

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

SANDRO SOUTO DE SOUTO

**Caracterização em Alta Resolução de Contaminantes em Solos  
como Pilar para a Sustentabilidade**

São Paulo

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.

#### Catalogação-na-publicação

Souto, Sandro Souto de

Caracterização em Alta Resolução de Contaminantes em Solos como Pilar para a Sustentabilidade / S. S. Souto -- São Paulo, 2022.

42 p.

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

1.Sustentabilidade 2.Áreas contaminadas 3.Crise hídrica 4.Meio ambiente  
5.Remediação de solo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
Departamento de Engenharia Química II.t.

SANDRO SOUTO DE SOUTO

**Caracterização em Alta Resolução de Contaminantes em Solos  
como Pilar para a Sustentabilidade**

**Versão Corrigida**

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

Orientador: Vicente Aquino Neto

São Paulo

2022

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus.

Agradeço à minha esposa Taisi e a minhas filhas Luisa e Laura pelo apoio e pela compreensão.

## **RESUMO**

Souto, Sandro Souto de. Caracterização em Alta Resolução de Contaminantes em Solos como Pilar para a Sustentabilidade. 2022. 42 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

O intuito central do presente trabalho é abordar o gerenciamento de áreas contaminadas tendo por foco a legislação aplicável no Estado de São Paulo, em especial, no que determina o Decreto Estadual 59.263/2013, que tem por foco a proteção do solo, através da correta identificação e remoção da massa do contaminante (fontes), na necessidade de termos uma Investigação Detalhada apta a subsidiar a Avaliação de Risco e o Plano de Intervenção, através do uso de Investigação em Alta Resolução e do atendimento dos procedimentos e das normas técnicas vigentes. Busca também abordar o significado do termo “Alta Resolução”, sua diferença em relação às abordagens tradicionais e o significado do termo “Abordagem TRIAD”, trazendo um caso concreto sob a ótica TRIAD e Alta Resolução, com utilização de ferramentas MIP/OIP/HPT. Discorrendo, ao final, sobre sustentabilidade, sobre a importância de o gerenciamento de áreas contaminadas promoverem o desenvolvimento sustentável, de forma que o gerenciamento seja conduzido com intervenções de curto e médio prazos (até 5 anos), com um olhar para as gerações futuras.

**Palavra-chaves:** Sustentabilidade. Áreas contaminadas. Crise hídrica. Meio ambiente. Remediação de solo.

## **ABSTRACT**

Souto, Sandro Souto de. Characterization of Contaminated Soils as Pillars of Sustainability. 2022. 42 f. Monography (MBA - Management of contaminated Sites, Sustainable Urban Development, and Revitalization of Brownfields) - Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2022.

The aim of this paper is to approach the management of contaminated sites firmly based on the applicable legislation in the state of São Paulo, Brazil, specially what is determined in the State Law 59.263/2013, which emphasizes the protection of soil, through the correct identification and removal of contaminant mass (source zones), given the intrinsic need of having a correct detailed investigation phase that is capable to support the process of a risk assessment and the intervention plan through the use of a High Resolution Site Characterization approach and the applicable technical norms. It also aims to clarify the meaning of the term “High Resolution”, its differences to traditional approaches and the meaning of the term “TRIAD approach” by using a real case study conducted under the premises of these two methodologies with the use of the MIP/OIP/HPT systems. The conclusion discusses the sustainability viewpoint of the processes related to the management of contaminated sites and its use as a tool promoting sustainable development, raising the case for management strategies that promote the use of intervention tools and techniques so that it is conducted in a short to medium term period (up to 5 years) guarantying a better society for future generations.

**Key-words:** Sustainability. Contaminated sites. Water crisis. Environment. Soil remediation

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Pontos fixos distribuídos em uma área sob investigação e a interceptação de áreas fonte de interesse.....	25
Figura 2 – Pontos variáveis de investigação com adensamento de áreas de interesse com anomalias representativas da presença de compostos de interesse em subsuperfície.....	25
Figura 3 – Plumas com áreas fontes indicadas pelas sondagens de alta resolução.....	26
Figura 4 – Plumas de fase retida de Benzeno acima dos valores orientadores.....	27
Figura 5 – Posicionamento de seção filtrante na mesma camada de fluxo, com base no sensor HPT, e com anomalia resultante da concentração de hidrocarbonetos.....	28
Figura 6 – Pluma dissolvida de benzeno acima dos valores orientadores.....	29
Figura 7 – Pluma de Benzeno em fase vapor acima dos valores orientadores.....	30
Figura 8 – Correlação entre a concentração de contaminação e o tempo para o atingimento das metas para eliminação de riscos.....	36

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>10</b>
<b>3. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL NO ESTADO DE SÃO PAULO. O FOCO NA PROTEÇÃO DO SOLO E NA IDENTIFICAÇÃO E REMOÇÃO DA MASSA DO CONTAMINANTE: LEI 13.577/2009, DECRETO ESTADUAL 59.263/2013, DECISÃO DE DIRETORIA CETESB 038/2017/C.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1. Foco na proteção do solo .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2. Foco na identificação e na remoção da massa dos contaminantes (fontes) .....</b>	<b>13</b>
<b>3.3. Da Investigação Detalhada apta a subsidiar a Avaliação de Risco e o Plano de Intervenção. Investigação do solo em Alta Resolução (CETESB - Decisão de Diretoria 038/2017/C). Dever de atendimento de procedimentos e normas técnicas (art. 39 do Decreto Estadual 59.263/2013) .....</b>	<b>14</b>
<b>4. APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIA DE GERENCIAMENTO COM A COMBINAÇÃO DAS ABORDAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO E TRIAD.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1. O significado do termo “Alta Resolução” e suas diferenças em relação às abordagens tradicionais .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2. O significado da abordagem TRIAD .....</b>	<b>22</b>
<b>4.3. Caso concreto sob a ótica TRIAD e Alta Resolução, com uso de ferramentas MIP/OIP/HPT .....</b>	<b>23</b>
<b>5. SUSTENTABILIDADE NO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS</b>	<b>32</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>38</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial iniciou na segunda metade do século XVIII, na Inglaterra, trazendo grandes avanços tecnológicos que permitiram o surgimento das indústrias e a consolidação do modelo capitalista, transformando o estilo de vida da humanidade, com impacto sobre economia mundial, sobre as relações de trabalho, sobre a exploração de recursos naturais, sobre a produção de bens de consumo e sobre o crescimento de grandes centros urbanos. A atividade industrial, no Brasil, é relativamente nova se comparada a outros países. Considerado um processo tardio, iniciado no século XX, associado à crise de 1929 e à falência de muitos produtores de café, período em que a produção cafeeira entrou em declínio, principalmente, nos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo, principais locais de cultivo desse produto, atingindo diretamente os cafeicultores. Eles passaram a buscar rapidamente outras alternativas, dando início ao processo de industrialização na Região Sudeste e ao crescimento acelerado dos centros urbanos, devido ao forte êxodo rural, e à necessidade de provê-los, com bens de consumo. A crise de 1929 foi conhecida como a Grande Depressão, período de forte recessão econômica que atingiu o capitalismo internacional, com forte impacto sobre a produção cafeeira brasileira, pois era o café o principal produto de exportação nacional.

Sobre o solo urbano, a sociedade desenvolver-se-á, morar, trabalhar, socializar, não podendo se dar sua ocupação de forma aleatória; não podendo seu uso e ocupação estarem dissociados dos instrumentos reguladores e jurídicos que norteiam seu uso correto e o desenvolvimento nacional. Com a promulgação da Constituição Federal de 1988, o Município passou a ter competência própria e específica para a ordenação do espaço urbano (inciso VIII, artigo 30). A Lei 6.766/1979 (alterada pelas Leis 9.785/1999, 10.932/2004, 11.445/2007, 12.424/2011, 12.608/2012, 13.465/2017, 13.786/2018, 13.913/2019 e 14.118/2021), dispõe sobre o parcelamento do solo urbano, estabelecendo princípios gerais de ordenação de uso e ocupação do solo para fins de parcelamento (BRASIL, 1979).

Por um longo período de forte desenvolvimento e produção industrial, não se teve consciência dos danos causados pelo depósito de resíduos provenientes do processo industrial no solo e que, hoje, sabe-se que resiste ao tempo e segue causando malefícios inclusive à saúde dos moradores destas regiões. Temos, assim, uma mudança de percepção, passando-se da ignorância sobre os efeitos maléficos causados pela disposição inadequada de resíduos no solo à certeza de possuir ele uma capacidade regenerativa limitada, cujo desconhecimento inicial resultou em inúmeras áreas contaminadas de características e proporções críticas. O Projeto de

Lei 386/2005, transformado na Lei Estadual de São Paulo 13.577/2009, por fim, visou a estabelecer diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas (SÃO PAULO, 2005).

Assim, juntamente com a mudança de entendimento, tivemos expressivos avanços tecnológicos atrelados ao gerenciamento de áreas contaminadas, refletidos na legislação mais recente (CONAMA, 2009; SÃO PAULO, 2009), que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas, diretrizes e procedimentos para proteção da qualidade do solo e para o gerenciamento de áreas contaminadas, dirigida ao dever de realizar a proteção do solo de forma preventiva ou, quando já contaminado, de maneira corretiva, o que denota claro objetivo de resguardar não somente sua qualidade, mas sua função socioambiental.

A função socioambiental não está limitada à propriedade rural, englobando a propriedade urbana. O direito de uso da propriedade encontra limites constitucionais, não sendo, portanto, ilimitado, tendo o Superior Tribunal de Justiça, em várias oportunidades, afastado a existência de um hipotético gozo absoluto e total do imóvel rural ou urbano (BRASIL, 2012). O Código Civil Brasileiro (BRASIL, 2002) ao dispor sobre o direito à propriedade prescreve que ele

deve ser exercido em consonância com as suas finalidades econômicas e sociais e de modo que sejam preservados, de conformidade com o estabelecido em lei especial, a flora, a fauna, as belezas naturais, o equilíbrio ecológico e o patrimônio histórico e artístico, bem como evitada a poluição do ar e das águas.

Na atual conjuntura, em um cenário urbano composto por inúmeras áreas contaminadas, somados às tecnologias, hoje, disponíveis e cada vez mais acessíveis, capazes de conferir verdadeiro entendimento do problema e busca de soluções economicamente viáveis, vivenciamos um momento único que torna possível a implementação dos deveres impostos pela legislação ambiental, de forma compatível com a atividade econômica (transporte, turismo, comércio, imobiliária etc.). Particularmente nessa época de mudanças climáticas, de degradação do solo, de indisponibilidade hídrica, com verdadeiro esgotamento quantitativo e/ou qualitativo deste recurso indispensável à vida.

