

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

VIVIAN LEME SANCHES

**USO DAS TECNOLOGIAS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE
FONTES DE CONTAMINAÇÃO, ATUALIZAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL
DA ÁREA E SUPORTE NA SELEÇÃO DE TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO**

São Paulo
2020

VIVIAN LEME SANCHES

**USO DAS TECNOLOGIAS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE
FONTES DE CONTAMINAÇÃO, ATUALIZAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL
DA ÁREA E SUPORTE NA SELEÇÃO DE TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO**

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Vicente Alquino Neto

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Sanches, Vivian Leme

Uso das tecnologias de alta resolução para identificação de fontes de contaminação, atualização do modelo conceitual da área e suporte na seleção de técnicas de remediação / V. L. Sanches -- São Paulo, 2020.

63 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Solventes clorados 2.Contaminação do solo 3.Águas subterrâneas [investigação] 4.Remediação do solo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

DEDICATÓRIA

*À minha tão amada mãe Sueli,
por todo incentivo e suporte dado aos meus estudos.*

RESUMO

SANCHES, Vivian Leme. Uso das tecnologias de alta resolução para identificação de fontes de contaminação, atualização do modelo conceitual da área e suporte na seleção de técnicas de remediação. 2020. 63 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

O conceito de que os processos geológicos conferem uma estrutura heterogênea ao subsolo com diferentes comportamentos de transporte de contaminantes fez com que o setor de gerenciamento de áreas contaminadas reavaliasse seus métodos e estratégias de investigação ambiental. Desta forma, a abordagem convencional de investigação ambiental através da instalação de poços de monitoramento e amostragens de solo com intervalo limitado passou a dar lugar às investigações de alta resolução ou, em inglês *High-Resolution Site Characterization (HRSC)*. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo apresentar e discutir um estudo de caso de aplicação de tecnologias de alta resolução, alinhado com os conceitos da Tríade e do Modelo Conceitual da Área (MCA) ao longo do Ciclo de Vida do Projeto. O estudo de caso escolhido para embasar essa discussão foi o do aterro industrial *East Gate Disposal Yard (EGDY)*, situado no Centro de Logística de Fort Lewis, no estado de Washington, EUA, cujo solo e água subterrânea local foram contaminados pela disposição inadequada de combustíveis, óleos e solventes halogenados no local por cerca de 25 anos. Para identificação e delimitação das fontes de contaminação, foram realizadas duas fases de investigações de alta resolução (Fases I e II). A investigação da Fase II, objeto deste trabalho, foi conduzida para delimitar a ocorrência de NAPL (*non-aqueous phase liquid*) em três áreas-fontes identificadas em estudos anteriores e complementar a caracterização hidrogeológica da área. O objetivo foi atualizar o MCA, de modo a permitir o dimensionamento de remediação termal nas áreas-fontes, a otimização do sistema de tratamento em operação (P&T) e, eventualmente, a substituição deste sistema por uma barreira reativa permeável (BRP). Com base nos dados obtidos, pôde-se concluir que os resultados da Fase II foram suficientes para o projeto da remediação termal, contudo investigações e estudos adicionais serão necessários para otimização do sistema P&T e eventual substituição por uma BRP. Em relação ao uso da investigação de alta resolução, destacou-se que a adoção de uma abordagem dinâmica, o conhecimento da tecnologia e de sua aplicabilidade e a participação de uma

equipe multidisciplinar em contato constante são fundamentais para o sucesso da investigação.

Palavras-chave: Solventes clorados. Contaminação do solo. Águas subterrâneas [investigação]. Remediação do solo.

ABSTRACT

SANCHES, Vivian Leme. Use of high-resolution technologies to identify sources of contamination, update the conceptual site model and support the selection of remediation techniques. 2020. 63 p. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

The concept that geological processes provide a heterogeneous structure to the subsoil with different contaminant transport behavior has caused the contaminated area management sector to reevaluate its environmental investigation methods and strategies. In this way, a conventional approach of environmental investigation through the installation of monitoring wells and soil sampling with limited interval passed a place for High-Resolution Site Characterization (HRSC). In this context, the present work aimed to present and discuss a case study of the application of high-resolution technologies, aligned with Triad and Project Life Cycle Conceptual Site Model (CSM) concepts. The case study chosen to support this discussion was the East Gate Disposal Yard (EGDY) industrial landfill, located at the Fort Lewis Logistics Center, in the state of Washington, USA, whose soil and local groundwater were contaminated by inadequate disposal of fuels, oils and halogenated solvents for about 25 years. Two phases of high-resolution investigations (Phases I and II) were carried out to identify and delineate the sources of contamination. The Phase II investigation, the object of this work, was conducted to delineate the occurrence of NAPL (non-aqueous phase liquid) in three source areas identified in previous studies and to complement the hydrogeological characterization of the area. The objective was to update the MCA to allow the dimensioning of thermal remediation in the source areas, the optimization of the treatment system in operation (P&T) and, eventually, the replacement of this system by a permeable reactive barrier (PRB). Based on the data obtained, it was concluded that the results of Phase II were sufficient for the design of thermal remediation, however, further investigations and studies will be necessary to optimize the P&T system and eventual replacement by a BRP. Regarding the use of high-resolution investigation, it was highlighted that the adoption of a dynamic approach, knowledge about the technology and its applicability and the participation of a multidisciplinary team in constant contact are fundamental for the success of the investigation.

Key-words: Chlorinated solvents. Soil contamination. Groundwater [investigation]. Soil remediation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS.....	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1	Abordagem da Tríade	13
3.2	Modelo Conceitual ao longo do Ciclo de Vida.....	15
3.3	Estratégias e Tecnologias de Alta Resolução	19
4	ESTUDO DE CASO	25
4.1	Apresentação.....	25
4.2	Modelo Conceitual Inicial	27
4.3	Escopo, Metodologia das Investigações e Plano de Comunicação	33
4.3.1	Investigação em outras áreas potenciais	35
4.3.2	Investigações com método <i>direct-push</i> (SCAPS LIF).....	36
4.3.3	Investigações com método <i>direct-push</i> (Geoprobe MIP/EC).....	36
4.3.4	Investigação com perfuratriz sônica	37
4.3.5	Instalação de piezômetros	38
4.3.6	Instalação de poços de monitoramento	39
4.3.7	Amostragem de água subterrânea	40
4.3.8	Amostragem de água superficial.....	40
4.3.9	Investigação geofísica	41
4.3.10	Plano de Comunicação.....	41
4.4	Resultados.....	43
4.4.1	Outras áreas potenciais.....	43
4.4.2	Resultados SCAPS LIF	43
4.4.3	Resultados Geoprobe MIP/EC	43
4.4.4	Resultados das Amostras de Solo (perfurações sônicas)	46
4.4.5	Resultados das Amostras de Água Subterrânea	48
4.4.6	Resultados das Amostras de Água Superficial	50
4.4.7	Resultados da Geofísica	50
4.5	Atualização do Modelo Conceitual da Área	50
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	56
6	CONCLUSÕES.....	60
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

O tema central deste trabalho consiste em discutir a aplicação de técnicas e ferramentas de investigação ambiental que proporcionem a redução das incertezas do modelo conceitual da área (MCA) e contribuam para a escolha de tecnologias mais eficazes e eficientes para remediação de áreas contaminadas.

Nesse contexto, as tecnologias de alta resolução ou, em inglês *High-Resolution Site Characterization (HRSC)*, tem sido cada vez mais utilizadas e tem apresentado resultados satisfatórios quando aplicadas de forma adequada.

Segundo CURRY et al. (2016), a abordagem convencional de investigação ambiental através da instalação de poços de monitoramento e amostragens de solo com intervalo limitado é resultado do início da indústria americana de reabilitação de áreas contaminadas na década de 1980, a qual adotou a experiência do mercado de exploração e produção de água subterrânea e petróleo. Como resultado, os *sites* eram frequentemente representados por um pequeno número de dados com a hipótese de que os aquíferos fossem relativamente homogêneos e isotrópicos.

Essas hipóteses, entretanto, passaram a ser repensadas a partir de publicações como, por exemplo, *Remediation Hydraulics* de PAYNE et al. (2008). O conceito de que os processos geológicos conferem uma estrutura heterogênea ao subsolo com diferentes comportamentos de transporte de contaminantes, gerando zonas de transporte de alta permeabilidade, zonas de advecção lenta e zonas de armazenagem de baixa permeabilidade, fez com que o setor de gerenciamento de áreas contaminadas reavaliasse seus métodos e estratégias de investigação ambiental. A partir de então, as tecnologias de alta resolução começaram a ser mais utilizadas e os resultados obtidos passaram a indicar consistentemente que a maior parte do fluxo de massa de contaminantes (cerca de 95%) ocorre em um pequeno segmento da seção transversal do aquífero, condição que permite otimizar as estratégias de remediação de maneira mais efetiva e econômica durante o ciclo de vida do projeto (PAYNE et al., 2008; SUTHERSAN, S.; QUINNAN, J.; WELTY, N., 2015).

Com base nos resultados obtidos, a Agência Ambiental dos EUA (*Environmental Protection Agency - USEPA*, 2016) e seu Conselho Interestadual de Tecnologia e Regulamentação (*Interstate Technology & Regulatory Council- ITRC*, 2019) passaram a indicar a utilização de ferramentas de investigação de alta resolução como processo de tomada de decisão em campo com a participação de todos os envolvidos, inclusive

das próprias agências reguladoras, para obtenção de um Modelo Conceitual da Área (MCA) com poucas incertezas gerenciáveis.

No Brasil, destaca-se a atuação da agência ambiental do Estado de São Paulo que através da Decisão de Diretoria nº. 038/2017/C (CETESB, 2017) recomenda, com bem menos detalhes que as diretrizes internacionais, a utilização de métodos de investigação de alta resolução durante a Investigação Detalhada para a localização de fontes de contaminação não identificadas nas etapas de Avaliação Preliminar e Investigação Confirmatória e para áreas com complexidades associadas ao meio físico e à distribuição dos contaminantes.

Esta abordagem tem por objetivo garantir que o MCA possa ser atualizado com dados de resolução adequada para identificação de heterogeneidades hidrológicas, fontes de contaminação, distribuição tridimensional dos contaminantes e quantificação das massas das substâncias químicas de interesse (CETESB, 2017). Essas informações serão essenciais para subsidiar às etapas subsequentes do processo de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), tais como Avaliação de Risco e Plano de Intervenção. Incertezas relacionadas ao modelo conceitual em etapas avançadas do processo de GAC representam os principais gargalos para o andamento do caso, gerando indecisão das partes interessadas, trabalho desnecessário na forma de várias mobilizações de investigação e, em último caso, implementação de estratégias de remediação ineficazes. Tais situações podem resultar em aumento significativo de custos e extensões de cronograma para reabilitação da área de interesse e encerramento do caso e, em um contexto mais amplo, impactos sociais e ambientais para a sociedade.

Embora campanhas de investigação considerando uma escala de detalhe maior e o uso de técnicas de alta resolução possam representar, em um primeiro momento, custo adicional para a etapa de diagnóstico de uma área contaminada, este custo tende a ser compensado durante a fase de remediação em casos de alta complexidade. Estima-se que a redução no custo total do projeto (em inglês, *Return on Investigation* – ROI) seja de 3 a 5 vezes o valor investido na elaboração de um bom MCA (SUTHERSAN, S.; QUINNAN, J.; WELTY, N., 2015).

Contudo, para uma caracterização de alta resolução adequada, é necessário que as ferramentas a serem utilizadas sejam selecionadas levando-se em conta as características geológicas e hidrogeológicas do meio físico e as características físico-químicas dos contaminantes. Segundo RIYIS (2019), no Brasil, a maior parte das

investigações com alta resolução tem se limitado a utilização de técnicas que possibilitem a aquisição de dados qualitativos de concentração em tempo real (*Membrane Interface Probe- MIP*), algum método de fluorescência induzida por laser (*Laser-Induced Fluorescence – LIF*) ou óptico (*Optical Image Profiler – OIP*). Além disso, os resultados têm ficado aquém do esperado, principalmente, pelo uso da ferramenta dissociada de uma abordagem que priorize seu aproveitamento total, alto custo dos equipamentos na sua maioria importados, uso inadequado e/ou interpretação equivocada dos resultados e adaptação das ferramentas às condições brasileiras.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal apresentar e discutir a aplicação de tecnologias de alta resolução (*High-Resolution Site Characterization - HRSC*) para identificação e delimitação de fontes de contaminação, permitindo a atualização do modelo conceitual com escala de detalhamento adequada para embasar a escolha e dimensionamento de medidas de remediação mais eficientes e eficazes.

Em um contexto mais amplo, visa também contribuir com o aprendizado brasileiro, apresentando um caso real internacional de aplicação das técnicas de alta resolução e discutir a aplicabilidade das estratégias utilizadas no contexto nacional.

Para tal, optou-se por escolher um estudo de caso dentre os disponibilizados no site *Clu-in (Clean-Up Information)* da USEPA (2016). Como critério de escolha, buscou-se um caso complexo de contaminação por solventes organoclorados investigado por diversas ferramentas de alta resolução.

O estudo de caso escolhido foi o do aterro industrial *East Gate Disposal Yard (EGDY)*, localizado no Centro de Logística de Fort Lewis, no estado de Washington, EUA. O aterro EGDY operou entre 1946 a 1971 recebendo combustíveis, óleos lubrificantes, solventes clorados e não clorados, sucatas e resíduos da construção civil provenientes das atividades conduzidas no depósito de munições Fort Lewis Mount Rainier. Em virtude da detecção de uma pluma de contaminação por tricloroeteno (TCE) na cidade vizinha Tillicum, investigações de alta resolução foram planejadas e conduzidas com o suporte técnico da *U.S. Army Corps of Engineers (USACE)*, visando identificar as fontes de contaminação e respectivas medidas de tratamento, bem como otimização das medidas de remediação já implantadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A USEPA (2016) define as investigações de alta resolução (*High-Resolution Site Characterization - HRSC*) como estratégias e técnicas de caracterização que usam escalas e densidades apropriadas de amostragem para definir com maior precisão a distribuição de contaminantes e o contexto físico de origem, embasando a seleção de técnicas de remediação mais rápidas e eficazes para a área contaminada.

Com base nesta definição, a “alta resolução” é alcançada abordando dois tópicos principais: (1) escala das amostras e (2) quantidade e espaçamento adequado das amostras nas três dimensões. Ou seja, as amostragens e/ou medições devem ser feitas em uma escala e com uma densidade que sejam capazes de identificar a variabilidade do parâmetro que está sendo medido.

Por outro lado, segundo BARBER, J.; DYMENT, S.; PITKIN, S (2014), esta é uma definição funcional que depende da natureza física do local. Ou seja, não existe um tamanho de amostra único ou uma quantidade e espaçamento de amostra padrão que sejam apropriados para todos os locais.

Nesse sentido, o planejamento da investigação de alta resolução deve ser apropriado à escala das heterogeneidades na subsuperfície que controlam a distribuição, transporte e destino dos contaminantes. Em geral, essas heterogeneidades acontecem em uma escala muito pequena, a qual não é endereçada pelas investigações tradicionais.

Desta forma, de modo geral, deve-se atentar para as seguintes considerações:

- Tamanho curto da amostra (dimensão vertical da amostra);
- Pequeno espaçamento vertical entre as amostragens;
- Sondagens organizadas ao longo de *transects* (seções transversais orientadas perpendicularmente à direção do transporte de contaminantes); e
- Espaçamento minimizado entre as perfurações que formam o *transect*.

Em comparação com as investigações tradicionais, a investigação de alta resolução permite:

- **Aumento de detalhes:** as tecnologias convencionais usadas para caracterizar locais contaminados, normalmente avaliam heterogeneidades na escala de dezenas de metros, enquanto que as heterogeneidades que controlam o transporte de contaminantes estão na escala de centímetro a metro. Neste sentido, a investigação de alta resolução é uma estratégia eficaz para obter

informações detalhadas o suficiente da geologia, hidrogeologia e contaminação para selecionar e projetar medidas de remediação.

- **Redução de incertezas:** a investigação de alta resolução identifica e elimina as lacunas de dados obtidos na investigação tradicional, reduzindo as incertezas do modelo conceitual da área (MCA) e aumentando a confiança das partes envolvidas para tomada de decisão quanto ao projeto e otimização dos sistemas de remediação. Além disso, o conjunto de dados de alta densidade gerado durante uma investigação de alta resolução permite a visualização e análise 3D, ferramenta indispensável para o gerenciamento de dados e atualização do modelo conceitual da área ao longo do ciclo de vida.
- **Melhores práticas de gerenciamento:** a investigação de alta resolução é uma prática de gerenciamento, que aprimora a aplicação de outras práticas como o planejamento sistemático e desenvolvimento do modelo conceitual ao longo do ciclo de vida do projeto, estratégias dinâmicas de trabalho e tecnologias de medição em tempo real.

Para melhor compreensão dos conceitos aqui abordados, serão descritos nas próximas seções a abordagem da Tríade, o desenvolvimento do modelo conceitual ao longo do ciclo de vida do projeto e as estratégias e tecnologias de alta resolução.

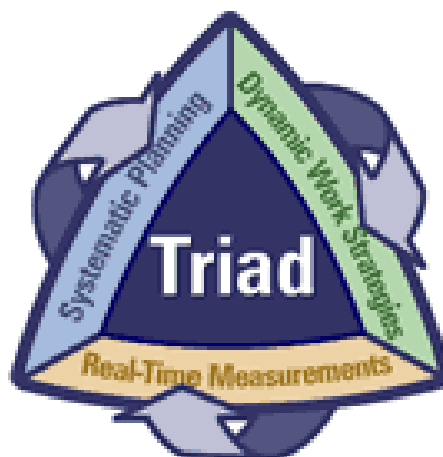
3.1 Abordagem da Tríade

A abordagem da Tríade foi desenvolvida por profissionais experientes com o apoio da USEPA para promover a modernização de práticas técnicas adotadas na caracterização e remediação de áreas contaminadas. Trata-se de um método integrado para gerenciamento de incertezas, que tem por objetivo aumentar a confiança de que as decisões do projeto sejam feitas de maneira adequada e econômica (CRUMBLING, 2004).

Neste sentido, pode ser usada para reduzir significativamente os custos de coleta de dados, agilizar cronogramas, melhorar comunicação com as partes interessadas e melhorar a qualidade das decisões do projeto (USEPA, 2010).

Para tal, é baseada em três práticas principais (**Figura 1**), descritas a seguir:

Figura 1 – Abordagem da Tríade.



