sanifox foram incluídos no modelo MVS, de forma a permitir a visualização tridimensional da pluma de fase dissolvida. Adicionalmente, os resultados de TCE obtidos pela CETESB foram incluídos também no modelo tridimensional. O Anexo C apresenta visualizações das plumas de TCE com os resultados pontuais dos poços de produção regionais.

De acordo com a Avaliação de Risco à Saúde Humana realizada para a área em 2018, foram identificadas concentrações acima das CMA para os seguintes compostos:

- Cenário hipotético Comercial/Industrial *on-site*:
 - Inalação de vapores a partir da água subterrânea em ambientes abertos e fechados - 1,1,2,2-tetracloroetano, 1,1,2-tricloroetano, clorofórmio, tetracloreto de carbono e tricloroetano.
- Cenário hipotético Residencial *on-site*:
 - Inalação de vapores a partir da água subterrânea em ambientes abertos e fechados - 1,1,2,2-tetracloroetano, 1,1,2-tricloroetano, 1,1-dicloroetano, 1,2-dicloroetano, cloroeto de vinila, clorofórmio, tetracloreto de carbono e tricloroetano.

2.4.3

Vapor

Conforme indicado anteriormente, foi realizada pela ERM em 2018 a coleta de vapor no subsolo através de pontos de amostragens instalados no contra-piso e/ou poços de vapores nas chácaras área (Chácara Casarão, Chácara Estrela, Chácara Deck e Chácara da Vovó). Nessas amostras não foram detectadas concentrações de VOC acima dos valores de referência utilizados para comparação.

Adicionalmente, a Sanifox instalou, em 2016, 10 poços de monitoramentos de vapores na área interna e externa do site, sendo detectados os seguintes compostos nas amostras coletadas em alguns desses poços em concentrações acima dos limites de quantificação do método/aparelho utilizado pelo laboratório: 1,1-dicloroetano, 1,1-dicloroetano, 1,2-dicloroetano, 1,1,2-

tricloroetano, 1,1,2,2-tetracloroetano, benzeno, cis/trans-1,2-dicloroeteno, cloreto de vinila, clorofórmio, tetracloreto de carbono, tetracloroeteno e tricloroeteno.

2.5

RESUMO DO MODELO CONCEITUAL

A Tabela 02, Anexo E apresenta o modelo conceitual dos impactos em área interna e externa, atualizados de acordo com o relatório da Sanifox (2017a). As Figuras 19 e 20, Anexo A apresentam seções esquemáticas com o resumo do modelo conceitual da área.

Segue abaixo um resumo dos itens apresentados acima, relacionados ao modelo conceitual da área:

Geologia e Hidrogeologia

- As sondagens rotativas realizadas na área durante esses trabalhos indicam a grande complexidade/heterogeneidade da geologia local, sendo a mesma composta por rochas sedimentares com presença de fraturas;
- Regionalmente e em maior profundidade, as informações de descrições geológicas dos poços tubulares existentes nos arredores da antiga USA Chemicals obtidas junto a CPRM indicaram que as rochas sedimentares ocorrem na região até uma profundidade de aproximadamente 450 metros, quando é encontrado o embasamento local, composto por granito. As rochas sedimentares são compostas basicamente por intercalação de espessas camadas horizontais a sub-horizontais de material mais permeável (arenitos) e camadas menos permeáveis (siltitos e argilitos);
- As investigações realizadas pela Sanifox mostraram que o terreno onde estava instalada a antiga USA Chemicals situa-se sobre um divisor de águas local, com vertentes para norte e sul;
- O aquífero local apresenta baixas permeabilidades, armazenamentos localizados e uma alta complexidade em função das anisotropias causadas pelos fraturamentos e controle litológico. A circulação da água subterrânea na área flui preferencialmente pela porosidade secundária das rochas consolidadas em zonas de fraturamento mais intensos, já a porosidade primária pode ser relevante localmente em zonas bem definidas, geralmente associada aos sedimentos de granulação mais grosseira e friável; e
- O aquífero local apresenta caráter semi confinado, sendo caracterizado por lentes de arenitos finos com pequenas espessuras (decimétricas a, no máximo, métricas), que encontram-se semi confinadas por camadas geralmente muito mais espessas, compostas por argilitos (Sanifox, 2014). A partir do contexto hidrogeológico elaborado, foi possível estabelecer 03

níveis do aquífero até a profundidade investigada (aproximadamente 45 m), denominados de: raso (Nível A), intermediário (Nível B) e profundo (Nível C).

Centro de Massa

- O processo de infiltração dos produtos para a subsuperfície ocorreu primeiramente a partir da área de tancagem, denominada como AC-01, localizada na porção sul da área da antiga USA Chemicals, onde inclui-se o poço artesiano existente nessa área no passado. Infiltrações secundárias para a subsuperfície provavelmente aconteceram também nas áreas dos PM-01 e 31, devido a acúmulo de produto na superfície no momento que foram realizadas as ações emergenciais de contenção do mesmo por conta do acidente ocorrido em 1983;
- Em relação ao solo, foi verificado que os impactos (industrial) se concentram, principalmente, na antiga área de tancagem (AC-01) e no limite norte do *site* (área interna e externa), em profundidades variando entre 1 e 3 metros. Adicionalmente, de forma pontual, concentrações acima dos padrões de referência (industrial) também ocorrem na porção central e leste da área. Os compostos detectados em concentrações acima dos padrões de referência são: alumínio, 1,1,2,2-tetracloreto, 1,1,2-tricloroetano, 1,1-dicloroetano, 1,2-dicloroetano, 1,2-dicloroeteno (cis+trans), benzeno, clorofórmio, tetracloreto de carbono, cloreto de vinila, tetracloroeteno e tricloroeteno;
- De acordo com a Avaliação de Risco à Saúde Humana, foram identificadas concentrações acima das concentrações máximas aceitáveis (CMAs) para solo considerando-se os cenários hipotéticos comercial/industrial *on-site* e residencial *on-site*;
- Para a água subterrânea, as principais substâncias de interesse detectadas nas amostras de água subterrânea são: 1,1-dicloroetano, 1,1-dicloroeteno, 1,2-dicloroetano, 1,1,2-tricloroetano, 1,1,2,2-tetracloreto, benzeno, cis/trans-1,2-dicloroeteno, cloreto de vinila, clorofórmio, tetracloreto de carbono, tetracloroeteno e tricloroeteno;
- As plumas de fase dissolvida apresentam 04 centros de massa distintos, sendo 02 em área interna (AC-01 e PM-01) e 02 em área externa (PM-21 e PM-31). Com relação a distribuição espacial dos impactos em água subterrânea, é possível concluir que a massa de compostos de interesse em fase dissolvida no nível A é maior, se comparada aos níveis inferiores, sendo indicado em relatórios anteriores da Sanifox que o nível B do aquífero apresenta, em geral, concentrações até 90% menores que as observadas no nível superior. Em geral, o nível C, representado pelo poço PM-07C, apresenta concentrações inferiores aos outros dois níveis;

