

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

DAVI AMBROZIO LOIO

Identificação e classificação dos atributos de complexidade em área contaminada por hidrocarbonetos visando otimização de processo de remediação

São Paulo, SP

2022

Identificação e classificação dos atributos de complexidade em área contaminada por hidrocarbonetos visando otimização de processo 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: MSc. Sasha Tom Hart

São Paulo, SP

2022

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

Loio, Davi Ambrozio

Identificação e classificação dos atributos de complexidade em área contaminada por hidrocarbonetos visando otimização de processo de remediação / D. A. Loio -- São Paulo, 2022.

47 p.

Monografia (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.Áreas contaminadas 2.Contaminação do solo 3.Contaminação de águas subterrâneas 4.Hidrocarbonetos 5.Remediação do solo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

RESUMO

LÓIO, D.A. **Identificação e classificação dos atributos de complexidade em área contaminada por hidrocarbonetos visando otimização de processo de remediação.** 2022. 47f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Algumas áreas contaminadas apresentam condições que podem ampliar a complexidade do gerenciamento e da remediação até aos níveis desejados. Uma área complexa é aquela que, devido a desafios técnicos e não técnicos, provavelmente não será restaurada dentro de um prazo razoável, terá maior custo de remediação e maior pegada ambiental, caso esses desafios não sejam adequadamente compreendidos e abordados desde o início do projeto. Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo identificar, descrever e classificar os principais atributos de complexidade de uma área contaminada por hidrocarbonetos derivados de petróleo em processo de remediação. A partir de revisão de literatura e consolidação das informações obtidas nos estudos ambientais da área, foram identificados os principais atributos de complexidade existentes – os desafios técnicos: (a) heterogeneidade geológica e fluxos preferenciais, (b) presença de fase livre (LNAPL) associada a baixa transmissividade, (c) plumas extensas e combinadas; e os desafios não técnicos: (d) rotatividade de pessoal e perda de conhecimento institucional e (e) mudança de leis, normas e regulamentos. Cada desafio foi então descrito e classificado numa escala de 1 a 5 para os aspectos de Gravidade (G), Urgência (U) e Tendência (T). A identificação, avaliação e classificação dos desafios técnicos e não técnicos, o mapeamento das incertezas e a proposição de estratégia de gerenciamento, mostraram-se subsídios úteis para direcionar e concentrar os esforços, recursos humanos e financeiros nas questões com maior potencial de afetar a efetividade do processo. Em função dos resultados, é recomendado que gestores deste e de outros processos de reabilitação de áreas complexas avancem com o uso destas estratégias, considerem a aplicação de estratégias de gerenciamento adaptativo, o maior detalhamento e entendimento de parâmetros da área, a avaliação de outras potenciais complexidades observadas e aprimoramento quantitativo da metodologia de classificação e priorização proposta.

Palavras-chave: Áreas contaminadas. Áreas complexas. Hidrocarbonetos. Remediação do solo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Sistemática das medidas de intervenção em relação às fontes, vias de exposição e receptores	8
Figura 02. Fatores que afetam a remediação de hidrocarbonetos de petróleo	12
Figura 03. Fluxograma para o gerenciamento da remediação de áreas complexas	16
Figura 04. Layout do empreendimento – identificação das principais áreas	21
Figura 05. Avaliação litológica da seção 1, sentido fluxo da água subterrânea (esquerda-direita), EC (marrom) e HPT (azul)	34
Figura 06. Sondagens da seção 2 (perpendicular ao fluxo da água subterrânea), fluorescência OIP (roxo) e HPT (azul)	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Desafios técnicos em áreas complexas	14
Tabela 02. Desafios não técnicos em áreas complexas	15
Tabela 03. Critérios para avaliação do potencial de remediação	17
Tabela 04. Principais áreas e processos do empreendimento	20
Tabela 05. Relação de estudos ambientais desenvolvidos para a área	22
Tabela 06. Classificação dos desafios técnicos e não técnicos	24
Tabela 07. Desafios técnicos e não técnicos identificados na área	32
Tabela 08. Classificação dos desafios técnicos e não técnicos da área	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BTEX	Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno e Xilenos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMA	Concentração Máxima Aceitável
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNAPL	<i>Dense non-aqueous phase liquid</i>
EC	<i>Electrical Conductivity</i>
GAC	Gerenciamento de áreas contaminadas
HPT	<i>Hydraulic Profiling Tool</i>
HRSC	<i>High-resolution site characterization</i>
ITRC	<i>Interstate Technology and Regulatory Council</i>
LNAPL	<i>Light non-aqueous phase liquid</i>
MCA	Modelo conceitual da área
MPE	<i>Multi-Phase Extraction</i>
N.A.	Nível d'água
OIP	<i>Optical Image Profiler</i>
OiHPT	<i>Optical Image-Hydraulic Profiling Tool</i>
PAH	<i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbon</i>
P&T	<i>Pump and Treat</i>
SQI	Substância química de interesse
TPH	<i>Total Petroleum Hydrocarbons</i>

SUMÁRIO

RESUMO	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	iv
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Aspectos gerais	4
3.2. Etapas do gerenciamento de áreas contaminadas	5
3.3. Modelo conceitual e plano de intervenção	6
3.4. Características e comportamento dos hidrocarbonetos em subsuperfície	8
3.5. Técnicas de remediação aplicadas à contaminação por hidrocarbonetos	10
3.6. Áreas complexas e o seu gerenciamento	13
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1. Avaliação do histórico e contexto do empreendimento	20
4.2. Etapas e escopo de trabalho	22
4.3. Proposta de classificação dos desafios da área	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1. Avaliação do histórico e contexto local	25
5.2. Caracterização do meio físico	30
5.2.1. Geomorfologia, pedologia e aspectos climáticos	30
5.2.2. Geologia regional	31
5.2.3. Geologia e hidrogeologia local	31
5.3. Identificação, descrição e classificação dos desafios da área	32
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	42
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Nos últimos séculos, o aumento expressivo do consumo de recursos naturais e fabricação de novos produtos químicos, associados ao desenvolvimento dos processos industriais de transformação, extração, estocagem e manuseio de matérias-primas e de seus produtos, bem como o seu transporte em diferentes modais trouxeram, como consequência negativa, a poluição ambiental sob diferentes formas. O meio ambiente passou a receber, de forma planejada ou acidental, os resíduos e substâncias químicas descartadas dos processos, surgindo assim inúmeros impactos negativos sobre a saúde humana e ao meio ambiente, incluindo o aparecimento das denominadas áreas contaminadas (IPT, 2014).

Muitos dos avanços alcançados nas últimas duas décadas no gerenciamento e reabilitação de áreas contaminadas no Brasil foram motivados, sobretudo, pelo estabelecimento de legislações e normas técnicas dedicados ao tema, disciplinando os empreendedores a buscarem melhores práticas de gestão ambiental, a redução dos impactos ambientais das suas atividades, bem como a adoção de medidas corretivas, quando necessário, sob o risco de paralisação das suas atividades e a responsabilização dos infratores nas esferas penal, civil e administrativa.

De forma geral, o gerenciamento de uma área contaminada consiste no emprego de uma série de etapas sequenciais e inter-relacionadas que visam identificar as características, os riscos e danos decorrentes da contaminação, os mecanismos de transporte dos contaminantes e vias de exposição e a proposição de medidas de intervenção adequadas a cada cenário, com o objetivo de reduzir, a níveis aceitáveis, os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente em decorrência da exposição às substâncias contaminantes identificadas (CETESB, 2017).

Em meados do século XX, quando se iniciou o processo de recuperação de áreas contaminadas em países como Estados Unidos, Reino Unido, Alemanha e Holanda, buscava-se a restauração das condições naturais do solo e água subterrânea. Entretanto, devido aos altos custos e dificuldade técnica, essa abordagem vem sendo gradualmente alterada, adotando-se o gerenciamento baseado no risco aceitável, medida que é menos restritiva e mais viável técnica e economicamente (GÜNTHER, 2006).

Em algumas áreas contaminadas, condições específicas podem tornar ainda mais complexos o gerenciamento e a remediação da contaminação até aos níveis aceitáveis ou padrões legais. O ITRC (2017) define uma área complexa como “um local em remediação

ambiental que, devido a desafios técnicos e não técnicos, provavelmente não será restaurado dentro de um prazo razoável”. Um local com desafios técnicos e não técnicos consideráveis normalmente tem um prazo de remediação mais longo, maior custo de remediação e maior pegada ambiental (como uso de energia ou emissões de carbono), principalmente se os desafios do local não forem adequadamente compreendidos e abordados desde o início. Por outro lado, locais complexos têm maior potencial de economia de custos, redução da pegada ambiental, reutilização benéfica da área e outros benefícios sociais (ITRC, 2017).

A área objeto deste estudo tem como atividade o armazenamento e distribuição de combustíveis e encontra-se em plena operação. Apresenta contaminação em fase livre e dissolvida por hidrocarbonetos derivados de petróleo, decorrentes de vazamento dos produtos diesel e gasolina em tubulações subterrâneas (enterradas). Atualmente estão em operação sistemas de remediação por extração multifásica (MPE) e bombeamento (*Pump & Treat*), com previsão de revisão e ampliação, visando maior eficiência, eficácia e atuação sobre toda a extensão da pluma de fase livre.

Nesse contexto, conforme será abordado ao longo deste trabalho, o caso apresenta desafios técnicos e não técnicos que conferem ao seu processo de gerenciamento um grau relativamente elevado de complexidade e incertezas, dificultando o alcance das metas de remediação em curto e médio prazo. Por outro lado, se adequadamente avaliados e controlados, esses desafios oferecem oportunidades de inovação, de redução de custos e de ampliação da sustentabilidade ambiental ao longo do ciclo de vida do projeto de reabilitação, possivelmente por meio do desenvolvimento e aplicação de ferramentas do gerenciamento de áreas complexas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O trabalho tem como objetivo geral identificar os principais atributos de complexidade, visando subsidiar o direcionamento da atual estratégia de gerenciamento e das medidas de remediação para otimização da remoção da massa de contaminantes e reabilitação de uma área contaminada por hidrocarbonetos derivados de petróleo.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Realizar revisão de literatura referente ao gerenciamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos e gerenciamento de áreas complexas;
- Consolidar as principais informações obtidas nos estudos ambientais já desenvolvidos na área;
- Identificar os principais atributos de complexidade no processo de gerenciamento da área;
- Propor uma classificação do nível de complexidade dos desafios técnico e não técnicos selecionados; e
- Identificar oportunidades de melhoria para o gerenciamento, com base no estágio atual do modelo conceitual e as necessidades prioritárias.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aspectos gerais

De acordo com CETESB (2021), áreas contaminadas são definidas como áreas onde existe ou existiu fonte de contaminação primária e, como resultado, contém quantidades de matéria ou concentrações de substâncias em ao menos um dos compartimentos do meio ambiente, capazes de causar danos aos bens a proteger. São considerados bens a proteger, para fins de gerenciamento de áreas contaminadas, os receptores humanos, receptores ecológicos, ecossistemas naturais, recursos naturais, recursos ambientais, patrimônio (bens públicos, privados, coletivos e ambientais) e a ordenação territorial (CETESB, 2021). Outras variações desta definição são adotadas nas legislações especializadas em diferentes países, sendo comum entre elas considerar não apenas a presença dos poluentes, mas também a ocorrência de danos ou riscos aos bens a proteger (GLOEDEN, 1999).

As principais causas da ocorrência de áreas contaminadas, segundo Günther (2006), são: incidentes devido ao armazenamento ou deposição inadequada de resíduos, manejo inadequado de substâncias químicas nos processos industriais, lançamento inadequado de efluentes líquidos e/ou gasosos, perdas durante os processos produtivos, armazenamento inadequado de produtos, vazamentos nas instalações (tanques, tubulações etc.) e vazamentos ao longo dos processos, além de acidentes em instalações ou durante o transporte de cargas perigosas. A indústria destaca-se como a principal fonte, devido à quantidade de operações que são desempenhadas nas instalações produtivas, ao volume e diversidade de substâncias químicas que demanda e à quantidade de resíduos perigosos que produz (GÜNTHER, 2006).

Em âmbito nacional, o principal marco no gerenciamento de áreas contaminadas foi a publicação da Resolução Conama nº 420/2009, que “dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas” (BRASIL, 2009).

No Estado de São Paulo, precursor das normativas sobre GAC – Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Brasil, as principais legislações vigentes relacionadas ao tema são: Lei Estadual nº 9.999/1998; Decreto Estadual nº 47.400/2002; Lei Estadual nº 13.577/2009; Decreto Estadual nº 59.263/2013; Decisão de Diretoria CETESB nº 256/2016/E; Decisão de

Diretoria CETESB nº 038/2017/C; Instrução Técnica CETESB nº 39/2017 (atualizada em agosto/2019); Resolução SMA 10/2017; Resolução SMA 11/2017.

Apenas no Estado de São Paulo, o total de áreas contaminadas cadastradas pela CETESB é de 6.434, de acordo com o último levantamento publicado em dezembro de 2020. Grande parte destas áreas referem-se a postos de combustíveis, representando mais de 70% do total, seguidos das áreas industriais, que representam em torno de 20% do total. A maior representatividade dos postos de combustíveis deve-se a um intensivo programa de licenciamento ambiental desenvolvido pela CETESB desde 2001, ampliando o controle e exigências ambientais para esse tipo de fonte (CETESB, 2020). Observa-se uma tendência de crescimento do número de áreas reabilitadas, que pode ser associado aos avanços das técnicas e ferramentas de GAC, aperfeiçoamento das legislações e normas, ampliação das exigências, fiscalização e controle do órgão, bem como a crescente pressão imobiliária nos centros urbanos.

3.2. Etapas do gerenciamento de áreas contaminadas

Conforme descrito pela CETESB (2017) na Decisão de Diretoria nº 038/2017/C, “o Gerenciamento de Áreas Contaminadas visa reduzir, para níveis aceitáveis, os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente em decorrência de exposição às substâncias provenientes de áreas contaminadas, por meio de um conjunto de medidas que assegurem o conhecimento das características dessas áreas e dos riscos e danos decorrentes da contaminação, proporcionando os instrumentos necessários à tomada de decisão quanto às formas de intervenção mais adequadas”.