Fonte: <https://triadcentral.clu-in.org/>

- 1. Planejamento sistemático:** é um processo rigoroso de planejamento do projeto que estabelece uma base cientificamente defensável para as atividades propostas. No âmbito da Tríade, o planejamento sistemático se baseia nas legislações e normas existentes e enfatiza que todos os dados coletados satisfaçam uma necessidade definida (USEPA, 2010). Identifica todos os elementos necessários com base nas informações das partes interessadas e leva a uma estratégia de trabalho dinâmico com coleta de dados usando tecnologias de medição em tempo real que alimentam diretamente as decisões críticas. Desta forma, o planejamento sistemático reduz as incertezas associadas aos níveis de remediação em relação aos limites regulatórios e ao risco, à adoção de potenciais ações de remediação, às estratégias para encerramento do caso e reutilização da área e às preocupações das partes interessadas. Além do planejamento de decisões conhecidas, envolve ainda a criação de contingências para acomodar as mudanças nas condições do projeto, de modo que as partes interessadas possam facilitar o projeto em todos os estágios principais de tomada de decisão (USEPA, 2010). O modelo conceitual da área (MCA) desempenha um papel crítico ao longo do ciclo de vida do projeto na comunicação de incertezas, na identificação de necessidades de dados adicionais, no consenso e na maximização do uso de informações novas e históricas.
- 2. Estratégias dinâmicas de trabalho:** uma sequência acordada de atividades dinâmicas de coleta de dados que tratam de maneira eficiente as preocupações

identificadas no projeto, usando informações em tempo real para reduzir incertezas no gerenciamento e na tomada de decisões. Diferentemente dos planos de trabalho não dinâmicos que especificam o tipo exato, a quantidade, a qualidade e a localização da coleta de dados antes de qualquer atividade de campo, as abordagens dinâmicas intensificam os esforços para coletar os dados apropriados necessários para cumprir os objetivos da investigação (USEPA, 2010). Planos de trabalho simplificados, desenvolvidos no contexto da estrutura regulatória de um projeto, são usados para documentar as estratégias dinâmicas de trabalho. A incerteza é gerenciada em tempo real usando os diagramas de lógica de decisão e outros controles de qualidade, e conforme o modelo conceitual evolui, o planejamento da coleta de amostras pode ser modificado e ajustado à realidade verificada. A maior flexibilidade e obtenção de resultados em tempo real diminui significativamente as lacunas de dados, que são os principais motivadores de remobilizações e de esforços de caracterização estendidos (USEPA, 2011).

3. **Tecnologias de medição em tempo real:** incluem qualquer mecanismo de geração de dados que forneça informações em um prazo suficiente para acionar as estratégias dinâmicas de trabalho. Essas tecnologias ajudam a gerenciar a incerteza, fornecendo medições ou coletas e análises confiáveis dos meios ambientais com uma densidade muito maior do que normalmente é economicamente possível com métodos convencionais de amostragem e análise. Juntamente com a estratégia dinâmica de trabalho, as tecnologias em tempo real são usadas para focar quando e onde amostras e análises laboratoriais podem oferecer o maior benefício. Mais informações sobre essas tecnologias serão apresentadas na Seção 3.3.

3.2 Modelo Conceitual ao longo do Ciclo de Vida

O Modelo Conceitual da Área (MCA) é uma representação iterativa que resume e ajuda a visualizar e a entender os dados disponíveis. O MCA usa uma combinação concisa de documentos escritos e gráficos para retratar as informações conhecidas e as hipóteses a respeito de uma determinada área (USEPA, 2011).

Mais especificamente, a CETESB (2017) define o Modelo Conceitual como um *relato escrito, acompanhado de representação gráfica, dos processos associados ao*

transporte das substâncias químicas de interesse na área investigada, desde as fontes potenciais, primárias e secundárias de contaminação, até os potenciais ou efetivos receptores.

Um MCA abrangente deve contemplar diferentes tipos de componentes, incluindo dados físicos, históricos, programáticos, de risco e de remediação. A USEPA (2018) destaca oito componentes principais:

1. Uso pretérito,
2. Investigações pretéritas;
3. Geologia e hidrogeologia;
4. Reutilização pretendida;
5. Critério de Decisão;
6. Rotas de exposição e receptores;
7. Potenciais remediações; e
8. Estratégia de conclusão.

Segundo USEPA (2018), investigações mais eficazes usam um MCA abrangente que aborda todos os elementos citados, muitos deles relacionados entre si.

À medida que os dados existentes são avaliados, organizados e sintetizados no MCA, as lacunas de dados devem ser identificadas e endereçadas. O MCA passa a servir então como uma estrutura onde os dados novos serão incorporados assim que disponíveis para reavaliação do cenário, premissas e hipóteses adotadas anteriormente.

O ciclo de vida de um MCA reflete a progressão natural do processo de reabilitação de uma área contaminada, onde as informações disponíveis são usadas ou novas informações adquiridas, para apoiar uma mudança no foco do projeto, que pode se dar da caracterização de uma área para a avaliação e seleção de técnicas de remediação e, posteriormente, para a otimização das técnicas escolhidas.

A USEPA (2011) identifica seis estágios possíveis para o ciclo de vida de um MCA, descritos a seguir:

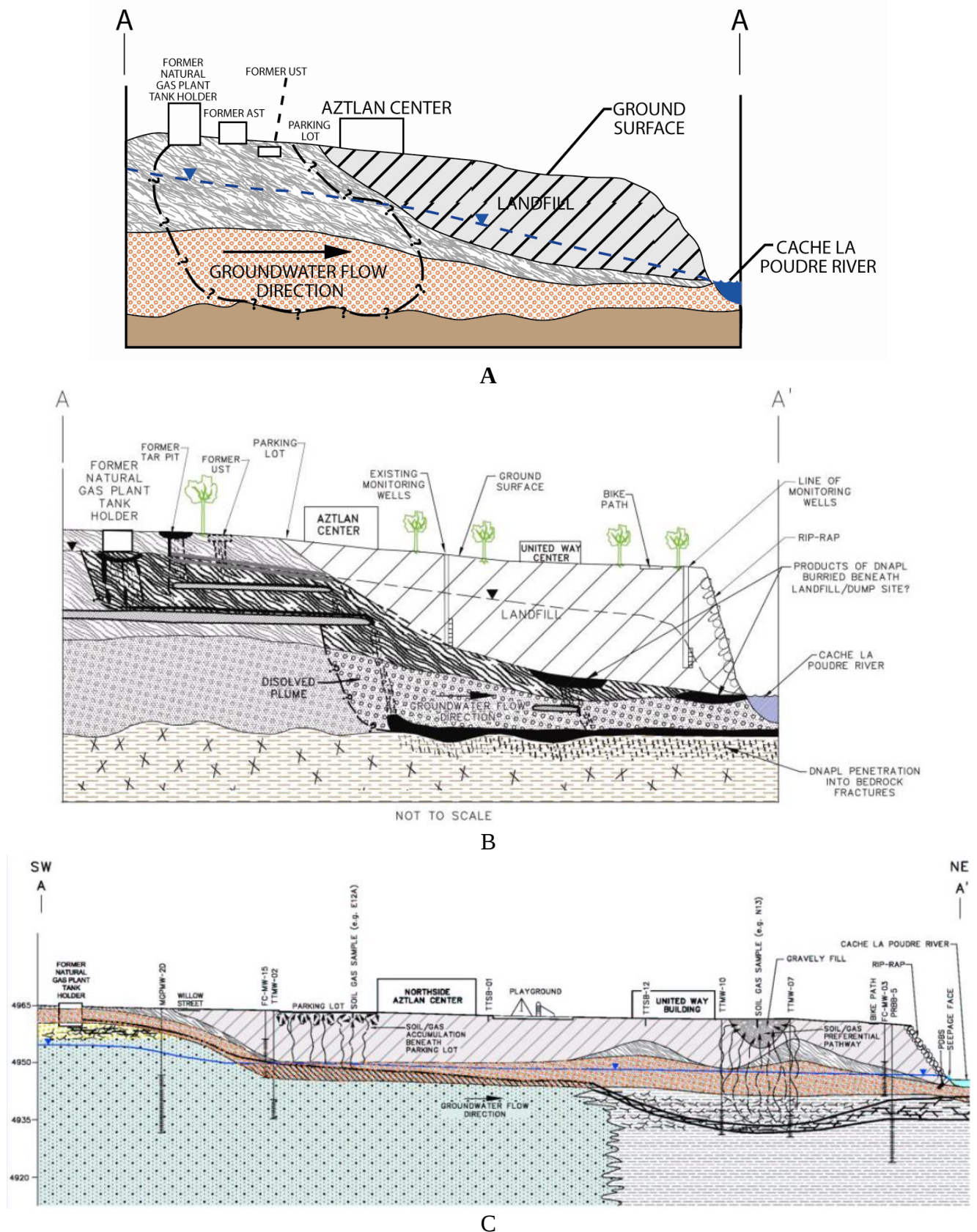
- 1. Estágio Preliminar:** marco ou entrega do projeto com base nos dados existentes; desenvolvido antes do planejamento sistemático para fornecer uma base fundamental para o esforço de planejamento.
- 2. Estágio da Linha de Base:** marco do projeto ou produto usado para documentar o consenso / divergência das partes interessadas, identificar

lacunas de dados, incertezas e necessidades; um resultado do planejamento sistemático.

3. **Estágio de Caracterização:** melhoria iterativa do MCA à medida que novos dados se tornam disponíveis durante os esforços de investigação; suporta seleção de tecnologia e solução de tomada de decisão.
4. **Estágio de Projeto:** melhoria iterativa do MCA durante o planejamento da remediação; apoia o desenvolvimento da base de projeto da remediação e detalhes técnicos.
5. **Estágio de Remediação / Mitigação:** melhoria iterativa do MCA durante a implementação da remediação; apoia os esforços de implementação e otimização de soluções, fornece documentação quanto ao atingimento das metas de remediação.
6. **Estágio Pós-Remediação:** informações abrangentes, físicas, químicas, geológicas e hidrogeológicas do MCA suportam o planejamento de reutilização da área; documenta controles institucionais e resíduos deixados no local; e outros atributos importantes da área.

A **Figura 2** apresenta exemplos de representações gráficas para diferentes estágios do modelo conceitual do projeto *Cache La Poudre River*, localizado no Colorado, USA. Nota-se que no estágio preliminar (Figura 2 - A) são compiladas informações gerais do *site*, incluindo localização das principais unidades e utilidades, dados primários da geologia, superfície potenciométrica e direção do fluxo d'água subterrâneo, conexão da água subterrânea com o curso d'água superficial e estimativa da extensão da contaminação no solo e na água subterrânea. No estágio de caracterização (Figura 2 – B), os atributos do *site* são integrados com as observações de campo e dados de investigações, sendo possível observar melhor entendimento quanto às fontes de contaminação e maior detalhamento da estratigrafia geológica, da distribuição dos contaminantes e da variação da superfície potenciométrica. Já no estágio de projeto (Figura 2 – C), são capturados os principais atributos do *site* para suporte no projeto de remediação, como por exemplo as zonas de acúmulo de gases e caminhos preferenciais.

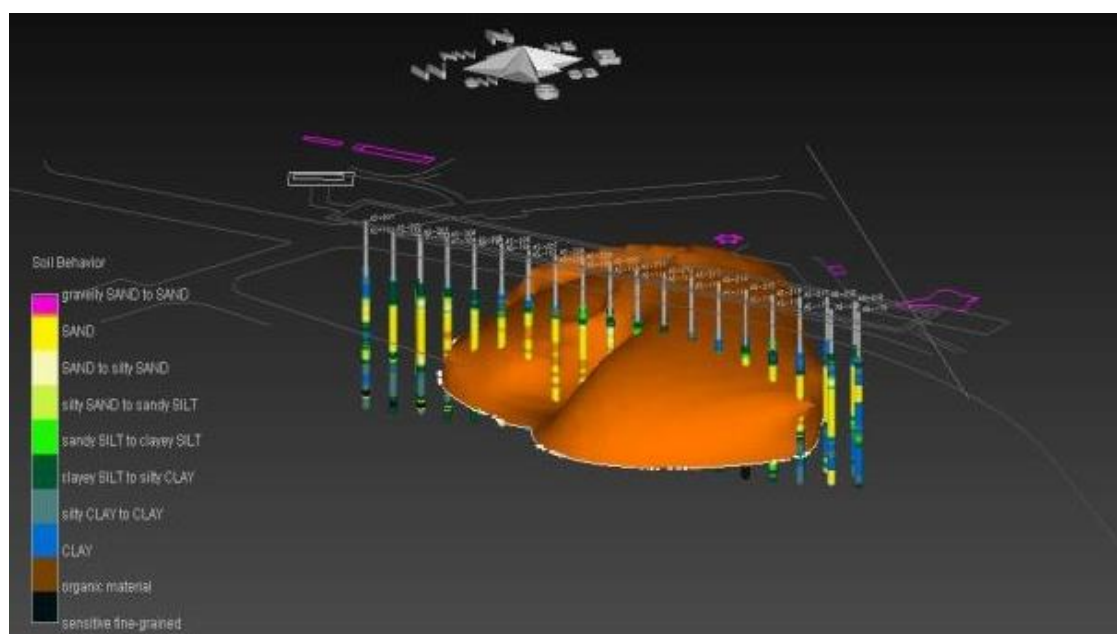
Figura 2 – Exemplos de representações gráficas para alguns dos estágios do modelo conceitual do projeto *Cache La Poudre River* no Colorado, USA: A – Estágio Preliminar; B- Estágio de Caracterização; C- Estágio de Projeto.



Fonte: USEPA (2011).

Em áreas contaminadas cujo processo de gerenciamento é mais maduro e possui grande quantidade de dados, uma ferramenta-chave para avaliação e atualização do MCA é a visualização tridimensional (3D) que pode ser obtida por renderizações mais simplificadas até o uso de modelos gráficos mais sofisticados (**Figura 3**). Estas ferramentas são especialmente importantes para o gerenciamento de dados obtidos por investigações de alta resolução, os quais requerem análise 3D eficiente e espacialmente precisa dos conjuntos de dados de alta densidade normalmente gerados por este método de investigação.

Figura 3 – Visualização 3D de um modelo conceitual em Estágio de Remediação / Mitigação.



Fonte: USEPA (2011).

O tratamento estatístico e geoestatístico destes dados também é uma linha por onde a investigação de alta resolução está caminhando e evoluindo. A interpolação de dados geoestatísticos em 3D pode ajudar na interpretação dos dados e na realização de estimativas quanto às propriedades do aquífero e à distribuição de contaminantes, por exemplo.

3.3 Estratégias e Tecnologias de Alta Resolução

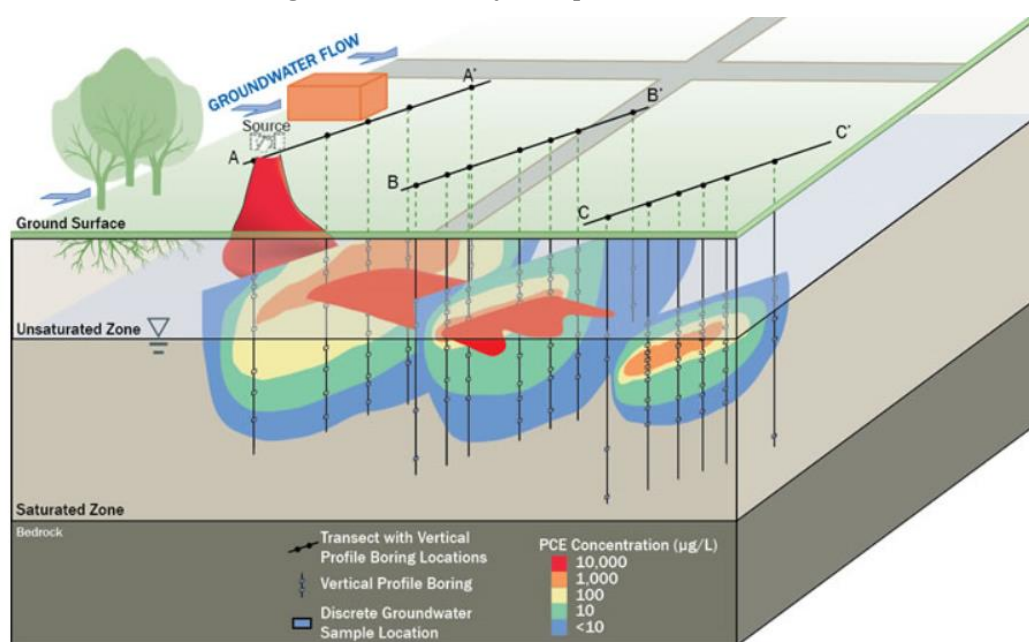
A estratégia apropriada para a implementação das investigações de alta resolução é orientada pelas características geológicas presentes no local. Ou seja, embora os problemas da escala de caracterização sejam semelhantes, a investigação de alta

resolução aplicada a investigação de um aquífero na rocha fraturado exige um conjunto diferente de ferramentas que um aquífero em meios porosos não consolidados.

Tendo isso em conta, várias abordagens de amostragem podem ser implementadas, incluindo, mas não se limitando a intervalos discretos de amostra, perfil vertical de subsuperfície e estratégias de caracterização baseadas em seções transversais perpendiculares à direção do transporte de contaminantes (ou *transects*) e em caracterização sequenciada do meio.

Perfis verticais distribuídos em *transects* para caracterização das águas subterrâneas é uma estratégia comum de investigação de alta resolução tanto para meios porosos como para meios fraturados. Nesta abordagem, os perfis de alta resolução são avançados ao longo de *transects* geralmente perpendiculares ao gradiente hidráulico predominante no local. O *transect* inicial é construído a jusante da fonte conhecida ou suspeita; o segundo *transect* é construído na fonte secundária identificada ou o mais próximo possível dela. *Transects* subsequentes são então instalados para caracterizar tridimensionalmente a extensão da contaminação em fase dissolvida nas águas subterrâneas. Se a densidade dos dados for adequada, a análise espacial dos dados resultantes normalmente revela a morfologia transversal da contaminação das águas subterrâneas, incluindo a distribuição e posição vertical e horizontal dos centros de massa das plumas em fase dissolvida (**Figura 4**).

Figure 4 –Delimitação da pluma e de seu núcleo.



Fonte: <https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/hrscintro.cfm#introhow>.