- É verificada a presença de alguns SQI em poços cacimba e tubulares de chácaras e indústrias amostrados pela CETESB no entorno da área. Desses poços, destacam-se os poços cacimbas da Chácara da Vovó, Chácara Estrela, Chácara Paula e Chácara Deck, e os poços tubulares da Antiga Chácara Casarão e da indústria Porto Feliz S/A. Segundo modelo conceitual, a presença de SQI nos poços das chácaras são decorrentes dos processos de migração das plumas de fase dissolvida nos níveis superiores do aquífero. No entanto, resultados da modelagem hidrogeológica realizados nessa etapa de trabalho, indicam que processos naturais de movimentação das plumas de fase dissolvida não impactariam os poços tubulares profundos da Porto Feliz S/A. Dessa forma, ainda de acordo com a modelagem hidrogeológica, uma possível explicação para a origem desses compostos na Porto Feliz S/A seria através do bombeamento das plumas de fase dissolvidas em níveis rasos, aliados a migração descendente através desses poços tubulares para níveis mais profundos, atingindo assim os poços localizados nessa indústria; e
- Não foram detectadas presença de VOC, decorrentes das atividades relacionadas a área investigada, em concentrações acima dos padrões de referência nas amostras de vapores coletadas nos pontos de amostragens instalados no contra-piso e/ou poços de vapores nas chácaras (Chácara Casarão, Chácara Estrela, Chácara Deck e Chácara da Vovó) e Calpão Industrial localizados no entorno da área da Antiga USA Chemicals.

3

MODELO DE FLUXO

A modelagem hidrogeológica é uma metodologia capaz de simular o processo de migração de compostos em fase dissolvida de uma área. No entanto, devido à complexidade da área estudada e por se tratar de impactos que atingem o meio fraturado de rochas sedimentares, existindo aquíferos de grande heterogeneidade horizontal e vertical, além de baixa potencialidade hídrica, assim como múltiplos parâmetros com decaimento sequencial (compostos "pais" se transformando em alguns subprodutos de compostos "filhos"), a simulação de plumas em três dimensões nem sempre é possível.

A modelagem da área foi realizada de modo que pudesse oferecer ao projeto os seguintes resultados:

- Visão de migração das Substâncias Químicas de Interesse (SQIs);
- A degradação natural dessas substâncias; e
- A simulação e avaliação de métodos de remediação para apoiar a avaliação de alternativas de remediação.

Dessa maneira, foi adotada a simulação através de um modelo tridimensional de fluxo e transporte advectivo de partículas, seguido de simulações conservadoras de transporte reativo dos compostos de interesse ao longo de linhas de fluxo e cálculo de concentrações e receptores críticos.

Para realização das simulações, foram utilizados os seguintes softwares:

- MODFLOW/ Modpath, com interface gráfica Visual MODFLOW para simular o fluxo das águas subterrâneas em 3 dimensões; e
- Modelos de transporte reativo com Biochlor e PREMCHLor. Estes modelos simulam o transporte de contaminantes em uma dimensão, ao longo de uma linha de fluxo e visam estimar concentrações em receptores em pontos específicos. O PREMCHLor acopla a este modelo unidimensional um modelo de fonte com massas estimadas e decaimento com funções variadas.

Os resultados dessa simulação serão utilizados como ferramentas importantes para auxiliar a tomada de decisão para a implementação da abordagem final de remediação.

Nessa seção serão apresentadas as etapas para elaboração do modelo hidrogeológico de fluxo e seus resultados, enquanto que o modelo de transporte será contemplado no Item 4.

3.1 *MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL*

Anteriormente a elaboração do modelo hidrogeológico deve-se ter uma noção avançada do modelo hidrogeológico conceitual da área, o qual é uma representação esquemática e simplificada do sistema de fluxo subterrâneo, devendo indicar, da melhor forma possível, as principais características da área estudada, permitindo uma melhor compreensão dos mecanismos que governam a circulação e o armazenamento da água em subsuperfície e subsidiando a gestão e uso dos recursos hídricos subterrâneos.

A seguir, são apresentadas as principais características que embasaram o desenvolvimento do modelo conceitual local.

3.1.1 *Recarga*

O conceito de recarga natural dos aquíferos consiste na parcela de água oriunda da precipitação direta pelas chuvas, capaz de infiltrar no solo. O valor da recarga vai depender do tipo de solo e das estruturas geológicas existentes como falhas e fraturas.

Não foram obtidos dados de recarga da área, dessa forma, foi considerado nesse estudo um percentual da água de chuva infiltrada, ou uma taxa de 10%

do valor da precipitação anual (162 mm/ano), sendo selecionado o valor que melhor se ajustou ao resultado de calibração do modelo matemático que está descrito no Item 3.3.1

3.1.2 *Unidades Hidroestratigráficas*

Para estruturação do modelo conceitual apresentado no item anterior, as camadas geológicas foram agrupadas em aquíferos (representada pelos arcritos) e aquíferos (representada pelos argilitos), em função da intensa intercalação de sedimentos marinhos e terrestres no local (siltitos, arenitos, varvitos). Estes materiais apresentam pouca continuidade lateral, o que dificulta estabelecer correlações estratigráficas.

O modelo conceitual foi estruturado primeiramente no *software* MVS, onde foram estabelecidas as principais unidades hidroestratigráficas da região, com base nos critérios apresentados no Modelo Conceitual e, posteriormente, incorporado no *Visual Modflow*.

3.1.3 *Dados de Entrada*

Foram contempladas informações de 63 poços de monitoramento instalados na antiga área da *US Chemicals* e seu entorno, cujas características principais são apresentadas na Tabela 03, Anexo E. As descrições geológicas das sondagens e os perfis construtivos dos mesmos estão apresentados no Anexo F.

Adicionalmente, visando embasar o modelo hidrogeológico, foram também utilizadas informações de poços de captação d'água instalados na área, obtidas a partir do *sítio* da CPRM (Siagas) e dados das Informações Técnicas da CETESB, incluindo poços cacimbas e poços tubulares rasos e profundos. No entanto, apenas alguns poços apresentam informações litológicas, profundidade, níveis de água (estático e dinâmico), vazões etc, as quais estão sintetizadas na Tabela 04, Anexo E. Os perfis disponíveis estão apresentados no Anexo D.

A distribuição dos poços de monitoramento instalados pela Sanifox pode ser observada na Figura 05 (Anexo A), enquanto que a figura com os poços de captação d'água do entorno podem ser visualizadas na Figura 07 (Anexo A).

3.2 *MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL*

Com base nos dados obtidos e análises realizadas nas etapas anteriores, foi realizada a elaboração de um modelo numérico computacional a partir do *software* *Visual Modflow* (Versão 4.6.0.166). Esse *software* utiliza o código MODFLOW, desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), através de malha tridimensional de diferenças finitas e resolve equações de fluxo de água subterrânea e transporte de compostos, em

condições saturadas.

Com este código pode-se simular uma grande variedade de situações geológicas e hidrogeológicas em três dimensões, sendo atualmente o código de diferenças finitas mais difundido e aceito por agências e órgãos governamentais ao redor do mundo.

A versão com formulação de Newton (MODFLOW NWT, NISWONGER et al. 2005), utilizada nesse trabalho, inclui uma concepção mais avançada para evitar oscilações e erros numéricos relacionados às células secas, comuns em versões mais antigas do programa.