Desta forma, o presente estudo tem o objetivo demonstrar, através de um caso concreto, os benefícios da utilização de tecnologias de Alta Resolução para caracterização de solos e identificação de fontes secundárias de contaminantes, em zonas não saturada e saturada, em consonância com a legislação e normas técnicas vigentes, possibilitando a compreensão e o dimensionamento do problema, com escolha de técnicas de remediação adequadas que visem à reparação do dano, em um prazo razoável, visando à promoção do desenvolvimento sustentável.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Este estudo foi desenvolvido por meio do levantamento bibliográfico disponível em conjunto com os resultados de um estudo realizado em uma área contaminada com o uso de abordagens de alta resolução e TRIAD. Com objetivo de demonstrar os benefícios do uso de tecnologias avançadas de coleta de dados em tempo real, com dados interpretados sob a ótica de sustentabilidade e responsabilidade social e ambiental. As abordagens e estudos de caso ilustradas nesse estudo estão descritas em detalhe nos capítulos a seguir.

## **3. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL NO ESTADO DE SÃO PAULO. O FOCO NA PROTEÇÃO DO SOLO E NA IDENTIFICAÇÃO E REMOÇÃO DA MASSA DO**

## **CONTAMINANTE: LEI 13.577/2009, DECRETO ESTADUAL 59.263/2013, DECISÃO DE DIRETORIA CETESB 038/2017/C**

A Lei 13.577/2009 (SÃO PAULO, 2009), dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, sendo regulamentada pelo Decreto Estadual 59.263/2013. A Decisão de Diretoria da CETESB 038/2017/C, dispõe sobre a aprovação do “Procedimento para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas”, da revisão do “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” e estabelece “Diretrizes para Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental”, em função da publicação da Lei Estadual nº 13.577/2009 e seu Regulamento.

Adiante, serão abordados aspectos voltados à proteção do solo, associados à certeza de ser ele um receptor limitado de substâncias nocivas, incapaz de regenerar sozinho o meio contaminado por substâncias antrópicas. Assim sendo, imperiosa a ação humana como única forma capaz de auxiliá-lo, de forma efetiva, a não perpetuar a transferência de graves passivos ambientais nele depositados às futuras gerações.

### **3.1. Foco na proteção do solo**

A Lei nº 13.577, de 8 de julho de 2009, é regulamentada pelo Decreto Estadual 59.263, de 5 de junho de 2013 (SÃO PAULO, 2013), que trata da proteção da qualidade do solo contra alterações nocivas por contaminação, da definição de responsabilidades, da identificação e do cadastramento de áreas contaminadas e da remediação dessas áreas de forma a tornar seguros seus usos atual e futuro. Tem por objetivo garantir o uso sustentável do solo, protegendo-o de contaminações e prevenindo alterações nas suas características e funções, através de medidas que promovam: a proteção da qualidade do solo e das águas subterrâneas, a prevenção à geração de áreas contaminadas, a identificação de áreas contaminadas, a remediação de áreas contaminadas e das águas subterrâneas por elas afetadas, o incentivo à reutilização de áreas remediadas, a articulação entre as instituições; que à população afetada/exposta à contaminação seja garantida saúde e segurança e garantias à informação e à participação nas decisões relacionadas com as áreas contaminadas (SÃO PAULO, 2013). Ele estabelece 15 instrumentos para a implantação do sistema de proteção da qualidade do solo e para o gerenciamento de áreas contaminadas, sendo eles: Cadastro de áreas contaminadas; Disponibilização de informações; Declaração de informação voluntária; Licenciamento e fiscalização; Plano de

Desativação do Empreendimento; Plano Diretor e legislação de uso e ocupação do solo; Plano de Intervenção; Incentivos fiscais, tributários e creditícios; Garantias bancárias; Seguro ambiental; Auditorias ambientais; Critérios de qualidade para solo e águas subterrâneas; Compensação ambiental; Fundos financeiros; Educação ambiental (SÃO PAULO, 2013).

Mas por que proteger o solo?

Sabe-se, hoje, da limitação da capacidade depurativa do solo em relação às substâncias nocivas nele depositadas e de suas importantes funções: sustentação da vida e do “habitat” para pessoas, animais, plantas e organismos do solo; manutenção do ciclo da água e dos nutrientes; proteção da água subterrânea; manutenção do patrimônio histórico, natural e cultural; conservação das reservas minerais e de matéria-prima; produção de alimentos; meios para manutenção da atividade socioeconômica (SÃO PAULO, 2013).

Dito isso, a lei e seu regulamento trazem dentre seus objetivos não apenas a prevenção de novas contaminações, mas a correção/reparação dos danos ambientais causados em áreas contaminadas, através de intervenções que priorizem a identificação e a remoção da massa do contaminante, ou seja, que visem à promoção “remediação de áreas contaminadas e das águas subterrâneas por elas afetadas” (SÃO PAULO, 2013), “de forma a tornar seguros seus usos atual e futuro” (SÃO PAULO, 2009).

Mas o que seriam medidas de remediação e quem seriam os responsáveis por sua adoção?

O Decreto ao conceituar “medidas de remediação” traz uma mescla de medidas preventivas, que impeçam a dispersão do contaminante (técnicas de contenção ou isolamento) somadas às medidas corretivas (técnicas de tratamento que promovam a remoção ou a redução da massa do contaminante). Ao tratar sobre a reabilitação de área classificada como Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi), traz o dever de o representante legal pela área desenvolver Plano de Intervenção a ser executado sob sua responsabilidade, contemplando o controle ou eliminação das fontes de contaminação, podendo ser admitidas medidas de remediação (para tratamento e para contenção de contaminantes), medidas de controle institucional e medidas de engenharia. No entanto, traz o dever de priorização de medidas de remediação que promovam a remoção e redução de massa dos contaminantes. Ainda, caso proponha o uso de medidas de remediação por contenção de contaminantes, de medidas de controle institucional e de medidas de engenharia, o Plano de Intervenção deverá contemplar uma análise técnica, econômica e financeira que comprove a viabilidade da solução de remoção de massa, com indicação do tempo de vigência de sua aplicação. (SÃO PAULO, 2013).

No mesmo sentido, temos a Decisão de Diretoria 038/2017, da CETESB, sobre a definição das medidas de intervenção ao esclarecer que as medidas de remediação por tratamento deverão ser priorizadas, em relação às medidas de remediação por contenção, tendo em vista sua ação no sentido de promover a remoção da massa de contaminantes presentes na área, em atendimento ao que determina o §2º, do artigo 44, do Decreto nº 59.263/2013. Também traz o dever de aplicação de medidas de remediação por contenção, medidas de controle institucional e de medidas de engenharia nas situações em que as medidas de remediação por tratamento não se mostrem, a curto e médio prazos, suficientes para o controle dos riscos, em que sua aplicação se mostre inviável técnica e economicamente ou que sua aplicação possa intensificar o risco aos receptores ou o dano ao ambiente. (CETESB, 2017).

Já os responsáveis legais solidariamente responsáveis pela prevenção, identificação e remediação de uma área contaminada são elencados no artigo 18, quais sejam: o causador da contaminação e seus sucessores, o proprietário da área, superficiário, o detentor da posse efetiva, quem dela se beneficiar direta ou indiretamente, podendo ser desconsiderada a personalidade da pessoa jurídica quando for obstáculo para a identificação e a remediação da área contaminada.

Desta forma, a proteção do solo deverá se dar através da priorização de medidas de intervenção com foco na identificação, cubagem e remoção da massa dos contaminantes, que serão abordadas nos itens subsequentes.

### **3.2. Foco na identificação e na remoção da massa dos contaminantes (fontes)**

O Decreto Estadual determina que o Plano de Intervenção conteplane o controle ou eliminação das fontes secundárias de contaminação, cujo trabalho de identificação e mapeamento já deverá ter sido executado na etapa anterior de Investigação Detalhada, que consiste na “avaliação detalhada das características da fonte de contaminação e dos meios afetados, determinando os tipos de contaminantes presentes e suas concentrações, bem como a área e o volume das plumas de contaminação; e sua dinâmica de propagação” (SÃO PAULO, 2013).

Ao tratar de contaminação, o Decreto traz o termo “massa” associado à definição dos termos “Medidas de remediação”, “Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe)” e “Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR)”. E ao tratar dos itens mínimos que deverão ser contemplados na elaboração do Plano de Intervenção, que deverá contemplar o controle ou eliminação das fontes de contaminação, com priorização de medidas de remediação por

tratamento (que provam a remoção e redução de massa dos contaminantes) e, para o caso de adoção de outras medidas (medidas de remediação para contenção de contaminantes, medidas de controle institucional e medidas de engenharia), deverá conter uma análise técnica, econômica e financeira que comprove a inviabilidade da solução de remoção de massa. Caso sejam necessárias medidas de controle institucional para o uso e ocupação do solo ou para o uso das águas subterrâneas e superficiais, o responsável legal deverá contemplá-las no Plano de Intervenção, justificar a necessidade, detalhá-las, indicar sua localização por meio de coordenadas geográficas e o período de vigência, e garantir sua manutenção pelo período de aplicação. Nos casos em que sejam propostas medidas de engenharia, o responsável legal deverá apresentar Plano de Intervenção à CETESB, contendo as medidas indicadas, cronograma de implantação e sua localização, assegurando a sua manutenção pelo período de sua aplicação. (SÃO PAULO, 2013).

A Decisão de Diretoria da CETESB 038/2017/C dispõe sobre os procedimentos técnicos a serem adotados no Gerenciamento de áreas contaminadas, trazendo o termo “massa” relacionado à definição de “fonte secundária”, à “Investigação Detalhada” e à “Definição dos objetivos do Plano de Intervenção”, que serão abordados no tópico subsequente (CETESB, 2017).

### **3.3. Da Investigação Detalhada apta a subsidiar a Avaliação de Risco e o Plano de Intervenção. Investigação do solo em Alta Resolução (CETESB - Decisão de Diretoria 038/2017/C). Dever de atendimento de procedimentos e normas técnicas (art. 39 do Decreto Estadual 59.263/2013)**

O Decreto Estadual 59.263/2013, determina que a execução de todas as etapas do processo de gerenciamento de áreas contaminadas seja realizada por responsável técnico habilitado, contratado pelo responsável legal. Ele deverá atender aos procedimentos estabelecidos pelo SEAQUA (Sistema Estadual de Administração da Qualidade Ambiental, Proteção, Controle e Desenvolvimento do Meio Ambiente e Uso Adequado dos Recursos Naturais), e na ausência desses, às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (SÃO PAULO, 2013).