O espaçamento vertical da amostra para análise laboratorial em cada perfil é normalmente minimizado na medida do possível, de acordo com os recursos do projeto e os objetivos a serem alcançados. O mais comum é a utilização de ferramentas de investigação em tempo real, como o MIP por exemplo, associadas também a medição em alta resolução das propriedades hidrológicas dos aquíferos que controlam a movimentação da contaminação para coletar medições verticalmente contínuas, sendo as amostras para análise laboratorial direcionadas adequadamente a zonas de maior concentração e de movimentação ou acúmulo das substâncias químicas de interesse (SQIs).

Além do mapeamento tridimensional das plumas de contaminação, a investigação de alta resolução fornece informações sobre as quantidades relativas de massa de contaminante presentes nas zonas transmissivas e não transmissivas, a quantificação do fluxo de massa e a sua atenuação ao longo do eixo longitudinal de movimentação das mesmas, informações essenciais para garantir que a remediação selecionada seja direcionada adequadamente.

A caracterização sequenciada dos meios é outra estratégia bastante utilizada nas investigações de alta resolução. Em geral, os dados de distribuição de contaminantes de um meio podem ser aproveitados para definir locais ótimos de amostragem nos meios adjacentes. Por exemplo, os resultados da amostragem de gás no solo podem ser usados para otimizar os locais de amostragem do solo e das águas subterrâneas. Da mesma forma, os dados das águas subterrâneas podem ser usados para determinar os locais de amostragem de vapores, do solo, das águas superficiais e de sedimentos adjacentes nos pontos de descarga destas plumas nos corpos d'água.

As ferramentas usadas como parte da investigação de alta resolução podem ser divididas em quatro categorias (ITRC, 2019):

- 1. Ferramentas de detecção direta:** são aquelas que medem o parâmetro de interesse por meio de contato direto ou por amostragens discretas em posições específicas, sendo introduzidas na subsuperfície por meio de tecnologias *direct-push* e, portanto, limitadas à investigação de formações não consolidadas. Diferentes sensores podem ser adicionados nessas ferramentas para fornecer registros quanto à litologia e permeabilidade do meio e quanto à presença de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e presença de líquidos de fase não aquosa

(NAPLs - *Non-Aqueous Phase Liquid*). São exemplos desse tipo de ferramenta: fluorescência induzida por laser (LIF – *laser-induced fluorescence*), perfilador de imagem óptica (OIP – *optical image profiler*) e sonda de interface de membrana (MIP – *membrane interface probe*) para coleta de dados analíticos; teste de penetrômetro de cone (CPT – *cone penetrometer testing*) e condutividade elétrica (EC – *electrical conductivity*) para coleta de parâmetros físicos; ferramentas de perfilamento hidráulico como HPT (*hydraulic profiling tool*), APS (*Waterloo® advanced profiling system*) e HPT *groundwater profiler* (HPT-GWP); e *liners* flexíveis (FLUTeTM – *flexible underground technology*).

Ferramentas geofísicas de sondagens ou poços: medem o contraste das propriedades físicas de diferentes materiais, sendo usadas para inferir ou estimar parâmetros de interesse. A geofísica em furos de sondagem abertos ou revestidos é utilizada para coletar dados físicos, hidráulicos e químicos que podem ser correlacionados com outros furos próximos. Em geral, são aplicadas onde os métodos de detecção direta não podem ser usados, normalmente em formações muito densas ou consolidadas e a grandes profundidades (aquíferos rochosos e fraturados). Podem fornecer ainda dados sobre parâmetros que não podem ser obtidos com ferramentas de detecção direta, como por exemplo a porosidade. São exemplos desse tipo de ferramenta: sondas para medição da temperatura e resistividade do fluido ao longo do perfil do poço; dispositivo para fornecer o perfil vertical do diâmetro do poço; televisionamento óptico e acústico da parede de sondagens (OTV – *optical televiewer* e ATV – *acoustic televiewer*); detector passivo de radiação gama natural; medidores de vazão de poço.

2. **Ferramentas geofísicas de superfície:** são instrumentos geofísicos não intrusivos usados para avaliar a subsuperfície. Proporcionam medições indiretas das propriedades físicas dos materiais a partir de sinais produzidos por fontes naturais ou geradas, através do contraste das respostas de diferentes materiais. Por se tratar de um método indireto, requer correlação ou interpretação, estando sujeitas a erros de interpretação. Por este motivo, são mais eficazes quando usadas em conjunto com medições convencionais. Ferramentas geofísicas de superfície são geralmente portáteis e podem cobrir

grandes áreas. São exemplos desse tipo de ferramenta: imagens de resistividade elétrica (ERI – *electrical resistivity imaging* ou ERT – *electrical resistivity tomography*); radar de penetração no solo (GPR – *ground penetrating radar*); reflexão e refração sísmica; análise multicanal das ondas superficiais (MASW – *multichannel analysis of surface waves*); pesquisas eletromagnéticas (EM – *electromagnetic surveys*).

3. **Ferramentas de sensoriamento remoto:** são ferramentas que, geralmente, usam sensores baseados em satélite ou aeronaves para detectar e classificar objetos na superfície. O uso de *drones* equipados com sensores remotos para caracterização de *sites* tem se tornado cada vez mais frequente, principalmente, em áreas de difícil acesso e potencialmente perigosas, mantendo as pessoas fora de perigo. A USEPA, por exemplo, está usando *drones* para monitorar áreas do *Superfund* como o *site* de Ambler, a antiga capital mundial da fabricação de amianto, na Pensilvânia (GUARINO, B., 2015). São exemplos desse tipo de ferramenta: câmera de espectro visível; fotogrametria; coleta de amostras e monitoramento usando *drones*;

O sucesso no gerenciamento de uma área contaminada com a escolha e implantação de medidas de remediação mais eficientes e eficazes, não depende apenas da utilização de uma única ferramenta de alta resolução. Conforme apresentado anteriormente, essas ferramentas têm aplicações bastante específicas e devem ser utilizadas em conjunto, até mesmo com métodos tradicionais, de forma a obter as evidências necessárias que subsidiem conclusões e tomadas de decisão.

A possibilidade de mobilizar laboratórios em campo é uma estratégia que corrobora para que a interpretação de dados seja feita em tempo real. Os resultados obtidos devem ser discutidos com todos os tomadores de decisão envolvidos, visando uma estratégia dinâmica de trabalho que permita alterações e complementações ao plano de campo inicial.

O envolvimento de profissionais tecnicamente qualificados, tanto em campo como em escritório, é fundamental para a interpretação adequada dos dados e a revisão contínua do modelo conceitual. Segundo USEPA (2018), investigações bem-sucedidas usam equipe abrangente composta por técnicos multidisciplinares, partes interessadas e, no caso americano, o EPA ainda incentiva o uso de funcionários internos para fornecer suporte técnico e apoio regulatório. Nesta configuração, de modo geral, a equipe

técnica é responsável pelo desenvolvimento e atualização do MCA abrangente e a equipe regulatória e partes interessadas são responsáveis por revisar e comentar o conteúdo técnico, além de fornecer informações importantes sobre reutilização, critérios de decisão e estratégias para encerramento do caso. No Brasil, as agências ambientais não possuem uma estrutura capaz de atender este tipo de engajamento, restringindo-se apenas ao acompanhamento do cumprimento da legislação e emissão de sanções.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Apresentação

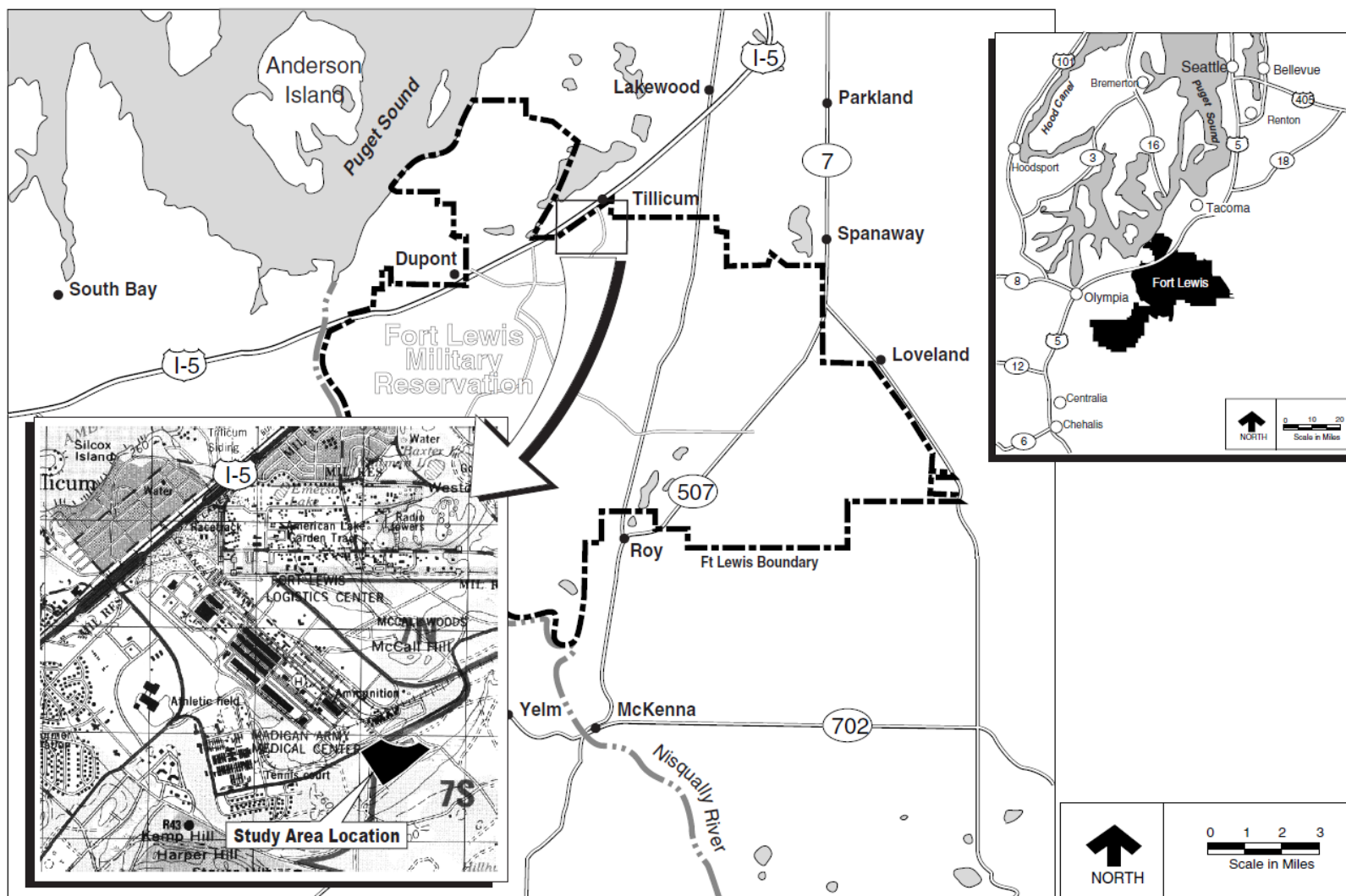
O estudo de caso em questão, escolhido na lista de casos disponibilizada pela USEPA (2016), aborda a área do antigo aterro industrial denominado *East Gate Disposal Yard* (EGDY), também conhecido como aterro 2, localizado no Centro de Logística de Fort Lewis, no estado de Washington, EUA (**Figura 5**).

Com uma área total de 14 hectares, o aterro industrial EGDY operou de 1946 até pelo menos 1971, como local de disposição de resíduos sólidos e de descartes líquidos. Combustíveis, óleos lubrificantes e solventes clorados, provenientes de atividades de limpeza e desengraxe de equipamentos conduzidas no depósito de munições Fort Lewis Mount Rainier, foram derramados como líquido livre ou em tambores em valas abertas no aterro industrial. Resíduos da construção civil e sucata industrial e militar também foram descartados em valas.

Em 1985, a USEPA detectou contaminação por tricloroeteno (TCE) nas águas subterrâneas da cidade de Tillicum, localizada próximo à reserva militar de Fort Lewis. Em 1997, o Departamento de Obras Públicas de Fort Lewis solicitou assistência ao *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) para condução de investigações ambientais na área do aterro EGDY, visando identificar a presença de fase livre no interior da propriedade que poderia estar agindo como fonte ativa de longo prazo para a pluma de TCE na água subterrânea. Investigações ambientais e estudos de viabilidade de remediação foram conduzidos entre 1986 e 1988. Um sistema *Pump and Treat* (P&T) para remediação do aquífero superior começou a operar em 1995. A investigação para identificação e delimitação das fontes de contaminação foram realizadas em duas fases (Fases I e II), iniciadas em 1999 e finalizadas em 2002.

Um dos objetivos da Fase I de investigação foi a delimitação da área utilizada para descarte de resíduos, a qual era anteriormente desconhecida devido à falta de registros ou controles do local. As valas com resíduos metálicos foram identificadas por meio de um levantamento eletromagnético e as valas que não continham resíduos metálicos foram identificadas a partir de fotos aéreas históricas. Esta primeira etapa indicou que o local de disposição era muito maior do que o anteriormente previsto, 14 hectares ao invés de 5 hectares.

Figure 5 – Localização do antigo aterro industrial *East Gate Disposal Yard (EGDY)*.



Fonte: USACE/URS (1999).

Posteriormente, uma caracterização do local em alta resolução (*High-Resolution Site Characterization*– HRSC), usando amostragem de água subterrânea em várias profundidades com tecnologia *direct push* e análise por cromatografia gasosa (CG) no próprio *site*, levou à rápida identificação de três áreas-fontes (denominadas Áreas 1, 2 e 3) de contaminação nas águas subterrâneas, onde a presença de fase livre era bastante provável. Abertura de valas exploratórias com uma retroescavadeira revelou a presença de tambores intactos cheios de produto líquido com até 75% de TCE.

Os resultados da investigação da Fase I foram usados para desenvolver um estudo de viabilidade que determinou que a intensiva remoção da fonte era a melhor estratégia a longo prazo para reduzir o risco e os custos de operação do sistema P&T. Uma ação de escavação e remoção dos tambores resultou na recuperação de aproximadamente 18.000 kg de TCE em produto líquido obtido em tambores e em solo contaminado nas adjacências. Adicionalmente, a tecnologia de tratamento termal foi escolhida para remediação das três áreas-fontes identificadas com fase NAPL (*non-aqueous phase liquid*).

A investigação da Fase II teve como objetivo a coleta adicional de dados de forma a permitir o projeto da remediação do tratamento termal e a avaliação de opções para otimização da operação do sistema existente de P&T ou sua substituição por uma barreira reativa permeável. Para cumprir este objetivo, uma ampla campanha de investigação de alta resolução (HRSC) foi programada, visando melhor definir a delimitação horizontal e vertical da pluma de NAPL; suas características físicas e químicas; as heterogeneidades na geologia local; e a presença de interferências subterrâneas.

O presente trabalho tem como foco a apresentação da estratégia de investigação de alta resolução da Fase II planejada em consonância com os conceitos da Tríade e da atualização do Modelo Conceitual da Área ao longo do ciclo de vida do projeto.

4.2 Modelo Conceitual Inicial

O Modelo Conceitual da Área (MCA), aqui denominado como inicial, baseia-se no conhecimento das fontes e da distribuição dos contaminantes e caracterização da geologia e hidrogeologia local, obtidos com os resultados da investigação da Fase I.

A análise de fotografias aéreas antigas mostrou que o aterro EGDY foi operado a partir de meados da década de 1940 até cerca de 1971. No início da sua operação duas

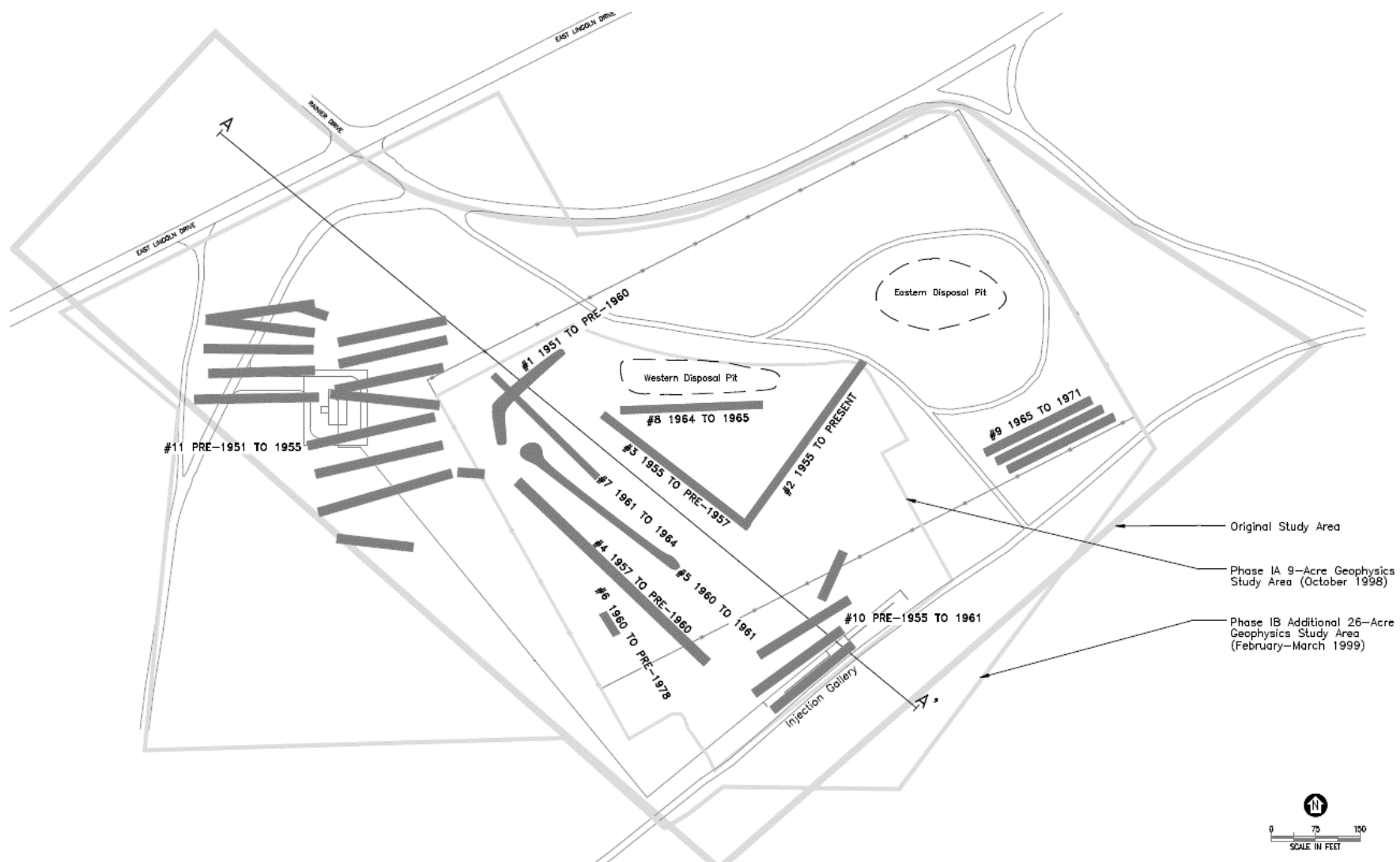
grandes cavas foram utilizadas para descarte de resíduos sólidos, e valas eram utilizadas para descarte de resíduos líquidos, algumas delas atingindo provavelmente a profundidade do lençol freático. Após o esgotamento da capacidade das cavas, por volta de 1957, as valas passaram a ser utilizadas para recebimento de descartes líquidos e resíduos sólidos, sugerindo em função da menor capacidade que um volume limitado de resíduos passou a ser transportado para o local. Foi verificado que as valas que receberam resíduos líquidos estão localizadas principalmente na porção oeste do aterro EGDY, onde áreas com manchas escuras no solo identificadas nas aerofotos indicam provável despejo superficial de resíduos líquidos. Valas com resíduos também foram identificadas fora da área cercada do aterro, conforme mapeamento mostrado na **Figura 6**.