A metodologia de gerenciamento de áreas contaminadas baseia-se em uma estratégia constituída por etapas sequenciais, onde a informação obtida em cada etapa é a base para a execução da etapa posterior, visando otimizar recursos técnicos e econômicos. É composta de dois processos (CETESB, 2017):

a) Processo de Identificação de Áreas Contaminadas: tem como objetivo identificar as áreas contaminadas, determinar sua localização e características e avaliar os riscos a elas associados, possibilitando a decisão sobre a necessidade de adoção de medidas de intervenção. É constituído por seis etapas fundamentais:

- Identificação de Áreas com Potencial de Contaminação;

- Priorização de Áreas com Potencial de Contaminação;
- Avaliação Preliminar;
- Investigação Confirmatória;
- Investigação Detalhada;
- Avaliação de Risco.

b) Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas: possibilita selecionar e executar, quando necessárias, as medidas de intervenção, visando reabilitar a área para o uso declarado. É constituído por três etapas fundamentais:

- Elaboração do Plano de Intervenção;
- Execução do Plano de Intervenção;
- Monitoramento para Encerramento.

Em função do nível das informações obtidas, dos riscos existentes ou das medidas de intervenção adotadas, as áreas contaminadas podem ser classificadas como:

- Área com Potencial de Contaminação (AP);
- Área Suspeita de Contaminação (AS);
- Área Contaminada sob Investigação (ACI);
- Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi);
- Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe);
- Área Contaminada em Processo de Reutilização (ACRu);
- Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME);
- Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR).

3.3. Modelo conceitual e plano de intervenção

Dentre os documentos elaborados ao longo do gerenciamento de uma área contaminada, destacam-se o Modelo Conceitual e o Plano de Intervenção, os quais são as bases para o entendimento do problema existente e o planejamento das ações necessárias, respectivamente, fundamentais para as tomadas de decisão e, consequentemente, à eficácia, eficiência e sucesso de todas as etapas do projeto.

A CETESB, por meio da DD 038/2017, define o modelo conceitual como o “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. Esse relatório deve conter a identificação das substâncias químicas de interesse, das fontes de contaminação, dos mecanismos de liberação das substâncias, dos meios pelos quais as substâncias serão transportadas, dos receptores e das vias de ingresso das substâncias nos receptores” (CETESB, 2017).

Ainda conforme a CETESB (2021), o plano de intervenção é o documento onde são definidas e planejadas as medidas de intervenção necessárias para viabilizar o uso seguro de uma Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi) e sua vizinhança, com objetivo de a tornar uma Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR). O plano de intervenção deve prever, basicamente: o objetivo geral e os objetivos específicos; as medidas de intervenção a serem adotadas; a seleção das técnicas a serem empregadas em cada uma das medidas de intervenção definidas. Estas definições devem ser feitas pelo responsável técnico com base no modelo conceitual da área, considerando, dentre outras coisas, as características das fontes de contaminação primárias ou secundárias, as SQI – Substâncias Químicas de Interesse, os caminhos potenciais e reais de exposição e os bens a proteger identificados, além do uso pretendido para a área em avaliação.

Considerando a relevância de ambos os documentos no gerenciamento de uma área contaminada, devem ser atualizados sempre que houver fatos novos, inovação tecnológica ou fatores técnicos, buscando a redução das incertezas.

Conforme observou Marker (2013), o universo das medidas de intervenção – como medidas de controle institucional e de engenharia, de remediação (contenção e tratamento), de ação emergencial e de monitoramento – é amplo e complexo. Conforme ilustrado na figura 01, as medidas de intervenção agem:

- a) Sobre a fonte de contaminação, por eliminação/escavação e destinação, mitigação, ou controle e confinamento;
- b) Sobre a propagação dos contaminantes, interceptando-os fisicamente ou mitigando sua propagação, sobretudo no fluxo subterrâneo;
- c) Sobre o receptor, limitando o contato dos contaminantes com os receptores (homem) e outros bens a proteger através de restrição de usos de superfícies ou água.

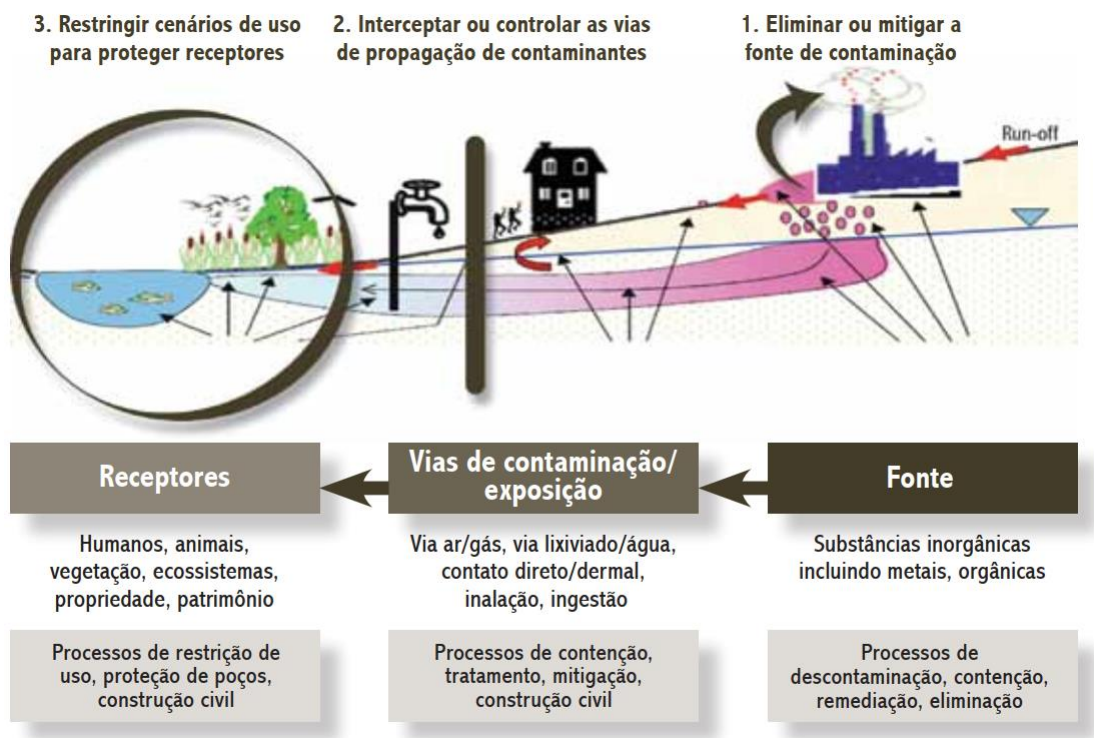


Figura 01. Sistemática das medidas de intervenção em relação às fontes, vias de exposição e receptores (adaptado de SWARTJES et al., 2011 apud MARKER, 2013).

As medidas de intervenção têm como objetivo o controle do risco, visando assegurar um risco aceitável e compatível com o uso pretendido de uma área. Pode-se considerar que um risco está controlado quando as medidas aplicadas reduzem a possibilidade dos contaminantes alcançarem os receptores, ficando abaixo de um valor estabelecido considerado como seguro para determinado uso. A seleção da estratégia e das tecnologias depende do uso pretendido da área, o que determina o montante de recursos financeiros disponíveis para as medidas de intervenção (MARKER, 2013), sendo que muitas vezes não há a pretensão de mudança de uso da área, apenas a eliminação do risco e a regular manutenção das atividades do empreendimento.

3.4. Características e comportamento dos hidrocarbonetos em subsuperfície

Os hidrocarbonetos são compostos orgânicos de cadeia linear, ramificada ou cíclica, constituídos por carbono (C) e hidrogênio (H). A maioria dos hidrocarbonetos encontrados naturalmente são provenientes do petróleo bruto e gás natural, originados a partir da decomposição da matéria orgânica. Para a produção de produtos e materiais úteis, como combustíveis, petroquímicos e outros derivados, os hidrocarbonetos precisam ser processados,

alterando sua estrutura química e física. Tais diferenças na estrutura molecular, embora a fórmula empírica possa permanecer a mesma, causam diferenças significativas nas suas propriedades e comportamento (SPEIGHT, 2011).

Os hidrocarbonetos podem estar presentes basicamente sob quatro formas: dissolvidos em água, sorvidos em partículas orgânicas, como gás do solo e na forma de fase líquida não aquosa, comumente conhecida como “NAPL” (*non-aqueous phase liquid*) ou simplesmente “fase livre”, referente ao produto ou derivado de petróleo na sua forma pura. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2013), as principais substâncias relacionadas à contaminação ambiental causada pelo petróleo ou seus derivados, no solo e nas águas subterrâneas, podem ser agrupadas em:

- Compostos Orgânicos Voláteis (COVs): compostos orgânicos halogenados (principalmente clorados), benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos (BTEX) e outros COVs não halogenados;
- Compostos Orgânicos Semivoláteis (SVOCs): bifenilas policloradas (PCBs), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), pesticidas e herbicidas orgânicos, fenóis, a maioria dos combustíveis e destilados, explosivos, dioxinas, furanos e outros SVOCs halogenados e não halogenados;
- Outros compostos orgânicos não especificados.

Em contato com os compartimentos ambientais, como solo e água subterrânea, os hidrocarbonetos de petróleo passam por processos físicos, químicos e biológicos, por meio da interação com microrganismos e vias metabólicas, conhecidos coletivamente como intemperismo. O nível de degradação dos hidrocarbonetos de petróleo sob processos de intemperismo depende em grande parte da sua natureza, composição, características físicas e químicas. O processo de intemperismo pode incluir a adsorção a partículas do solo e materiais orgânicos, volatilização para a atmosfera e dissolução em água. O processo de intemperismo físico abiótico, mais rápido, envolve a evaporação de hidrocarbonetos alifáticos de baixo peso molecular, enquanto os demais processos físicos, químicos e biológicos envolvem espalhamento, dispersão, evaporação, dissolução, afundamento, emulsificação, foto-oxidação, biodegradação, entre outros. Muitos hidrocarbonetos de petróleo têm uma alta afinidade por matéria orgânica e podem ser facilmente adsorvidos a materiais orgânicos e aderir ao solo e sedimentos devido à sua hidrofobicidade (OSSAI et al., 2020).

Em solo, os hidrocarbonetos de petróleo permeiam verticalmente para baixo até atingirem as águas subterrâneas, espalhando-se lateralmente, além de parte ficar retida nos

poros do solo. Em meio aquático, os hidrocarbonetos tendem a flutuar na superfície e formar películas ou manchas e seu processo de intemperismo pode incluir espalhamento, evaporação, dissolução, dispersão e emulsificação, enquanto as frações moleculares mais densas tendem a afundar. (OSSAI et al., 2020).

Os hidrocarbonetos de petróleo apresentam efeitos tóxicos e letais, dependendo da natureza química, composição e propriedades das suas frações, além do modo, nível e tempo de exposição. Podem causar problemas toxicológicos à saúde humana e de animais, incluindo hemotoxicidade (destruição de glóbulos vermelhos), carcinogenicidade (capacidade ou tendência de induzir câncer), genotoxicidade (induzir danos não transmissíveis ao DNA), mutagenicidade (incitar mutações genéticas transmissíveis), teratogenicidade (indução de malformação do embrião ou feto), citotoxicidade (capacidade de ser tóxico para as células), neurotoxicidade (danos ao cérebro e sistema nervoso), imunotoxicidade (reprimir o sistema imunológico), nefrotoxicidade (danos ao rim), hepatotoxicidade (danos ao fígado), cardiotoxicidade (danos aos músculos cardíacos) e toxicidade ocular (induzir distúrbios oculares). Também podem causar efeitos inibitórios no crescimento das plantas, obstruindo ou diminuindo a ingestão de água e sais minerais, causando a quebra dos seus processos metabólicos, resultando em deficiência de clorofila e nutrientes que levam ao declínio da resistência a pragas e doenças, apresentando crescimento atrofiado, deformações nas raízes, folhas e flores (OSSAI et al., 2020).

3.5. Técnicas de remediação aplicadas à contaminação por hidrocarbonetos

Um meio contaminado será considerado recuperado ou reabilitado quando a concentração dos contaminantes atingir um nível seguro e compatível com a proteção da saúde humana e atender aos padrões legais aplicáveis. Para atingir este objetivo, diversas técnicas de remediação e estratégias de gerenciamento estão disponíveis, aplicáveis de forma individual ou combinada, em função das características da contaminação, da área contaminada e do estágio de intervenção já alcançado.

Uma análise das estratégias de remediação adotadas nos últimos anos nos Estados Unidos, na Europa e no Brasil mostra que a maioria das soluções incluem, no caso de solos e sedimentos, a dragagem, escavação, descarte ou contenção e, para águas subterrâneas, a biorremediação, oxidação química, bombeamento e tratamento (P&T) e atenuação natural,

com número crescente de tecnologias alternativas (EEA, 2015; USEPA, 2013 apud DA SILVA, MARANHO, 2019).

Em alguns casos, uma ação típica dos gestores é a escolha de tecnologias que atinjam os objetivos de remediação o mais rápido possível, mas esses objetivos geralmente só são alcançados por tecnologias excessivamente caras, que podem resultar em custos de remediação muito altos. Outra abordagem comum é a adoção de medidas simples e de baixo custo, porém, com o risco de a remediação não atingir os objetivos necessários, ou atingi-los em prazos relativamente longos (BAGE et al., 2002; DA SILVA, MARANHO, 2019).

Nesse contexto de incertezas e escolhas arriscadas, além de informações detalhadas sobre os contaminantes e sobre a área contaminada, os gestores precisam de um bom conhecimento das tecnologias de remediação disponíveis, das diferenças entre elas e informações que auxiliem na seleção da(s) tecnologia(s) mais adequada(s) ao caso concreto.