3.2.1 *Construção do Modelo Numérico*

3.2.1.1 *Domínio do Modelo e Discretização*

O domínio do modelo numérico corresponde às áreas apresentadas no modelo hidrogeológico conceitual. No presente modelo, o domínio compreende, especificamente, as sub-bacias do Ribeirão Avecuia e do córrego Pinheirinho.

Como premissa, considerou-se que as áreas externas à estas sub-bacias não contribuem com o fluxo de água subterrânea, tratando-se de divisores de água subterrânea. Assumiu-se, portanto, que os divisores de água superficial são também válidos para a água subterrânea nos horizontes mais superficiais do sistema. Como esta condição pode não ser verdadeira para os horizontes mais profundos, utilizou-se condições de contorno que permitem a entrada ou saída de água, representando fluxos mais regionais (vide próximo capítulo).

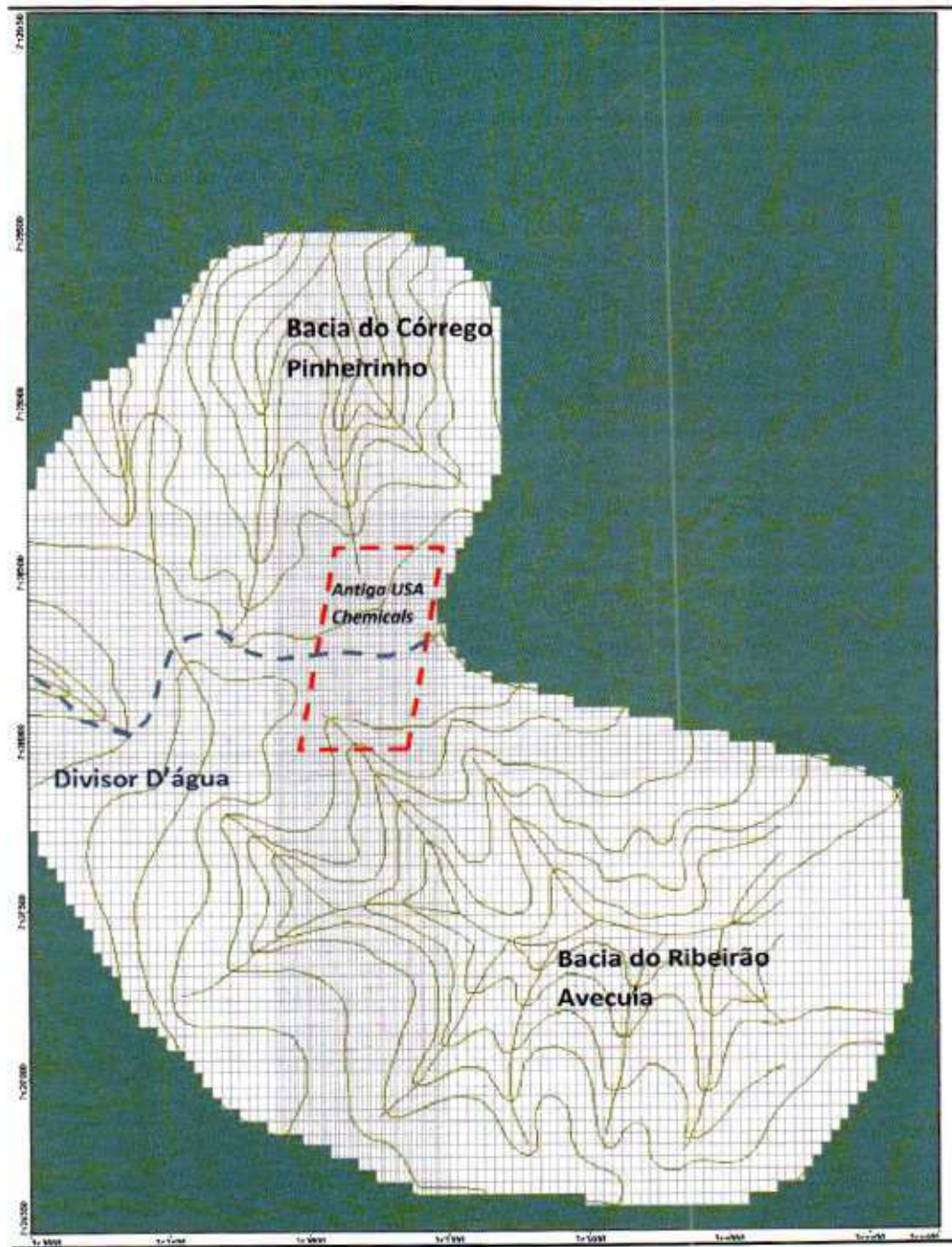
O limite vertical superior do modelo corresponde à posição do nível d'água e possui elevação variável (em torno da cota 640 m). O limite inferior foi definido em torno da cota 100 m, no contato com o embasamento cristalino. Isso equivale a profundidades em torno dos 450m e foram definidas com base em perfis de poços tubulares profundos na região (Anexo D).

O modelo cobre uma área de 2,6 km de largura por 3,6 km de extensão, com uma área total aproximada de 9,4 km², tendo sido discretizado em células de 30 m por 30 m e refinamento de aproximadamente 15 m a 18 m nas áreas de maior interesse. Em sua configuração final o modelo de fluxo apresenta-se como um bloco composto por 87 linhas por 90 colunas.

Verticalmente, foram geradas 17 camadas numéricas, utilizadas para reproduzir a geologia regional em profundidade, conforme discutido a seguir.

O domínio do modelo e sua discretização são apresentados na Figura 3.1, a seguir.

Figura 3.1 *Domínio do Modelo, em planta*



3.2.1.2

Reprodução das Unidades Aquíferas no Visual Modflow

Para a representação da geologia no modelo computacional foram utilizadas as informações geológicas contidas nos poços de monitoramento e poços tubulares instalados na área e em seu entorno, os primeiros consolidados no modelo geológico tridimensional elaborado no MVS e o segundo, utilizando as informações disponibilizadas no *site* do Serviço Geológico do Brasil, CPRM.

Dessa forma, em concordância com o modelo conceitual anteriormente discutido, a representação da geologia e a espessura das camadas foram

divididas em aquíferos e aquíferos, conforme demonstrado na Tabela 3.1, abaixo.