Os NAPLs descartados na área do EGDY consistiram em solventes clorados (principalmente TCE), combustíveis, óleos e lubrificantes. Embora as propriedades químicas e físicas destes compostos sejam bastante conhecidas quando considerados individualmente, a composição das misturas amostradas na área do EGDY se mostraram bastante variáveis, sendo considerado certo nível de incerteza na taxa e transporte dos contaminantes em subsuperfície.

A análise dos produtos líquidos coletados nas valas e nos tambores variaram desde TCE puro até hidrocarbonetos totais de petróleo (TPHs) com baixa concentração de TCE. Os resultados analíticos em amostras de solo e água subterrânea mostraram altas concentrações de TPH e de TCE, indicando que a área de estudo possuía fase livre do tipo LNAPL e DNAPL (*light* e *dense non-aqueous phase liquid*, respectivamente) e presença de fase residual no solo.

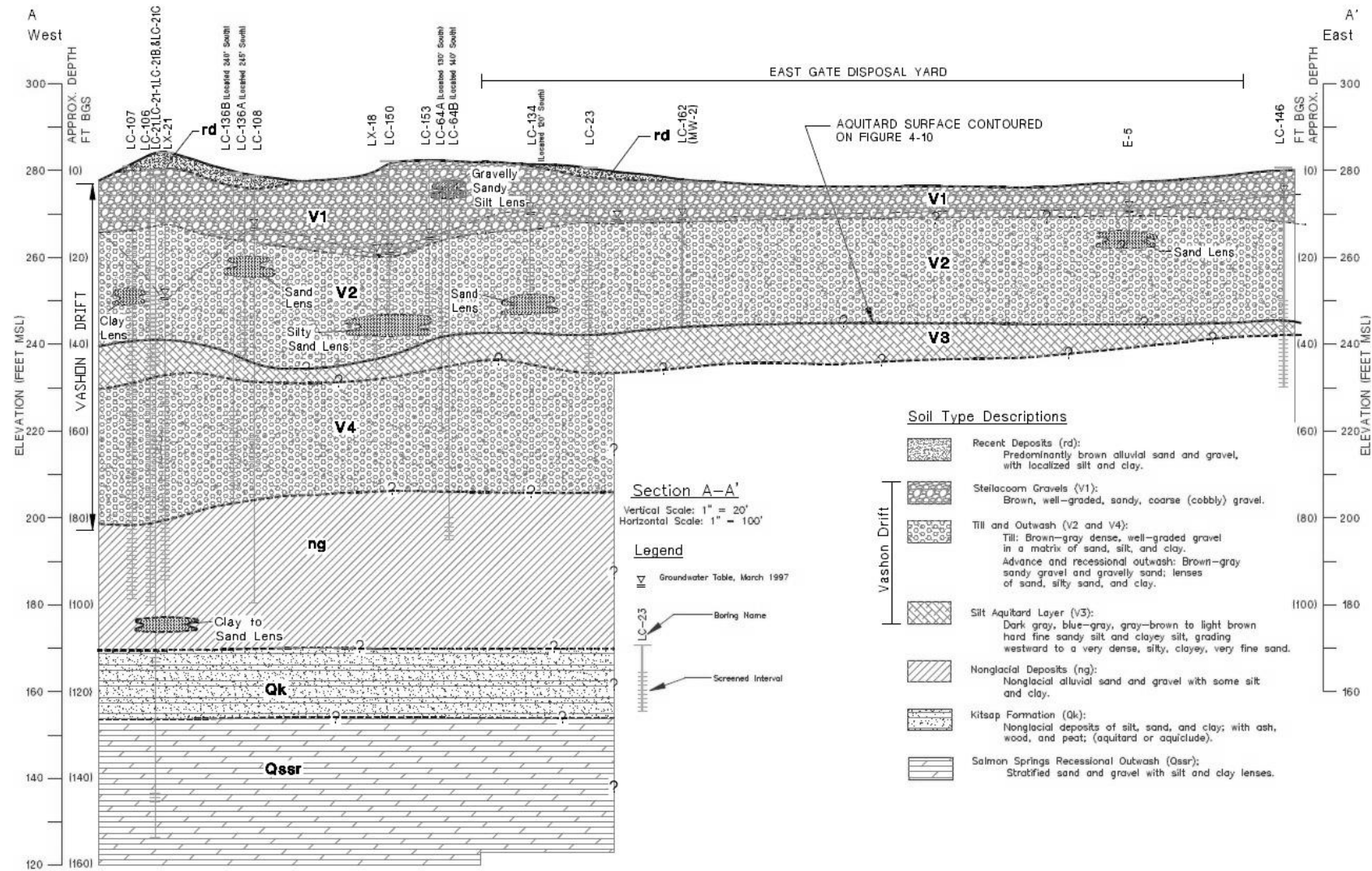
A geologia da área de estudo reflete muitos dos processos e eventos que afetaram as planícies de Puget Sound, região costeira do Noroeste Pacífico, no estado de Washington. A série de glaciações do Pleistoceno e os períodos interglaciais deixaram um registro deposicional distinto, resultando em uma estratigrafia extremamente heterogênea. A **Figura 7** apresenta a seção geológica A-A' (indicada na Figura 6) da subsuperfície do aterro EGDY, obtida através da interpretação dos vários boletins de sondagens executadas no local.

Figure 6 – Mapeamento das cavas e valas de disposição de resíduos identificadas em EGDY.



Fonte: USACE/URS (1999).

Figure 7 – Seção geológica A-A' do aterro EGDY.



Fonte: USACE/URS (1999).

De acordo com esta seção geológica, observa-se que a geologia local é composta por depósitos recentes, depósitos glaciares do *Drift Vashon* (*Steilacoom Gravel*, *Vashon Till*, *Vashon Glacial Outwash* e *Silt Aquitard Layer*), depósitos não glaciares (*Pre-Vashon/Post-Kitsap* e *Kitsap*) e depósitos glaciares da unidade *Salmon Springs*, os quais são descritos a seguir:

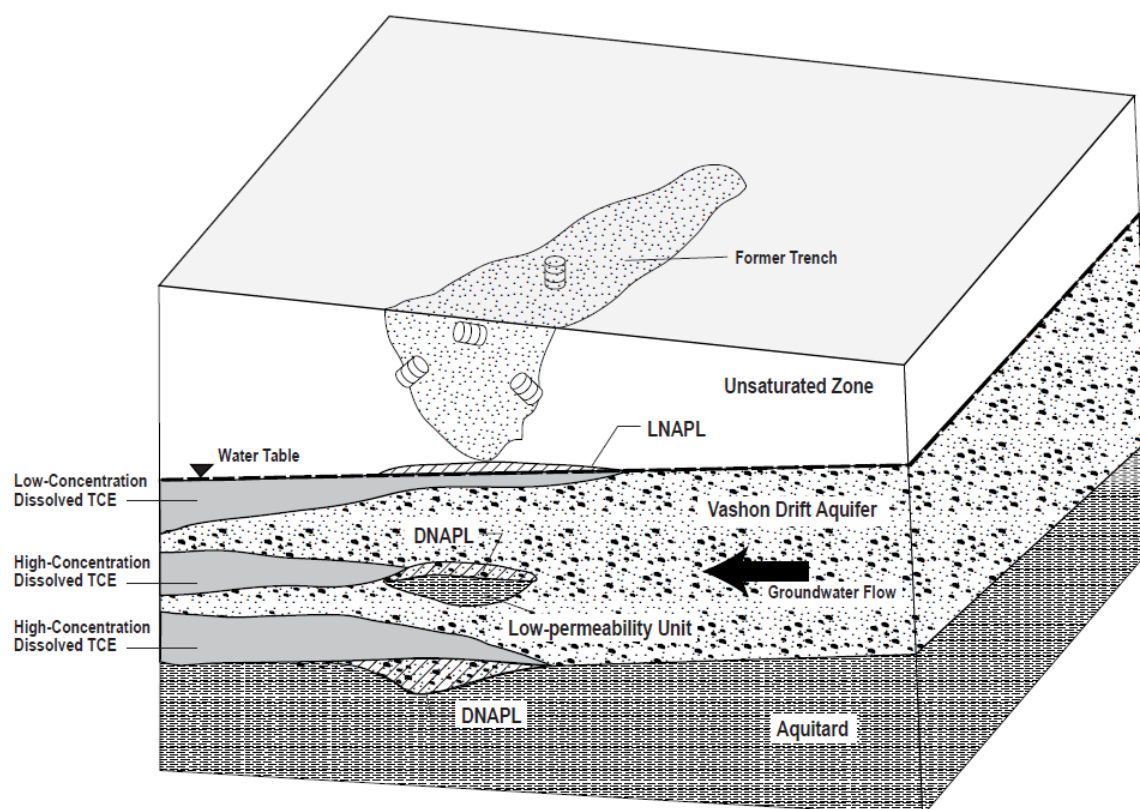
- Depósitos recentes: sedimentos aluvionares nas cores marrom e preta, compostos por areia e cascalho com porções localizadas de silte e argila;
- *Steilacoom Gravel*: unidade geológica superior predominante com cerca de 4m de espessura, composta por areia e cascalho marrom depositados em canais entrelaçados formados pela rápida descarga do lago glacial Puyallup;
- *Vashon Till*: cascalho marrom e cinza, denso, bem graduado em matriz de areia, silte e argila;
- *Vashon Glacial Outwash*: unidade composta principalmente por areia e cascalho, marrom e cinza, variegados, mal graduados, com lentes localizadas de areia, silte e argila;
- *Silt Aquitard Layer*: consiste em camada de silte arenoso e argiloso, rijo, gradando a oeste para camada de areia fina, siltosa e argilosa, bastante densa, com variações nas cores cinza escuro, cinza azulado, cinza claro, marrom acinzentado e marrom claro;
- *Pre-Vashon e Post-Kitsap*: depósitos não glaciares compostos por sedimentos aluvionares compostos por cascalho, areia e porções de silte e argila;
- *Kitsap*: esta unidade geralmente consiste em silte argiloso, areia siltosa e silte arenoso, nas cores marrom e preto, com ocorrência ocasional de cascalho fino, turfa e detritos orgânicos; e
- *Salmon Springs*: unidade glacial encontrada sob a Formação Kitsap composta por cascalho arenoso com detritos orgânicos e lentes de areia.

Em relação à hidrogeologia local, o aquífero superficial raso está presente nas camadas permeáveis *Steilacoom Gravel* (V1) e *Vashon Glacial Outwash* (V4) e na camada menos permeável *Vashon Till* (V2). A profundidade média do nível d'água, medido em março de 1997 e apresentado na Figura 7, é de 3 metros e o fluxo das águas subterrâneas regional é predominantemente para O-NO. Nos pontos LX-18 e LX-21 (poços de bombeamento do sistema P&T) é possível observar os cones de rebaixamento do lençol freático.

Destaca-se ainda a presença da camada menos permeável e aparentemente contínua dentro do *Drift Vashon*, a qual funciona como um aquitarde (unidade V3), além das lentes menos permeáveis nos depósitos *Vashon Till* (V2). Tanto as condições de fluxo da água subterrânea como a migração de DNAPLs podem ser afetadas pela presença da camada contínua do aquitarde como pelas lentes com mudança relativa de permeabilidade.

A **Figura 8** apresenta uma representação esquemática do MCA, tendo em conta as informações disponíveis quanto à fonte de contaminação, distribuição dos contaminantes, geologia e hidrogeologia da área de estudo.

Figure 8 – Modelo Conceitual da Área (MCA) do aterro EGDY.



Fonte: USACE/URS (1999).

As principais lacunas de dados identificadas ao final da investigação da Fase I foram a necessidade de detalhamento quanto ao aquitarde (espessura e continuidade), delimitação das fases livres de LNAPL e DNAPL, entendimento das propriedades físico-químicas da fase NAPL, identificação de adicionais fontes de contaminação fora do aterro, extensão da pluma de fase dissolvida e direção do fluxo d'água subterrâneo na porção sudoeste do EGDY.

4.3 Escopo, Metodologia das Investigações e Plano de Comunicação

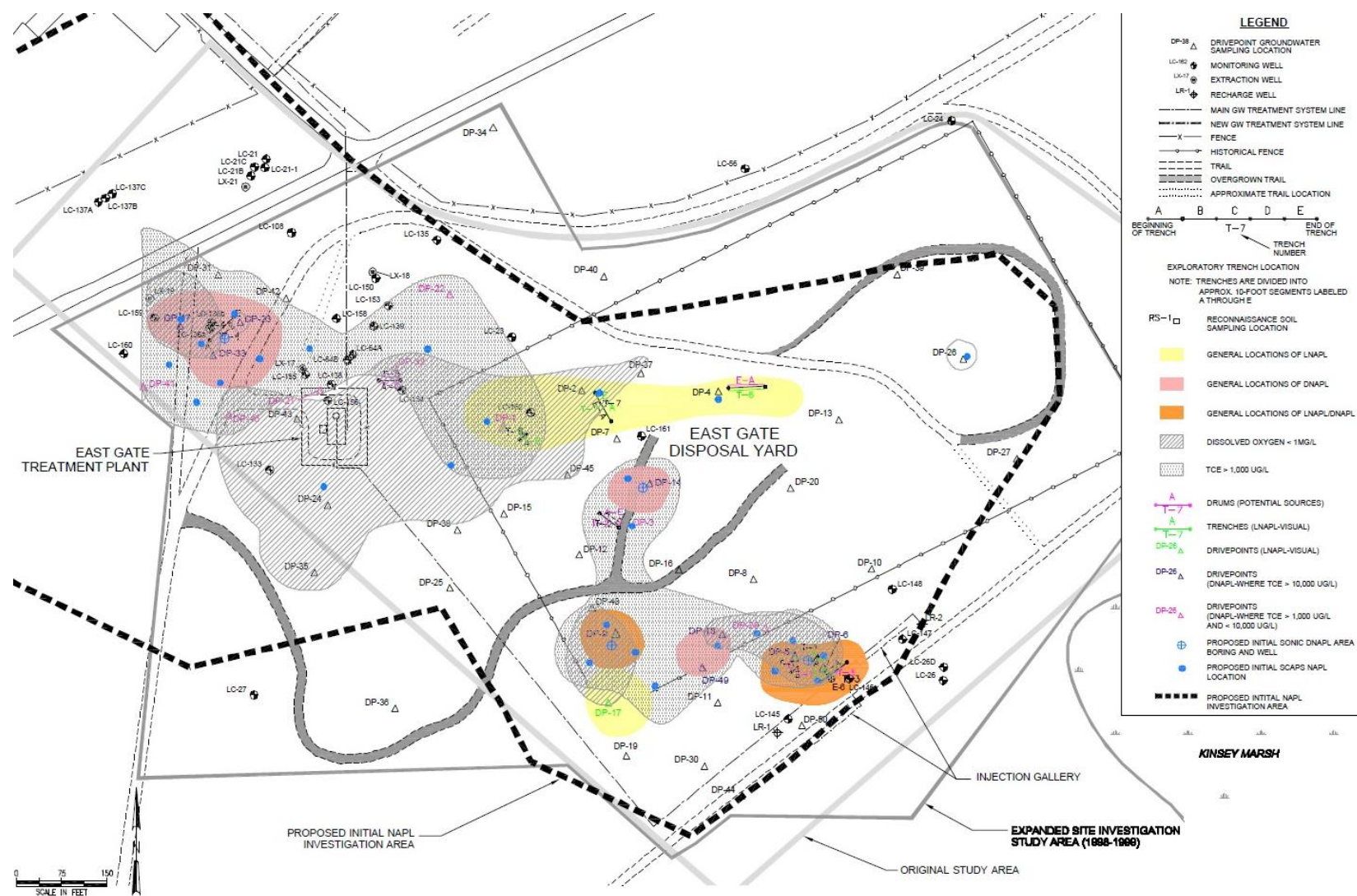
A investigação da Fase II teve como principal objetivo endereçar as lacunas identificadas no Modelo Conceitual da Área (MCA), de modo a permitir o projeto e a estimativa de custos da remediação das fontes de contaminação por tratamento térmico, bem como a otimização do sistema de remediação P&T e, eventualmente, sua substituição por uma barreira reativa permeável.

Para alcançar esse objetivo, o Plano de Gerenciamento da Fase II (USACE / URS, 2001) definiu uma estratégia de investigação iterativa, na qual o plano de amostragem e as respectivas tecnologias de investigação são atualizados em campo com base nos dados coletados e refinamento do MCA. Uma lista com as ferramentas aplicáveis e um plano de investigação inicial (**Figura 9**) foram apresentados como orientação, podendo a quantidade e a locação dos pontos de investigação serem alterados em campo de modo que as lacunas do MCA pudessem ser preenchidas.