No gerenciamento de áreas contaminadas, a Investigação Detalhada é primordial à realização da etapa de Avaliação de Risco e através das conclusões nela obtidas, à definição dos objetivos do Plano de Intervenção. Vejamos:

A etapa de Investigação Detalhada será realizada com objetivo de caracterizar o meio físico onde se insere a área contaminada, composta pela caracterização da fonte de contaminação (tipos de contaminantes presentes e suas concentrações) e dos meios afetados (área e o volume das plumas de contaminação, e sua dinâmica de propagação). Ao final desta etapa, deverá ser possível, em relação às substâncias químicas de interesse (SQIs): definir a concentração e quantificar a massa nos diversos meios avaliados e nas diferentes fases em que se encontrem (fase livre, dissolvida, gasosa e retida); caracterizar seu transporte nas diferentes unidades hidro estratigráficas e sua evolução no tempo e caracterizar os cenários de exposição necessários à realização da etapa de Avaliação de Risco. Em relação às plumas de contaminação: deverão estar integralmente delimitadas nos planos horizontal e vertical (delimitação tridimensional); os *hot spots* ou centro de massas deverão ter sido investigados com a resolução adequada para todas as SQIs, de modo que seja possível a quantificação das respectivas massas de cada uma delas, nas diferentes unidades hidro estratigráficas identificadas. Para esta etapa, recomenda-se a utilização de métodos de investigação de alta resolução, de modo que o Modelo Conceitual seja apto a demonstrar que as informações obtidas são suficientes para embasar a realização das etapas de Avaliação de Risco e Plano de Intervenção (CETESB, 2017).

Na etapa de Avaliação de Risco, são identificados, avaliados e quantificados os riscos à saúde humana, ao meio ambiente e a outros bens a proteger, devendo ser executadas as ações correspondentes àqueles receptores expostos ou potencialmente expostos, que efetivamente tenham sido identificados na área contaminada ou em sua vizinhança. Pode vir a ser composta por: Avaliação de Risco à Saúde Humana (visa à determinação dos riscos para os receptores humanos identificados); Avaliação de Risco Ecológico (objetiva verificar a ocorrência de risco para uma espécie, comunidade ou ecossistema); Identificação de Risco considerando Padrões Legais Aplicáveis (deverá identificar os riscos potenciais e presentes relativos à qualidade dos corpos d'água superficiais); Identificação de Risco considerando Padrões Legais Aplicáveis e Modelagem Matemática (emprego da modelagem matemática para simular o comportamento temporal da contaminação e prever a potencial alteração da qualidade de recursos hídricos superficiais e subterrâneos e definir a necessidade de adoção de medidas de intervenção); Identificação de Perigo à Vida ou à Saúde da População (identificação de Perigo à Vida ou à Saúde da População, em decorrência da contaminação de uma área, conforme descritas no artigo 19, do Decreto nº 59.263/2013 e situações que determinam a classificação da área como Área Contaminada com Risco Confirmado -ACRi, conforme descritas no artigo 36, do Decreto 59.263/2013) (SÃO PAULO, 2013; CETESB, 2017).

O Plano de Intervenção está baseado nos resultados obtidos nas etapas anteriores (Avaliação Preliminar, Investigação Confirmatória, Investigação Detalhada e Avaliação de Risco), necessários à caracterização detalhada da área contaminada, utilizados para definir quais medidas de intervenção serão adotadas, que não estão restritas à proteção dos receptores humanos identificados, englobando todos os bens a proteger (receptores expostos ou potencialmente expostos) descritos no artigo 36, do Decreto 59.263/2013 (que define os casos em que uma área será classificada como Área Contaminada com Risco Confirmado - ACRI, quais sejam: os organismos presentes nos ecossistemas (inciso II), os corpos d'água superficiais e as águas subterrâneas (inciso IV), patrimônio público ou privado (inciso V).

Deverá ser contemplado no Plano de Intervenção, conforme disposto no artigo 44, do Decreto 59.263/2013: o controle ou eliminação das fontes de contaminação; o uso atual e futuro do solo da área a ser reabilitada, que poderá incluir sua vizinhança, caso a contaminação extrapole ou possa extrapolar os limites da propriedade; o resultado da Avaliação de Risco à saúde humana ou ecológica; a ultrapassagem dos padrões legais aplicáveis; as medidas de intervenção consideradas técnica e economicamente viáveis e as consequências de sua aplicação; o cronograma de implementação das medidas de intervenção propostas; o programa de monitoramento da eficiência e eficácia das medidas de remediação; os custos das medidas de intervenção propostas.

Poderão ser admitidas dentre as medidas de intervenção propostas: medidas de remediação (que englobam técnicas para tratamento e técnicas para contenção dos contaminantes), medidas de controle institucional (MCI) e medidas de engenharia (MCE).

Mas como deverão ser definidas/priorizadas as medidas de intervenção propostas?

Em que pese serem admitidas diversas medidas de intervenção, deverão ser priorizadas aquelas que resultem na remoção e redução de massa dos contaminantes, ou seja, medidas de remediação, corretivas, que englobem técnicas para tratamento, as quais se mostrem a curto e médio prazos (medidas de curto prazo: dias até 12 meses; medidas de médio prazo: de 1 ano até 5 anos), suficientes para o controle dos riscos. (CETESB, 2017).

A DD 038/2017/C, ao tratar sobre a definição das medidas de intervenção, traz também a questão temporal, frisando o dever de aplicação das demais medidas (medidas de remediação por contenção, de controle institucional e de controle de engenharia), nas situações em que as medidas de remediação por tratamento: a) não se mostrem, a curto e médio prazos, suficientes para o controle dos riscos; b) mostre-se inviável técnica e economicamente; c) quando isoladamente aplicada não se mostre suficiente para afastar o risco aos receptores ou o dano ao ambiente (CETESB, 2017).

No entanto, caso necessárias medidas de remediação por contenção, de controle institucional e de controle de engenharia haverá o dever de apresentação, no Plano de Intervenção, de uma análise técnica, econômica e financeira que comprove a inviabilidade da solução de remoção de massa, indicando o tempo de vigência de sua aplicação e os custos das medidas de intervenção propostas (SÃO PAULO, 2013).

Ou seja, em que pese o texto legal trazer uma gama de possibilidades, também traz limitações, em função do tempo de utilização das medidas e seus respectivos custos (que igualmente poderão se mostrar inviáveis economicamente a depender do tempo de sua vigência, associados aos custos que garantam sua manutenção e seu monitoramento por igual período, que deverão ser mantidos mesmo após ter sido a área declarada Reabilitada para o uso declarado, nos casos descritos no artigo 54, do Decreto 59.263/2013).

Assim, deverão ser estabelecidas estratégias necessárias ao alcance dos objetivos a serem alcançados no Plano de Intervenção, que a depender dos resultados obtidos na Investigação Detalhada e na Avaliação de Risco, poderão contemplar: “a) A eliminação, contenção ou isolamento das fontes primárias e secundárias de contaminação; b) A prevenção ou o controle da exposição dos receptores: i. Por meio da eliminação dos caminhos de exposição; ii. Por meio da remoção dos receptores expostos; c) A remoção de massa de contaminantes; d) A retração das plumas de contaminação; e) A contenção do avanço das plumas de contaminação de modo a evitar o atingimento ou o agravamento da contaminação de corpos d’água superficiais e subterrâneos”. (CETESB, 2017).

Também deverão ser levadas em consideração as técnicas de investigação adotadas (técnicas tradicionais ou técnicas modernas de alta resolução, hoje, igualmente, acessíveis e viáveis economicamente) que podem afetar de sobremaneira nas estratégias de escolha das medidas de intervenção propostas, o tempo de sua vigência e, consequentemente, nos custos globais de todo processo de gerenciamento da área.

Para seleção das técnicas a serem empregadas, o Responsável Técnico deverá considerar critérios que levem em consideração a disponibilidade da técnica, sua aplicabilidade, custos e o tempo necessário para atingimento das metas de remediação, considerando as SQIs e o meio contaminado (CETESB, 2017).

Assim, ao final da execução das medidas de intervenção propostas no Plano de Intervenção, deverá ser possível a alteração da classificação da área para Área Reabilitada para o uso Declarado (AR), definida como “área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria anteriormente contaminada que, depois de submetida às medidas de intervenção, ainda que não

tenha sido totalmente eliminada a massa de contaminação, tem restabelecido o nível de risco aceitável à saúde humana, ao meio ambiente e a outros bens a proteger” (SÃO PAULO, 2013).

Destarte, o “procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas”, como, hoje, descrito na legislação, caso devidamente implantado, com priorização de medidas de remediação que promovam a remoção e redução de massa dos contaminantes, mostrar-se-á apto a promover, não apenas o seu uso seguro, com consequente reabilitação para o uso declarado de acordo com a legislação de uso e ocupação do solo vigentes, mas também a reparação dos danos ambientais causados, dentro do período de tempo proposto no Plano de Intervenção, que variará, de acordo com o período de utilização das medidas de intervenção (que poderá ser de curto, médio ou longo prazo), de forma a não denotar uma transferência de responsabilidade às futuras gerações (caput e §2º, do artigo 225, da Constituição Federal (BRASIL, 1988). Não sendo concebível a adoção de medidas por tempo indeterminado (indefinido) e sem o devido monitoramento, caso mantidas após a emissão do Termo de Reabilitação para o uso declarado da área.

## **4. APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIA DE GERENCIAMENTO COM A COMBINAÇÃO DAS ABORDAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO E TRIAD**

### **4.1. O significado do termo “Alta Resolução” e suas diferenças em relação às abordagens tradicionais**

A chamada abordagem de alta resolução (*High Resolution Site Characterization - HRSC*) foi estabelecida pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA) e compreende estratégias e técnicas de investigação que usam escala apropriada na coleta de dados e amostras para avaliação da contaminação em conjunto com o meio físico, no qual ela reside (EPA, 2021).

Tais estratégias visam a diminuir as incertezas que acompanham a heterogeneidade do meio físico que controla a distribuição e destino da contaminação (EPA, 2021). Apesar de não haver especificações de metodologias ou ferramentas a serem utilizadas, o objetivo dessa abordagem, de diminuir incertezas apesar de uma avaliação criteriosa da contaminação e do meio físico, é a de ser capaz de apontar métodos mais apropriados para tal caracterização de alta resolução.

As investigações ambientais tradicionais são realizadas com utilização de poços de monitoramento e algumas sondagens para coletas pontuais de amostras de solo (BREWER et al., 2017a; EVALD, 2018; GUILBEAULT et al., 2005; SUTHERSAN et al., 2015). Porém, elas não são capazes de avaliar a heterogeneidade do meio de forma adequada, sendo o principal motivo das medidas de remediação não ser efetivo e extrapolar prazos estimados estabelecidos nos planos de intervenções (BREWER et al., 2017a; EVALD, 2018; GUILBEAULT et al., 2005; SUTHERSAN et al., 2015; WHO, 2021).