Tabela 3.1 *Discretização da geologia no modelo numérico*

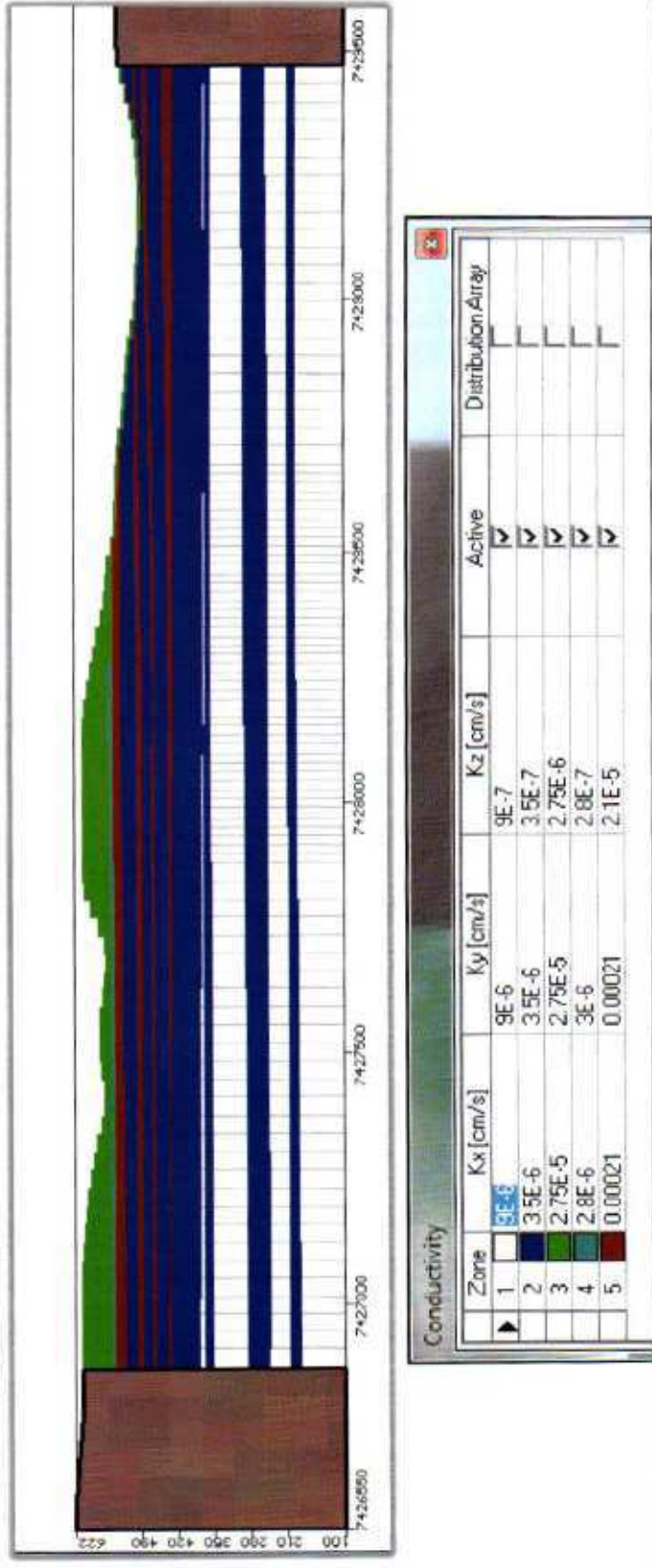
Camadas	Cor	Espessuras (m)	Condutividade Hidráulica* (cm/s)
Aquíferos		Variando de 15m a 50m	$2,8 \times 10^{-6}$ (k_x/k_y) a $2,8 \times 10^{-7}$ (k_z)
Aquíferos		Variando de 4m a 50m	$2,1 \times 10^{-4}$ (k_x/k_y) a $2,7 \times 10^{-6}$ (k_z)

*valores finais para o modelo

Como o modelo numérico foi calibrado e simulado em regime permanente, os termos de armazenamento (S) e armazenamento específico (S_y) não são computados na equação de fluxo, e, portanto, não são apresentados aqui.

Na Figura 3.2, a seguir, é apresentada uma seção geológica de sentido N-S gerada no Visual Modflow a partir da interpretação geológica obtida dos poços de monitoramento e poços profundos.

Figura 3.2 Discretização vertical (camadas do modelo numérico), sentido N-S



Condições de Contorno

As condições de contorno representam algumas funções utilizadas para controlar a entrada e saída de água do modelo numérico. No modelo desenvolvido foram utilizados 4 tipos principais de condições de contorno, a saber:

- Fluxo nulo (*no flow boundaries*): correspondem aos limites da área inativa do modelo, por onde não ocorre entrada ou saída de água subterrânea para as camadas numéricas definidas. Em termos conceituais, essas condições de contorno representam divisores de água ou linhas de fluxo. Esta condição também foi usada nas camadas de aquíferos, profundas onde se considera que o fluxo é principalmente vertical descendente;
- Recarga: representa a fração da precipitação pluviométrica que infiltra no subsolo e que sustenta o nível de água observado nos aquíferos. A recarga foi aplicada em todo o domínio do modelo, a uma taxa de 10% do valor da precipitação anual (162 mm/ano). Esse valor foi obtido durante o processo de calibração do modelo;
- Drenos (pacote DRN, condição tipo 3): usadas para representar córregos no modelo numérico. Esta condição de contorno calcula os fluxos que descarregam águas aos córregos locais, com base na diferença entre a cota do córrego e as células vizinhas, e a condutância do leito, um parâmetro que restringe a conexão entre o córrego e o aquífero, devido a deposição de finos no leito do rio. Foram representados no modelo os corpos hídricos que compõem as sub-bacias dos córregos Avecuia e Pinherinho. As cotas do córrego se basearam em valores do modelo de elevação do terreno e as condutâncias foram definidas durante o processo de calibração; e
- Condições de contorno tipo 1 (Carga Constante): usadas para representar fluxos profundos. Este tipo de condição de contorno assume um nível piezométrico que não muda com o tempo, com o modelo calculando os fluxos que entram ou saem do modelo, de acordo com o gradiente entre as cargas constantes e as células vizinhas. O fluxo calculado depende diretamente da condutividade hidráulica da célula e da diferença de carga entre a carga constante e a carga hidráulica da célula vizinha. O fluxo em profundidade não é totalmente conhecido, já que não há dados confiáveis nos poços do SLAGAS. Por esta razão, os valores usados para as cargas constantes são constantes por camadas (ou seja, inicialmente não se consideram fluxos de entrada ou de saída nas várias camadas). Porém, variam entre camadas, já que a região se encontra em uma zona de recarga regional com diferenças de nível importante, conforme se observa nos poços de monitoramento rasos e profundos (por exemplo diferenças de até 18m entre as camadas A e C do aquífero). Esta simplificação não é crítica, já que durante as simulações o modelo calcula as entradas e saídas profundas, de acordo com os gradientes simulados para atingir uma condição

estacionária. Além disso, as baixas permeabilidades fazem com que os efeitos de fronteira sejam minimizados.

Na **Figura 3.3** são mostradas as condições de contorno adotadas para as camadas superficiais. A Figura 3.4 mostra as condições de contorno para as camadas profundas.