A partir dessa abordagem de investigação dinâmica, as atividades de campo foram desenvolvidas entre junho de 2001 a abril de 2002, contando com:

- Abertura de valas exploratórias com o uso de retroescavadeira em potenciais áreas fontes identificadas fora do limite do aterro EGDY;
- 3 sondagens para coleta de dados de fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence – LIF*) na área do EGDY, usando equipamento de perfuração SCAPS (*Site Characterization and Analysis Penetrometer System*);
- 30 sondagens para coleta de dados com MIP/EC (*Membrane Interface Probe / Electrical Conductivity*) na área do EGDY, usando perfuratriz Geoprobe;
- 76 sondagens na área do EGDY para coleta de amostras de solo, usando perfuratriz sônica;
- 15 piezômetros na área à sudoeste do aterro EGDY, em perfurações feitas com Geoprobe;
- 1 poço de monitoramento convencional com seção filtrante única com 9 m de profundidade e 12 poços de monitoramento multiníveis do tipo CMT (*continuous multi-channel tube*) com até 33 m de profundidade e 4 a 6 canais de monitoramento na área do EGDY, nas perfurações sônicas;
- Amostragem de águas subterrâneas nos piezômetros e poços de monitoramento instalados para análise de VOC e TPH;

Figure 9 – Plano de investigação inicial.



Fonte: USACE/URS (2001).

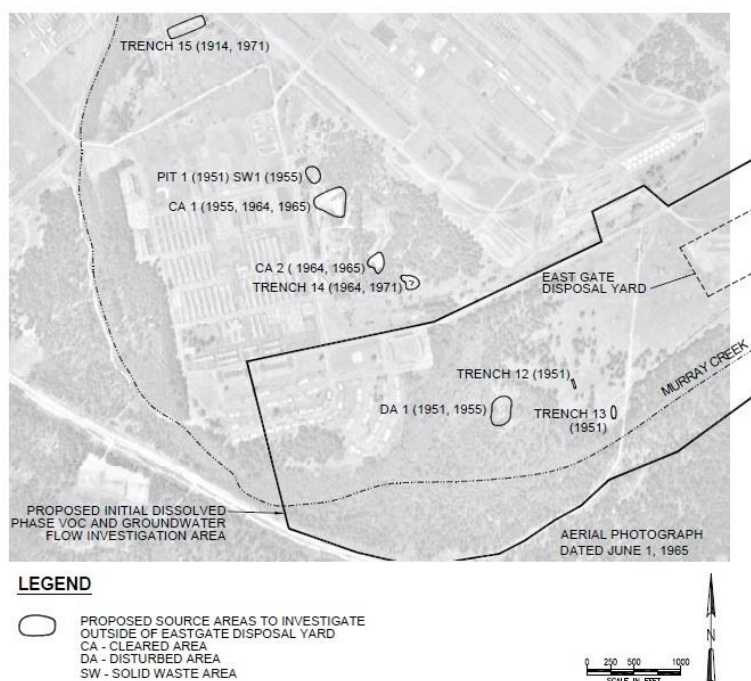
- Amostragem de águas superficiais ao longo do córrego Murray para análise de VOC; e
- Investigação geofísica na porção norte do aterro EGDY, usando imagens de resistividade elétrica (*Electrical Resistivity* - ER), polarização induzida (*Induced Polarization* - IP) e radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR).

A seguir, são descritas as tecnologias e metodologias para as investigações e o plano de comunicação estabelecido para permitir a abordagem dinâmica de investigação.

4.3.1 Investigação em outras áreas potenciais

A presença de TCE em fase dissolvida fora da área do aterro EGDY, em oposição ao gradiente regional das águas subterrâneas com direção O-NO, levou à investigação para identificação de outras fontes primárias fora do EGDY. Com base em análises de fotografias aéreas e em inspeção de reconhecimento local prévio, seis áreas foram escolhidas para abertura de valas exploratórias de até 1,5m de profundidade com o uso de retroescavadeira, a fim de procurar evidências de contaminação. Estas áreas foram nomeadas *Trench 12, 13, 14, Disturbed Area 1, Cleared Area 1 e 2*, conforme indicado na **Figura 10**.

Figura 10 – Localização das áreas investigadas por valas, fora do limite do aterro EGDY.



Fonte: USACE/URS (2002).

4.3.2 Investigações com método *direct-push* (SCAPS LIF)

O plano de trabalho da investigação Fase II previa a utilização de várias tecnologias pelo método *direct-push*, incluindo fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence* - LIF), ensaio de penetração de cone (*cone penetrometer test*– CPT), medições diretas com sonda MIP (*membrane interface probe*), GeoVis e amostradores de fase livre tipo FLUTe, através da plataforma de perfuração SCAPS (*Site Characterization and Analysis Penetrometer System*)¹.

Contudo, devido à abundância de cascalhos e pedregulhos na porção rasa da subsuperfície do aterro EGDY, a perfuração com a plataforma SCAPS foi prejudicada e não ultrapassou 6 m de profundidade. Por este motivo, a equipe de projeto decidiu encerrar a investigação com SCAPS e executar a caracterização *in situ* da fase NAPL com sonda MIP inserida do subsolo por sistema *direct-push* através de uma perfuratriz Geoprobe.

Embora as sondas MIPs fossem compatíveis com a Geoprobe, as demais ferramentas *direct-push* não puderam mais ser utilizadas. Por este motivo, a principal ferramenta utilizada para investigação direta foram as sondas MIPs.

Ao total, foram realizadas apenas três sondagens SCAPS e com coleta de dados LIF, denominadas SL001 (5,7m), SL002 (5,3m) e SL003 (5,4m).

4.3.3 Investigações com método *direct-push* (Geoprobe MIP/EC)

Uma perfuratriz Geoprobe modelo 6610DT foi utilizada para inserir a sonda MIP equipada com sensores para leitura contínua e em tempo real de condutividade elétrica (*electrical conductivity*– EC) e de VOCs. A sonda MIP foi conectada a um espectrômetro de massa DSITMS (*direct sampling ion trap mass spectrometer*), alojado em laboratório móvel mobilizado na área de estudo, o qual permitiu a especiação química dos compostos voláteis.

Um total de 30 sondagens foram executadas para coleta de dados com MIP/EC, denominadas SM003, SM005 a SM0012 e SM0029 a SM0049, distribuídas em três áreas com presença de NAPL identificadas na investigação Fase I. A profundidade

¹ SCAPS (*Site Characterization and Analysis Penetrometer System*) consiste em uma unidade de penetrômetro acoplada a um caminhão de 20 toneladas. Sondagens com uma variedade de sensores podem ser conectadas nesta plataforma e inseridas no solo até 50m de profundidade, através de uma prensa hidráulica (sistema *direct-push*), para obtenção de dados em tempo-real quanto às propriedades geofísicas do solo e ao tipo de contaminantes (derivados de petróleo, solventes, metais e explosivos), conforme ADAMS, J.W.; ROBITAILLE, G. (2000).

média alcançada nestas sondagens foi cerca de 10m, atingindo o topo do aquítarde intermediário. Apenas duas amostras de solo foram coletadas durante as investigações com Geoprobe, ambas coletadas no ponto SM0010.

As sondagens SM0013 a SM0028 também foram executadas com a Geoprobe e sistema *direct-push*, porém a sonda MIP não foi utilizada nestas perfurações e as mesmas foram finalizadas como piezômetros.

Na investigação com MIP, o número e a locação das sondagens foram determinados em campo, tendo como ponto de partida os pontos iniciais sugeridos no plano de investigação (Figura 9).

4.3.4 Investigação com perfuratriz sônica

Após as tentativas fracassadas de amostragem contínua de solo com a Geoprobe, em função da presença dos cascalhos e pedregulhos, optou-se pela utilização do método de perfuração sônica, também conhecido como perfuração vibratória ou sônica.

Um total de 76 sondagens (denominadas “RS”) foram executadas na área do aterro EGDY, por meio do uso de uma perfuratriz Rotosonic 150, atingindo profundidades de 11 a 35m. Estas sondagens tiveram como objetivo principal a delimitação horizontal e vertical da fase NAPL e como objetivos secundários a instalação de poços de monitoramento para identificação dos impactos (fases NAPL e dissolvida) na porção inferior do aquífero *Vashon*, abaixo do aquítarde intermediário.

Considerando que algumas dessas sondagens ultrapassariam a camada do aquítarde intermediário, um revestimento temporário de aço foi usado no processo de perfuração para evitar o colapso do poço e para isolar zonas contaminadas. Além disso, como regra geral foi estabelecido que perfurações com identificação de acúmulo de DNAPL líquido sobre o aquítarde intermediário deveriam ser paralisadas para evitar contaminação cruzada.

A locação inicial dessas sondagens foi baseada nos resultados das investigações de MIP e nas informações pré-existentes do MCA. A primeira perfuração (RS0001) foi intencionalmente locada em uma área considerada sem contaminação por NAPL, de forma a demonstrar que um selo poderia ser efetivamente posicionado no aquítarde intermediário e impedir a ocorrência de contaminação cruzada. Outras três sondagens (RS00002 a RS00004) foram alocadas intencionalmente dentro das três áreas suspeitas de NAPL, até a base do aquífero superior, para caracterização da fase livre e

estratigrafia. As sondagens subsequentes foram locadas tendo por base as informações obtidas em sondagens anteriores, na tentativa de delimitar a extensão horizontal e vertical da contaminação por NAPL.

Amostras contínuas de solo foram recuperadas e avaliadas quanto à estratigrafia e à presença de NAPL em cada uma das sondagens. Situações com ocorrência de odor, coloração, detritos e presença visível de NAPL foram anotadas nos boletins de sondagens. Métodos de *screening* incluindo o uso de detectores de fotoionização (PID) e de lâmpada ultravioleta (UV) foram usados para ajudar a avaliar a presença de contaminantes.

Após observação visual e realização dos métodos de *screening*, intervalos dos testemunhos foram selecionados para análise química do solo quanto aos parâmetros de VOC e TPH, sendo os resultados obtidos em 48 horas. Assim, a triagem de campo e os resultados laboratoriais foram combinados para delimitação da fase de NAPL.

Além disso, uma sondagem (RS0003) foi convertida em poço de monitoramento convencional raso, instalado até o topo do aquítarde em área com presença significativa de NAPL. Outras doze sondagens (RS0001, RS0002, RS0004, RS0005, RS0008, RS0070 a RS0076) foram convertidas em poços de monitoramento multiníveis do tipo CMTs com 4 a 6 canais, ultrapassando a camada do aquítarde intermediário e atingindo a base da Formação *Kitsap*. As demais sondagens foram tamponadas.

4.3.5 Instalação de piezômetros

Um total de 15 piezômetros, denominados LC-169 a LC-183, foram instalados a sudoeste do aterro EGDY com o objetivo de caracterizar a elevação do nível d'água e o regime de fluxo próximo à área do aterro.

Os piezômetros foram instalados nas perfurações realizadas com Geoprobe. Cada piezômetro foi instalado com poços com filtro pré-montado, formado por uma tela de aço inoxidável preenchida com areia, resultando em um diâmetro externo de 1,4", e tubos de revestimento e filtro de PVC com diâmetro de 3/4". O selo anular foi formado por bentonita granular envolta por papel e isolada do pré-filtro por um tampão de espuma de poliuretano. A calda de preenchimento foi formada de argamassa, *cap* de fechamento de alumínio e tampa de calçada protetora de 2,5" de diâmetro.

4.3.6 Instalação de poços de monitoramento

Um poço de monitoramento convencional e 12 poços de monitoramento multiníveis do tipo CMT foram instalados em perfurações sônicas e nomeados LC-184 a LC-196. O único poço de monitoramento convencional (LC-186) foi instalado na Área 1, em sondagem onde foi identificada presença significativa de NAPL na matriz do solo (RS0003), tendo por objetivo inicial a coleta de fase livre. No Plano de Gerenciamento da Fase II (USACE / URS, 2001), foi prevista a instalação de quatro poços de monitoramento até a base do aquitarde intermediário para coleta de DNAPL acumulado sobre essa camada menos permeável. Contudo, como não foram identificadas regiões de acúmulo de fase livre, apenas o poço LC-186 foi instalado.

Tal poço foi instalado com 9 m de profundidade e seção filtrante única de 3 m, sendo construído com tubo de PVC de 2" de diâmetro. O espaço anelar do filtro foi preenchido com areia, selado com bentonita e finalizado com acabamento de argamassa e tampa protetora de calçada de 8" de diâmetro.

Tendo em conta a falta de informação sobre possível impacto no aquífero abaixo do aquitarde intermediário, os poços CMTs foram instalados até 33 m de profundidade, atravessando o aquitarde intermediário e atingindo a base da Formação *Kitsap*. Os canais foram instalados nas zonas de fluxo mais permeáveis, definidas com base na descrição litológica das sondagens, visando avaliar a fase dissolvida da contaminação e o gradiente hidráulico tanto no aquífero superior como no aquífero entre o aquitarde intermediário e a Formação *Kitsap*.

A locação dos primeiros poços seguiu o posicionamento sugerido no plano de investigação inicial (Figura 9), sendo os demais pontos locados com base nos resultados das investigações com MIP, nas perfurações sônicas e nas amostras dos primeiros poços instalados, sem a intenção de formar *transects*.

Os poços CMTs foram instalados com tubo de polietileno estrudado de 1,7" de diâmetro da Solinst Canada Ltda, com 7 canais. Os poços LC-184, LC-185 e LC-187 a LC-189 foram construídos com 4 canais, o poço LC-194 foi construído com 5 canais, e os poços LC-190 a LC-193, LC-195 e LC-196 foram construídos com seis canais cada. Após a montagem dos canais na superfície, os poços foram instalados nas perfurações. O espaço anelar das zonas filtrantes de cada canal foi preenchido com areia e isolado das demais zonas filtrantes com selo de bentonita. O acabamento dos poços CMTs foi feito com argamassa e tampa protetora de calçada de 8" polegadas.

4.3.7 Amostragem de água subterrânea

Um total de 28 amostras de água subterrânea (*grab samples*) foram coletadas nas perfurações de MIP (3 amostras) e nas 15 perfurações com Geoprobe para instalação dos piezômetros localizados à sudoeste do aterro EGDY.

Segundo o Relatório de Investigação de Campo da Fase II (USACE / URS, 2002), as amostras nestas localidades foram coletadas com *bailers* de Teflon, inseridos dentro da haste do Geoprobe, sem a realização de purga prévia. Sempre que possível, a coleta de amostra foi tentada em duas profundidades discretas, uma rasa e outra profunda, por piezômetro. As amostras foram analisadas quanto ao parâmetro de VOC.

Os poços de monitoramento CMTs foram desenvolvidos de 2 a 7 dias após a finalização da instalação. Após o desenvolvimento, os poços foram deixados em equilíbrio por pelo menos 1 semana. A amostragem foi feita por bombeamento de baixa vazão (*lowflow*), com bomba peristáltica e purga até a estabilização dos parâmetros de campo (pH, temperatura, condutividade elétrica, potencial de oxi-redução, oxigênio dissolvido e turbidez). As amostras foram coletadas para análise de VOC.

Em relação ao poço de monitoramento convencional, como foi detectada presença de fase livre, o mesmo não foi desenvolvido. Portanto, 4 semanas após a finalização da instalação, o poço foi purgado e amostrado por bombeamento de baixa vazão, seguindo o mesmo procedimento de amostragem dos poços CMTs. As amostras foram então coletadas para análise de TPH e VOC.

As amostras de água subterrânea coletadas dos piezômetros foram denominadas “SG”. Foram coletadas em duplicata e analisadas pelo espectrômetro de massa (DSITMS) do laboratório móvel mobilizado na área em estudo e por um laboratório fixo no prazo de 48 horas.

Já as amostras coletadas nos CMTs e no poço convencional foram denominadas pela nomenclatura do poço de monitoramento acrescentando-se o número do canal do poço no caso dos CMTs (i.e., LC-0184-01 – amostra coletada no poço LC-0184 no canal 01). Estas amostras foram analisadas pelo laboratório fixo num prazo de até 48 horas.

4.3.8 Amostragem de água superficial

Doze amostras de águas superficiais foram coletadas ao longo do córrego Murray, localizado a sudoeste do aterro EGDY, para análise de VOC usando o espectrômetro

de massa (DSITMS) do laboratório móvel mobilizado na área de estudo. Estas amostras foram espaçadas de 90 a 120 m, começando perto da nascente do córrego Murray e da amostragem SW-MC-1. Os novos locais de amostragem foram numerados em ordem sequencial de SW-MC-0005 a SW-MC-0016.

As amostras foram coletadas a uma distância de 0,6 a 0,9 m da margem sul do córrego com *bailer* de Teflon. Os pontos de amostragem foram demarcados temporariamente com estacas de madeira e, posteriormente, as coordenadas de todos os pontos foram tomadas por GPS.

4.3.9 Investigação geofísica

O levantamento geofísico de uma área de 20.000 m² na porção norte do aterro EGDY foi realizado com o objetivo de caracterizar a natureza, a profundidade e a extensão da estratigrafia desta região para melhor entender o comportamento do NAPL. De interesse especial foram as unidades de baixa permeabilidade, as quais controlariam a migração vertical do DNAPL.

Três tipos de técnicas: resistividade elétrica (ER), polarização induzida (IP) e radar de penetração no solo (GPR) foram selecionadas para realizar o objetivo da pesquisa.

4.3.10 Plano de Comunicação

A natureza dinâmica das investigações exigiu o estabelecimento de um plano de comunicação entre os vários membros da equipe multidisciplinar formada para conduzir o trabalho.

De acordo com o Plano de Gerenciamento da Fase II (USACE / URS, 2001), a equipe do projeto consistia em representantes do Departamento de Obras Públicas de Fort Lewis, do USACE (*U.S. Army Corps of Engineers*) e da consultoria URS Corporation, responsáveis pelo fornecimento da estrutura geral para as amostragens e análises e pela definição dos objetivos do projeto e dos requisitos de qualidade, garantindo que os mesmos fossem atingidos.

O Departamento de Obras Públicas de Fort Lewis era a autoridade final do projeto e seus representantes os destinatários finais de todos os documentos do projeto, tendo como atribuições comentar as versões preliminares dos documentos, aprovar as versões finais e autorizar variações de custo e escopo.

Os membros da consultoria URS eram os responsáveis pelo gerenciamento e supervisão do projeto. Além da URS, um gerente de projeto da USACE era o responsável local pelo acompanhamento do orçamento do projeto e mudanças no escopo.

Dentro da equipe do projeto, os especialistas da USACE com experiência em geologia, hidrogeologia e química formavam a equipe técnica, a qual proporcionava presença contínua, integrada e multidisciplinar em todo o processo, estando em campo quando da coleta de dados relacionados à área de sua especialização.