A seleção da opção de remediação depende de diversos fatores que afetam tecnicamente a eficiência e a aplicabilidade da remediação, conforme ilustrado na figura 02. A falta de informação sobre esses fatores pode reduzir ou até mesmo anular a eficácia do processo. Algumas das estratégias não técnicas incluem a capacidade de atender aos padrões legais aplicáveis, custo aceitável em relação a outros métodos de remediação disponíveis, fatores de recursos humanos, fatores econômicos e de responsabilidade e fatores regulatórios, como criação de mercados, controle dos produtos e de substâncias tóxicas, além da definição da estratégia de gerenciamento de risco (redução da fonte, interrupção das vias e proteção dos receptores), adequação tecnológica e viabilidade, relação custo-benefício do ciclo de vida do projeto e dos riscos aceitáveis para contaminantes residuais após o tratamento (KUPPUSAMY et al., 2016a,b apud OSSAI et al., 2020).

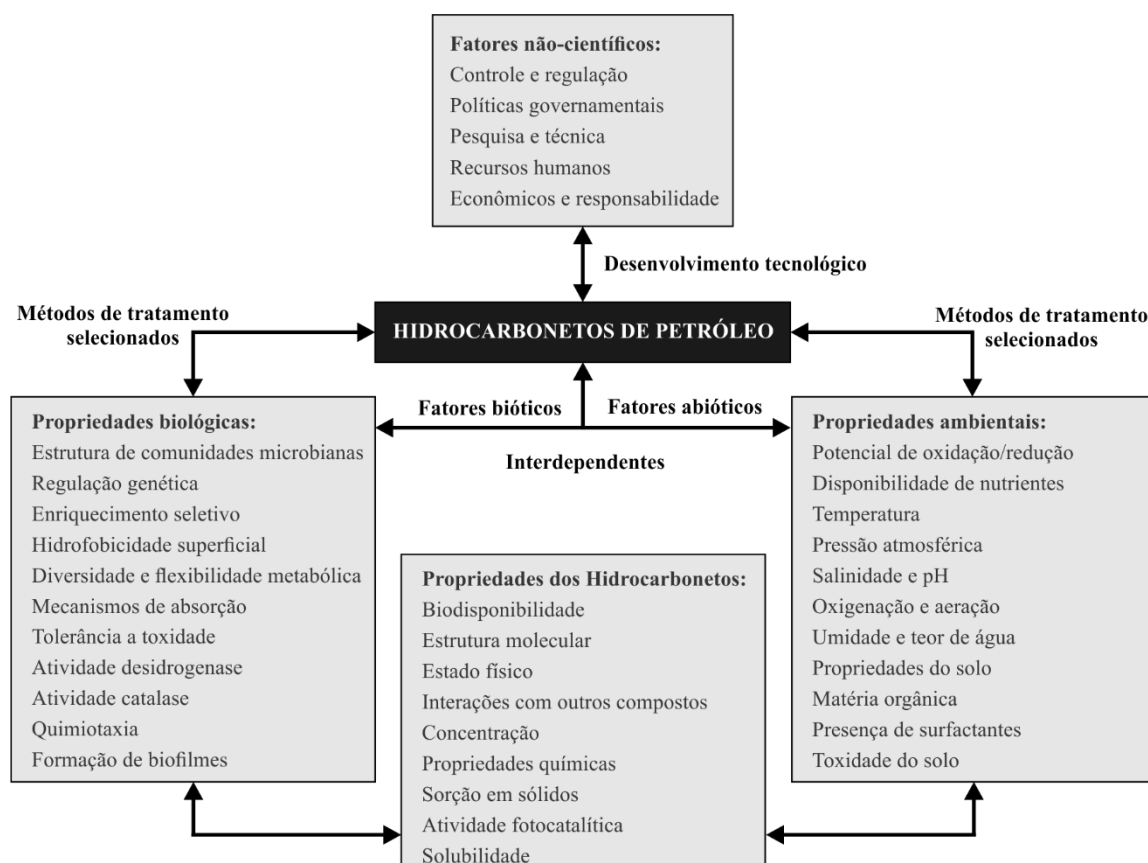


Figura 02. Fatores que afetam a remediação de hidrocarbonetos de petróleo (adaptado de OSSAI et al., 2020).

Vários métodos de remediação estão disponíveis, mas nenhum método será sempre o mais apropriado e aplicável a todos os tipos de contaminantes e condições específicas de uma área contaminada. Uma boa compreensão das características e condições dos ambientes afetados, natureza, composição e propriedades dos contaminantes, destino, transporte e distribuição dos contaminantes, mecanismo de degradação, interações e relações com microrganismos, fatores que afetam a remediação e os potenciais impactos determinam a escolha da técnica de remediação mais adequadas, ou uma combinação delas. Mais de um método de tratamento de remediação pode ser necessário ou combinado, visando remover, conter ou degradar os contaminantes, sendo crucial essa avaliação na tomada de decisão. Consequentemente, é uma boa opção selecionar métodos de tratamento de remediação que sejam mais adaptáveis, cientificamente defensáveis, sustentáveis, não invasivos, ecologicamente corretos e econômicos (OSSAI et al., 2020).

3.6. Áreas complexas e o seu gerenciamento

Em algumas áreas, condições específicas podem tornar ainda mais complexos o gerenciamento e a remediação da contaminação até aos níveis aceitáveis ou padrões legais. Desafios técnicos e não técnicos podem impedir o alcance das metas de remediação estabelecidas pela legislação e normativas técnicas, dentro de um prazo razoável.

Embora não haja uma única definição formal de complexidade, a maioria dos profissionais de remediação concorda que os atributos de complexidade incluem contaminações extensas de águas subterrâneas, geologia heterogênea, grandes vazamentos e/ou áreas fonte, múltiplos contaminantes e/ou recalcitrantes, distribuição heterogênea de contaminantes no subsolo e longos prazos decorridos desde o início ou fator gerador da contaminação. Fatores adicionais que contribuem para a complexidade incluem, também, restrições físicas para instalação ou operação das tecnologias de remediação e expectativas desafiadoras (por exemplo, requisitos regulatórios, metas de remediação e expectativas da comunidade). A complexidade de uma área contaminada aumenta com o número dessas características presentes (NRC, 2013).

No presente trabalho está sendo adotada a definição sugerida pelo ITRC (2017), que define uma área complexa como: “um local em remediação ambiental que, devido a desafios técnicos e não técnicos, provavelmente não será restaurado dentro de um prazo razoável”. Áreas com desafios técnicos e não técnicos consideráveis normalmente requerem um prazo de remediação mais longo, maior custo de remediação e maior pegada ambiental (como uso de energia ou emissões de carbono), principalmente se os desafios do local não forem adequadamente compreendidos e abordados desde o início. Por outro lado, locais complexos têm maior potencial de economia de custos, redução da pegada ambiental, reutilização benéfica da área e outros benefícios sociais (ITRC, 2017).

A heterogeneidade do subsolo e outras complexidades locais são os principais fatores de risco ao desempenho do projeto de remediação. As tecnologias de bombeamento e tratamento (P&T e MPE) visam atuar sobre a contaminação em áreas acessíveis às zonas de fluxo. As tecnologias de extração podem, no entanto, não ser suficientemente eficientes para remover toda a contaminação do subsolo, particularmente em configurações de rochas fraturadas ou locais com diferentes camadas estratigráficas (NRC, 1994; MACDONALD, KAVANAUGH, 1994 apud ITRC, 2011). Os contaminantes em fase livre podem ficar presos como pequenos glóbulos em partículas finas, sedimentos ou lentes de argila cercadas por

camadas arenosas em subsuperfície. Os contaminantes podem se difundir em regiões inacessíveis da subsuperfície (espaços porosos não móveis) após serem liberados, podendo se difundir ou se tornarem novamente disponíveis de forma lenta após a remediação (ITRC, 2011), estendendo o prazo para estabilização das concentrações, alcance das metas de remediação e efetiva conclusão do processo de gerenciamento.

As tabelas 01 e 02 apresentam, respectivamente, os principais exemplos de desafios técnicos e não técnicos que podem resultar em uma área contaminada complexa, segundo a definição do ITRC (2017).

Tabela 01. Desafios técnicos em áreas complexas (ITRC, 2017).

Desafios Técnicos	Exemplos
Condições geológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Heterogeneidade geológica e/ou caminhos de fluxo preferenciais • Falhas, panes • Base rochosa fraturada • Geologia cárstica • Meio de baixa permeabilidade
Condições hidrogeológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidades extremas ou variáveis da água subterrânea • Níveis flutuantes do lençol freático • Contaminação de águas subterrâneas profundas • Interações de águas superficiais e subterrâneas e sedimento impactado
Condições geoquímicas	<ul style="list-style-type: none"> • Geoquímica extrema (como alcalinidade ou pH excepcionalmente alto ou baixo, aceptores de elétrons elevados, condições redox extremas) • Temperaturas extremas da água subterrânea
Condições relacionadas a contaminantes	<ul style="list-style-type: none"> • Fase livre (LNAPL – <i>Light non-aqueous phase liquid</i> ou DNAPL – <i>Dense non-aqueous phase liquid</i>) • Contaminantes recalcitrantes • Altas concentrações de contaminantes ou múltiplos contaminantes • Contaminantes emergentes
Área de grande escala	<ul style="list-style-type: none"> • Localização e extensão da contaminação • Número, tipo e proximidade de receptores • Profundidade de contaminação • Plumas extensas ou combinadas

Tabela 02. Desafios não técnicos em áreas complexas (ITRC, 2017).

Desafios não técnicos	Exemplos
Objetivos da área	<ul style="list-style-type: none">• Expectativas sociais e aceitabilidade social• Mudando os objetivos da área• Adoção de objetivos do local que diferem dos níveis de triagem promulgados ou critérios de encerramento
Gerenciando mudanças que podem ocorrer em longos períodos de tempo	<ul style="list-style-type: none">• Correção em fases• Uso futuro• Gerenciamento da área• Múltiplas partes responsáveis• Rotatividade de pessoal e/ou perda de conhecimento institucional• Litígio
Sobreposição de responsabilidades regulatórias	<ul style="list-style-type: none">• Cooperação federal e estadual• Mudança de leis e regulamentos• Responsabilidade financeira• Áreas órfãs• Contaminantes sem critérios regulatórios ou orientação (como contaminantes emergentes)
Controles institucionais	<ul style="list-style-type: none">• Rastreando e gerenciando controles institucionais• Aplicação de controles institucionais• Gestão de longo prazo dos controles institucionais
Mudanças no uso da terra	<ul style="list-style-type: none">• Mudança do uso da terra ou da água• Múltiplos proprietários• Acesso à área
Financiamento	<ul style="list-style-type: none">• Falta de financiamento (estadual, federal ou setor privado)• Políticas que alteram o financiamento e/ou prioridades do programa• Responsáveis relutantes ou desconhecidos

Para áreas contaminadas complexas, são necessárias estratégias de gerenciamento e abordagens diferenciadas, por meio de análises preditivas, implementação de processos progressivos, com o objetivo de definir e alcançar uma estratégia de remediação bem-sucedida.

A publicação do ITRC (2017) consolida uma série de ações e processos recomendados para o gerenciamento de áreas contaminadas complexas, dentre os quais o denominado “gerenciamento adaptativo”, metodologia abrangente, flexível e iterativa, adequado para locais onde há incerteza significativa nas previsões de desempenho da remediação. O gerenciamento adaptativo de áreas contaminadas prevê a definição de objetivos intermediários de curto prazo e objetivos de longo prazo que refletem os desafios técnicos e não técnicos existentes na área. A estratégia corretiva pode envolver várias tecnologias simultaneamente e mudanças nas tecnologias ao longo do tempo. Propõe ainda um planejamento abrangente e avaliações de desempenho das medidas de remediação, que visam

auxiliar os tomadores de decisão a rastrear o seu progresso e orientar ajustes, se necessário, para garantir o alcance dos objetivos. O planejamento de longo prazo também pode otimizar a remediação, propor reavaliações ou transições para outras tecnologias ou ações de contingência (ITRC, 2017).

A figura 03 apresenta como o gerenciamento adaptativo pode ser aplicado à remediação de áreas complexas, conforme metodologia do ITRC (2017), consistindo na repetição das etapas, por meio da aplicação de critérios de decisão para ajustar, otimizar ou reavaliar a solução, conforme as necessidades observadas e avaliadas ao longo do processo.

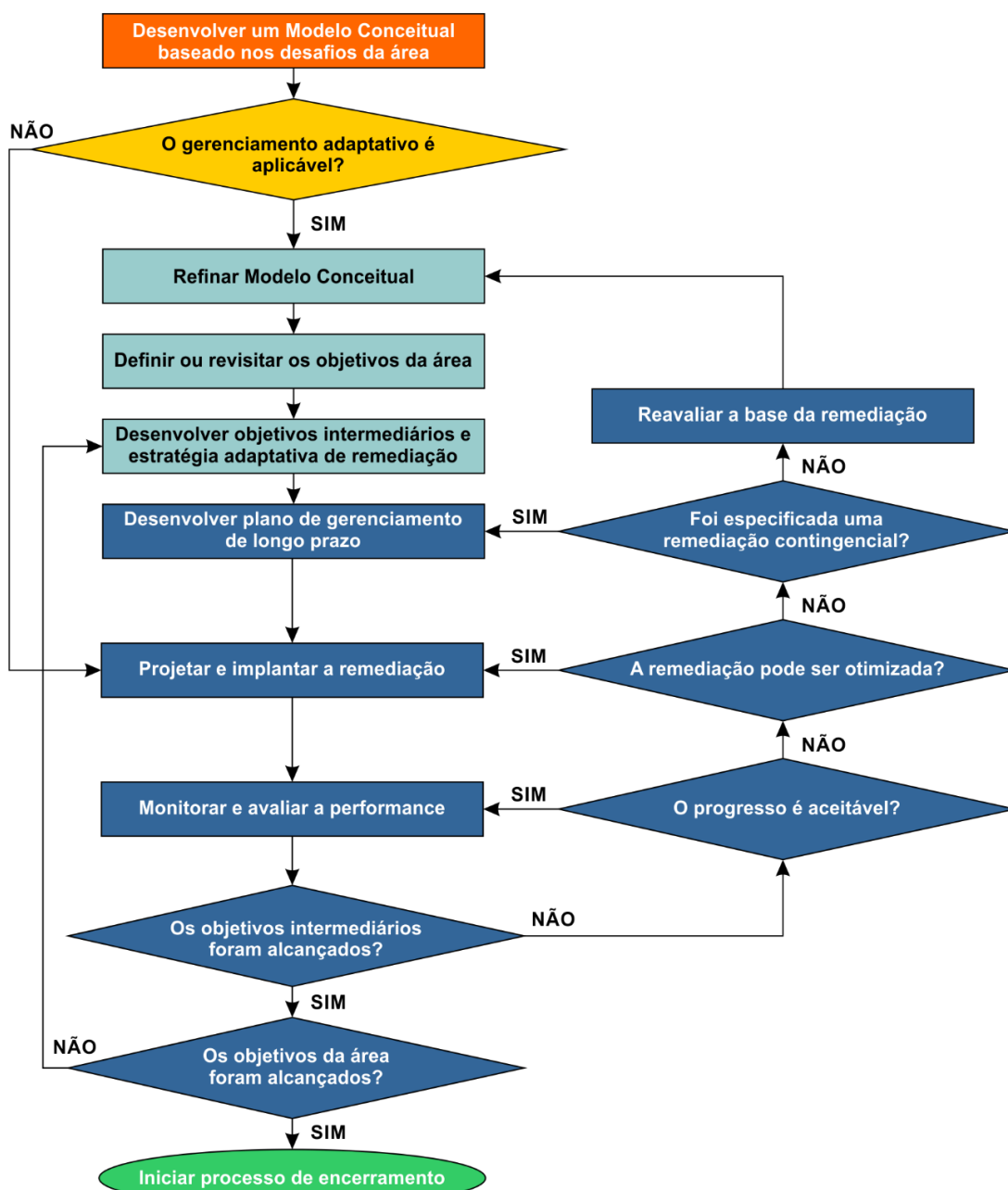


Figura 03. Fluxograma para o gerenciamento da remediação de áreas complexas (adaptado de ITRC, 2017).