No que tange às fases de contaminação, as metodologias de alta resolução devem utilizar de metodologias, nas quais a escala de caracterização seja apropriada, dada a complexidade do meio em subsuperfície que controla o transporte ou armazenamento das fases adsorvidas, dissolvidas e vapor.

Para solo, tradicionalmente, são realizadas coletas de amostras pontuais com uma ou duas coletas por sondagem (BREWER et al., 2017a, 2017b; EVALD, 2018; HADLEY e SEDMAN, 1992; RIYIS, 2019; SOUTO et al., 2020). Mais recentemente, houve a adoção de metodologias de avaliação em tempo real de compostos para seleção de pontos para coletas de alíquotas pontuais para quantificação de massa, como, por exemplo, medições com aparelho XRF para metais e PID portátil para VOCs. Para metais, tal *screening* com XRF tende a ser

representativo dada à imobilidade de tais compostos. Ainda assim, Brewer et al. (2017a) pondera a coleta de amostras pontuais dada à variabilidade amostral presente no mesmo ponto de coleta. Já para voláteis, a medição com PID portátil para seleção de pontos de coleta não é eficaz por si só, uma vez que houve a remoção do liner, considerando a coleta via *Direct Push*, e a percolação de tais voláteis dentro do liner. Além disso, diferentes litologias liberam compostos voláteis em diferentes taxas, o que acarreta a não correlação entre maiores leituras de PID com a posição de maior concentração de compostos em solo (EVALD, 2018; RIYIS, 2019; VILAR et al., 2018). A EPA, em dois métodos, aponta que a aferição relativa ao grau de concentração de compostos voláteis em liners deve ser apenas utilizada para a seleção do método de preservação da amostra e, de forma alguma, para a seleção de pontos de coleta, dadas as incertezas atreladas à remoção do solo do meio até a medição dos compostos voláteis por tal aparelho (COSTANZA e DAVIS, 2000; EPA, 2007; HEWITT e LUKASH, 1997).

Logo, para caracterização da fase adsorvida na matriz do solo subsuperficial, devem ser utilizadas metodologias que permitam uma varredura de solo em alta densidade, com pontos amostrais ou avaliativos, com escala menor que 30 cm, ou com multi-incrementos verticais (BREWER et al., 2017a, 2017b; GUILBEAULT et al., 2005), para que tal definição de alta resolução seja aplicada.

Para água subterrânea, tradicionalmente, são utilizadas amostras de água coletadas em poços com seções filtrantes longas, instalados sem consideração da litologia, na qual as seções filtrantes estão posicionadas (EVALD, 2018; FREITAS, 2017; RIYIS, 2019; RIYIS et al., 2013). Tal abordagem não pode ser considerada alta resolução, pois não há caracterização em densidade adequada das condições hidro químicas, dada à conexão de diferentes camadas hidro estratigráficas, não sendo tal amostra representativa da real condição hidro química da área sob investigação. Para esse meio, os poços de monitoramento devem ter seções filtrantes curtas ou devem ser coletadas com utilização de amostradores pontuais, como o Waterloo Profiler, Screen Point, ou HPT Groundwater Sampler.

Para a fase vapor, há, convencionalmente, o uso de poços de monitoramento com seção filtrante curta. Contudo, deve-se notar a importância do distanciamento vertical e da posição espacial dos pontos. Uma vez que essa fase é a mais móvel dentre as demais, considerando que a difusão da fase vapor/ar é até 10 mil vezes maior que dos valores de difusão da fase dissolvida (EPA, 2012), o comportamento é afetado por diversos fatores, como por exemplo, umidade do solo, diferenciais de pressão, fazendo-se necessário o conhecimento e identificação das áreas com a presença de maior massa de contaminantes (EPA, 2012). Dado o comportamento móvel e dependente da variável de tempo, os *hotspots* da fase de vapor podem ou não estar

correlacionados com áreas de maiores concentrações de massa em solo ou água subterrânea, sendo a presença de NAPL e fase adsorvida os maiores geradores de massa de vapor (EPA, 2012).

Até o presente ponto, foram descritas as metodologias para avaliação das diferentes fases de contaminação (adsorvida, dissolvida e vapor), porém a definição da abordagem de alta resolução abrange igualmente a caracterização do meio físico, no qual tais substâncias de interesse residem, que deverá ser realizada com mesma densidade de dados.

Solos apresentam alta complexidade e feições estratigráficas de diferentes escalas (GUILBEAULT et al., 2005). Neste cenário, é de extrema relevância a identificação, em escala apropriada, das camadas hidro estratigráficas de interesse em uma determinada área. De acordo com Maxey (1964, apud KGS, 1996), uma unidade hidro estratigráfica é uma unidade com propriedades hidráulicas distintas das camadas imediatamente adjacentes.

Comumente, tal avaliação dessas camadas dá-se por descrição táctil-visual, análises granulométricas ou coletas de amostras indeformadas com amostradores shelby (EVALD, 2018; RIYIS, 2019; RIYIS et al., 2013; VILAR et al., 2018). Porém, considerando que, por exemplo, um silte possa ter condutividade hidráulica variando entre 3 e 4 ordens de magnitude (BRAJA, 2016), a descrição táctil visual seria apta para descrição da litologia em questão (estratigrafia), mas incapaz de identificar propriedades hidráulica (hidro estratigrafia) da área. Como apontado por Guilbeault et al. (2005), a diferença de condutividade hidráulica em um aquífero homogêneo pode ser indistinguível visualmente e impactar em até 4 ordens de magnitude a distribuição da concentração de contaminantes. As coletas de amostras granulométricas e indeformadas estão estreitamente ligadas à descrição táctil-visual, que se descrita por diferentes profissionais levará a diferentes interpretações. Logo, caso não haja uma coleta em intervalos próximos, não maiores que 30 centímetros (escala adequada), como indicado por Guilbeault et al. (2005), não se mostrarão aptas a indicar a hidro estratigrafia de um aquífero poroso.

Por conseguinte, para a definição de propriedades hidráulicas do meio poroso e subsequente definição de camadas hidro estratigráficas, em alta resolução, devem ser utilizadas ferramentas capazes de realizar medições em escala apropriada (alta densidade de dados) que avaliem características hidráulicas das diferentes formações, em conjunto, com posterior descrição litológica e granulométrica para uma devida caracterização da heterogeneidade do meio físico. Algumas ferramentas que são capazes de realizar tal avaliação são as sondas Hydraulic Profiling Tool (HPT) (MCCALL, 2011; MCCALL et al., 2017) e variações da metodologia Cone Penetration Testing (CPT) (PARADIS et al., 2014).

#### **4.2. O significado da abordagem TRIAD**

A abordagem TRIAD foi estabelecida, em 2003, pela *Interstate Technology and Regulatory Agency (ITRC)*, dos Estados Unidos, como estratégias de gerenciamento que visa à diminuição de incertezas na construção de um modelo conceitual robusto (ITRC, 2003).

Trata-se de metodologia baseada em três pilares: 1) Planejamento sistemático de projeto; 2) Planos de trabalho dinâmicos; 3) Tecnologias de aquisição de dados em tempo real (ITRC, 2003). Ela tem por cerne a redução de incertezas durante a aquisição de dados, mediante o uso de ferramentas de análise **em tempo real**, objetivando a construção de um modelo conceitual do site robusto e com menos incertezas, em especial, sobre a caracterização da contaminação e do meio físico.

O pilar “Planejamento sistemático” deve ser aplicado em todos os projetos, e quanto mais cedo os objetivos de remediação forem estipulados, melhor será a definição das medidas de investigação necessárias para uma tomada de decisão mais assertiva (ITRC, 2003).

Os “Planos de trabalho dinâmicos” têm por objetivo manter a flexibilidade das ações a ser tomada em campo durante a coleta de dados e apresentar adaptações diante de quaisquer mudanças de condições ou conhecimentos adquiridos que possam inferir na metodologia previamente eleita. Também devem ser adotados mecanismos de comunicação e de tomada rápida de decisões. Tais mecanismos são possíveis de serem alcançados com a adoção de ferramentas de coleta e análise de dados **em tempo real** (ITRC, 2003).

Por último, as “Tecnologias de aquisição de dados em tempo real” objetivam a coleta, tratamento, compartilhamento e análise de dados de forma fluída, em grande volume e em tempo reduzido.

A abordagem TRIAD não pode ser conduzida, caso um dos pilares não esteja presente, pois é através de seu conjunto, aplicados em todas as etapas do projeto (da elaboração dos planos iniciais, coleta de uma alta densidade de dados, compartilhamento e gerenciamento de informações e adaptações necessárias das medidas de investigação) que o modelo conceitual é construído, de forma dinâmica, durante os trabalhos de campo.

A TRIAD utiliza de dados qualitativos (e semiquantitativos) para varredura de áreas de interesse de forma mais eficaz se comparado, por exemplo, com uma abordagem tradicional, que é caracterizada por múltiplas campanhas de coletas de amostras das diferentes matrizes, solo, água e vapor, e instalações de poços de monitoramento de forma individualizada e pontual. A utilização dos três pilares evita múltiplas mobilizações, diminui o volume de resíduos gerados, otimizando o uso de recursos humanos e financeiros nos projetos em que é adotada.

A combinação dos conceitos TRIAD e HRSC possibilita que o gerenciamento de uma área contaminada tenha sucesso na construção de um modelo conceitual de área robusto e com um nível de incerteza gerenciável para que a avaliação de risco à saúde humana e o plano de intervenção possam ser fundamentados em um banco de dados completo que descreva as fases de contaminação, o meio físico e o comportamento de armazenamento ou transporte das substâncias químicas de interesse presentes nos diferentes meios.

#### **4.3. Caso concreto sob a ótica TRIAD e Alta Resolução, com uso de ferramentas MIP/OIP/HPT**

O estudo de caso descrito a seguir compreende uma antiga base de distribuição de combustíveis que estava desativada e não utilizada desde os anos 2000. Diversas etapas de investigação tradicional foram realizadas e mais de 15 anos de remediação, via bombeamento e tratamento, utilizados, como principal metodologia de remediação na área. Contudo, o imóvel sofreu desvalorização para fins de mudança de uso e reutilização, devido às incertezas relativas à real extensão do problema e aos respectivos impactos ambientais, no atual estágio.

A área continha um total de 152 poços de monitoramento, submetida, por cerca de 17 anos, a técnicas de bombeamento e campanha de injeção de oxidantes. Porém, a principal incerteza residia ainda sobre a posição de fontes primárias pretéritas e sobre a real distribuição de massa de contaminantes no meio.

A primeira etapa do planejamento de projeto foi composta pela revisão da avaliação preliminar e do levantamento histórico de atividades operacionais que serviram de fonte primária para a contaminação durante os anos de operação da base.