O papel mais importante da equipe técnica era integrar e compreender as inconsistências entre os dados e o Modelo Conceitual da Área (MCA). A equipe técnica estava em contato diariamente, interpretando os dados postados no software eRoom pela equipe de suporte. Os representantes da USACE em consulta por telefone com os membros da equipe do projeto tomavam as decisões relativas ao presente e ao dia seguinte de campo.

A equipe de suporte do projeto incluía o pessoal técnico e de suporte e operadores de equipamentos diretamente envolvidos na coleta de dados e amostragem. Era composta por representantes da USACE, URS, contratada de perfuração sônica da USACE e subcontratados da URS, os quais ficavam em contato diário com o representante do local pela USACE podendo ser convidados a participar das reuniões técnicas para apresentar resultados ou outras questões técnicas, quando necessário.

Adicionalmente, representantes do laboratório *Cold Regions Research Laboratory* – CRREL ficavam a cargo do desenvolvimento e manutenção da ferramenta de visualização de dados.

Membros da Agência Ambiental (USEPA), do serviço de Pesquisa Geológica (*U.S. Geological Survey* – USGS) e do laboratório Battelle Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) também integravam a equipe do projeto para supervisão regulatória e suporte técnico. A comunicação destes membros quanto ao andamento das investigações era feita via eRoom, resumos semanais por e-mail, teleconferências envolvendo decisões importantes e reuniões quinzenais no local.

A aprovação do Departamento de Obras Públicas de Fort Lewis e da USEPA era necessária para desvios maiores na investigação (USACE / URS, 2001).

4.4 Resultados

A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos com cada uma das investigações realizadas.

4.4.1 Outras áreas potenciais

Um total de 42 valas exploratórias (nomeadas T001 a T042) foram escavadas nas 6 áreas selecionadas para a investigação e nenhuma evidência de descarte de resíduos foi observada nas áreas avaliadas. Tendo em conta a análise prévia com fotografias aéreas e com inspeção de reconhecimento do local e a abrangência da investigação com valas exploratórias, concluiu-se que a única fonte da contaminação na área era mesmo o aterro EGDY. Neste contexto, a pluma de fase dissolvida de TCE identificada à sudoeste do aterro EGDY pode ser explicada com base na mudança do fluxo d'água subterrâneo nesta área, condicionada pela proximidade do Córrego Murray, conforme discutido no item 4.5.

4.4.2 Resultados SCAPS LIF

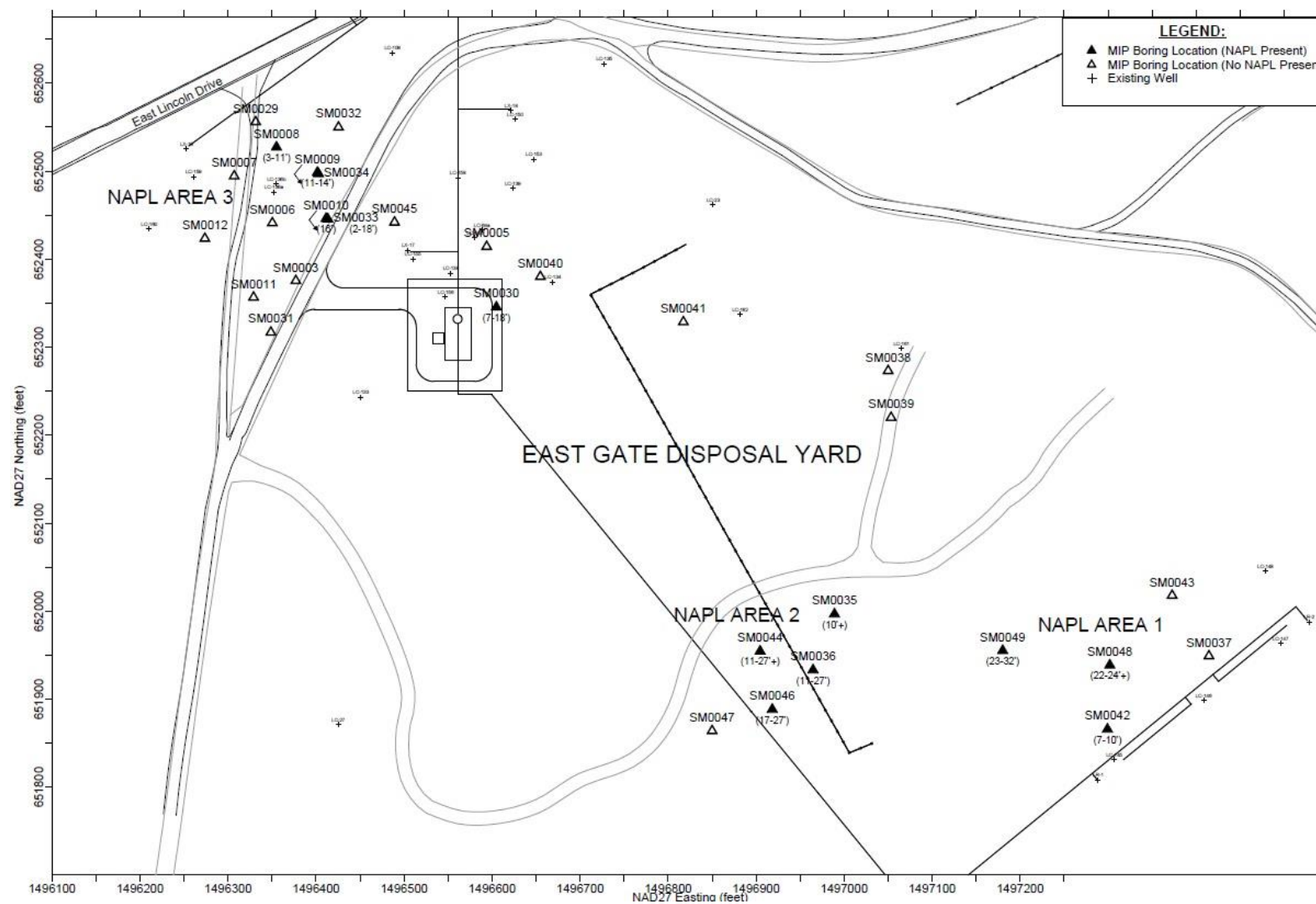
Três tentativas de leitura de LIF foram feitas no interior da área do aterro EGDY, nas sondagens SL001 (5,7m), SL002 (5,3m) e SL003 (5,4m). Embora tenha ocorrido baixa detecção de VOCs nestas perfurações, tais resultados foram desconsiderados uma vez que a profundidade das três perfurações foi insuficiente para caracterizar a profundidade da contaminação.

4.4.3 Resultados Geoprobe MIP/EC

Um total de 30 sondagens com avanço até o topo do aquítarde intermediário (aprox. 10m) foram realizadas com Geoprobe e sonda MIP para especiação de VOCs, distribuídas nas três áreas identificadas com presença de NAPL (**Figura 11**).

Na Área 1, foram realizadas 5 sondagens com MIP (SM0037, SM0042, SM0043, SM0048 e SM0049). Os principais compostos encontrados foram os solventes clorados, identificados nas perfurações SM0042, SM0048 e SM0049. O DCE foi detectado com concentração máxima de 100 mg/L no SM0042 (2 a 3 m) e o TCE com concentração máxima de 300 mg/L no SM0048 (6,7 a 7,3 m).

Figura 11 – Localização das sondagens e resultados com Geoprobe MIP.



Fonte: USACE/URS (2002).

Na perfuração SM0049, o TCE foi encontrado com concentração pico de 150 mg/L no intervalo de 7 a 9,7 m de profundidade, sendo que as concentrações caíram consideravelmente com o avanço da profundidade. Na Área 1, as concentrações pico de DCE e TCE foram suficientemente altas para representar presença de NAPL.

Na Área 2, foram realizadas mais 5 sondagens com MIP (SM0035, SM0036, SM0044, SM0046 e SM0047). Uma mistura complexa de hidrocarbonetos de petróleo foi identificada como principal contaminante. Embora não tenha sido possível determinar a concentração de todos os VOCs devido à falta de padrão, foi verificado que o NAPL estava presente provavelmente nas sondagens SM0036 (3,3 a 8,2 m), SM0044 (3,3 a 8,2 m) e SM0046 (5,1 a 8,2 m). Na sondagem SM0044, a sonda MIP não conseguiu avançar além de 8,2 m, não sendo esclarecido o motivo no relatório de investigação da Phase II (USACE/URS, 2002). Portanto, acredita-se que haja NAPL em profundidades maiores nesse ponto. Presença de LNAPL foi verificada em uma amostra coletada em um micropoço temporário colocado dentro da sondagem SM0035, a cerca de 3,0 m de profundidade. Essa observação corroborou a mudança de condutividade elétrica observada na mesma profundidade, indicando a interface de fluido não eletricamente condutor (NAPL) com fluido eletricamente condutor (água).

Um total de 6 sondagens foram realizadas entre as Áreas 2 e 3 (SM005, SM0030, SM0038 a SM0041) e 14 sondagens na Área 3 (SM003, SM006 a SM0012, SM0029, SM0031 a SM0034 e SM0045). Na Área 3, os solventes clorados, especialmente o TCE, foram identificados como principais contaminantes. A concentração máxima de TCE foi encontrada em SM0010 a aproximadamente 4,8 m de profundidade (20.000 mg/L). A alta concentração verificada neste ponto em comparação com as concentrações das demais sondagens, indica a presença de *hot spots* isolados sem distribuição lateral significativa. Destaca-se que houve uma grande redução na condutividade elétrica deste ponto (aproximadamente 30 mS/m) medida a 4,8 m de profundidade, indicando provável presença de fluido não eletricamente condutor (NAPL).

O perfil de MIP obtido mostra que a variação de concentrações nesta sondagem é máxima entre 4,8 e 5,4 m, havendo detecções até 8,8 m, porém em concentrações bastante reduzidas a partir de 6,8 m. Complementarmente, 2 amostras de solo foram coletadas nos intervalos de 4,5 a 5,2 m e 7 a 7,3 m de profundidade para análise de

VOC e TPH. TCE foi detectado na primeira amostra com concentração de 7,5 mg/kg e na segunda amostra com concentração de 6,8 -mg/kg.

4.4.4 Resultados das Amostras de Solo (perfurações sônicas)

Um total de 76 perfurações sônicas foram executadas na área do aterro EGDY, conforme apresentado na **Figura 12**. Em 7 sondagens não foram coletadas amostras de solo e nas 69 restantes, duas a nove amostras de solo foram coletadas em diferentes profundidades, totalizando 228 amostras de solo para análise de VOC e TPH em laboratório externo.

Conforme citado no item 4.3.4, após observação visual e medições com PID / UV, intervalos dos testemunhos foram selecionados para análise química do solo. A escolha das amostras de solo foi baseada nos seguintes critérios: proximidade com o nível d'água (NA), evidência visível ou leitura de UV indicando presença de NAPL e unidade estratigráfica menos permeável.

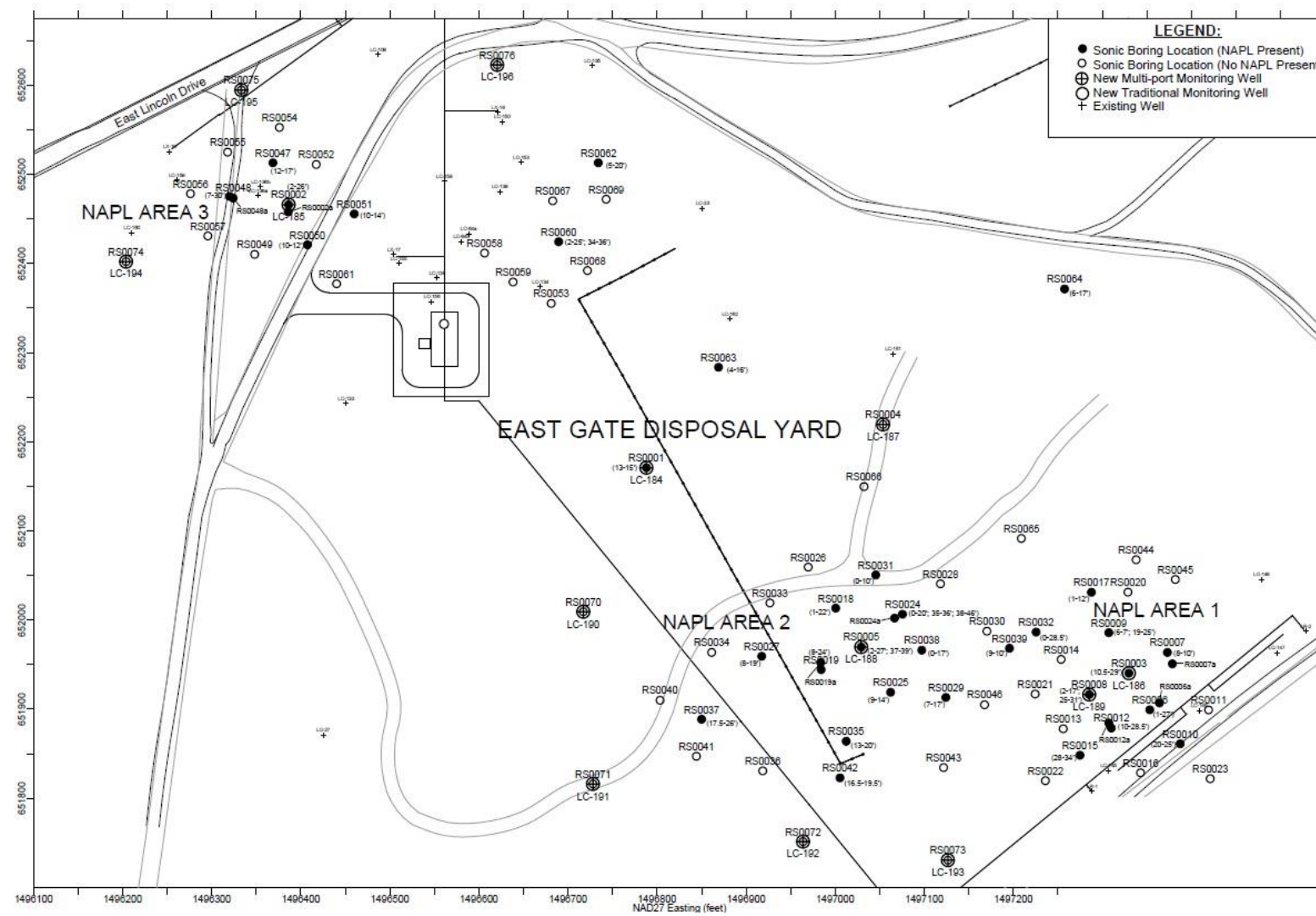
Os principais VOCs detectados foram cis-1,2-DCE e TCE, sendo o TCE mais comumente detectado, chegando a atingir 12.100 mg/kg na amostra RS0024-12,5m (Área 2). Sondagens realizadas ao redor da RS0024 não indicaram a mesma ordem de grandeza das concentrações.

Outras amostras com concentrações de TCE acima de 1.000 mg/kg foram 2.990 mg/kg (RS0002-1,8 a 2,0 m), 1.860 mg/kg (RS0005-3,6 a 4,0 m), 1.100 mg/kg (RS0012-4,2 a 4,5 m) e 2.460 mg/kg (RS0060-1,8 a 2,1 m). Com exceção do resultado da amostra RS0024-12,5 m, as concentrações de TCE e cis-1,2-DCE foram geralmente mais baixas na Área 2 do que nas Áreas 1 e 3.

Em zonas com contaminação visível de NAPL, as concentrações de TCE variaram da não detecção a 12.100 mg/kg (média de 328 mg/kg) e as concentrações de cis-1,2-DCE variaram da não detecção a 82 mg/kg (média 6,7 mg/kg). Nas zonas sem presença visível de NAPL, a média das concentrações de TCE e cis-1,2-DCE caem para 0,62 mg/kg e 0,115 mg/kg. A diferença nos resultados analíticos corroborou ainda mais a classificação visual das zonas com NAPL.

Análises da distribuição vertical de NAPL em relação a geologia local são apresentadas no item 4.5 Discussão dos Resultados.

Figura 12 – Localização das perfurações sônicas e resultados.



Fonte: USACE/URS (2002).

Em relação aos TPHs, os principais contaminantes identificados foram os hidrocarbonetos na faixa do diesel e do óleo. Os valores de diesel variaram da não detecção até 8.850 mg/kg, enquanto os valores de óleo variaram de não detectados até 15.300 mg/kg. As concentrações de TPH foram mais baixas na Área 3.

Assim como para os VOCs, a diferença entre a médias das concentrações de TPH nas zonas com e sem presença visível de NAPL foi superior a duas ordens de magnitude, suportando a classificação visual das zonas com NAPL.