A avaliação prévia do potencial de remediação em uma área contaminada é etapa fundamental para definição da solução técnica mais adequada. Consiste numa abordagem baseada em evidências: dados disponíveis do local, informações de áreas similares, avaliações preditivas ou uma combinação destas, para determinar se a área provavelmente atingirá os objetivos de remediação dentro de um prazo razoável (que pode ser estimado) ou se os desafios justificam o uso do gerenciamento adaptativo. Os resultados dessa avaliação podem ajudar a definir os objetivos e determinar se o gerenciamento adaptativo é aplicável ou recomendado na área (ITRC, 2017).

A tabela 03 apresenta oito questões sobre os principais fatores que podem afetar a probabilidade de atingir os objetivos da área dentro de um prazo razoável, particularmente relacionados à remediação das águas subterrâneas. Essas questões foram baseadas na experiência profissional dos membros da equipe do ITRC e estão alinhadas às orientações da USEPA (1993) e NJDEP (2013). São considerações práticas para avaliar o potencial de remediação no início do processo de gerenciamento, antes da seleção e implementação da remediação. Não se trata de uma lista exaustiva, questões podem ser incorporadas ou substituídas conforme as características e desafios da área de estudo (ITRC, 2017).

Tabela 03. Critérios para avaliação do potencial de remediação (adaptado de ITRC, 2017).

Questão	Descrição
1. Quão difícil é trabalhar no local?	Quanto da área contaminada é acessível (por exemplo, para perfuração ou escavação)? Estão presentes estruturas, unidades de processo ativas, ambientes sensíveis ou há outras restrições?
2. Quão difícil é perfurar no local?	A perfuração é difícil, lenta e consome muitos recursos? Por exemplo, em cenários mais simples onde a contaminação é superficial, as tecnologias de cravação direta (<i>direct push</i>) podem ser usadas para instalar vários poços.
3. Qual é a escala da área fonte e das plumas?	Qual é a extensão da área fonte e das plumas? O potencial de remediação pode ser significativamente menor se o volume da fonte ou a área das plumas forem grandes.
4. Que redução da concentração dos contaminantes é necessária?	Qual é a redução necessária nas concentrações para atingir os objetivos? Se for necessária uma redução de várias ordens de magnitude para atingir as metas de remediação, é mais provável que haja um longo prazo de remediação.

Tabela 03. Critérios para avaliação do potencial de remediação (adaptado de ITRC, 2017).

Questão	Descrição
5. Os principais contaminantes se atenuam mais rapidamente em relação ao tempo de deslocamento até os receptores?	Qual é a taxa estimada de atenuação? Se os contaminantes e condições geoquímicas forem compatíveis com processos naturais de atenuação, é provável que a área seja remediada em um prazo menor.
6. Existem massas de contaminantes de difícil remoção?	Qual massa de contaminante está em fase livre (NAPL) ou presente nas zonas de baixa condutividade hidráulica? Se uma massa significativa de contaminantes estiver em zonas de baixa condutividade (ou em leito rochoso fraturado ou cárstico), a pluma provavelmente persistirá por um longo tempo sem remediação. Se contaminantes estiverem presentes na forma de fase livre, a contaminação também pode persistir por mais tempo.
7. Qual é o desempenho previsto para as tecnologias de remediação disponíveis?	Existem tecnologias comprovadamente aplicáveis disponíveis para lidar com a contaminação? As observações em locais semelhantes indicam incertezas significativas e longos prazos de correção?
8. Qual é o prazo previsto para atingir os objetivos intermediários ou finais?	Dadas as alternativas técnicas de remediação disponíveis, quanto tempo levaria a remediação? Ferramentas de cálculo podem ser usadas para prever se qualquer abordagem ou combinação de abordagens pode atingir objetivos intermediários em um prazo menor.

Em áreas contaminadas complexas, o gerenciamento de longo prazo pode durar várias décadas, podendo até exceder os 100 anos. Esses longos prazos aumentam as incertezas, pois as soluções técnicas adotadas podem falhar ou apresentar desempenho inferior ao longo do tempo, a menos que sejam reavaliados e modificados rotineiramente. Por exemplo, sistemas projetados para remoção de uma massa inicial de contaminantes podem não funcionar de forma eficaz se a disponibilidade destes contaminantes mudar ao longo do tempo. O gerenciamento de longo prazo de áreas contaminadas complexas começa com o projeto de remediação e inclui todas as fases seguintes do gerenciamento, incluindo a operação da remediação, o monitoramento e a avaliação da efetividade da remediação (ITRC, 2017).

O emprego do gerenciamento adaptativo pode identificar e considerar essas incertezas ao longo do ciclo de vida do projeto, por meio do estabelecimento de um plano de gerenciamento de longo prazo. Essa abordagem torna mais claro e auxilia os tomadores de

decisão sobre o progresso da remediação, agiliza as reavaliações da remediação e facilita as transições para técnicas e soluções alternativas, ou ainda direcionam para o uso de ações de contingência. Como parte do gerenciamento adaptativo de uma área complexa, as decisões precisam ser totalmente definidas o mais cedo possível no processo de tomada de decisão, sendo recomendado mantê-las em um “plano de gerenciamento de longo prazo”. O plano deve ser um documento “vivo”, periodicamente revisado com base em avaliações de desempenho, que pode ajudar a atingir as metas de proteção da saúde humana e do meio ambiente e progredir em direção aos objetivos estabelecidos (ITRC, 2017).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são apresentados a caracterização, histórico de operação e etapas do estudo de caso. Por questões de confidencialidade, optou-se por não identificar o empreendimento, os aspectos geológicos que pudessem identificar a sua localização, as consultorias ambientais e demais partes envolvidas, limitando-se o presente estudo a abordar aspectos estritamente técnicos relacionados ao gerenciamento da contaminação, sem prejuízos ao adequado entendimento e interpretação das informações.

4.1. Avaliação do histórico e contexto do empreendimento

A área objeto deste estudo tem como atividade o armazenamento e distribuição de combustíveis. A sua construção e início da operação remontam ao final da década de 1970. Possui área total de aproximadamente 200.000 m², com cerca de 6.000 m² de área construída. Está classificada no zoneamento municipal como de uso predominantemente industrial.

No local não são produzidos produtos ou combustíveis, estes são recebidos por meio de dutos e caminhões-tanque, armazenados em tanques aéreos verticais e é realizado o carregamento de caminhões-tanque para distribuição a postos de combustíveis e outros clientes.

A unidade é constituída por áreas operacionais, administrativas e de apoio, conforme apresentado na tabela 04 e layout apresentado na figura 04.

Tabela 04. Principais áreas e processos do empreendimento.

Área	Processo
Portaria	Controla o acesso e saída de veículos leves, caminhões-tanque e pedestres.
Pátios de estacionamento	Destinados ao estacionamento e controle de fluxo dos caminhões-tanque que trafegam pelo empreendimento.
Área de tancagem	Bacias de tanques aéreos verticais, nos quais são armazenados os produtos etanol (anidro e hidratado), gasolina, óleo diesel, óleo combustível e biodiesel, com capacidade de armazenamento superior a 40.000 m ³ .
Tubovias	Dutovias (ou tubovias) são depressões no terreno onde passam as tubulações que transportam produto entre os tanques e plataformas de carregamento e descarregamento. Existem trechos nos quais as tubulações são enterradas.
Plataformas de carregamento e descarga	Onde são recebidos e expedidos os combustíveis por meio de caminhões-tanque.

Tabela 04. Principais áreas e processos do empreendimento.

Área	Processo
Manutenção e depósito	Utilizada para manutenções diversas e guarda de ferramentas, armazenamento de peças e outros materiais.
Áreas administrativas	Utilizadas para as atividades administrativas e de gestão.
Sistemas de drenagem	Contemplam a segregação entre as águas pluviais e contaminadas, sendo estas últimas encaminhadas por meio de canaletas em concreto para tratamento.

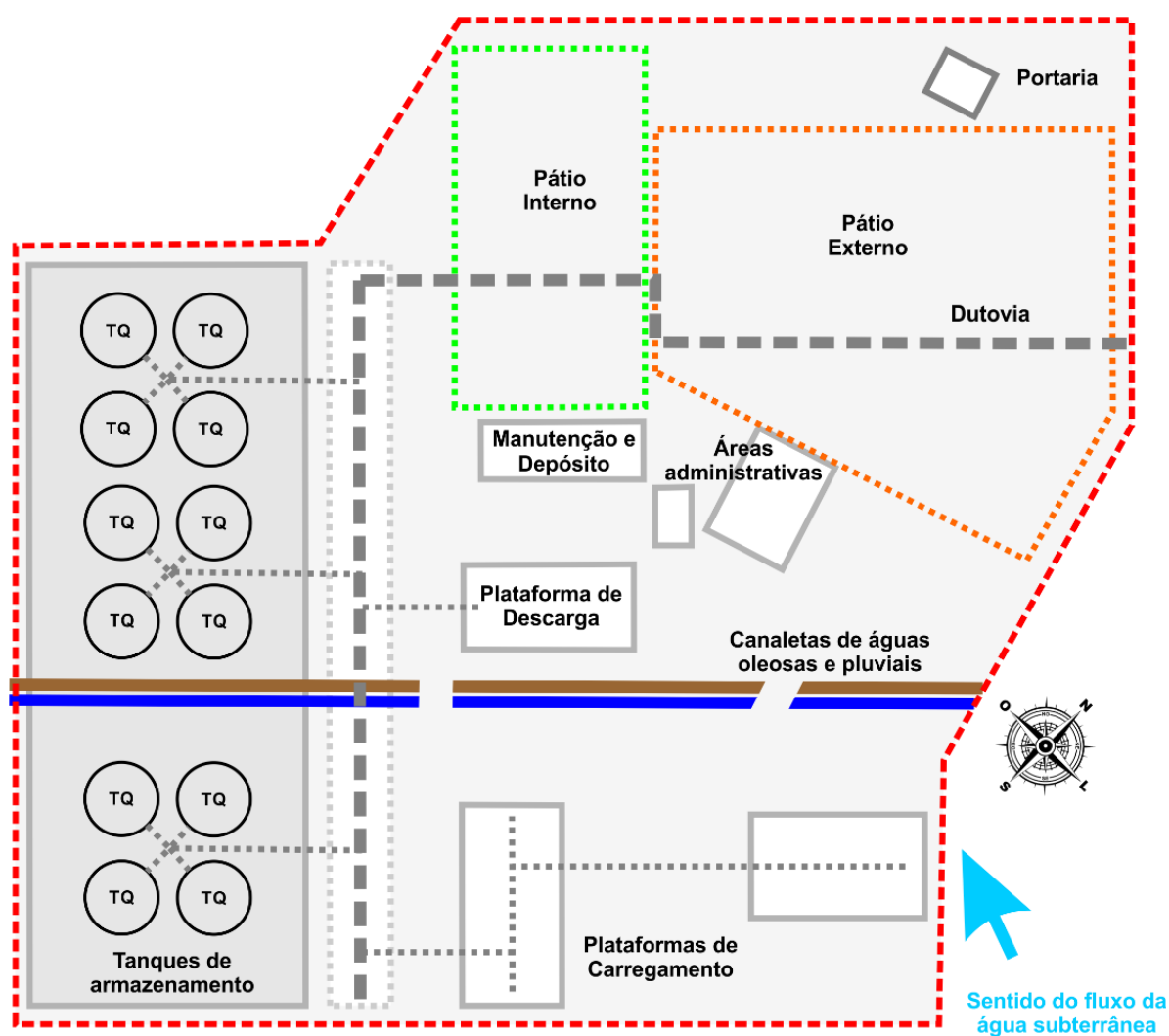


Figura 04. Layout do empreendimento – identificação das principais áreas.

Apresenta contaminação em fase livre (LNAPL) e dissolvida por hidrocarbonetos derivados de petróleo, decorrentes de vazamento dos produtos diesel e gasolina em tubulações subterrâneas (enterradas), sendo classificado, de acordo com CETESB (2017), como Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe). Atualmente estão em operação sistemas de remediação por extração multifásica (MPE) e bombeamento (*Pump & Treat*), em processo

de revisão de escopo e estratégia para nova contratação e ampliação, visando maior eficiência, eficácia e atuação sobre toda a extensão da pluma de fase livre.