A partir deste levantamento detalhado do histórico local e da análise crítica dos dados ambientais disponíveis de campanhas pretéritas, foi desenvolvido um plano inicial de trabalho para a área, com definição das metodologias iniciais a ser utilizada.

Considerando que as substâncias de interesse eram compostas majoritariamente por hidrocarbonetos, foram selecionados os sistemas *Membrane Interface Probe* (MiHPT) e *Optical Image Profiler* (OiHPT). Ambos os sistemas contendo os sensores *Hydraulic Profiling Tool* (HPT) e *Electrical Conductivity* (EC).

O sistema MiHPT é utilizado para medição de compostos orgânicos voláteis (VOCs) em subsuperfície através do aquecimento do solo (com temperatura constante), em intervalos regulares, gerando o carreamento dos compostos voláteis que passam através de uma membrana

semipermeável e são levados até um cromatógrafo de gás que realiza a medição desses compostos (CONSTANZA e DAVIS, 2000; GEOPROBE, 2020; MCCALL et al., 2014).

O cromatógrafo, onde é realizada a análise dos compostos voláteis capturados em subsuperfície, possui três detectores. Um detector é um foto ionizador (PID), que detecta hidrocarbonetos e compostos halogenados, um ionizador por chama (FID), que também é sensível para hidrocarbonetos, compostos halogenados e metano, e um detector específico para compostos halogenados (XSD).

Já o sistema OiHPT, comprehende a captura de imagens, em tempo real, em subsuperfície, que se utiliza do fato de que hidrocarbonetos poliaromáticos fluorescem sob influência de luz ultravioleta. O sistema possui um LED ultravioleta de 265 nm de comprimento de onda, um LED de luz visível para captura de imagens normais, e uma câmera que é capaz de captar imagens a 30 FPS, enquanto uma sonda direct-push e crava em formações inconsolidadas (MCCALL et al., 2018).

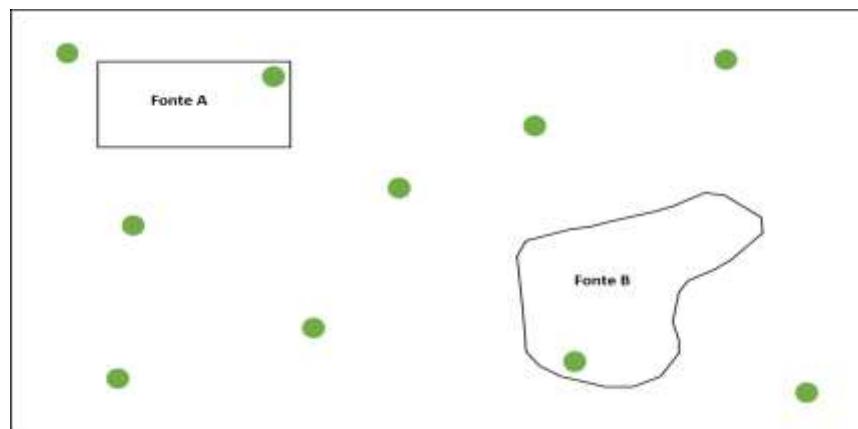
O sistema OiHPT é capaz de delimitar com precisão centimétrica, em tempo real, a existência de produto puro no meio (LNAPL) e apontar regiões fonte de contaminação, o que é uma limitação do sistema MiHPT que, pelo fato da possibilidade de saturação do cromatógrafo de gás, acaba saturando a membrana, linhas de carregamento e o cromatógrafo, interferindo na interpretação, dada tal impregnação de compostos puros no sistema.

Os sensores de HPT e ETC propiciam uma avaliação centimétrica do meio físico e de suas características hidráulicas e elétricas, sendo, portanto, capaz de apontar as diferentes camadas hidro estratigráficas (MCCALL, 2011; SCHULMEISTER et al., 2007).

Partindo da ótica da adoção de planos de trabalho dinâmicos, são apontados pontos fixos de investigação em áreas de interesse, ou pouco investigadas anteriormente, para serem pontos “guia”, que servirão de base para as definições de adensamento necessário, em tais áreas, conforme ilustrado pela Figura 1. Estes pontos fixos (pontos verdes na Figura 1) têm como objetivo nortear as investigações e apontar anomalias que devem ser detalhadas, mas também auxiliam na comprovação da inexistência de contaminação em determinadas áreas. Ainda que uma correlação direta entre massa de contaminante no meio e a magnitude dos sinais dos detectores não seja possível devido às diversas interferências do meio, é possível descaracterizar áreas devido à inexistência de sinais e apontar áreas com maiores concentrações dada a coleta direcionada de amostras das matrizes impactadas em áreas de interesse. Para os pontos fixos, podem ser selecionadas áreas identificadas no modelo conceitual da área mais recente, que será atualizado e complementado conforme o andamento da investigação.

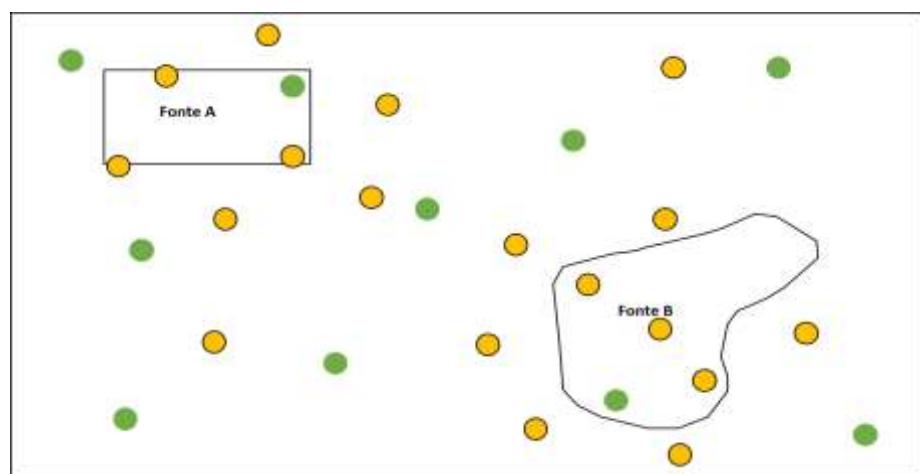
A partir desses pontos fixos, uma vez que a coleta e análise de dados é realizada em tempo real, pontos variáveis de investigação são posicionados para adensar regiões onde haja incertezas ou que necessite de delimitação tridimensional da extensão real da presença de compostos de interesse em subsuperfície ou para delimitação de camadas hidro geológicas de interesse. A posição de pontos variáveis é ilustrada pela Figura 2, com o posicionamento dos pontos laranja em áreas de interesse que necessitam de delimitação ou melhor compreensão para avaliação das anomalias apontadas por pontos fixos.

Figura 1 – Pontos fixos distribuídos em uma área sob investigação e a interceptação de áreas fonte de interesse.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 2 – Pontos variáveis de investigação com adensamento de áreas de interesse com anomalias representativas da presença de compostos de interesse em subsuperfície.



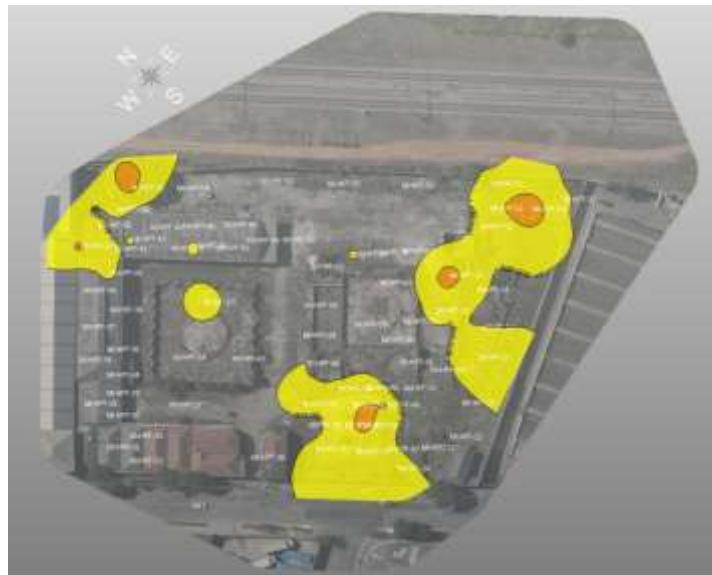
Fonte: Autor, 2022.

Com essa estratégia e ferramentas, é possível realizar rapidamente a varredura de grandes áreas com uma média de 30 a 80 metros de sondagem realizadas por dia, a depender

das condições e limitações locais. Percebe-se pelas figuras 1 e 2 que a distribuição dos pontos investigativos não é regular, este fato é deliberado, pois grids regulares de investigação podem acarretar da não identificação de áreas potenciais e fontes (BREWER et al., 2017a).

Na campanha de investigação foram realizadas 75 sondagens MiHPT e 20 sondagens OiHPT que identificaram regiões fonte e a extensão das regiões com presença de compostos orgânicos voláteis. A Figura 3 ilustra as áreas modeladas com indicativo de impacto pelas substâncias de interesse.

Figura 3 – Plumás com áreas fontes indicadas pelas sondagens de alta resolução.



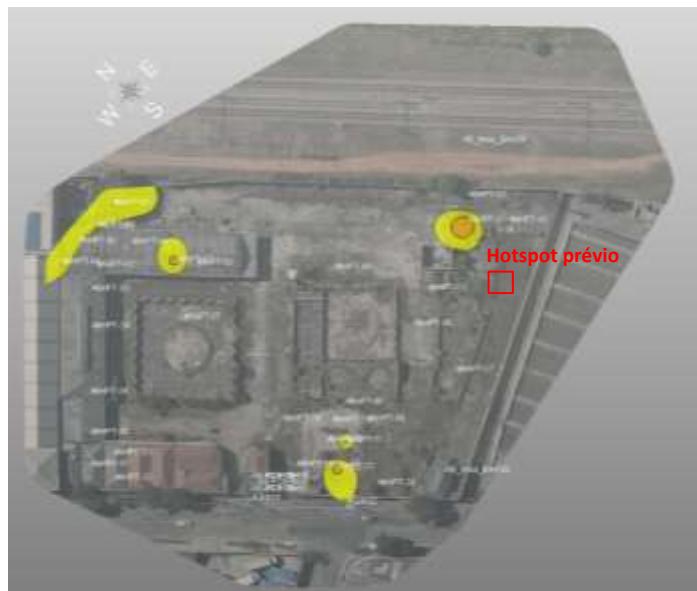
Fonte: Autor, 2022.