4.4.5 Resultados das Amostras de Água Subterrânea

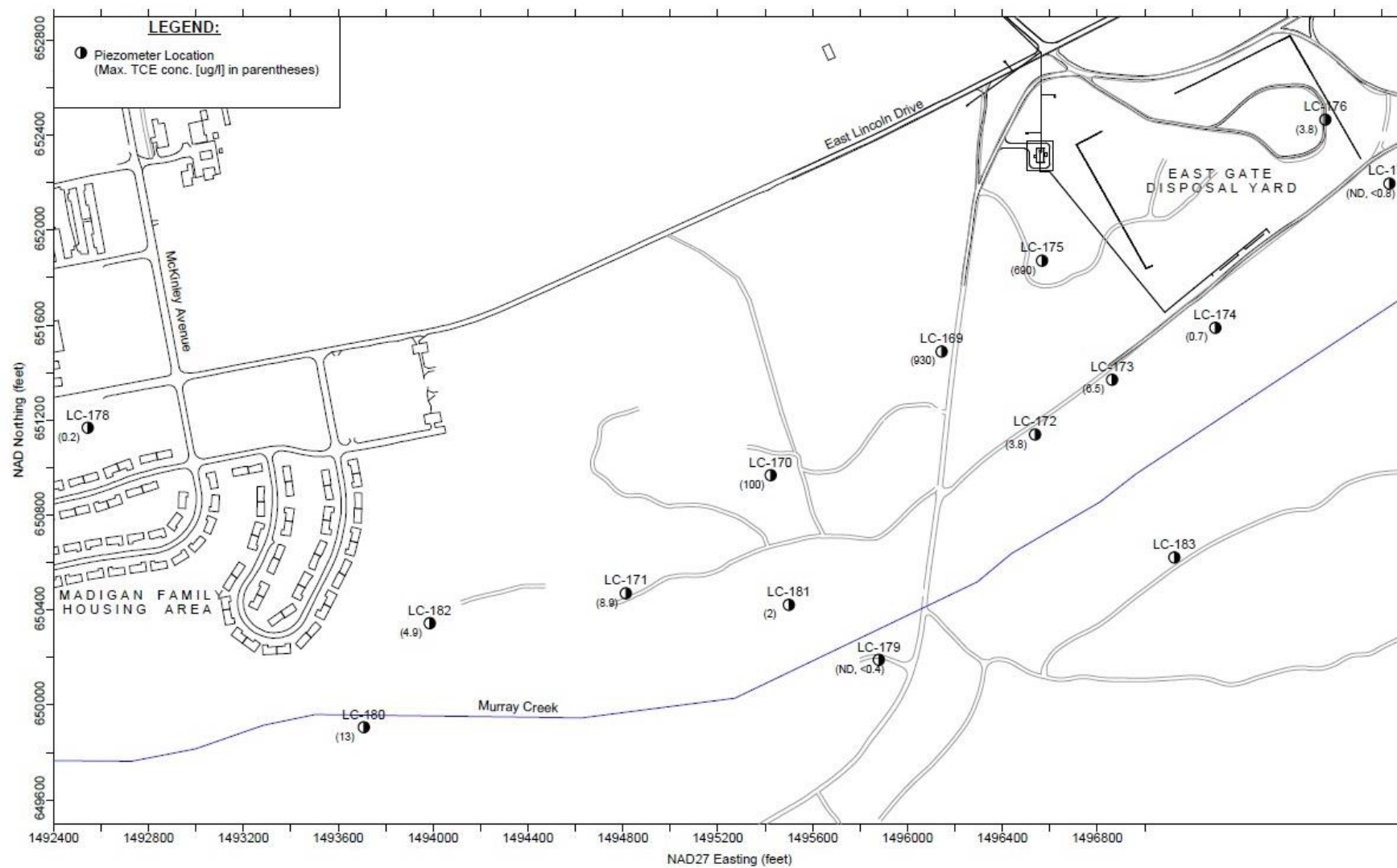
Um total de 84 amostras de água subterrânea foram coletadas durante a investigação de Fase II. Deste total, 56 amostras foram coletadas em poços de monitoramento e 28 *grab samples* foram coletadas nas perfurações de MIP (3 amostras) e nas perfurações dos piezômetros (25 amostras). A **Figura 13** apresenta a localização dos piezômetros. Em relação às *grab samples*, as 3 amostras coletadas nas perfurações de MIP (SM0003, SM0009 e SM0010) estavam situadas próximo do centro da Área 3 e apresentaram resultados compatíveis com as substâncias químicas de interesse (SQIs) desta área. Resultados de TCE variaram de 17.000 a 61.000 µg/L, enquanto os resultados de cis-1,2-DCE variaram de 920 a 13.000 µg/L.

As 25 amostras de água subterrânea coletadas nas 15 perfurações para instalação dos piezômetros indicaram o TCE e o cis-1,2-DCE como as únicas SQIs detectadas em concentrações elevadas nesses locais. Os valores de TCE variaram de não detectados a 930 µg/L e os valores de cis-1,2-DCE variaram de não detectados a 1.200 µg/L.

As amostras de água coletadas nos 12 poços de monitoramento CMTs indicaram detecções de TCE até 11.000 µg/L (LC-195-3) e detecções de cis-1,2-DCE até 5.730 µg/L (LC-195-2). Em geral, os canais mais rasos apresentaram níveis mais altos de contaminação do que os canais mais profundos. Nenhuma outra SQI foi detectada.

O poço de monitoramento convencional (LC-186), instalado na Área 1 (Figura 12), não apresentou uma quantidade mensurável de NAPL ao longo da investigação de campo, contudo foi amostrado para análise da fase dissolvida de VOC e TPH. TCE foi detectado em 11.200 µg/L, cis-1,2-DCE foi detectado em 1.180 µg/L e TPH foi detectado em 243 µg/L para a faixa do diesel e não foi detectado para a faixa do óleo de motor.

Figura 13 – Localização dos piezômetros e resultados a sudoeste do aterro EGDY.



Fonte: USACE/URS (2002).

4.4.6 Resultados das Amostras de Água Superficial

Um total de 12 amostras de águas superficiais foram coletadas ao longo do córrego Murray, a sudoeste do aterro EGDY, conforme indicado na **Figura 14**. O TCE foi detectado em concentrações que não ultrapassaram 2,33 µg/L.

4.4.7 Resultados da Geofísica

O levantamento geofísico realizado a partir das técnicas de ER, IP e GPR na área de 20.000 m², situada na porção norte do aterro EGDY, não apresentou resultados conclusivos quanto à caracterização estratigráfica. Os resultados de ER tiveram fraca correlação com os dados estratigráficos das perfurações sônicas e os resultados de IP não tiveram nenhuma correlação. Além disso, o lençol freático aparentemente impediu a interpretação dos dados de GPR abaixo de 2,4 a 4,5 m de profundidade.

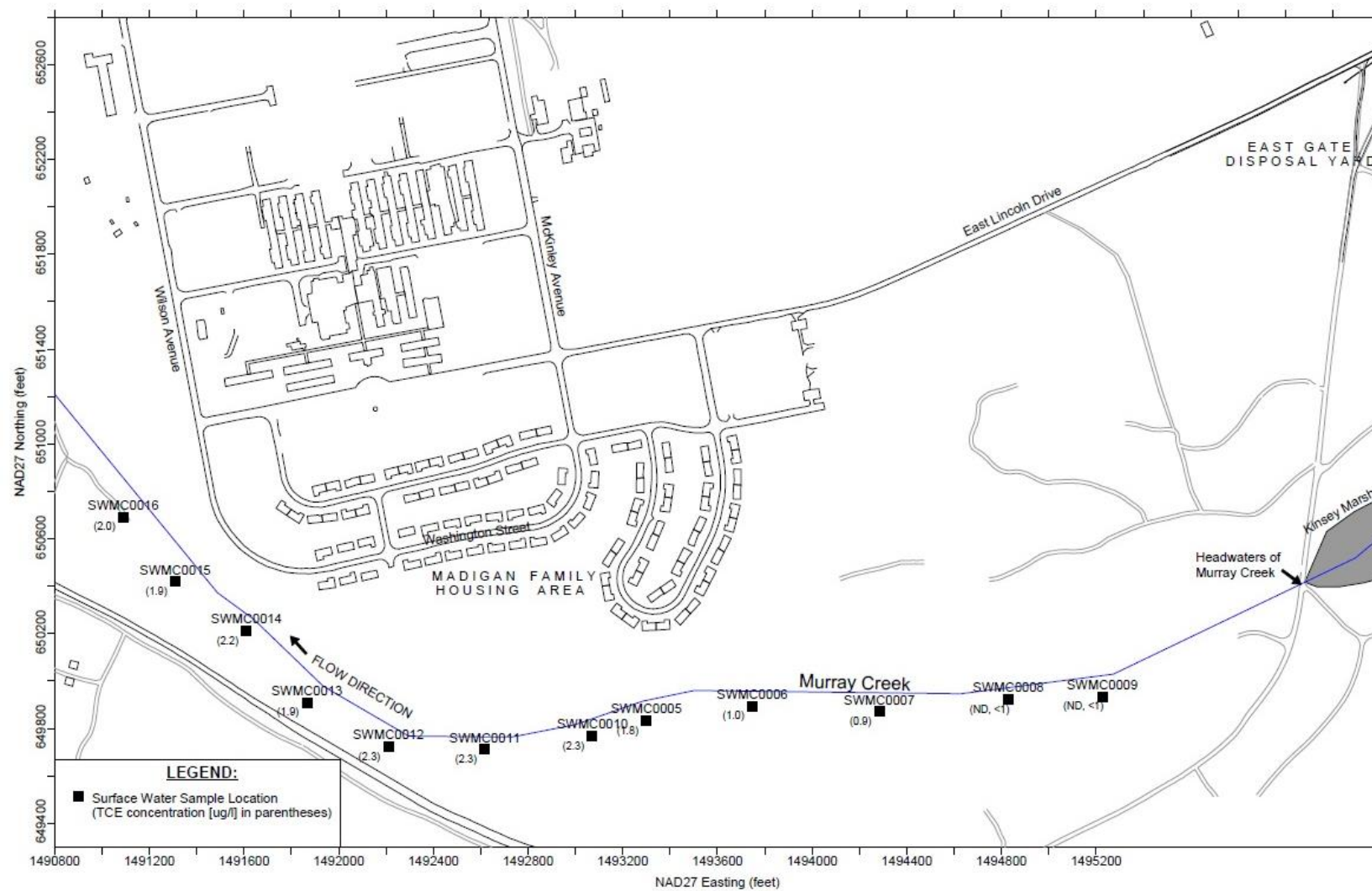
Como as amostras de solo obtidas nas perfurações sônicas permitiram a recuperação de testemunhos representativos e de alta qualidade, os dados destas amostras foram analisados em substituição aos dados geofísicos.

4.5 Atualização do Modelo Conceitual da Área

A análise do Modelo Conceitual da Área (MCA) resultante das investigações da Fase II e apresentado no relatório técnico elaborado por USACE/URS (2002) permitiu importantes atualizações em relação ao MCA inicial.

Em relação à geologia local, as várias sondagens executadas na Fase II para fins de investigação, coleta de amostras de solo e/ou instalação de poços de monitoramento, juntamente com os dados das investigações anteriores, permitiram a elaboração de oito seções geológicas da área de estudo com um nível maior de detalhamento dos contatos geológicos. Heterogeneidades não identificadas anteriormente e a persistência de estratos menos permeáveis puderam ser verificadas nesta segunda fase. Além disso, com base nos novos dados, foi possível uma reinterpretação da geologia local, com o agrupamento de algumas das unidades geológicas e com o reconhecimento de novas unidades.

Figura 14 – Localização e resultados das amostras superficiais coletadas no córrego Murray.



Fonte: USACE/URS (2002).

O entendimento em relação à hidrogeologia local também foi aprofundado. Com base nas investigações da Fase II, o aquitarde intermediário localizado dentro do aquífero *Vashon* foi definido como uma camada relativamente contínua dentro da área de estudo, ocasionando localmente a separação do aquífero em duas porções. Um segundo aquitarde composto por depósitos não glaciais, aquitarde *Non-Glacial* (referenciado nas etapas anteriores como *Kitsap*), foi confirmado abaixo da porção inferior do aquífero *Vashon*, separando-o do aquífero *Sea Level* (anteriormente *Salmon Springs*). Sotoposto a este aquífero, ocorrem unidades mais profundas de aquitarde e aquífero, as quais não foram avaliadas nesta investigação.

Embora a direção regional do fluxo d'água subterrâneo no aquífero *Vashon* seja para O-NO, a instalação dos piezômetros a sudoeste do aterro EGDY na Fase II mostrou que localmente o fluxo tem direção preferencial para O-SO, condicionada pela proximidade com a nascente do Córrego Murray (Figura 14), podendo variar sazonalmente. No aquífero *Sea Level*, o fluxo tem direção predominante para noroeste. A profundidade do nível d'água varia sazonalmente entre 1,5 a 4,5m de profundidade. Conforme indicado pelas investigações anteriores, os contaminantes removidos durante a etapa de escavação das valas e remoção dos tambores consistiram em uma mistura de óleos e graxas com solventes halogenados e não halogenados, sendo encontrado ainda tambores com solvente puro (TCE). Os principais compostos detectados na mistura foram o TCE, cis-1,2-DCE, TPH-O (faixa do óleo) e TPH-D (faixa do diesel). Os resultados das amostras de solo das zonas com presença visível de NAPL coletadas na Fase II foram utilizados para estimar a massa de cada composto na mistura de NAPL.

Para realizar o cálculo da estimativa de massa, em cada uma das três áreas identificadas com presença de NAPL (Áreas 1, 2 e 3), foi estimada a extensão da área impactada por NAPL, a espessura líquida² de NAPL e o volume resultante de solo contaminado por NAPL. Considerando um valor médio de porosidade medida do local de 0,3 e um valor de saturação do NAPL nos poros de 5%, obteve-se a estimativa de volume de NAPL na subsuperfície para a qual considerou-se um erro de $\pm 50\%$, em função das incertezas na espessura observada do solo contaminado com NAPL e na variação da faixa medida de saturação do NAPL (0,2% a 11,6%, com um ponto fora da curva de 68,6%). A este

² Como espessura líquida de NAPL, denominou-se a distância entre a parte superior e inferior do NAPL observado menos os intervalos de solo não contaminado por NAPL no interior desta faixa.

respeito, julga-se que tal estimativa poderia ser refinada setorizando o cálculo do volume de NAPL por áreas com resultados de saturação de NAPL semelhantes a fim de reduzir a incerteza do cálculo.

A massa total de NAPL e a massa dos compostos principais são apresentadas na **Tabela 1**. Com base nestes resultados foi possível concluir que a maior quantidade de NAPL está concentrada na Área 2 e que a porcentagem relativa de TCE e TPH na Área 3 é diferente das demais áreas.

Tabela 1 – Estimativa da massa total de NAPL e principais compostos para cada uma das áreas com detecção de NAPL.

Área com NAPL	Massa de contaminante						
	NAPL	TPH		TCE		DCE	
	(kg)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)
1	95.669	80.130	83,8%	11.208	11,7%	4.330	4,5%
2	181.297	169.789	93,7%	10.470	5,8%	1.038	0,6%
3	64.629	19.118	29,6%	43.081	66,7%	2.431	3,8%
Total	341.595	269.037	78,8%	64.759	19,0%	7.799	2,3%

Fonte: Adaptado de USACE/URS (2002).

Em relação à delimitação da fase NAPL, a atualização do MCA com base nos resultados da Fase II assumiu que a presença de NAPL encontra-se limitada na área do aterro EGDY, uma vez que as investigações conduzidas em áreas potenciais vizinhas não apresentaram evidências de descarte de resíduos. No interior da área de estudo as seguintes linhas de evidência foram utilizadas para delimitação das três áreas-fonte de NAPL: i. localização dos tambores e solos contaminados com NAPL; ii. contaminação de TCE na água subterrânea; iii. resultados de MIP; e iv. testes de NAPL e resultados das amostras de solo das perfurações sônicas. A **Tabela 2** apresenta a profundidade máxima atingida pelo NAPL, estimativa da espessura líquida, área impactada e volume de NAPL em cada uma das três áreas investigadas.

Tabela 2 – Dimensões das áreas impactadas por NAPL.

Área com NAPL	Extensão da área impactada por NAPL			
	Prof. Máx.	Espessura líq.	Área	Volume de NAPL
	m	cm	m ²	m ³
1	10,4	4,23	2.360	99,84
2	14,3	4,14	4.750	196,43
3	9,1	3,07	1.690	51,82

Fonte: Adaptado de USACE/URS (2002).

Nas três áreas-fonte, o NAPL foi detectado principalmente na porção superior do aquífero *Vashon*, situado acima do aquífero intermediário, não sendo verificado abaixo desta unidade. Em quatro sondagens RS0012 e RS0015 (Área 1) e RS0005 e RS0024 (Área 2), o NAPL foi observado dentro do aquífero intermediário, o que significa que esta unidade não é uma barreira completa para migração do DNAPL. A este respeito, conforme citado no item 4.3.4, para evitar contaminação cruzada durante a realização das perfurações sônicas, um revestimento temporário de aço foi usado no processo de perfuração e como regra geral perfurações com identificação de acúmulo de DNAPL líquido sobre o aquífero intermediário seriam paralisadas. No caso em questão, não houve identificação de zonas com acúmulo de DNAPL líquido.

Outras localidades apresentaram presença de NAPL, porém com dimensões e volumes menos expressivos.

O NAPL mais denso que a água que atingiu o lençol freático continuou a migrar para baixo na zona saturada. Atualmente, acredita-se que o DNAPL esteja imóvel na subsuperfície do aterro EGDY tendo em conta as seguintes linhas de evidência:

- De modo geral, a base do DNAPL foi observada dentro de unidades com alta condutividade hidráulica, sugerindo que mudanças na distribuição do tamanho de grãos ocorreram para superar as forças de migração vertical do DNAPL ou que o DNAPL simplesmente atingiu seu nível de saturação residual e parou de migrar;
- O DNAPL não parece ter penetrado em profundidades superiores a 14m, apesar do longo tempo de migração;
- Nenhum NAPL entrou no poço de coleta LC-186 entre o momento de instalação do poço e conclusão das investigações de campo; e
- Além disso, os valores geralmente baixos de saturação do NAPL sugerem que a saturação residual foi atingida.

Especificamente em relação ao LNAPL, este foi verificado em três valas exploratórias da Fase I e em uma perfuração sônica da Fase II (RS0064), porém sua extensão não se encontra delimitada.

Em relação à contaminação dissolvida na água subterrânea, as plumas dos compostos TCE e cis-1,2-DCE ultrapassaram os limites do aterro EGDY, sendo que a pluma de TCE atingiu distâncias maiores e em concentrações mais elevadas. No aquífero *Vashon*, a pluma de TCE se estendeu 3,2 km na direção do fluxo regional (O-NO) e

aproximadamente 1 km na direção do fluxo local (O-SO), atingindo o Córrego Murray. A este respeito, amostras de água superficial coletadas no Córrego Murray confirmaram baixas concentrações de TCE (aprox. 2 µg/L), indicando que parte da pluma dissolvida de TCE das Áreas 1 e 2 não está sendo capturada pelo sistema *Pump & Treat* instalado na área e concentrações remanescentes estão sendo descarregadas no curso d'água.

Verticalmente, concentrações de TCE e cis-1,2-DCE atingiram o aquífero *Sea Level* através de uma porção erodida do aquitarde *Non-Glacial*. Neste aquífero, a pluma de TCE não está totalmente delimitada e requer a instalação de poços de monitoramento adicionais.