4.2. Etapas e escopo de trabalho

Foram obtidos e avaliados os relatórios ambientais desenvolvidos para a área, visando a contextualização das questões técnicas com o cenário atual do gerenciamento, a caracterização do meio físico, a identificação das complexidades, potenciais lacunas e oportunidades de melhoria. Os relatórios ambientais avaliados são listados na tabela 05.

Tabela 05. Relação de estudos ambientais desenvolvidos para a área.

Ano	Estudo Ambiental
Julho/2018	Relatório de Avaliação Ambiental Preliminar
Janeiro/2019	Relatório de Investigação Ambiental Confirmatória
Maio/2019	Aplicação do software SCBR na atualização do modelo conceitual e definição de estratégias de gerenciamento ambiental da área visando o futuro encerramento do caso
Junho/2020	Relatório de Instalação dos Sistemas de Bombeamento Emergenciais de Fase Livre (Nov/19 a Abr/20)
Setembro/2020	Relatório de Investigação Ambiental Detalhada, Avaliação de Risco à Saúde Humana e Plano de Intervenção
Janeiro/2021	Relatório de Investigação de Alta Resolução (HRSC) – Área da dutovia do Pátio Externo
Maio/2021	Relatório de Ensaio Piloto Ensaio Piloto pela Técnica <i>Pump & Treat</i> e Projeto Executivo de Remediação
Outubro/2021	Relatório de Investigação Complementar e atualização do Plano de Intervenção

O resumo de cada trabalho e seus principais resultados são apresentados no item “5.1. Avaliação do histórico e contexto local”.

4.3. Proposta de classificação dos desafios da área

A partir da revisão bibliográfica e orientações do ITRC (2017), com base nas informações obtidas nos estudos ambientais e no conhecimento da área, foram selecionados os principais desafios técnicos e não técnicos do caso. Visando suprir lacuna identificada na metodologia do ITRC (2017), foi proposta uma classificação dos níveis de complexidade para diferenciá-los e priorizá-los.

Os documentos e treinamentos desenvolvidos pelas equipes do ITRC são importantes ferramentas para reduzir as barreiras no uso de tecnologias e abordagens ambientais inovadoras, ampliar e aprofundar o conhecimento técnico e agilizar a tomada de decisão no gerenciamento de áreas contaminadas. As publicações da instituição são escritas e revisadas por equipes de voluntários dos setores público e privado dos Estados Unidos, incluindo reguladores ambientais estaduais e federais, representantes de agências federais, especialistas do setor, partes interessadas da comunidade e meio acadêmico (ITRC, 2017).

Para a classificação do nível de complexidade de cada desafio, preliminarmente foram avaliadas metodologias amplamente empregadas em gerenciamento de projetos, gerenciamento e classificação de riscos e priorização de problemas. A metodologia que se mostrou mais adequada foi a denominada matriz GUT, em função da maior aderência das suas três dimensões – Gravidade (G), Urgência (U) e Tendência (T) aos objetivos do gerenciamento da área contaminada e à proposta do trabalho. Trata-se de ferramenta de decisão frequentemente usada para a priorização de problemas em diversos contextos (gerenciamento de projetos, gestão de pessoas e processos etc.), que apoia os gestores em decisões complexas, orientando a melhor sequência para solucioná-los. Consiste na avaliação dos problemas identificados em uma escala de prioridades, por meio da atribuição de notas de 1 a 5 para os aspectos de Gravidade (G), Urgência (U) e Tendência (T) (MARSHALL JR. et al, 2008; TRUCOLO et al., 2016).

No contexto do gerenciamento de áreas contaminadas abordado no presente trabalho, a definição adotada para os três aspectos foi a seguinte:

- **Gravidade (G):** é o potencial impacto do desafio na efetividade da remediação, no alcance das metas e reabilitação da área. A análise é feita com base nos efeitos que o desafio, caso não seja resolvido ou contornado, acarretará em médio e longo prazo.
- **Urgência (U):** é o prazo disponível ou recomendado para a resolução ou contorno do desafio. Quanto menor o tempo requerido para uma ação, mais urgente será o desafio que deverá ser tratado.
- **Tendência (T):** é a probabilidade ou potencial que o desafio e seus efeitos tem de crescer ou piorar com o passar do tempo, impactando direta ou indiretamente os objetivos da área, ou seja, a efetividade da remediação, o alcance das metas e reabilitação da área.

Para um determinado desafio avaliado, as notas atribuídas a cada um dos três aspectos são então multiplicadas, resultando em uma nota composta relacionada ao nível de complexidade, que pode variar entre 1 (menos crítico, menor prioridade) e 125 (mais crítico, maior prioridade). A tabela 06 apresenta a escala de classificação utilizada, conforme matriz GUT.

Tabela 06. Classificação dos desafios técnicos e não técnicos.

GRAVIDADE	URGÊNCIA	TENDÊNCIA	NOTA
Extremamente grave	Precisa de ação imediata	Irá piorar rapidamente	5
Muito grave	Urgente	Irá piorar a curto prazo	4
Grave	O mais rápido possível	Irá piorar a médio prazo	3
Pouco grave	Pouco urgente	Irá piorar a longo prazo	2
Sem gravidade	Pode esperar	Não irá mudar	1

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Avaliação do histórico e contexto local

A seguir são apresentadas de forma resumida os principais objetivos, resultados e recomendações dos estudos ambientais desenvolvidos para a área.

Julho/2018 – Relatório de Avaliação Ambiental Preliminar: teve como objetivo identificar aspectos e indícios do potencial ou suspeita de contaminação dos solos e das águas subterrâneas. Os resultados da avaliação subsidiaram a proposição do Modelo Conceitual inicial da área (MCA 1), além de um Plano de Investigação Confirmatória, contemplando técnicas de investigação direcionadas aos locais onde foi identificada suspeita de contaminação, e técnicas mais abrangentes de investigação naqueles locais em que não foi possível identificar a fonte primária de contaminação. Os quantitativos de investigação foram previstos englobando as duas estratégias de investigação, como: sondagens para malha de avaliação expedita de voláteis, sondagens para identificação de eventuais borras oleosas, sondagens investigativas, amostragem e análises de solos, instalação de poços de monitoramento, amostragem e análises de águas subterrâneas, levantamento topográfico cadastral e elaboração de relatório técnico de investigação confirmatória.

De acordo com levantamentos realizados na Avaliação Preliminar (2018), previamente ao início das obras de instalação (década de 1970), haviam três lagos na região, um aparentemente sem conexão com os cursos d'água do entorno, outro a sudoeste e outro a oeste, com um pequeno barramento, ligado a um curso d'água com direção de sul para norte. Estes deixaram de existir após as obras de terraplanagem. Não foram encontradas informações mais detalhadas sobre a movimentação de solo nos estudos ambientais disponíveis, que indiquem as prováveis áreas de corte e/ou aterro e localização exata em relação às instalações atuais.

Janeiro/2019 – Relatório de Investigação Ambiental Confirmatória: foram realizados 12 ensaios do tipo *Slug Test* para determinação da condutividade hidráulica. Foram coletadas 121 amostras de solo e 54 amostras de água subterrânea para análises químicas dos parâmetros BTEX, PAH e TPH Fingerprint. Dos 82 poços de monitoramento existentes naquele momento, 28 não foram amostrados devido a presença de fase livre de produto

combustível. Os resultados analíticos de solo apresentaram concentrações das substâncias Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno, Xilenos, Naftaleno, TPH Total superiores aos valores estabelecidos. Para solo, as plumas foram delimitadas e estavam localizadas no estacionamento de caminhões tanque e portaria. Quanto as análises da água subterrânea, observou-se concentrações superiores aos valores estabelecidos para Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno, Xilenos, Naftaleno e TPH Total. As plumas de fase dissolvida não foram completamente delimitadas, estando localizadas no estacionamento de caminhões tanque, portaria e tubovia. No estudo não foi possível a delimitação das plumas tanto no plano vertical, como no plano horizontal, e foi recomendado a continuidade da Investigação Detalhada, contemplando a instalação de poços de monitoramento adicionais e multiníveis, para posterior realização de Avaliação de Risco a Saúde Humana.

Maio/2019 – Aplicação do software SCBR na atualização do modelo conceitual e definição de estratégias de gerenciamento ambiental da área visando o futuro encerramento do caso: contemplou a análise técnica e científica de dados hidrogeológicos e geoquímicos da área do empreendimento, com o emprego do software SCBR (Solução Corretiva Baseada no Risco), modelagem e previsão de cenários visando a atualização do modelo conceitual, a definição de estratégias de gerenciamento ambiental para o futuro encerramento do caso, através da integração dos resultados da atualização do modelo conceitual hidrogeológico (etapa 1), atualização do modelo conceitual de fonte e transporte de contaminantes e definição de estratégias de gerenciamento ambiental da área (etapa 2). A partir da análise do histórico de serviços ambientais disponíveis na ocasião e resultados obtidos com o software e ferramentas de geoprocessamento empregados, foi identificada a necessidade de refinamento do modelo conceitual. Os resultados possibilitaram a atualização do modelo conceitual, o diagnóstico de incertezas e a proposição de ações recomendadas, a fim de reduzir lacunas e incertezas para a tomada de decisão assertiva e econômica no gerenciamento da área contaminada.

Junho/2020 – Relatório de Instalação dos Sistemas de Bombeamento Emergenciais de Fase Livre (Nov/19 a Abr/20): referente à instalação de cinco sistemas de remediação utilizando a técnica de extração multifásica (*MPE – Multi-Phase Extraction*), sendo 3 deles destinados a operar como uma barreira hidráulica a jusante da região da ocorrência da pluma de fase livre, nos limites noroeste do empreendimento, próximo à região

da portaria, visando prevenir a migração da fase livre e fase dissolvida para fora dos limites do empreendimento, e outros dois sistemas destinados a operar na região da pluma de fase livre, visando sua remoção. A barreira hidráulica teve sua operação iniciada em novembro de 2019 enquanto que os sistemas atuantes na pluma de fase livre tiveram sua operação iniciada em abril/2020.

Setembro/2020 – Relatório de Investigação Ambiental Detalhada, Avaliação de Risco à Saúde Humana e Plano de Intervenção: a investigação foi realizada com a execução de sondagens ambientais, instalação de poços de monitoramento, coleta de amostras de solo e de água subterrânea para análises laboratoriais, ensaios de permeabilidade (*slugtest*), instalação de poços *sub-slab*, realização de testes de estanqueidade, amostragem de ar do solo e levantamento planialtimétrico. Foram encontradas fases livres centimétricas delimitadas na área do pátio externo, que diminuiu de fevereiro para julho pela execução do sistema de remediação. Nas amostras de solo superficial não foi encontrada contaminação. As plumas de contaminação verificadas foram para os compostos Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno, Xilenos e Naftaleno, presentes no solo onde estavam em fase livre na água subterrânea e delimitadas horizontalmente apenas, exceto para a pluma de Benzeno. Na água subterrânea foi verificada a presença de plumas de contaminantes dissolvidos de Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno, Xilenos, Naftaleno, Benzo(a)antraceno, Benzo(b)fluoranteno e TPH Total (n-alcanos C08-C40), todas delimitadas horizontalmente e parcialmente na vertical. As concentrações de BTEX do solo ultrapassaram as CMAs (Concentrações Máximas Aceitáveis) para inalação de vapores em ambiente aberto e fechado pelos trabalhadores do empreendimento, todavia as amostras de vapores não indicaram a existência de risco para esses cenários. As concentrações de BTEX e Naftaleno também geraram risco para o cenário hipotético de ingestão de água subterrânea. Já na água subterrânea, as concentrações de BTEX superaram as CMAs para inalação de vapores em ambiente aberto e fechado pelos trabalhadores do empreendimento, entretanto para as amostras de vapores os resultados não indicaram a existência de risco para esses cenários. Como parte do plano de intervenção, foi recomendada a confirmação do risco para a intrusão de vapores, através da instalação e monitoramentos de poços *sub-slabs* na região adjacente ao empreendimento.

Janeiro/2021 – Relatório de Investigação de Alta Resolução (HRSC) – Área da dutovia do Pátio Externo: foram identificadas zonas de maior fluxo, a distribuição de produto no meio e sua disponibilidade para os poços existentes em função do N.A. local.

A avaliação litológica da área a partir do uso das ferramentas HPT e EC indicaram a presença de zonas de maior fluxo com grandes espessuras, caracterizadas pelos baixos valores de pressão máxima do HPT, delimitadas em seu topo e base por zonas de menor permeabilidade, ressaltando a presença de lentes de menor permeabilidade em meio às zonas de fluxo.

As fontes primárias (produto puro em solo) identificado neste estudo não foram identificadas pontualmente. Houve detecções mais rasas em parte das sondagens OiHPT, porém não se observou uma correlação direta de fontes potenciais nestas regiões e a ligação com a camada de produto mais profunda. Conforme histórico, houveram vazamentos em pontos da dutovia do pátio externo, no entanto as sondagens realizadas nesta campanha não indicaram sinais rasos de produto no solo nessas regiões. Esse comportamento pode ser devido ao intervalo de tempo entre os vazamentos e a atual investigação, dada a migração do produto para maiores profundidades.

Foi detectada uma região de produto puro em uma zona de fluxo na zona não saturada com espessura de aproximadamente 2 metros. Foi observada uma fonte pontual diferente que não está associada aos pontos de vazamentos conhecidos nas tubovias do pátio externo. Outra região, em maior profundidade, abrangendo a interface entre as zonas saturada e não saturada situa-se também em uma zona de fluxo entre 16 e 19 metros de profundidade aproximadamente.

Comparando-se os dados obtidos pelas sondagens OiHPT e a disponibilidade de fase livre em poços de monitoramento próximos foi observado comportamento heterogêneo do produto em solo e a fase livre disponível nos poços. Os poços avaliados encontram-se na mesma camada de fluxo, no entanto apresentam comportamento distintos dada a variação do N.A. local.

Com base nos trabalhos de alta resolução e o histórico ambiental da área da dutovia do pátio externo, foi recomendado:

- A atualização da investigação ambiental detalhada, devido a extensão da área, a não identificação pontual de anomalias decorrentes de fonte primária e a área abrangida pelo atual estudo de alta resolução. Para a identificação e caracterização de anomalias resultantes de

fontes primárias, foi recomendada a utilização de metodologias de alta resolução com alta densidade de informações, dada a incerteza conceitual ainda presente.