Figura 3.3 *Condições de Contorno - Camadas Superficiais*

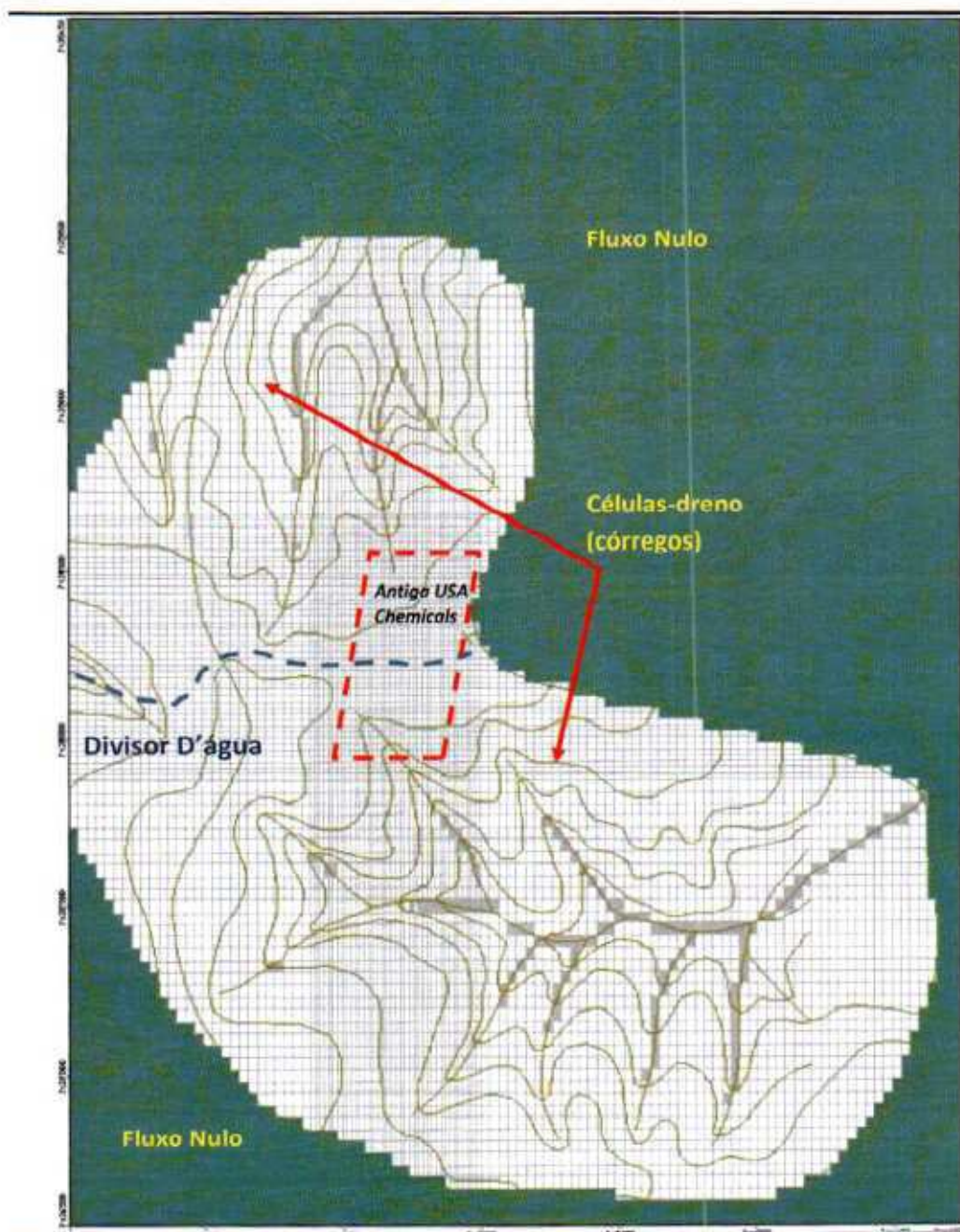
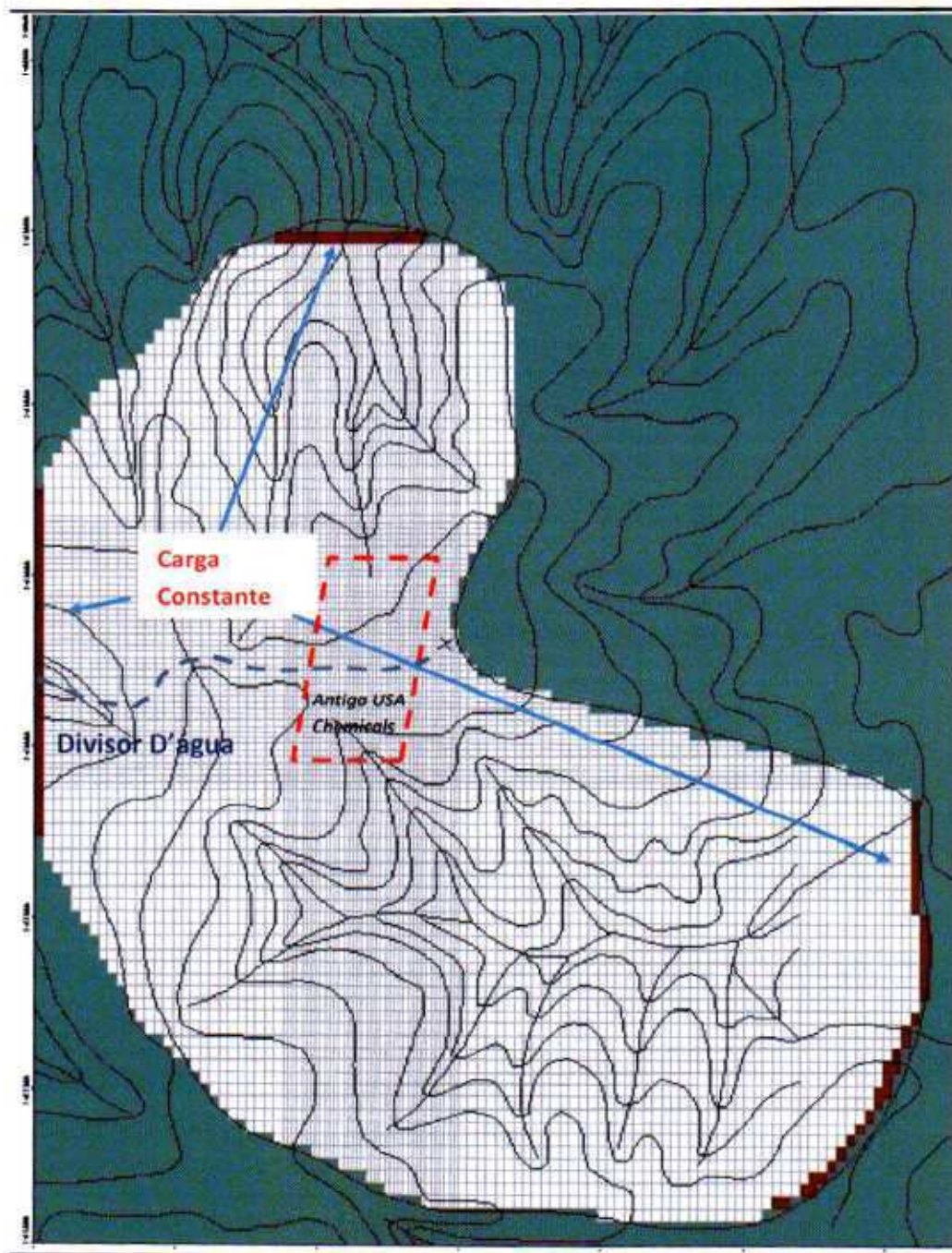


Figura 3.4 Condições de Contorno - Camadas Profundas



3.3

RESULTADOS DO MODELO TRIDIMENSIONAL DE FLUXO

O modelo foi executado assumindo-se uma condição estacionária. O solucionador de matrizes usado foi o GMRES com critério de convergência de carga hidráulica estabelecido em 0.001 m. O modelo converge rapidamente em poucas iterações com um valor de discrepância de massa inferior a 0.01%, o que atesta uma convergência adequada da solução numérica.