Tendo em consideração os objetivos principais da investigação Fase II, o estudo (USACE/URS, 2002) concluiu que:

- Embora as três áreas-fontes principais de NAPL foram delimitadas em planta e em profundidade, outras fontes menos expressivas foram identificadas e não delimitadas, destacando-se a fase de LNAPL;
- As várias sondagens executadas na Fase II em conjunto com dados anteriores permitiram uma boa caracterização estratigráfica das três áreas-fontes. Contudo, caminhos preferenciais verticais e entre as áreas-fontes podem existir, incerteza que poderia ter sido minimizada caso tivesse sido possível a realização da investigação geofísica;
- A contaminação da fase dissolvida no aquífero *Sea Level* não foi delimitada; e
- A pluma dissolvida de TCE das Áreas 1 e 2 não está sendo totalmente capturada pelo sistema *Pump & Treat* instalado na área, permitindo descarga de contaminantes no Córrego Murray.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste trabalho, é apresentado um caso real de aplicação das técnicas de alta resolução, visando avaliar criticamente os ganhos obtidos no processo de investigação e de atualização do modelo conceitual, as dificuldades encontradas e a aplicabilidade das estratégias utilizadas no contexto nacional.

Trata-se do estudo de caso do aterro industrial *East Gate Disposal Yard (EGDY)* do Centro de Logística de Fort Lewis, localizado no estado de Washington, EUA. Entre 1946 a 1971, o aterro EGDY operou recebendo resíduos sólidos e descartes líquidos (principalmente combustíveis, óleos e solventes halogenados), os quais foram despejados diretamente no solo ou dispostos em tambores em valas abertas ao longo de sua área de 14 hectares, ocasionando a contaminação do solo e da água subterrânea local. Investigações ambientais e estudos de viabilidade de remediação foram conduzidos entre 1986 e 1988 e um sistema *Pump and Treat (P&T)* para remediação do aquífero superior foi instalado em 1995. Entre 1999 e 2002, foram realizadas as investigações para identificação e delimitação das fontes de contaminação, as quais foram conduzidas em duas fases (Fase I e II) sendo a Fase II o foco do estudo de caso aqui apresentado.

A conclusão da Fase I permitiu a delimitação da área utilizada para descarte de resíduos e a identificação de três áreas-fontes de contaminação com provável presença de fase livre (denominadas Áreas 1, 2 e 3). Com base nestes resultados, foi definida que a melhor estratégia de remediação seria a intensiva remoção das fontes de contaminação. Inicialmente, uma ação de escavação foi conduzida para remoção dos tambores enterrados e do solo contaminado nas adjacências. Adicionalmente, a tecnologia de tratamento termal foi escolhida para remediação dos três centros de massa identificados. Assim, a investigação da Fase II teve como principais objetivos delimitar a ocorrência de NAPL (*non-aqueous phase liquid*) nas três áreas-fontes e complementar a caracterização hidrogeológica para atualização do MCA, de modo a permitir a elaboração do projeto de remediação termal, a otimização do sistema de tratamento P&T e, eventualmente, sua substituição por uma barreira reativa permeável. Para tal, foi adotada uma abordagem de investigação dinâmica, a fim de concentrar os esforços nas áreas que requeriam maior caracterização. Nesse sentido, é importante destacar que o conceito de investigação dinâmica foi concebido desde o Termo de Referência para a contratação das investigações, apresentado no Plano de

Gerenciamento da Fase II (USACE / URS, 2001). Ao invés de apresentar um escopo fixo e pré-definido, esse documento apresentou o Modelo Conceitual da Área (MCA) com uma compilação robusta dos resultados das investigações anteriores e a identificação das principais lacunas de dados. Para complementação dos dados, foi apresentada uma lista com as ferramentas aplicáveis e um plano de investigação inicial com a locação de alguns pontos principais. Diferentemente dos modelos de contratação mais comuns no Brasil, o critério para finalização das atividades de campo não foi baseado na realização de um número fixo de sondagens e/ou amostragens e sim no preenchimento total das lacunas inicialmente identificadas no MCA.

O envolvimento de profissionais tecnicamente qualificados, tanto em campo como em escritório, é outro requisito importante para garantir uma abordagem dinâmica de investigação. No estudo de caso apresentado, a equipe de projeto incluía uma equipe técnica composta por especialistas multidisciplinares, uma equipe de suporte composta pelos técnicos de apoio e representantes dos subcontratados, gestores das diversas entidades envolvidas e membros da agência ambiental, os quais se comunicavam através de um efetivo plano de comunicação. Destaca-se aqui o uso de softwares para compartilhamento de documentos e visualização de dados para facilitar o acesso das informações por toda a equipe e dar agilidade na interpretação adequada dos dados, atualização do MCA e tomada de decisões em campo.

No Brasil, este tipo de estrutura não é muito comum. O envolvimento de agentes reguladores na equipe de projeto, restringe-se apenas ao acompanhamento do cumprimento da legislação e à emissão de sanções, havendo uma maior participação apenas nos casos de áreas críticas e em áreas de interesse público. Tendo em conta a experiência americana, acredita-se que o maior envolvimento do órgão ambiental na equipe de um projeto traria maior alinhamento nas decisões e maior celeridade ao processo de gerenciamento ambiental da área.

No estudo de caso do aterro EGDY, destaca-se ainda o uso de várias técnicas e ferramentas para obtenção do objetivo final. Conforme apresentado nesse trabalho, as ferramentas de alta resolução têm aplicações bastante específicas e devem ser utilizadas em conjunto, até mesmo com métodos tradicionais, de forma a obter as evidências necessárias que subsidiem conclusões e tomadas de decisão. Foi o caso, por exemplo da abertura das valas exploratórias com retroescavadeira que, apesar de não serem consideradas técnicas de alta resolução, possibilitaram a obtenção das

informações necessárias de forma economicamente viável, tendo em conta a grande dimensão da área.

Nos casos de investigação de alta resolução, é fundamental que o contratado responsável pelas investigações tenha total conhecimento do MCA, das ferramentas a serem utilizadas e de sua aplicabilidade, a fim de evitar problemas. No estudo de caso analisado, algumas das ferramentas previstas não apresentaram resultados satisfatórios devido às condições do meio físico local. O equipamento de perfuração SCAPS, por exemplo, não atingiu a profundidade esperada e, portanto, a coleta de dados LIF foi interrompida e os dados obtidos descartados. Já o levantamento geofísico a partir das técnicas de resistividade elétrica (*Electrical Resistivity* - ER), polarização induzida (*Induced Polarization* - IP) e radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR) não apresentou resultados conclusivos quanto à caracterização estratigráfica.

Por conta das dificuldades encontradas, foi necessária uma adaptação das técnicas inicialmente previstas. As investigações planejadas com a plataforma SCAPS foram substituídas pelas investigações com MIP e pela coleta de amostras de solo com perfuração sônica. Apesar das adequações, algumas ferramentas inicialmente previstas não puderam ser utilizadas e outras, como a geofísica, não puderam ser substituídas. Conforme será discutido adiante, entende-se que parte do escopo das investigações da Fase II tenha ficado comprometido e que tal prejuízo poderia ter sido evitado caso o Termo de Referência já tivesse descartado essas ferramentas ou se o subcontratado tivesse se atentado para as condições do meio físico local.

Os resultados obtidos com as demais técnicas permitiram importantes atualizações no modelo conceitual da área. Em relação ao meio físico, heterogeneidades não identificadas anteriormente e a persistência de estratos menos permeáveis puderam ser verificadas, e o entendimento em relação à hidrogeologia local foi aprofundado. Quanto à composição da fase NAPL, os compostos TCE, cis-1,2-DCE, TPH-O (faixa do óleo) e TPH-D (faixa do diesel) foram confirmados como os principais contaminantes. A distribuição em massa destes compostos para cada uma das três áreas-fontes pôde ser estimada e a distribuição espacial pôde ser delimitada horizontalmente e verticalmente. Em relação à contaminação na água subterrânea, foi confirmado que as plumas dos principais contaminantes em fase dissolvida, os compostos TCE e cis-1,2-DCE, ultrapassaram os limites do aterro EGDY. A migração em profundidade atingiu o aquífero inferior (*SeaLevel*), não estando as plumas

verticalmente delimitadas nesta profundidade. Amostras de água superficiais indicaram descarga de baixas concentrações de TCE no Córrego Murray.

Com base nos dados obtidos, conclui-se que a investigação de Fase II atingiu o objetivo de obter dados suficientes para o dimensionamento da remediação termal nas áreas-fontes principais de NAPL. Contudo, uma vez que estas áreas sejam remediadas, a contribuição das fontes menores para abastecimento da contaminação dissolvida deverá ser avaliada. Um melhor entendimento da eventual conexão dessas áreas com as três áreas fontes era previsto através da investigação geofísica, ficando prejudicado com os dados inconclusivos obtidos.

Quanto à otimização do sistema de tratamento da contaminação em fase dissolvida, julga-se que dados importantes como a delimitação da fase livre sobrenadante (LNAPL), a delimitação das plumas de contaminação no aquífero *Sea Level* e a descarga de contaminantes no Córrego Murray precisam ser melhor detalhados em uma investigação futura para definição da adequação do sistema de tratamento e eventual implantação de uma barreira reativa permeável. Neste caso em particular, a modelagem do fluxo d' água subterrâneo e a definição do fluxo de massa em direção a área de captação é de extrema importância para definição da locação da barreira. *Transects* também podem ser instalados para quantificar a atenuação da contaminação.

A exposição dos receptores externos foi outro importante ponto não abordado pela investigação de Fase II. Sabe-se que a noroeste do aterro EGDY, há ocupações residenciais no limite das plumas de fase dissolvida que requerem uma avaliação de intrusão de vapores para definição de medidas de mitigação, se necessário.

Além dos resultados técnicos obtidos, destaca-se que a análise financeira do projeto mostrou que o uso das tecnologias de alta resolução proporcionou uma economia no custo das investigações da ordem de 40 a 50% (USACE / URS, 2002) , tendo em conta a otimização do número de sondagens previstas para delimitação das áreas-fontes em função da obtenção de dados em tempo-real e da tomada de decisão em campo quanto à escolha da tecnologia de investigação, definição da locação e do número dos pontos de investigação. A redução no tempo para conclusão das investigações foi estimada em 1 a 2 anos, com base na redução das mobilizações necessárias e consequentemente aprovações de plano (USEPA, 2016).

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo principal apresentar e discutir a aplicação de tecnologias de alta resolução (*High-Resolution Site Characterization - HRSC*) para identificação e delimitação de fontes de contaminação, permitindo a atualização do modelo conceitual com escala de detalhamento adequada para embasar a escolha e dimensionamento de medidas de remediação.

O estudo de caso americano do aterro industrial *East Gate Disposal Yard* (EGDY) no Centro de Logística Fort Lewis, escolhido para embasar essa discussão, mostrou que uma estratégia de investigação de alta resolução com o uso de várias ferramentas aliadas até mesmo com técnicas tradicionais, permitiu:

- A delimitação horizontal e vertical das três áreas-fontes principais de contaminação por NAPL;
- A atualização do Modelo Conceitual da Área (MCA) com dados que contribuíram para o melhor entendimento quanto à caracterização da geologia e hidrogeologia local, composição, distribuição e quantificação da massa de contaminantes; e
- A obtenção de dados suficientes para o dimensionamento da remediação termal nas áreas-fontes principais de NAPL.

Outros objetivos da investigação como a otimização do sistema *Pump&Treat* em operação para remediação da contaminação em fase dissolvida e a avaliação da futura substituição deste sistema por uma barreira reativa ficaram prejudicados em função da não obtenção de dados ou da obtenção de dados inconclusivos por algumas ferramentas previstas devido às condições do meio físico local. Por este motivo, entende-se que investigações complementares deverão ser conduzidas com os seguintes objetivos:

- Delimitação da fase livre sobrenadante (LNAPL);
- Identificação de eventual conexão entre as três áreas-fontes principais e avaliação da contribuição de fontes menores de NAPL para abastecimento da contaminação dissolvida;
- Delimitação das plumas de contaminação dissolvida no aquífero Sea Level;
- Detalhamento da descarga de contaminantes no Córrego Murray através, por exemplo, da instalação de *transects*; e
- Modelagem do fluxo d'água subterrâneo para definição da melhor localização da barreira reativa permeável (BRP).

A exposição dos receptores externos foi outro importante ponto não abordado pela investigação de Fase II. Sabe-se que a noroeste do aterro EGDY, há ocupações residenciais no limite das plumas de fase dissolvida que requerem uma avaliação de intrusão de vapores para definição de medidas de mitigação, se necessário.

Adicionalmente aos resultados técnicos do estudo de caso, são destacadas a seguir contribuições das estratégias adotadas relacionadas aos conceitos da Tríade e do Modelo Conceitual ao longo do ciclo de vida para aplicação no contexto nacional:

- A implantação de uma abordagem dinâmica deve ser prevista no Termo de Referência de contratação da investigação de alta resolução. Ao invés de apresentar um escopo fixo e pré-definido, é importante que o critério de paralização das investigações seja baseado no preenchimento total das lacunas inicialmente identificadas no MCA.
- A formação de uma equipe multidisciplinar experiente com presença em campo é fundamental para interpretação assertiva dos dados e tomada de decisões em campo;
- O envolvimento de representantes do órgão ambiental na equipe do projeto tende a contribuir para o alinhamento nas decisões e maior celeridade ao processo de gerenciamento ambiental da área;
- O estabelecimento de um Plano de Comunicação entre os membros da equipe técnica é essencial para a efetividade da estratégia dinâmica do trabalho;
- Sempre que possível, o uso de softwares para compartilhamento de documentos e visualização de dados facilita o acesso das informações por todos os membros da equipe e dá agilidade na interpretação dos dados, atualização do MCA e tomada de decisões;
- Considerando que as ferramentas de alta resolução têm aplicações bastante específicas, é recomendável o uso de várias técnicas e ferramentas, incluindo até mesmo métodos tradicionais de forma a obter as evidências necessárias que subsidiem a conclusão dos estudos; e
- É fundamental ainda que o contratado responsável pelas investigações tenha total conhecimento do MCA, das ferramentas a serem utilizadas e de sua aplicabilidade, a fim de evitar inconsistências nos dados obtidos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J. W.; ROBITAILLE, G. **The Tri-Service Site Characterization and Analysis Penetrometer System – SCAPS: Innovative Environmental Technology from Concept to Commercialization**. U.S. ARMY ENGINEERING R&D CENTER / ARMYENVIRONMENTAL CENTER, 2000. 48 p. Disponível em: <https://clu-in.org/download/toolkit/thirdednew/scaps99073.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2020

BARBER, J.; DYMENT, S.; PITKIN, S. **High-Resolution Site Characterization for Groundwater Short Course**. In: 23rd Annual NARPM Training Program. USEPA, 2014.407 p. Disponível em: <https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/pdfs/HRSC-Participant-Manual-NARPM-2014.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Decisão de Diretoria nº 038/2017/C de 07/02/2017**. CETESB, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2020.

CRUMBLING, D.M. **Summary of the Triad Approach**. USEPA, 2004. 4 p. Disponível em: <https://triadcentral.clu-in.org/ref/doc/triadsummary.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2020.

CURRY, P.; WELTY, N.; WRIGHT, J.; FAVERO, D.; QUINNAN, J. Smart Characterization – An Integrated Approach for Evaluating a Complex 1,4-Dioxane Site. **Remediation Winter**, p. 29 - 45, Wiley Periodicals, 2016, Published online (www.wileyonlinelibrary.com), DOI 10.1002/rem.

INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL (ITRC). **Implementing Advanced Site Characterization Tools**. Washington: ITRC, 2019. 328 p. Disponível em: https://asct-1.itrcweb.org/asct_full_pdf_12_15_19.pdf. Acesso em: 01 ago. 2020.

GUARINO, B. EPA will use drones to survey and keep a safe distance from a toxic superfund site. **INVERSE**, 30 nov. 2015. Disponível em: <https://www.inverse.com/article/8635-epa-will-use-drones-to-survey-and-keep-a-safe-distance-from-a-toxic-superfund-site>. Acesso em: 22 nov. 2020.

PAYNE, F.C.; QUINNAN, J.A.; POTTER, S.T. **Remediation Hydraulics**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

RIYIS, M.T. **Contribuição para Investigação de Áreas Contaminadas com Abordagem de Alta Resolução**. 2019. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/191563>. Acesso em: 27 jun. 2020.

SUTHERSAN, S.; QUINNAN, J.; WELTY, N. The New ROI: Return on Investigations by Utilizing Smart Characterization Methods. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v.35, n. 3, Summer, 2015.

UNITED STATES ARMY CORPS ENGINEERS (USACE) / URS GREINER WOODWARD CLYDE. **Phase I Technical Memorandum for East Gate Disposal Yard Expanded Site Investigation Logistics Center, Fort Lewis, Washington.**

Washington: USACE/URS, 1999. 291 p. Disponível em: <https://triadcentral.clu-in.org/user/doc/TPP-EGDY2-finaltechmemo.pdf>. Acesso em 16 jul. 2020.

UNITED STATES ARMY CORPS ENGINEERS (USACE) / URS GREINER WOODWARD CLYDE. **Management Plan Phase II Remedial Investigation – East Gate Disposal Yard and Logistics Center, Fort Lewis, Washington.** Washington:

USACE/URS, 2001. 625 p. Disponível em: <https://triadcentral.clu-in.org/user/doc/TPP-EGDY2-PhaseIIFinalMP.pdf>. Acesso em 18 jul. 2020.

UNITED STATES ARMY CORPS ENGINEERS (USACE) / URS GREINER WOODWARD CLYDE. **Field Investigation Report Phase II Remedial Investigation – East Gate Disposal Yard, Fort Lewis, Washington – DSERTS NO.FTLE-67.**

Washington: USACE/URS, 2002. 210 p. Disponível em: <https://triadcentral.clu-in.org/user/doc/TPP-EGDY2-FinalFIR.pdf>. Acesso em 18 jul. 2020.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Office of Solid Waste and Emergency (5203P). **Best Management Practices: Use of Systematic Project Planning Under a Triad Approach for Site Assessment and Cleanup.** EPA 542-F-10-010. USEPA, 2010. 19 p. Disponível em: <https://clu-in.org/download/char/epa-542-f-10-010.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2020.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G). **Environmental Cleanup Best Management Practices: Effective Use of the Project Life Cycle Conceptual Site Model.**

USEPA, 2011. 12 p. Disponível em: <https://clu-in.org/download/remed/csm-life-cycle-fact-sheet-final.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2020.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Contaminated Site Clean-Up Information. **High-Resolution Site Characterization (HRSC)**, 23 set 2016 (última atualização). Disponível em: <https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/index.cfm>. Acesso em: 07 jul. 2020.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Smart Scoping for Environmental Investigations Technical Guide.** EPA ID # 542-G-18-004,

USEPA, 2018. Disponível em: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/100001799.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2020.