- O acompanhamento da evolução da presença de fase livre em todos os poços da região e, constatadas novas ocorrências de fase livre, aumentar o escopo investigativo para demais regiões.
- A amostragem de solo orientada pelas anomalias identificadas através das ferramentas de alta resolução para avaliação quali-quantitativa das SQIs para a região estudada.
- A revisão da abordagem de remediação e ampliação da abrangência dos sistemas atuando na área, em função dos resultados obtidos da extensão da área com produto puro.
- A realização de ensaio piloto de recuperação hidráulica na região da dutovia externa. Após o ensaio, realizar melhorias nos sistemas de remediação por recuperação hidráulica na região de interesse.

Maio/2021 – Relatório de Ensaio Piloto Ensaio Piloto pela Técnica Pump & Treat e Projeto Executivo de Remediação: para o ensaio piloto de bombeamento foram instalados dois Poços de Monitoramento – PM (2”) e 4 Poços de Bombeamento – PB (4”) distribuídos em duas regiões. O perfil construtivo dos poços de extração utilizados nos testes levou em consideração as regiões com maior disponibilidade de produto oleoso assim como as regiões com fluxo favorável, favorecendo melhor entendimento da recuperação dentro das regiões de interesse. Os poços foram instalados com profundidade entre 15 e 20 metros. Considerando os resultados obtidos, foi validada a aplicação da técnica *Pump & Treat*, a ser incorporado aos sistemas de extração multifásica em operação, com foco na porção central da pluma de produto oleoso identificada através da Investigação de Alta Resolução. Foi então proposto sistema *Pump & Treat* totalizando 20 bombas, operando em regime de rodízio em 28 poços de bombeamento, a serem configuradas para operarem com rebaixamento de 1,0 m ao nível no NA inicial, vazão de extração de 443,5 L/h, raio de influência do bombeamento de aproximadamente 8,2 m e taxa de remoção de fase livre de 5,6 L/mês por bomba.

Outubro/2021 – Relatório de Investigação Complementar e atualização do Plano de Intervenção: durante os serviços em campo foi detectada a existência de produto em fase livre em 37 poços, abrangendo principalmente a área do Pátio Externo. De acordo com os resultados analíticos das amostras de solo coletadas, foram detectadas concentrações acima

dos valores orientadores para os compostos Naftaleno e Xilenos na sondagem ST-18 na profundidade de 5,00 metros. Para Etilbenzeno, além da concentração na ST-18 também foi encontrada concentração acima do valor orientador na sondagem ST-13 a 2,00 m. Foram verificadas plumas de contaminação em fase dissolvida para Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno, Xilenos, Naftaleno, Benzo(a)Antraceno e TPH Total, únicos compostos cujas concentrações na água subterrânea superaram os valores de referência considerados. No plano horizontal, todas as plumas apresentaram-se completamente delimitadas, com exceção das plumas de Benzeno e TPH, que se apresentaram inferidas ao norte. Com base nos resultados, foi recomendado que a remediação em operação deverá se manter até a completa eliminação da fase livre no local. Após a eliminação da fase livre, o processo de remediação deverá ser direcionado para a redução dos teores em fase retida e fase dissolvida, com as devidas alterações de técnicas e ensaios pilotos/de bancada necessários, além da atualização do plano de intervenção. Enquanto houver fase livre no local, deverão ser realizados monitoramentos periódicos de poços *sub-slabs*, dentro e fora do empreendimento.

5.2. Caracterização do meio físico

5.2.1. Geomorfologia, pedologia e aspectos climáticos

A região está inserida em contexto geomorfológico formado por morros baixa, com 600 a 800 m de altitude e declividades entre 20 e 30%. Neste domínio, conforme IAC (<http://www.iac.sp.gov.br/solosp/>), predominam os argissolos, que se referem a solos minerais com nítida diferenciação entre as camadas ou horizontes, reconhecido em campo especialmente pelo aumento, por vezes abrupto, nos teores de argila em profundidade. Podem ser arenosos, de textura média, ou argilosos no horizonte mais superficial. Apresentam cor mais forte (amarelada, brunada ou avermelhada), maior coesão e maior plasticidade e pegajosidade em profundidade, devido ao maior teor de argila.

Em relação ao clima, na região predomina clima quente e temperado, com pluviosidade significativa ao longo do ano, onde mesmo no mês mais seco do ano ainda se tem altos índices pluviométricos. De acordo com a Köppen e Geiger o clima é classificado como Cfa (Temperado subtropical), com temperatura média de 19,4 °C.

A média anual de chuvas é de 1269 mm, com predomínio das chuvas entre os meses de outubro a março. Do mês mais seco para o mais chuvoso, tem-se uma diferença de

precipitação de 196mm. Julho é o mês mais seco com 25 mm, e o mais chuvoso é Janeiro, com 221 mm. As temperaturas médias variam pouco, em torno de 6,7 °C de diferença, com temperatura média de 22,3 °C em Janeiro e 15,6 °C em Julho. Em janeiro cai a maioria da precipitação, com uma média de 221 mm.

5.2.2. Geologia regional

Do ponto de vista geológico, a área de estudo encontra-se regionalmente inserida em unidade sedimentar que compreende os seguintes litotipos: Arenito, Arenito Conglomerático, Argilito, Conglomerado suportado por matriz, Siltito. Ocorrem conglomerados basais com granodecrescência, gradando progressivamente para arenitos mais finos. Para o topo, predominam siltitos com camadas de arenitos conglomeráticos que gradam para siltitos e argilitos.

A norte ocorrem sedimentos aluvionares, denominado de Depósitos Aluvionares, predominando litotipos desde areia arcoseana, argila, cascalho, conglomerado polimítico a silte. São sedimentos aluvionares inconsolidados constituídos por seixos, areias finas a grossas, com níveis de cascalhos, lentes de material siltoargiloso e restos de matéria orgânica, relacionados a planícies de inundação, margens, barras de canal e canais fluviais atuais.

A sul ocorrem unidades do Embasamento Cristalino, referente a biotita granito, granito e monzogranito, e Paragnaisses, referente a biotita gnaiss, biotita xisto, gnaiss quartzoso, milonito e rocha calcissilicática.

5.2.3. Geologia e hidrogeologia local

De acordo com investigações realizadas na própria área, o solo pode ser caracterizado predominantemente como siltoarenoso, de coloração marrom, com porções siltosas e argilosas em maior profundidade, o que foi confirmado por ensaios granulométricos onde se registrou de 47,4 a 81,1% de areia e 15,4 a 43,8% de silte.

A hidrogeologia local avaliada pela investigação executada na área mostra sentido preferencial de fluxo da água subterrânea de sudeste para noroeste. O nível d'água medido nos poços de monitoramento daquela área ocorre entre 10,43 m e 18,98 m, com média de 12,67 m.

5.3. Identificação, descrição e classificação dos desafios da área

A partir das informações levantadas nos relatórios ambientais, referentes às características geológicas e hidrogeológicas, aspectos da contaminação existente e conhecimento da área, foram identificados os desafios técnicos e não técnicos mais críticos, que conferem complexidade ao gerenciamento do processo de remediação. Os desafios técnicos e não técnicos são apresentados na tabela 07.

Tabela 07. Desafios técnicos e não técnicos identificados na área.

Desafios técnicos	
Condições geológicas	a) Heterogeneidade geológica e fluxos preferenciais
Condições relacionadas aos contaminantes	b) Presença de fase livre (LNAPL)
Escala	c) Plumas extensas e combinadas
Desafios não técnicos	
Gerenciando mudanças que podem ocorrer em longos períodos de tempo	d) Rotatividade de pessoal e perda de conhecimento institucional
Sobreposição de responsabilidades regulatórias	e) Mudança de leis, normas e regulamentos

Os desafios técnicos e não técnicos selecionados, apresentados na tabela 07, foram então individualmente avaliados e classificados, conforme procedimento apresentado no item “4.3. Proposta de classificação dos desafios da área”. Os resultados consolidados são apresentados na tabela 08.

Tabela 08. Classificação dos desafios técnicos e não técnicos da área.

Desafios da Área	G	U	T	G x U x T
a) Heterogeneidade geológica e fluxos preferenciais	4	4	2	32
b) Presença de fase livre (LNAPL) associada a baixa transmissividade	3	4	2	24
c) Plumas extensas e combinadas	3	3	2	18
d) Rotatividade de pessoal e perda de conhecimento institucional	2	1	2	4
e) Mudança de leis, normas e regulamentos	2	1	2	4

Nota: **(G) Gravidade:** (5) Extremamente grave, (4) Muito grave, (3) Grave, (2) Pouco grave, (1) Sem gravidade. **(U) Urgência:** (5) Precisa de ação imediata, (4) Urgente, (3) O mais rápido possível (2) Pouco urgente, (1) Pode esperar. **(T) Tendência:** (5) Irá piorar rapidamente, (4) Irá piorar a curto prazo, (3) Irá piorar a médio prazo, (2) Irá piorar a longo prazo, (1) Não irá mudar.

A seguir são apresentadas as descrições, justificativas e classificações sugeridas para cada desafio técnico e não técnico avaliado. Ressalta-se que as notas atribuídas refletem a avaliação do autor, tendo como parâmetros de comparação outros empreendimentos e contaminações similares, referentes à mesma empresa e tipologia de atividades (bases de armazenamento e distribuição de combustíveis).

Cabe esclarecer também que, de acordo com os estudos avaliados, não foram identificados desafios associados à presença de rocha fraturada, ambientes cársticos, riscos e/ou conflitos relacionados à vizinhança. Quando presentes, estes desafios podem dificultar ainda mais o alcance das metas estabelecidas para o gerenciamento da área contaminada.

a) Desafio 01 (técnico) – heterogeneidade geológica e fluxos preferenciais:

Conforme o “Relatório de Investigação de Alta Resolução (Janeiro/2021)” realizado na área da dutovia do Pátio Externo, a avaliação litológica com as ferramentas HPT e EC indicaram a presença de zonas de maior fluxo com grandes espessuras, caracterizadas pelos baixos valores de pressão máxima do HPT, delimitadas em seu topo e base por zonas de menor permeabilidade, além de indicar a presença de lentes de menor permeabilidade em meio às zonas de fluxo. A figura 05 apresenta uma avaliação litológica através de vista em seção de 6 sondagens realizadas na direção do fluxo da água subterrânea.

Comparando-se os dados obtidos pelas sondagens OiHPT e a disponibilidade de fase livre em poços de monitoramento próximos, observou-se comportamento heterogêneo do produto em solo e a fase livre disponível nos poços. Os poços avaliados encontram-se na mesma camada de fluxo, no entanto apresentam comportamentos distintos dada a variação do N.A. local. A figura 06 apresenta a avaliação da fluorescência (OIP) e permeabilidade (HPT), através de vista em seção de 5 sondagens perpendiculares ao fluxo da água subterrânea.

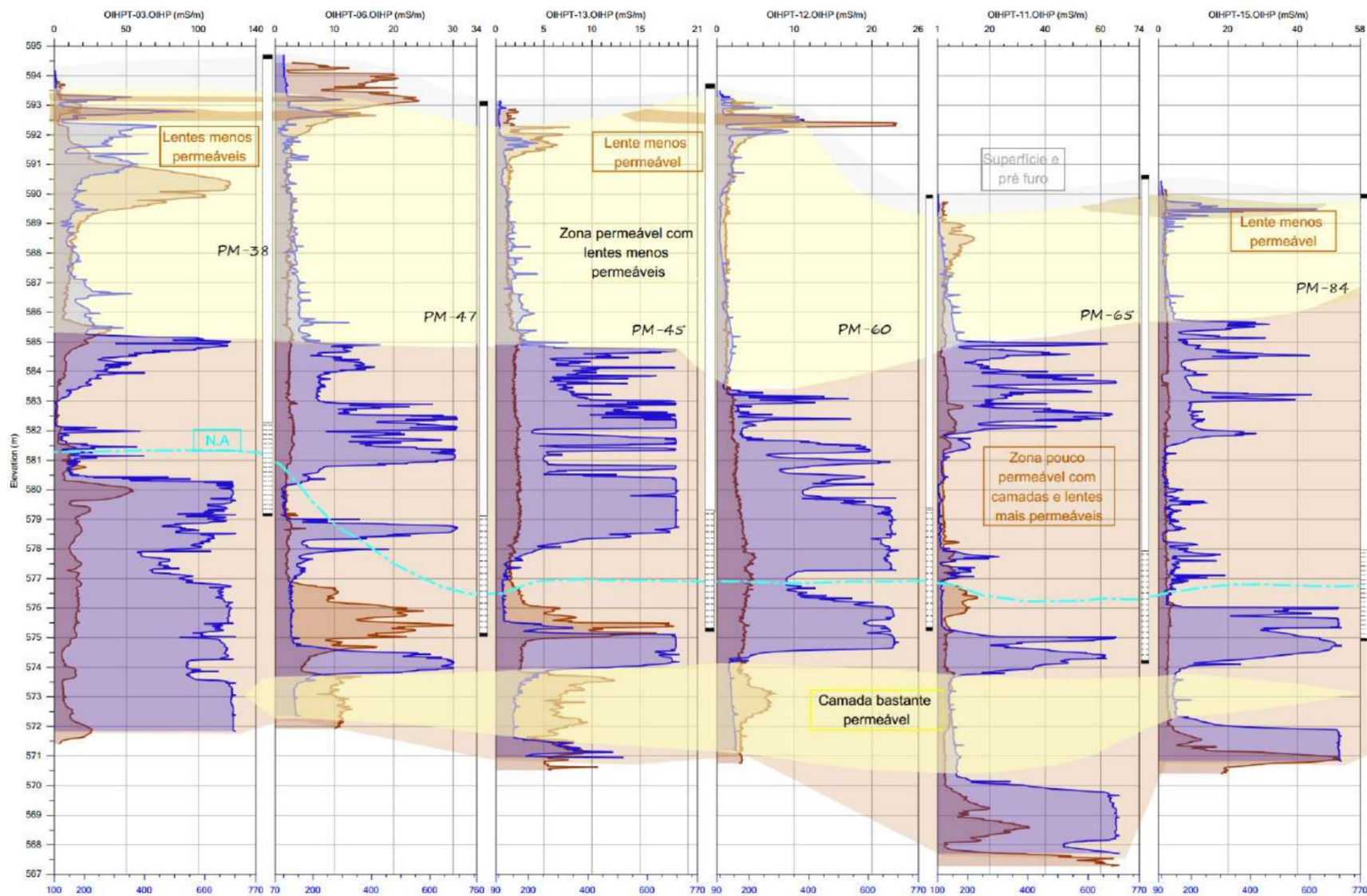


Figura 05. Avaliação litológica da seção 1, sentido fluxo da água subterrânea (esquerda-direita), EC (marrom) e HPT (azul).