Com base nas anomalias apontadas pelas sondagens de alta resolução, ilustradas pela figura 3, os pontos de coleta de amostras de solo foram selecionados visando à quantificação de massa nos centros de massas e áreas adjacentes. A densidade amostral é otimizada pelas sondagens de alta resolução dado o conhecimento prévio sobre a posição e concentração provável de compostos em subsuperfície. A Figura 4 mostra a pluma adsorvida de benzeno no solo, bem como ilustra a posição do *hotspot* previamente conhecido. É possível perceber que os *hotspots*, em solo, são correlacionados com os pontos de maiores sinais apontados pelos sistemas MiHPT e OiHPT.

Em trabalhos de investigação anteriores que analisaram a fase adsorvida, na matriz do solo, foi encontrado apenas o composto Benzeno com valor de 0,5 mg/Kg em um dos pontos coletados durante a instalação de poços de monitoramento. Na investigação atual foram encontradas cinco áreas com concentrações em solo, como ilustrado na figura 3, com

concentrações de até 1,1 mg/kg de Benzeno (2 vezes mais do que o previamente conhecido), além da diferença de concentração, a identificação da real área com a presença da maior participação de massa foi o diferencial alcançado pelo uso de metodologias dinâmicas para identificação de áreas fonte.

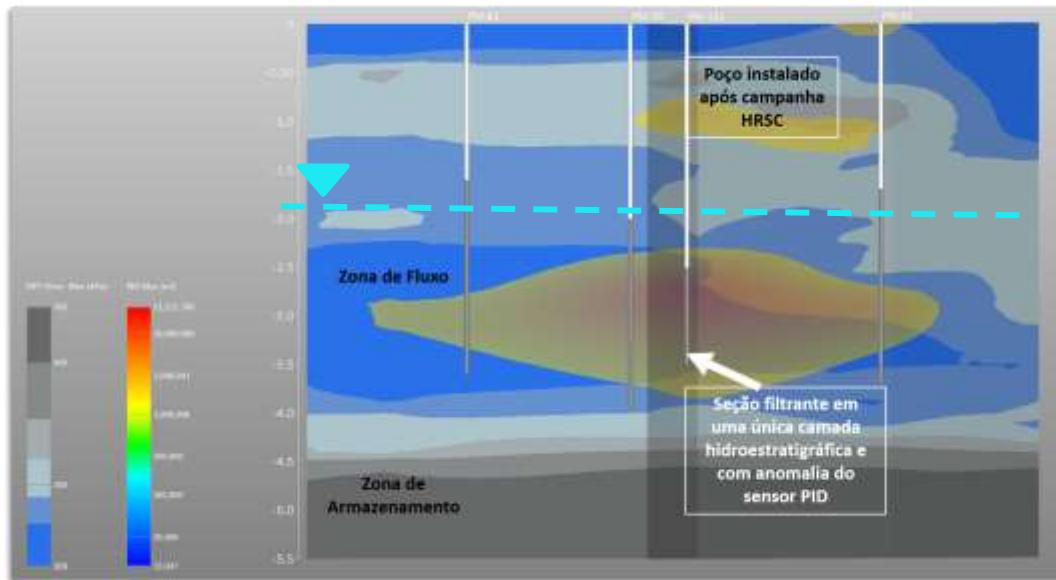
Figura 4 – Plumas de fase retida de Benzeno acima dos valores orientadores.



Fonte: Autor, 2022.

Pela análise conjunta dos dados dos sensores dos sistemas MiHPT e OiHPT com as interpretações de camadas hidro geológicas apontadas pelo sensor HPT, foram instalados poços de monitoramento com seções filtrantes posicionadas em sua totalidade na mesma camada de fluxo de interesse, como ilustrado pela Figura 5. O posicionamento em camadas únicas de fluxo é crucial para a coleta de análises de água subterrânea com representatividade das características hidro químicas do aquífero (EVALD 2018; GUILBEAULT et al., 2005; RIYIS, 2019). A Figura 5 demonstra o posicionamento da seção filtrante de um poço instalado após a realização de sondagens de alta resolução e os poços de monitoramento instalados em campanhas prévias. O poço instalado, após a campanha de alta resolução, tem seção filtrante na mesma camada de fluxo onde também ocorreu o maior sinal de anomalia do sensor PID, indicando a maior concentração de hidrocarbonetos.

Figura 5 – Posicionamento de seção filtrante na mesma camada de fluxo, com base no sensor HPT, e com anomalia resultante da concentração de hidrocarbonetos.



Fonte: Autor, 2022.

Após a amostragem da água subterrânea as características hidro químicas do aquífero local foram atualizadas. O poço instalado com base nos sinais das sondagens de alta resolução apresentou concentrações de compostos com até duas ordens de grandeza (4421,0 µg/L para 33,5 µg/L de Benzeno) acima dos demais poços próximos, por exemplo, as concentrações de benzeno foram de 4421,0 µg/L no poço instalado após a HRSC para 33,5 µg/L de Benzeno nos poços próximos. Ainda que os poços ilustrados, pela Figura 6, estejam a menos de 5 metros de distância um do outro, os poços com seções filtrantes maiores, interconectando camadas hidro estratigráficas distintas apontaram para a diluição das concentrações. Tais fatos também foram apontados por Guilbeault et al. (2005), onde amostras coletadas em distâncias ainda menores apontaram concentrações de até 4 ordens de grandeza de diferença dadas as heterogeneidades do meio físico que condiciona o transporte e armazenamento de contaminantes. A Figura 6 ilustra a extensão espacial da pluma dissolvida de benzeno na área.

Em investigações pretéritas, a maior concentração para Benzeno foi de 3580 ug/L em um poço localizado na porção norte da área, em 2009, já em campanha subsequente de investigação em 2011. O maior valor foi de 690 ug/L, valor 75% menor que o encontrado no centro de massa real, identificado após a campanha atual em alta resolução com planos dinâmicos de trabalho. Tal diferença de entendimentos, de concentração e posicionamento da pluma dificultaram o atingimento dos objetivos de remediação dadas incertezas de caracterização e temporais das áreas avaliadas.

Figura 6 – Pluma dissolvida de benzeno acima dos valores orientadores.



Fonte: Autor, 2022.

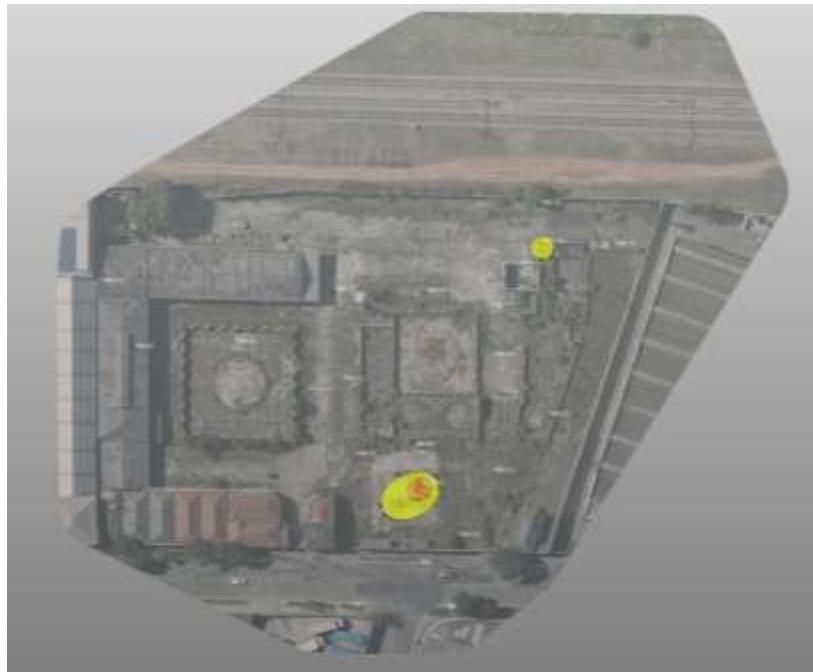
A última fase da contaminação avaliada foi a vapor. Foram instalados 32 poços de monitoramento, tanto nas profundidades de 1,25 metros, para avaliar o vapor do subsolo quanto poços do tipo subslab em áreas fechadas, para avaliar a intrusão de vapores em tais áreas.

A instalação desses pontos de monitoramento de vapores, deu-se nos centros de massa e áreas limiares deles, em densidade apropriada, ou seja, em alta resolução, para mapeamento das possíveis anomalias e caminhos preferenciais de migração desta fase.

O resultado da amostragem de vapores é ilustrado pela Figura 7. É possível observar que as regiões com concentrações de vapores acima dos valores orientadores são concêntricas com a posição da maior massa em solo subsuperficial, como pode ser observado pelas plumas das Figuras 4 e 7. Esse comportamento ocorre porque a carga mássica para geração de vapores deve ser elevada e, neste cenário, a carga mássica em solo foi superior às demais, o que será abordado em breve.

A concentração de vapor no hotspot foi de 7,300 ug/m<sup>3</sup> para Benzeno, e a massa total de vapores na área representa menos de 0,1% do total de massa de contaminantes nas diferentes matrizes: solo, água e vapor.

Figura 7 – Pluma de Benzeno em fase vapor acima dos valores orientadores.



Fonte: Autor, 2022.

Caso uma metodologia de análise de vapores tivesse sido utilizada para realização de uma avaliação preliminar para identificação de áreas fontes, seria provável a ocorrência de falsos positivos, ou seja, regiões com concentrações acima de valores orientadores em um dos outros meios seriam indicadas como não impactadas, dado que apenas os hotspots em solo possuem massa suficiente para a geração de plumas de intrusão de vapores, considerando que a fração mássica em água subterrânea é rapidamente degradada na zona vadosa. A análise de vapores no solo é crucial para o gerenciamento de áreas contaminadas. Contudo, não deve ser utilizada como linha de evidência primária para identificação de fontes secundárias, dada a mobilidade desta fase e a possível não correlação espacial com os centros de massa da fonte secundária. Essa análise deve ser realizada após o conhecimento e delimitação de áreas dos centros de massa nas matrizes de solo e água subterrânea, com intuito de evitar falsos negativos ou positivos que não, necessariamente, encontram-se nos reais centros de massa de contaminação.

O balanço de massa, considerando a soma de todas as substâncias de interesse obtido após a investigação de alta resolução, apontou que 97,3% da massa de contaminação ainda presente no site está em fase retida na matriz do solo subsuperficial. Cerca de 2,6% da massa encontra-se em fase dissolvida, enquanto menos de 0,1% da massa é liberada na fase vapor.

Essa partição de massa aponta para a necessidade da compreensão e expansão da fase retida em solo para a criação de um modelo conceitual de área mais robusto e representativo da realidade, com intuito da implantação de medidas de intervenção eficazes, previsíveis e sustentáveis. Nesse site, por cerca de 17 anos, o plano de intervenção foi focado no gerenciamento da fase dissolvida e fase livre aparente, bem como na contenção hidráulica de massa que representava menos de 3% do total da carga mássica presente na área.