Na Figura 3.5 está apresentada a superfície potenciométrica calculada pelo modelo em regime estacionário (camada 1), com os principais vetores de fluxo subterrâneo identificados.

O nível de água subterrânea varia entre as cotas 560 m, nas porções mais elevadas (divisor de águas entre as sub-bacias dos córregos Aveçuia e Pinheirinho), e 510 m, nas porções mais baixas, localizadas nos limites do modelo.

O padrão do fluxo varia das partes topograficamente mais altas para as drenagens locais. O site em questão está posicionado em uma área de divisor de águas com um fluxo horizontal, mas com presença também de um fluxo vertical existente, porém com uma velocidade muito lenta. A migração horizontal parece ser mais predominante em camadas mais profundas, a partir da camada C. Este padrão de fluxo se observa com mais clareza nas simulações de caminamento de partículas descritas mais a diante neste relatório.

Na Figura 3.6 é apresentada a superfície potenciométrica para a camada mais profunda (camada 8), em torno da elevação 450m.

Figura 3.5 Superfície Equipotencial gerada no Visual Modflow (Nível raso - Camada 1)

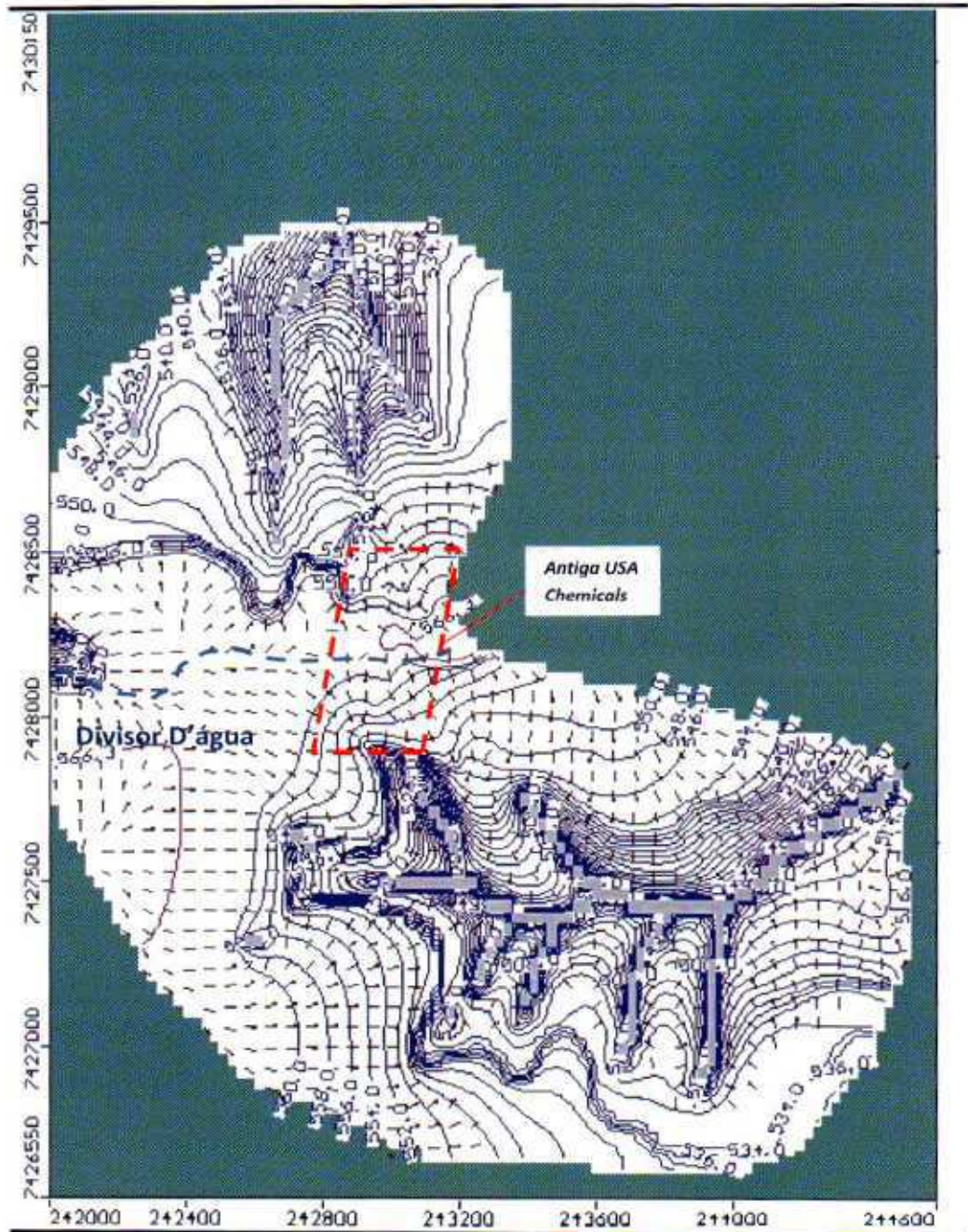
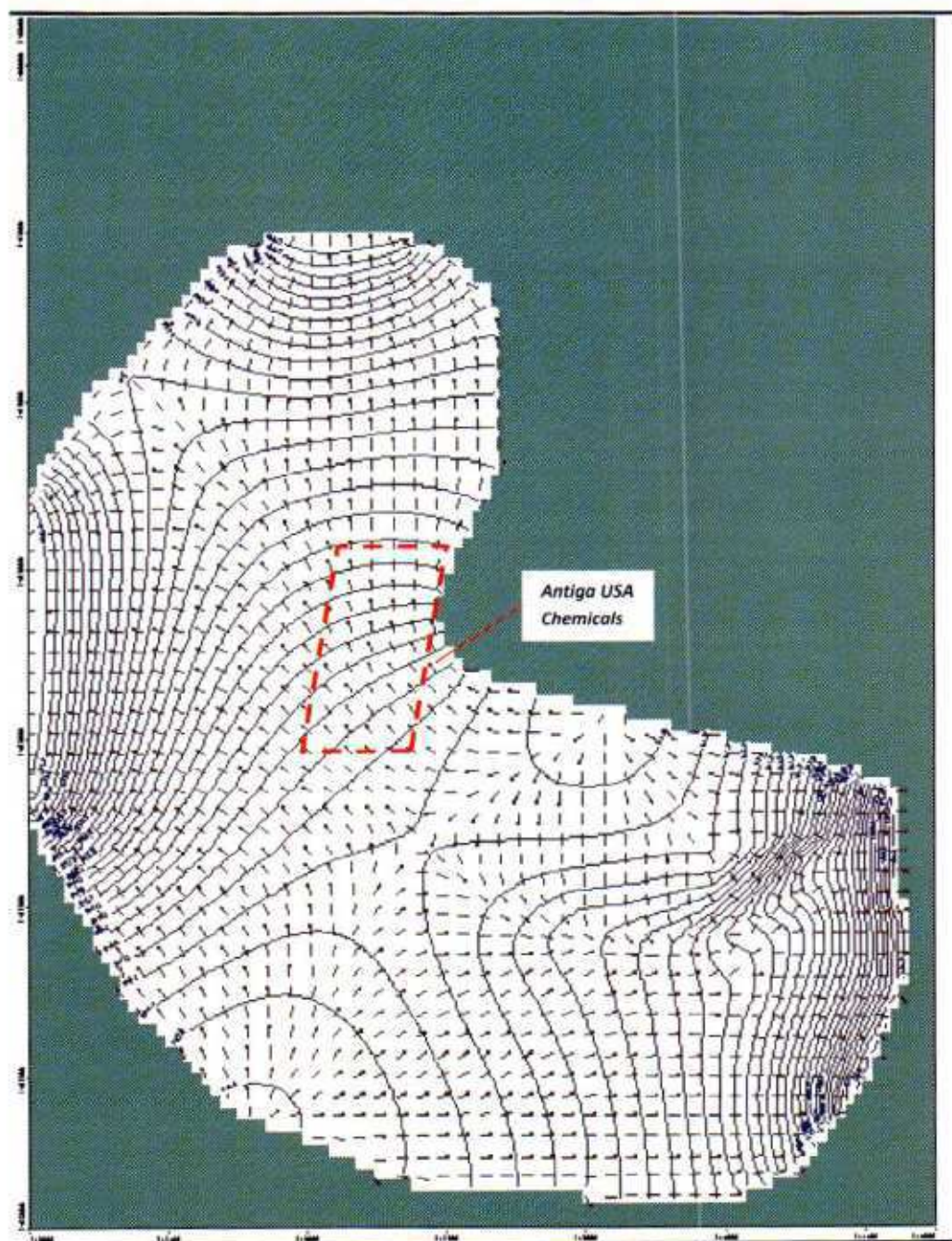