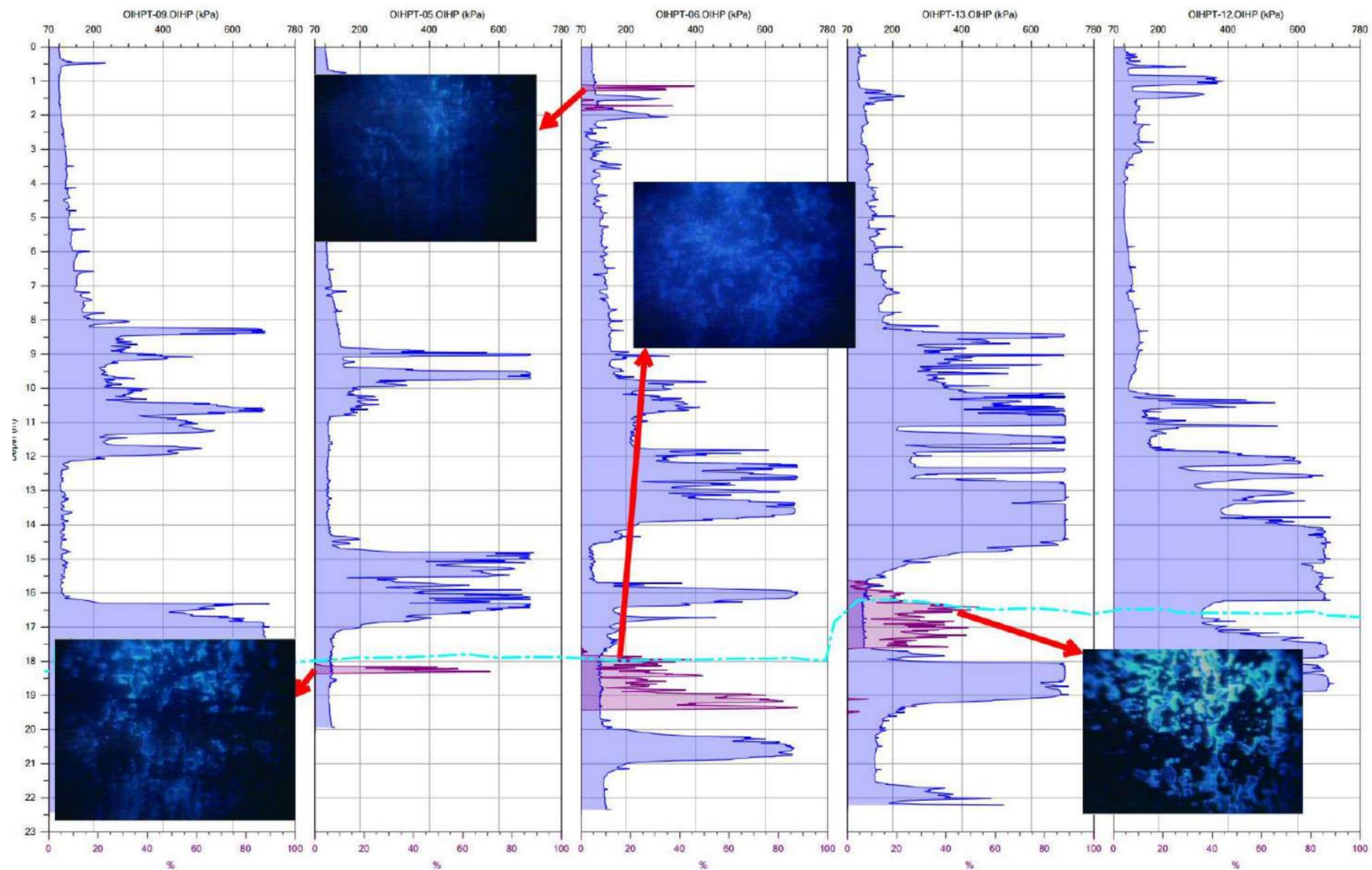


Figura 06. Sondagens da seção 2 (perpendicular ao fluxo da água subterrânea), fluorescência OIP (roxo) e HPT (azul).

Com base nessas informações técnicas, histórico ambiental da área e expectativas, foram atribuídos os seguintes pesos para os parâmetros avaliados:

(G) Gravidade: (4) muito grave, em função da relação direta entre heterogeneidade geológica e fluxos preferenciais com a efetividade da extração de fase livre por meio dos sistemas de extração multifásica e bombeamento em operação no local. Entende-se também que há elevado potencial de avanço das plumas de contaminação para regiões desprovidas de atuação do sistema de remediação.

(U) Urgência: (4) urgente, principalmente ações direcionadas a ampliação da caracterização das diferentes camadas estratigráficas, de forma a confirmar ou redefinir os perfis ideais para os poços de extração e otimizar a extração da massa de contaminantes, especialmente a fase livre, que tende a avançar para os limites do empreendimento. As informações do mapeamento em resolução adequada das zonas de maior permeabilidade e fluxo podem converter o desafio em oportunidade de otimização da remediação.

(T) Tendência: (2) irá piorar a longo prazo, embora seja esperado que as condições hidrogeológicas ou litológicas, propriamente ditas, não se alterem ao longo do tempo, a expansão em médio a longo prazo das plumas para áreas ainda não investigadas em resolução adequada, ou pouco investigadas, representa uma piora do cenário para o gerenciamento da contaminação, conferindo riscos adicionais à efetividade da remediação e reabilitação da área.

b) Desafio 02 (técnico) – presença de fase livre (LNAPL) associada a baixa transmissividade:

Com base nas informações disponíveis na ocasião, o trabalho “Aplicação do software SCBR na atualização do modelo conceitual (Maio/2019)” estimou um volume total de LNAPL na ordem de 600 m³, sendo potencialmente recuperáveis por meio de métodos hidráulicos de extração em torno de 20% (120 m³) desse volume. A simulação foi realizada através de análises geoestatísticas, através de modelo proposto por Jeong e Charbeneau (2014) e limite de transmissividade do LNAPL indicado pelo ITRC (2009). De acordo com os últimos dados operacionais disponíveis dos sistemas de remediação, foram extraídos em torno de 35 m³ de produto contaminante.

De acordo com o mesmo trabalho, a avaliação da distribuição da transmissividade estimada do LNAPL na área indicou uma tendência à baixa recuperação hidráulica, pois apenas uma região apresentou transmissividade acima do recomendado pela literatura. Foi estimado que um sistema de hidráulico de extração, na região de maior transmissividade, operaria com eficiência na remoção de LNAPL por cerca de 3 anos e, após esse período, a espessura de fase livre se reduziria até atingir o limite de transmissividade indicado para operação de sistemas hidráulicos por extração (faixa de 9×10^{-3} a 7×10^{-2} m²/dia) (ITRC, 2009).

Considerando o nível de detalhamento das informações disponíveis à época, incertezas e inferências realizadas na modelagem, foi recomendada a realização de testes de transmissividade diretamente nos poços de monitoramento com presença de fase livre, utilizando como referência a norma ASTM E2856-13 (*Standard Guide for Estimation of LNAPL Transmissivity*) (ASTM, 2013), combinando com a execução de testes de bombeamento para definição de parâmetros hidráulicos de dimensionamento dos sistemas hidráulicos de extração, conforme metodologia da norma ASTM D4050-20 (*Standard Test Method for (Field Procedure) for Withdrawal and Injection Well Testing for Determining Hydraulic Properties of Aquifer Systems*) (ASTM, 2020).

Os testes de bombeamento foram executados, conforme apresentado no “Relatório de Ensaio Piloto Ensaio Piloto pela Técnica *Pump & Treat* e Projeto Executivo de Remediação (Maio/2021)”, porém não foram encontrados registros de ensaios de transmissividade nos poços de extração em nenhum dos estudos ambientais disponíveis.

Com base nessas informações técnicas, histórico ambiental da área e expectativas, foram atribuídos os seguintes pesos para os parâmetros avaliados:

(G) Gravidade: (3) grave, em função das incertezas ainda existentes sobre a transmissividade real nas diferentes porções da pluma de fase livre e a possibilidade de alcance dos limites de recuperação hidráulica, com potencial impacto adverso na efetividade dos sistemas de remediação em operação no local e reabilitação da área.

(U) Urgência: (4) urgente, pois é fundamental que os sistemas de remediação atuem no limite máximo de sua eficiência e contenham o avanço das plumas de fase livre, o que demanda a avaliação da transmissividade real nas suas diferentes porções, confirmando ou redefinindo os locais e perfis ideais para os poços de extração.

(T) Tendência: (2) irá piorar a longo prazo, pois, embora seja esperado que as condições hidrogeológicas ou litológicas que afetam a transmissividade não se alterem ao longo do tempo, há a possibilidade de expansão em médio a longo prazo das plumas no caso de eficiência de extração abaixo do tecnicamente possível e desejável para a área, representando uma piora do cenário para o gerenciamento da contaminação, conferindo riscos adicionais aos receptores e reabilitação da área.

c) Desafio 03 (técnico) – plumas extensas e combinadas:

Embora o histórico de serviços ambientais relate a ocorrência de diferentes eventos de vazamento de derivados de petróleo (diesel e gasolina) e etanol, há ausência de informações detalhadas em relação à origem, tipo de produto, localização, área de abrangência e volume derramado / recuperado em cada evento. Desta forma, o LNAPL presente na área de estudo é resultante da mistura dos produtos vazados ao longo dos anos, sendo que a ausência da caracterização deste LNAPL resulta em incertezas no entendimento do transporte e distribuição dos contaminantes nas zonas não saturada e saturada, podendo comprometer a seleção e efetividade de técnicas de remediação por extração hidráulica.

Devido à grande extensão do empreendimento e fontes potenciais difusas, há dificuldade na identificação de eventuais novos aportes de contaminantes, aumentando as incertezas do modelo conceitual. A análise geoestatística dos dados pelo método de interpolação de *Kriging*, realizada no estudo “Aplicação do software SCBR na atualização do modelo conceitual (Maio/2019)”, indicou que o LNAPL está distribuído por uma área na ordem de 20.000 m², concentrado principalmente na área do pátio externo do empreendimento. Destaca-se que o volume específico recuperável de LNAPL no solo compreende apenas a parcela do LNAPL que está acima da saturação residual, não tendo relação direta com a eficiência dos sistemas de recuperação hidráulica.

Nesse cenário, visando reduzir as incertezas e permitir uma melhor compreensão da relação entre as fontes primárias e secundárias de LNAPL e as plumas de fase dissolvida atualmente observadas na área, o estudo “Aplicação do software SCBR na atualização do modelo conceitual (Maio/2019)” recomendou caracterização físico-química do LNAPL em fase livre detectado nos poços de monitoramento, incluindo os seguintes parâmetros: densidade, viscosidade, tensão interfacial LNAPL-água, tensão superficial do produto,

pressão de vapor e frações volumétricas dos compostos químicos de interesse, incluindo BTEX, PAHs e Etanol.

Com base nessas informações técnicas, histórico ambiental da área e expectativas, foram atribuídos os seguintes pesos para os parâmetros avaliados:

(G) Gravidade: (3) grave, em função da extensão significativa das plumas de LNAPL e fase dissolvida e sua proximidade com receptores on-site e residenciais, bem como as incertezas no entendimento da composição, transporte e distribuição dos diferentes contaminantes.

(U) Urgência: (3) o mais rápido possível, de forma a garantir a manutenção das plumas de LNAPL dentro dos limites do empreendimento.

(T) Tendência: (2) irá piorar a longo prazo, pois é esperada que a curto a médio prazo a atuação dos sistemas de remediação por extração multifásica e bombeamento exerçam efetivamente as funções de barreira hidráulica e redução da massa de LNAPL a partir do centro da pluma. Para tanto, é necessária melhor compreensão e atendimento das recomendações apresentadas anteriormente nos desafios técnicos 01 (heterogeneidade geológica e fluxos preferenciais) e 02 (presença de fase livre (LNAPL) associada a baixa transmissividade).

d) Desafio 04 (não técnico) – rotatividade de pessoal e perda de conhecimento institucional:

O processo de gerenciamento da área contaminada objeto desse estudo envolve equipes multidisciplinares de profissionais da própria empresa que opera o empreendimento, das consultorias técnicas contratadas para execução dos serviços ambientais (diagnóstico, remediação e, eventualmente, consultorias especializadas), além de fiscais e especialistas designados pelo órgão ambiental para o acompanhamento do processo.

A rotatividade de pessoal e perda de conhecimento institucional, aqui abordados na condição de desafio não técnico, referem-se às consequências das mudanças das consultorias e responsáveis técnicos contratados, seja por questões de encerramento do prazo contratual definido, saldo contratual ou performance insatisfatória, quanto à troca de pessoal dentro de

cada consultoria contratada, por motivos de reestruturação, redistribuição de áreas ou de atribuições.

Ainda que o processo de gerenciamento da área contaminada seja pautado na obtenção de dados, interpretação e registros na forma de relatórios técnicos, protocolados junto ao órgão ambiental, acessíveis e disponíveis para consulta a qualquer tempo pelos envolvidos no gerenciamento da área, a mudança de consultorias e/ou de pessoas pode gerar perdas de parte dos conhecimentos adquiridos no processo, assim como impactar negativamente na continuidade operacional dos trabalhos, nas estratégias de curto prazo e no fluxo esperado de informações para atendimento dos prazos estabelecidos internamente ou junto ao órgão ambiental.