O conhecimento do balanço mássico e das áreas onde tais fases se encontram é de extrema importância na elaboração do plano de intervenção e na adoção de estratégias mais sustentáveis no gerenciamento de áreas contaminadas. Apesar de 97% da massa se encontrar na matriz do solo, essa porção está contida em cerca de 10 a 20% da área sob estudo, tal proporção tem sido encontrada em outros estudos no Brasil e exterior (GUILBEAULT et al., 2005; RIYIS, 2019; SOUTO et al., 2020; SUTHERSAN et al., 2015).

Esse estudo de caso demonstra a capacidade que as estratégias de alta resolução, junto com uma abordagem dinâmica indicada pela TRIAD, têm de permitir a identificação de áreas fontes de forma dinâmica, tridimensional e robusta. A adoção sistemática dessa estratégia de gerenciamento possibilita uma comunicação e participação, em tempo real, de todas as partes interessadas envolvidas, uma geração menor de resíduos, um menor tempo de exposição em campo, uma maior confiabilidade técnica dos dados adquiridos, com base em metodologias conceituadas e padronizadas e, em consequência, uma maior segurança jurídica a todos os envolvidos.

Além da confiabilidade dos dados e do arcabouço técnico sólido gerado por tal abordagem, a combinação dessas metodologias permite a definição temporal das soluções possíveis para o gerenciamento de risco e impacto ambiental. Tal gerenciamento deve avaliar a variável temporal da permanência dos compostos contaminantes no meio ambiente dada as premissas previstas na legislação atual, que têm como foco a manutenção dos padrões de qualidade do solo subsuperficial e da água subterrânea.

## 5. SUSTENTABILIDADE NO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

Reconhecemos os impactos da degradação da natureza e a sustentabilidade têm se tornado pauta global. O termo sustentabilidade é cada vez mais perceptível e rotineiro, tornando-se cada vez mais popular, evidenciando sua importância. Palavra esta utilizada ao longo dos anos com diversos conceitos e significados, tendo uma das definições mais importantes surgida em 1987, por meio do relatório da Comissão de Brundtland (ONU, 1987), que estabeleceu que o

desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades. Contém dentro dele dois conceitos-chave: o conceito de 'necessidades', em particular as necessidades essenciais dos pobres do mundo, às quais prioridade absoluta deve ser dada; e a ideia das limitações impostas pelo estado da tecnologia e da organização social sobre a capacidade do ambiente para satisfazer as necessidades presentes e futuras.

O conceito supra nos traz como ideias centrais: o respeito aos recursos finitos do planeta e as gerações futuras no cerne da proposta, destacando a importância da visão de longo prazo ao tratarmos o tema.

O termo sustentabilidade deriva etimologicamente do termo sustentável que vem do latim *sustentare*, que significa sustentar, defender, favorecer, apoiar, conservar, cuidar (USP, 2022). Se acrescentarmos ao conceito etimológico a visão de longo prazo, teremos que para o indivíduo ou organização serem sustentáveis, necessário que levem em consideração a questão temporal, pois para algo ser sustentável, deverá ser duradouro, perdurável ao longo do tempo. Desta forma, seu conceito deve ser visto como algo sistêmico, indissociável da questão temporal, devendo ser visto como um processo contínuo.

Estabelecida a importância da questão temporal (de que não há que se falar em sustentabilidade sem que ações sejam contínuas e duradouras), importante abordar e compreender o “tripé da sustentabilidade” - ou *triple bottom line* - criado por John Elkington, no ano de 1994, no qual a visão de sustentabilidade é expandida, trazendo aspectos ambientais, sociais e econômicos. Este conceito do Triple Bottom Line (OLIVEIRA et al., 2012):

(...) no inglês, é conhecido por 3P (People, Planet e Profit); no português, seria PPL (Pessoas, Planeta e Lucro). Analisando-os separadamente, tem-se: Econômico, cujo propósito é a criação de empreendimentos viáveis, atraentes para os investidores; ambiental, cujo objetivo é analisar a interação de processos com o meio ambiente sem lhe causar danos permanentes; e social, que se preocupa com o estabelecimento de ações justas para trabalhadores, parceiros e

sociedade. Juntos, no entanto, estes três pilares se relacionam de tal forma que a interseção entre dois pilares resulta em viável, justo e vivível, e dos três, resultaria no alcance da sustentabilidade (...).

Assim, Elkington propõe uma visão integrada sobre o tema, tratando assuntos comumente associados à sustentabilidade a outros não habitualmente relacionados a ela como, por exemplo, responsabilidade social, qualidade de vida (vinculadas ao aspecto social), revendo a definição de sucesso (não restritas à obtenção do lucro), expandindo sua concepção, vinculando-a à visão de futuro (temporal, com olhar para as futuras gerações).

Também temos o conceito de *ESG - Environmental, social and corporate governance*, que está em alta no mundo corporativo e significa, em tradução livre, “Ambiental, social e governança”, possuindo seus fundamentos fortemente relacionados aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, que “são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas [...] possam desfrutar de paz e de prosperidade [...] a fim de que possamos atingir a Agenda 2030 no Brasil” (ONU, 2022b). O termo foi cunhado em 2004, em uma publicação denominada *Who Cares Wins* (THE GLOBAL IMPACT, 2004), relatório que entregou uma proposta que expôs os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), para encorajar a integração de critérios ambientais, sociais e de governança no mercado de capitais, surgido de uma parceria do Banco Mundial com a ONU, endossado por instituições privadas.-Atualmente mais de 19.000 empresas, sendo 1.420 localizados no Brasil (ONU, 2022a), já aderiram aos 10 princípios que o Pacto Global propõe nas áreas de trabalho, anticorrupção, direitos humanos e meio ambiente. É a maior iniciativa de sustentabilidade corporativa mundial, indicando o conceito de governança, atrairindo o uso de métricas reais para dimensionar o verdadeiro efeito, de forma a trazer transparência às organizações, evitando que sigam utilizando práticas insustentáveis, utilizando a “sustentabilidade” apenas como marketing (*greenwashing*) (PACTO GLOBAL, 2022).

Estão entre os 10 princípios do Pacto Global: a) Direitos Humanos: a.1. As empresas devem apoiar e respeitar a proteção de direitos humanos reconhecidos internacionalmente. a.2. Assegurar-se de sua não participação em violações destes direitos; b) Trabalho: b.1. As empresas devem apoiar a liberdade de associação e o reconhecimento efetivo do direito à negociação coletiva., b.2. A eliminação de todas as formas de trabalho forçado ou compulsório, b.3. A abolição efetiva do trabalho infantil, b.4. Eliminar a discriminação no emprego; c) Meio Ambiente: c.1. As empresas devem apoiar uma abordagem preventiva aos desafios ambientais., c.2. Desenvolver iniciativas para promover maior responsabilidade ambiental., c.3. Incentivar o desenvolvimento e difusão de tecnologias ambientalmente amigáveis.; d) Anticorrupção: As

empresas devem combater a corrupção em todas as suas formas, inclusive extorsão e propina (PACTO GLOBAL, 2022).

Neste contexto, grandes fundos gestores de investimentos estão de olho em temas ambientais, sociais e de governança para fazer investimentos. São imperiosos que conselhos de administração de empresas, principalmente, aquelas com passivo ambiental ou sem agenda de sustentabilidade crível, passem a adotar medidas que não denotem práticas atentatórias a esses fins, sob pena de receberem menos aportes ou de terem que pagar por financiamentos mais caros, visto que o tema sustentabilidade tem forte peso para mais de 50% dos fundos estrangeiros (ISTO É DINHEIRO, 2020; RESET, 2020).

No estudo de caso demonstrado nesse trabalho, durante mais de 15 (quinze) anos, foram utilizadas abordagens tradicionais para investigações, e sugeridas medidas de remediação focadas na remoção e contenção da fase livre aparente e fase dissolvida.

As estratégias de gerenciamento adotadas no estudo de caso tiveram como objetivo central metodologias de contenção da contaminação, e não da remoção efetiva de massa de contaminação, o que torna o processo pouco sustentável ao longo de mais de uma década de existência e manutenção de cenários de risco à saúde humana e aos bens a proteger. O elevado grau de incertezas presentes no modelo conceitual da área até então utilizado não permitiu a avaliação, definição e aplicação de medidas de intervenção sustentáveis que poderiam atingir os objetivos de gerenciamento estabelecidos pela legislação vigente, descrita no item 3, de forma previsível, eficaz e sustentável.

No entanto, após essa estratégia de gerenciamento, de investigação e medidas de remediação, ainda se tem 97% da massa de contaminantes adsorvida ao solo subsuperficial que subsidia as fases dissolvida e vapor por um tempo indeterminado. Estudos apontam que certas frações de contaminação podem permanecer em concentrações geradoras de risco por até 1000 anos (D’Affonseca et al., 2008). Considerando as incertezas conceituais que não podem ser respondidas por metodologias tradicionais de gerenciamento, não se pode prever a eficácia das medidas de intervenção nem a previsibilidade do atingimento de valores de referência a serem alcançados em uma determinada área.

A partir da aplicação de metodologias de gerenciamento integrado, HRSC e TRIAD, partindo de uma densa coleta de dados, com análise em tempo real e planos dinâmicos de trabalho, foi possível construir um novo modelo conceitual da área, mais robusto e com um baixo nível de incertezas conceituais que permitem a avaliação e a adoção de medidas de intervenção com uma estimativa confiável de tempo de execução e monitoramento da eficácia do processo.

Considerando a obrigatoriedade da eliminação de risco à saúde humana, bem como o risco aos bens a proteger, esse conhecimento robusto das partições de massa, bem como do meio físico onde tais se encontram armazenadas ou em transporte, é possível prever metodologias de intervenção que atingirão os padrões legais aplicáveis ao longo dos anos. Para isso, as intervenções deverão ser propostas com prazo de vigência que não represente a transferência do passivo ambiental às futuras gerações (BRASIL, 1988), sendo consideradas medidas de longo prazo aquelas com duração máxima de 30 anos ou uma geração (IPT, 2014).

A Figura 8 adiante ilustra a relação entre a concentração de contaminação máxima presente na área e o processo de decaimento dela ao longo do tempo. Neste gráfico, tem-se três cenários.

O primeiro, é a manutenção das concentrações atuais, em solo e água subterrânea, que podem levar um tempo indeterminado para decaimento, dados os lento processos de difusão e particionamento de contaminação entre as diferentes fases, não permitindo a eliminação de cenários de risco dentro de um período aplicável.