Figura 3.6 Superfície Equipotencial gerada no Visual Modflow (Nível Profundo-Camada 8)



3.3.1 Calibração do Modelo Numérico

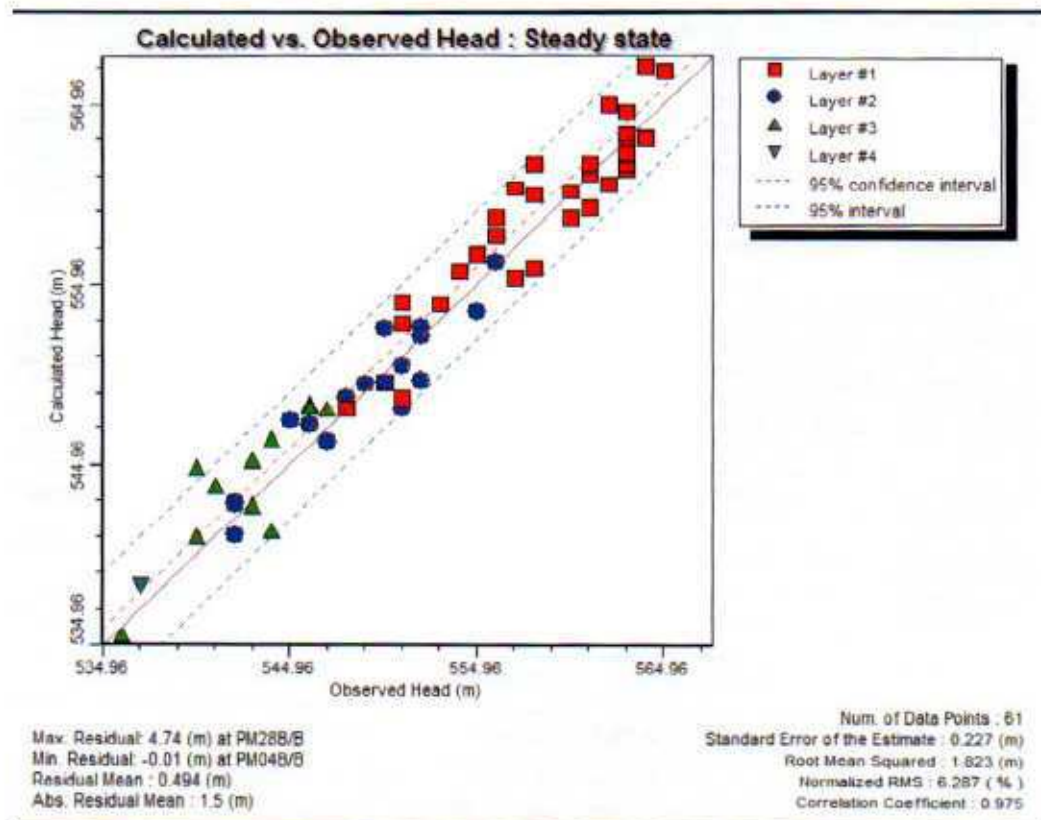
A calibração é o processo de ajuste dos parâmetros de entrada do modelo para se atingir o grau desejado de correspondência entre a situação modelada e o sistema natural de fluxo. O modelo de fluxo é considerado calibrado quando o mesmo consegue reproduzir, em um grau aceitável, as cargas hidráulicas e fluxos do sistema natural que está sendo modelado.

Visando comparar os níveis de água modelados e aqueles medidos em campo, foi realizada a calibração do modelo em regime estacionário. Para tanto, foram utilizados os valores das cotas do nível de água dos piezômetros instalados na área do empreendimento.

As medidas realizadas para a calibração do modelo de fluxo são dos meses de março/abril de 2017, apresentadas no relatório de Investigação Detalhada Complementar das Zonas Norte e Sul na Área Externa (Sanifox, 2017a).

A seguir é apresentado, na **Figura 3.7**, o gráfico de calibração com os resultados obtidos. O eixo 'Y' deste gráfico indica o valor de carga hidráulica calculado pelo modelo, enquanto que o eixo 'X' mostra os dados observados. Uma calibração 'ideal', onde o calculado é igual ao observado, produziria pontos exatamente em cima da linha de 45°. Na prática, isto não é possível devido a efeitos localizados, de difícil representação em um modelo mais regional como este.

Figura 3.7 Calibração do Modelo Computacional - Regime Estacionário



De modo geral, nota-se uma boa concordância entre valores calculados e calibrados, o que é corroborado por dados estatísticos sobre o ajuste efetuado. Neste gráfico, observa-se que o valor da calibração (*Normalized RMS*), foi da ordem de 6,2%. Essa média é normalizada entre o nível piezométrico máximo e mínimo observados e indica que o modelo é capaz de explicar corretamente

94% das condições de fluxo observadas na rede de monitoramento. Este valor é significativo, considerando-se as incertezas associadas em cada litologia e a complexidade local da geologia. Valores inferiores a 10% são geralmente aceitos como adequados.

O erro médio do modelo (cargas hidráulicas calculadas - observadas, dividido pelo número de observações) foi de 0.494 m, com um coeficiente de correlação de 97.5%, resultados que atestam uma excelente correlação entre dados calculados e observados.

A partir da realização do modelo de fluxo, procederam-se então, com as simulações de transporte de partículas, apresentadas no próximo item.