Com base nessas informações, histórico ambiental da área e expectativas, foram atribuídos os seguintes pesos para os parâmetros avaliados:

(G) Gravidade: (2) pouco grave, pois no cenário e contexto atual do gerenciamento da área, considerando ainda as ferramentas de gestão e compartilhamento de informações disponíveis, não são esperados impactos deste desafio em médio e longo prazo na efetividade da remediação e no alcance das metas e reabilitação da área.

(U) Urgência: (1) pode esperar, pois não são recomendadas ações adicionais de contorno no momento, apenas manter a seleção criteriosa e avaliação periódica de desempenho das consultorias contratadas, a divulgação clara e o alinhamento das expectativas técnicas e de segurança operacional entre todos os envolvidos, evitando-se mudanças repentinas.

(T) Tendência: (2) irá piorar a longo prazo, pois, conforme maior o período de duração do processo de gerenciamento da contaminação, maiores as probabilidades de mudança das consultorias envolvidas ou do seu pessoal, pelos motivos já expostos.

e) Desafio 05 (não técnico) – mudança de leis, normas e regulamentos:

Conforme abordado no início do trabalho, muitos dos avanços alcançados nas últimas duas décadas no gerenciamento e reabilitação de áreas contaminadas no Brasil foram motivados, sobretudo, pelo estabelecimento de legislações e normas técnicas dedicados ao tema, disciplinando os empreendedores a buscarem melhores práticas de gestão ambiental, a

redução dos impactos ambientais das suas atividades, bem como a adoção de medidas corretivas, quando necessário, sob o risco de paralisação das suas atividades e a responsabilização dos infratores nas esferas penal, civil e administrativa.

Apesar de muito bem desenvolvida e aperfeiçoada nos últimos anos, a legislação relativa ao gerenciamento de áreas contaminadas no Estado de São Paulo, assim como as normas técnicas e demais regulamentos aplicáveis ao tema em todo o país, estão em constante processo de evolução. Com alguma frequência são publicados valores orientadores mais restritivos, novas orientações técnicas voltadas a subtemas específicos e procedimentos de gestão mais detalhados, acompanhando os avanços tecnológicos, o surgimento de novos desafios e de contaminantes emergentes, bem como resultantes do maior conhecimento dos efeitos adversos à saúde humana e aos ecossistemas dos contaminantes comumente estudados.

Assim, trata-se de um desafio que deve ser considerado e avaliado em todos os processos de gerenciamento de áreas contaminadas, sobretudo naquelas áreas cujo alcance das metas e encerramento do processo de reabilitação são previstos para médio a longo prazo, cenário no qual são mais prováveis a efetivação de mudanças de leis, normas e regulamentos.

Com base nessas informações, histórico ambiental da área e expectativas, foram atribuídos os seguintes pesos para os parâmetros avaliados:

(G) Gravidade: (2) pouco grave, pois considerando o arcabouço técnico legal bem consolidado e já restritivo existente no Estado de São Paulo, associado às normas técnicas vigentes, não são esperados impactos significativos deste desafio em médio e longo prazo na efetividade da remediação, no alcance das metas e reabilitação da área.

(U) Urgência: (1) pode esperar, pois não são recomendadas ações adicionais de contorno no momento, apenas manter o acompanhamento das propostas de alteração da legislação, normas e regulamentos em discussão junto aos diferentes fóruns, participação de câmaras técnicas e eventos correlatos ao gerenciamento de áreas contaminadas.

(T) Tendência: (2) irá piorar a longo prazo, pois não são esperadas alterações relevantes de legislação ou normas técnicas em curto e médio prazo que possam afetar de forma significativa a evolução do gerenciamento da área.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir do levantamento e análise dos resultados dos estudos ambientais desenvolvidos, a área pode ser considerada complexa, pois apresenta os seguintes desafios técnicos: heterogeneidade geológica e fluxos preferenciais, presença de fase livre (LNAPL) associada a baixa transmissividade, plumas extensas e combinadas; e não técnicos: rotatividade de pessoal e perda de conhecimento institucional, mudança de leis, normas e regulamentos, conforme descrito e justificado no item 5.3 deste trabalho.

Visando suprir lacuna identificada na metodologia de gerenciamento de áreas complexas sugerida pelo ITRC (2017), foi proposta a classificação da criticidade dos desafios selecionados. Após busca e avaliação de metodologias de classificação e priorização, foi selecionado o uso da matriz GUT, em função da maior aderência das suas três dimensões – Gravidade (G), Urgência (U) e Tendência (T) aos objetivos do gerenciamento da área contaminada e à proposta do trabalho.

Com base na avaliação das informações obtidas nos estudos ambientais e histórico da área, foram atribuídas notas para os três aspectos da matriz GUT, obtendo-se os seguintes resultados, nessa ordem de criticidade/prioridade (maiores notas representam os desafios mais críticos e prioritários): a) heterogeneidade geológica e fluxos preferenciais (nota 32), b) presença de fase livre (LNAPL) associada a baixa transmissividade (nota 24), c) plumas extensas e combinadas (nota 18); e não técnicos: d) rotatividade de pessoal e perda de conhecimento institucional (nota 4), e) mudança de leis, normas e regulamentos (nota 4).

Ainda que os trabalhos executados até o momento na área objeto do estudo atendam plenamente aos procedimentos vigentes no Estado de São Paulo, às exigências formuladas pela CETESB e apresentem dados fundamentais para o adequado gerenciamento da área, os prazos e investimentos necessários para a completa remoção da contaminação em forma de fase livre, bem como para o alcance das metas de remediação estabelecidos para a reabilitação da área são, atualmente, incertos.

Nesse sentido, a identificação, avaliação e classificação dos desafios técnicos e não técnicos, o mapeamento das incertezas e a proposição de estratégia de gerenciamento, mostraram-se subsídios úteis para direcionar e concentrar os esforços, recursos humanos e financeiros nas questões com maior potencial de afetar a efetividade do processo, sendo recomendado que gestores deste e de outros processos de reabilitação de áreas complexas avancem com o uso destas estratégias.

Em relação ao uso da matriz GUT, em alguns cenários foi observada uma forte correlação entre dois ou mais aspectos (gravidade x urgência x tendência). Trata-se de uma característica intrínseca ao método, não sendo observados quaisquer prejuízos aos objetivos do presente trabalho. Como exemplo, em determinadas condições pode-se esperar um desafio extremamente grave (gravidade = 5) que automaticamente demande uma ação imediata (urgência = 5) sob o risco iminente de piorar rapidamente (tendência = 5); ou, ainda, um desafio sem gravidade (gravidade = 1), cuja ação corretiva ou de contorno, por consequência, pode esperar (urgência = 1), não havendo tendência de mudar ao longo do tempo (tendência = 1). Há outras situações nas quais não é esperada forte correlação entre os três aspectos, por exemplo, um desafio extremamente grave (gravidade = 5) cujas ações de contorno passíveis de adoção já foram empregadas e, portanto, o peso dos aspectos urgência e tendência tenderão a ser menores, uma vez que seus efeitos já estão sendo atenuados.

Em função dos resultados obtidos, recomenda-se:

- A aplicação de estratégias de gerenciamento adaptativo da remediação na área do estudo, por meio do estabelecimento de objetivos intermediários, definição de métricas mensuráveis, monitoramento e avaliação periódica da performance da remediação e reavaliação iterativa do processo, revisando e otimizando, sempre que necessário, o modelo conceitual e as estratégias de gestão;
- O maior detalhamento e entendimento dos seguintes parâmetros: a transmissividade real nos poços de extração; os perfis hidroestratigráficos, em resolução adequada, nas demais porções do empreendimento, incluindo a relação entre os perfis dos poços de extração com as zonas de fluxo e de armazenamento de LNAPL; a caracterização detalhada das plumas dos diferentes produtos vazados apontados pelo histórico para entendimento das interações e implicações dessa mistura na dinâmica da contaminação; a caracterização das plumas, em resolução adequada, visando permitir a quantificação das massas das substâncias químicas de interesse presentes;
- A avaliação de outras potenciais complexidades observadas, relacionadas aos seguintes desafios técnicos: empreendimento em plena operação, fluxo constante de veículos pesados, com restrições espaciais à instalação de sistemas de remediação e intervenções (áreas classificadas, atmosferas potencialmente explosivas); profundidades do nível d'água relativamente elevadas, atingindo em determinados períodos e localidades cerca de 20 metros; a magnitude de oscilação do nível d'água subterrânea ao longo do ano e sua relação com a disponibilidade de fase livre nos poços de extração; número elevado de poços de

monitoramento e bombeamento, gerando elevada vazão de efluentes extraídos; infraestruturas limitadas para descarte e tratamento de efluentes e transmissão de energia; presença de bairro predominantemente residencial distante cerca de 500 metros de uma das laterais do empreendimento; e não técnicos: potenciais litígios e gestão de longo prazo dos controles institucionais, entre outros;

- O aprimoramento da metodologia de classificação e priorização baseada na matriz GUT proposta neste trabalho, incorporando elementos quantitativos específicos de cada desafio no processo de atribuição das notas/pesos de criticidade, de forma a reduzir o grau de subjetividade intrínseco a sua definição.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E2856-13: **Standard Guide for Estimation of LNAPL Transmissivity**. 2013.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4050-20: **Standard Test Method for (Field Procedure) for Withdrawal and Injection Well Testing for Determining Hydraulic Properties of Aquifer Systems**. 2020.

BAGE, G.F., SAMSON, R., SINCLAIR-DESGACNÉ, B. **A technicoeconomic approach for the selection of a site remediation strategy – Part A: theory**. Environmental Management. 30 (2002) 807–815, <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2671-1>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 420**, de 28 de dezembro de 2009. Brasília, 2009.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. 3.ed. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/>. Acesso em: 04/09/2021.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decisão de Diretoria – DD Nº 038/2017/C**. São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf>. Acesso em: 28/08/2021.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-areas-contaminadas/>. Acesso em: 28/08/2021.

DA SILVA, B.M.; MARANHO, L.T. **Petroleum-contaminated sites: Decision framework for selecting remediation Technologies**. Journal of Hazardous Materials 378 (2019).

EEA. European Environment Agency, **Progress in Management of Contaminated Sites – European Environment Agency**, (2015).

GLOEDEN, E. **Gerenciamento de áreas contaminadas na bacia hidrográfica do reservatório Guarapiranga**. São Paulo, 1999. 191f. Tese (Doutorado em Recursos minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1999.

GÜNTHER, W. M. R. **Áreas contaminadas no contexto da gestão urbana**. São Paulo em Perspectiva, v. 20, n. 2, p. 105-117, 2006.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: IPT, 2014. Disponível em: https://www.ipt.br/institucional/campanhas/48-guia_para_gestao_de_areas_contaminadas.htm Acesso em: 04/09/2021.

ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2009. **Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals**. Technical/Regulatory Guidance. Dezembro, 2009.

ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2011. **Project Risk Management for Site Remediation**. Remediation Risk Management. RRM-1. March.

ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2017. **Remediation Management of Complex Sites**. RMCS-1. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Remediation Management of Complex Sites Team. <https://rmcs-1.itrcweb.org>. Acesso em: 14/08/2021.

JEONG, J.; CHARBENEAU, R.J. **An Analytical Model for Predicting LNAPL Distribution and Recovery from Multi-layered Soils**. Journal of Contaminant Hydrology. 156C. p.52-61. October, 2014.

KUPPUSAMY, S., PALANISAMI, T., MEGHARAJ, M., VENKATESWARLU, K., NAIDU, R., 2016a. **Ex-situ remediation technologies for environmental pollutants: A critical perspective**. Rev. Environ. Contam. Toxicol. 236, 117–192.

KUPPUSAMY, S., PALANISAMI, T., MEGHARAJ, M., VENKATESWARLU, K., NAIDU, R., 2016b. **In-situ remediation approaches for the management of contaminated sites: A comprehensive overview**. Rev. Environ. Contam. Toxicol. 236, 1–116.

MACDONALD, J.A., KAVANAUGH, M.C. 1994. **Restoring Contaminated Groundwater: An Achievable Goal?** Environmental Science and Technology 28(8): 362A–68A.

MARKER, A. **Manual: Revitalização de áreas degradadas e contaminadas (brownfields) na América Latina**. São Paulo, 2013, 1ed. ICLEI-Brasil.

MARSHALL JR., I.; CIERCO, A.A.; ROCHA, A.V.; MOTA, E.M.; AMORIM, S.R.L. **Gestão da qualidade**. 9.ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2008.

NJDEP. New Jersey Department of Environmental Protection. **Technical Impracticability Guidance for Ground Water**. December 3 (2013).

NRC (National Research Council). 1994. **Alternatives for Ground Water Cleanup**. Committee on Ground Water Cleanup Alternatives; Water Science and Technology Board; Board on Radioactive Waste Management; Commission on Geosciences, Environment, and Resources. Washington D.C.: National Academies Press.

NRC (National Research Council), 2013. **Alternatives for Managing the Nation's Complex Contaminated Groundwater Sites**. National Research Council, National Academies Press, Washington, D.C.

OSSAI, I. C., AHMED, A., HASSAN, A., & HAMID, F. S. (2020). **Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review**. Environmental Technology and Innovation, 17, 100526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>.

SPEIGHT, J.G. (2011). **Handbook of industrial hydrocarbon processes**. Amsterdam, Elsevier.

SWARTJES, F. A. **Dealing with Contaminated Sites. From Theory towards Practical Application**. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, The Netherlands (Editor), 2011.

TRUCOLO, A.C., TALASKA, T.T.R., DE ASSUMPÇÃO, V.T., CHAGAS FILHO, J.G.A. **Matriz GUT para priorização de problemas – estudo de caso em empresa do setor elétrico**. Revista Tecnológica / ISSN 2358-9221, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 124 - 134, dec. 2016. ISSN 2358-9221. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/revista/index.php/revista/article/view/183>>. Acesso em: 17/02/2022.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Technical Impracticability: Guidance for Evaluating Technical Impracticability of Ground-Water Restoration**. OSWER Directive 9234.2-25. September (1993).

USEPA. United States Environmental Protection Agency, **Superfund Remedy Report**. 14:15, 19 (2013).