3.4 *SIMULAÇÕES DE CAMINHAMENTO DE PARTÍCULAS PARA DEFINIÇÃO DE ROTAS DE MIGRAÇÃO PREFERENCIAIS E ZONAS DE CAPTURA DE POÇOS*

3.4.1 *Código utilizado e metodologia de simulação*

Foram realizadas simulações de caminhamento de partículas no *Visual Modflow*, com a utilização da ferramenta *ModPath* (Pollock, 1984) para verificar os tempos de trânsito e as direções de fluxo da água subterrânea. Neste tipo de simulação as partículas são movidas por transporte advectivo, processo pelo qual o soluto se move a uma velocidade igual à velocidade linear média do fluido percolante, ou seja, da água, sem considerar, portanto, retardamento do soluto.

As simulações foram feitas para um período de 35 anos em relação a data definida como início dos impactos (1983), considerando-se dois cenários: 1) movimento das partículas "para frente" (*Forward*), e; 2) movimento de partículas "reverso" (*Backward*). Ambos cenários são apresentados a seguir.

3.4.1.1 *Descrição dos cenários de caminhamento de partículas simulados*

O presente trabalho contemplou a simulação de dois cenários distintos para os poços tubulares de captação d'água, sendo:

- Cenário 1: poços sem bombeamento (desligados); e
- Cenário 2: poços com bombeamento (ligados).

Adicionalmente, as simulações consideraram caminhamento de partículas para frente (*Forward*) e reverso (*Backward*), com o objetivo de definir tanto os caminhos preferenciais a partir das plumas atuais (caminhamento para frente), assim como estimar as zonas de captura dos poços em ambos cenários. A compilação destes cenários nos ajuda a estabelecer possíveis mecanismos de impactos dos poços vizinhos rasos e profundos.

Simulação com partículas "para frente" (Forward)

Nesta simulação foram inseridas partículas na área da maior pluma em extensão (clorofórmio) verificada no site na campanha de monitoramento março/abril de 2017 (Sanifox, 2017a), as quais foram simuladas no campo de fluxo gerado pelo MODFLOW, em três dimensões.

Adicionalmente, foi realizada também uma simulação considerando um fator de retardamento de 2,7 com o objetivo de simular a adsorção dos compostos orgânicos no material do aquífero. Apesar do retardamento utilizado representar uma "média" das diferentes SQIs do site, o valor escolhido é conservador ao considerar que os compostos podem estar atingindo os poços vizinhos mais rapidamente que a realidade.

Nas Figuras 3.8 a 3.10 são apresentados os resultados para o cenário com os poços tubulares profundos e cacimbas do entorno desligados, ou seja, sem bombeamento.

Como resultado dessa simulação, verificou-se que as partículas se movem em direção ao córrego Pinheirinho e neste trajeto chegam aos poços instalados no local (poços de monitoramento, cacimbas e poços tubulares), entre eles, o poço da Antiga Chácara Casarão, no qual foram detectadas concentrações de tetracloreto de carbono, tricloroeteno, cis 1,2-dicloroeteno, trans 1,2-dicloroeteno, 1,1,2-tricloroetano, 1,1-dicloroetano e clorofórmio.

Com o fator de retardamento de 2,7, verifica-se que as partículas se movem de forma mais devagar e com menor área de abrangência, principalmente nas camadas mais superficiais, sendo que o caminhar das partículas na camada C com e sem retardamento é bem similar.

Comparando este resultado com o observado no monitoramento realizado pela CETESB em maio/junho de 2017, verifica-se que a simulação com o retardamento 2,7 representa o observado, principalmente na região norte em relação a USA Chemicals, uma vez que as partículas atingem, no máximo, o poço tubular 48 (Chácara Triângulo), poço onde foi verificada presença de VOCs. A sul verifica-se que as partículas atingem, no máximo, o afluente do Ribeirão Avecuia, o que também é observado na realidade. No entanto, uma exceção a esses comportamentos é observada a oeste da área, nos poços tubulares da Porto Feliz S/A, região onde não são verificadas partículas com as simulações do modelo, porém, foram detectadas concentrações de VOCs nas amostragens realizadas pela CETESB.

Figura 3.8 Simulação com partículas "Forward" (Poços Cetesb desligados - não bombeando)

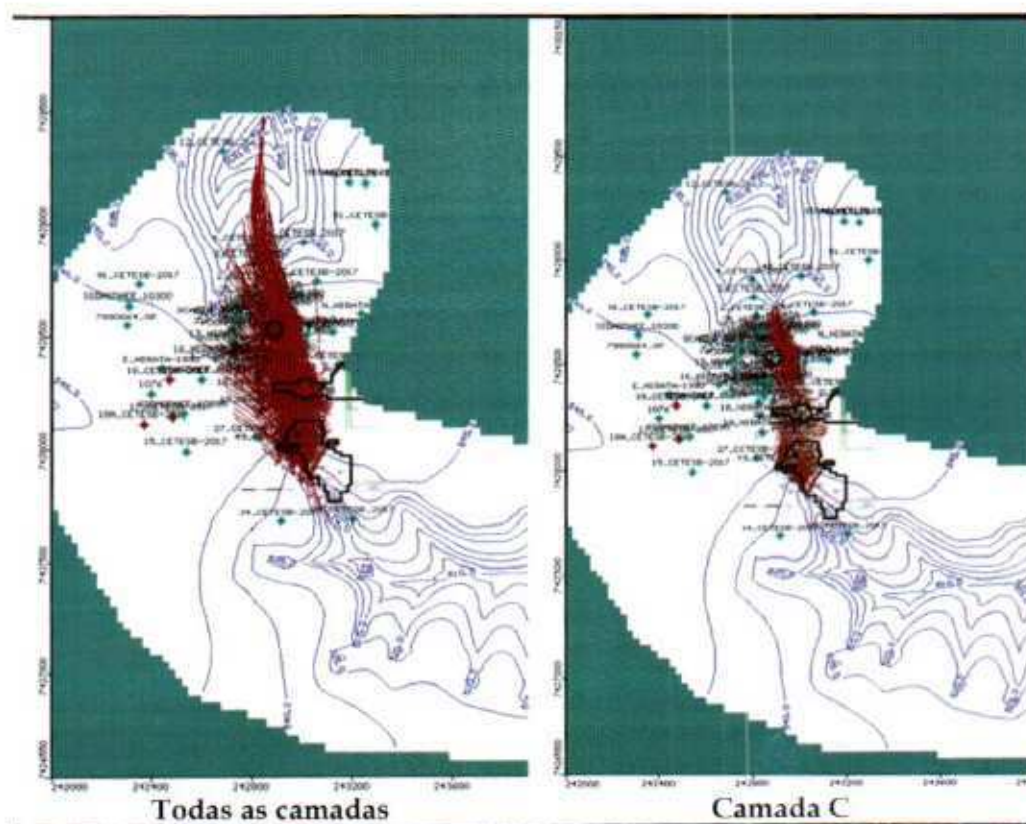


Figura 3.9 Simulação com partículas "Forward" (Poços da CETESB desligados - não bombeando - fator de retardamento de 2.7)