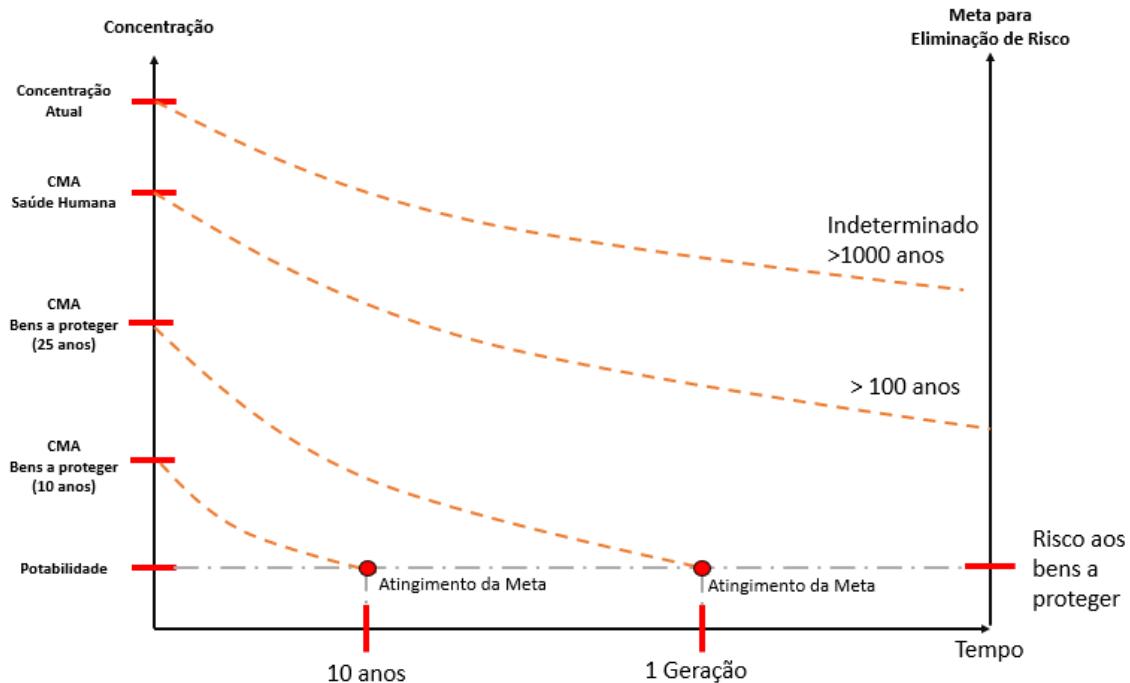
O segundo, é o atingimento de concentrações máximas aceitáveis para eliminação do risco à saúde humana. As CMAs para eliminação de risco à saúde humana visam apenas à eliminação desse risco, que pode ser de forma imediata, a depender das medidas de intervenção, ou de forma gradual, em conjunto com aplicações de medidas de engenharia e de controle institucional. Porém, estas CMAs não são suficientes para o atingimento da eliminação do risco aos bens a proteger dentro do período máximo correspondente a uma geração. Logo, a área ainda será caracterizada como área contaminada com risco confirmado (ACRi), o que implica na obrigatoriedade de ações de intervenção até que tais riscos sejam eliminados, sem representar a transferência dessa obrigatoriedade às futuras gerações

O terceiro cenário apresenta as CMAs para o atingimento da eliminação dos riscos aos bens a proteger. Estes podem se dar em até uma geração, ou em um período menor a depender das medidas de remediação, a partir da remoção de massa que sejam adotadas. Esse é o cenário de maior controle sobre o processo de gerenciamento, que garantirá o cumprimento de metas estabelecidas na legislação e a descaracterização da área como área contaminada com risco confirmado.

Ressalta-se que tais cenários devem ser simulados através de modelagem numérica de armazenamento e transporte levando em consideração o balanço real de massa, tanto adsorvida na matriz do solo como dissolvida, e o particionamento de uma fase para outra como fonte de alimentação infinita no modelo. Não se deve considerar apenas a maior concentração dissolvida como fonte secundária, pois como foi mostrado, no estudo de caso, a maior fração de massa

encontra-se na fase adsorvida e é o particionamento de massa, a partir desta que deve ser considerado como fonte secundária, que servirá de fonte ao longo do tempo para o transporte de contaminação na zona vadosa e saturada.

Figura 8 – Correlação entre a concentração de contaminação e o tempo para o atingimento das metas para eliminação de riscos.



Fonte: Autor, 2022.

Desta forma, tendo em vista o exposto anteriormente, os procedimentos a serem adotados no gerenciamento de áreas contaminadas igualmente devem visar à promoção do desenvolvimento sustentável, de forma a alcançarem o entendimento e compreensão do problema, de maneira precisa, através do uso de tecnologias em alta resolução que permitam a identificação e a cubagem da massa de contaminante retida em solo, conduzindo à utilização de técnicas de remediação mais assertivas (intervenções que promovam a eliminação e/ou redução da massa de contaminantes), reparando o dano causado de forma que, temporalmente, conduzam não somente à reabilitação de áreas, mas que não signifiquem a transferência do problema às futuras gerações como ocorre, por exemplo, quando priorizadas medidas de controle institucional, especialmente, a restrição de uso das águas subterrâneas (muitas delas propostas por longos prazos, ou até mesmo por prazo indeterminado), em detrimento da adoção de medidas de remediação, de curto e médio prazos (até 5 anos) (CETESB, 2017).

## 6. CONCLUSÃO

A evolução da legislação ambiental, em consonância ao desenvolvimento sustentável, vem impondo ao mercado desafios técnicos cada vez maiores e necessários à proteção da vida e ao meio ambiente em nosso planeta, já tão maltratado, desde o advento da Revolução Industrial.

Assim, no sentido de atender a essas demandas cada vez mais urgentes, faz-se cada vez mais necessário, diríamos imprescindível, a utilização de práticas (TRIAD) e tecnologias (ALTA RESOLUÇÃO - MIP-OIP-HPT) aptas ao entendimento e à solução dos problemas ambientais relacionados ao Gerenciamento de Áreas Contaminadas, com maior assertividade, dentro de um prazo razoável, que não denote a transferência de passivos ambientais às futuras gerações, sem limitação temporal (o que seria incompatível com os termos “gerenciamento”, “sustentabilidade” e “desenvolvimento sustentável”).

De forma a atender, simultaneamente, aos anseios da sociedade, às imposições legais e às normas técnicas vigentes, mostra-se inafastável a utilização de ferramentas adequadas, pois sem Alta Resolução, não há solução!

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAJA M, **Principles of Geotechnical Engineering**. 6th. ed. Stamford: Cengage Learning, 2016.
- BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 5 out. 1988. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acesso em: 16 nov. 2021.
- BRASIL. Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002. Institui o Código Civil. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 10 jan. 2002. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/110406compilada.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/110406compilada.htm). Acesso em: 08 nov. 2021.
- BRASIL. Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 19 dez. 1979. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/16766.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16766.htm). Acesso em: 08 nov. 2021.
- BRASIL (2012). Superior Tribunal de Justiça STJ. Recurso Especial: Resp 0000541-97.2009.4.04.7007 PR 2011/0046149-6 – Inteiro Teor. Disponível em: <https://stj.jusbrasil.com.br/jurisprudencia/866045080/recurso-especial-resp-1240122-pr-2011-0046149-6/inteiro-teor-866045182?ref=juris-tabs>. Acesso em: 25 nov. 2021.
- BREWER, R.; PEARD, J.; HESKETT, M. A Critical Review of Discrete Soil Sample Data Reliability: Part 1 - Field Study Results. **Soil and Sediment Contamination**, v. 26, n. 1, p. 1–22, 2017a.
- BREWER, R.; PEARD, J.; HESKETT, M. A Critical Review of Discrete Soil Sample Data Reliability: Part 2 - Implications. **Soil and Sediment Contamination**, v. 26, n. 1, p. 23–44, 2017b.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria nº 038/2017/C. São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/decisoes-de-diretoria/dd-038-2017-c/>. Acesso em: 08 nov. 2021.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=111046>. Acesso em: 08 nov. 2021.
- COSTANZA, J.; DAVIS, W. M. Rapid Detection of Volatile Organic Compounds in the Subsurface by Membrane Introduction into a Direct Sampling Ion-Trap Mass Spectrometer. **Analytical Chemistry**, v. 4, n. 5, p. 246–254, 2000.
- D’AFFONSECA, F. M.; BLUM, P.; FINKEL, M.; MELZER, R.; GRATHWOHL, P. Field scale characterization and modeling of contaminant release from a coal tar source zone. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 102, p. 120–139, 2008.

EPA – United States Environmental Protection Agency (2021). **High-Resolution Site Characterization (HRSC).** Disponível em: <https://cluin.org/characterization/technologies/hrsc/index.cfm>.

EPA – United States Environmental Protection Agency (2012). **Conceptual Model Scenarios for the Vapor Intrusion Pathway.** Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/vi-cms-v11final-2-24-2012.pdf>.

EPA – United States Environmental Protection Agency (2007). **Method 3815 - Screening Solid Samples for Volatile Organics.** Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3815.pdf>.

EVALD, M. K. **Investigação ambiental de alta resolução com uso do sistema membrane interface-hydraulic profilling tool.** 2018. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Geológica) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

FREITAS, L. G. **Aplicação de técnicas de alta resolução para caracterização geoambiental de áreas com ocorrência de gás metano.** 2017. 210 f. Dissertação (Mestrado) – Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.

GEOPROBE (2020). **Geoprobe Membrane Interface Probe (MIP).** Standards of Operation. Disponível em: [https://geoprobe.com/sites/default/files/pdfs/MIP\\_SOP\\_mk3010\\_1020.pdf](https://geoprobe.com/sites/default/files/pdfs/MIP_SOP_mk3010_1020.pdf).

GUILBEAULT, M. A.; PARKER, B. L.; CHERRY, J. A. Mass and flux distributions from DNAPL zones in sandy aquifers. **Ground Water**, v. 43, n. 1, p. 70–86, 2005.

HADLEY, P. W.; SEDMAN, R. M. How Hot Is That Spot? **Journal of Soil Contamination**, v. 1, n. 3, p. 217–225, 1992.

HEWITT, A. D.; LUKASH, N. J. E. (1997) **Estimating the Total Concentration of Volatile Organic Compounds in Soil: A Decision Tool for Sample Handling.** Disponível em: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a326037.pdf>.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas. 1. ed. rev. São Paulo, IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, BNDES, 2014. Disponível em: [https://www.ipt.br/download.php?filename=1317-Guia\\_Gerenciamento\\_de\\_Areas\\_Contaminadas\\_\\_\\_1a\\_edicao\\_revisada.pdf](https://www.ipt.br/download.php?filename=1317-Guia_Gerenciamento_de_Areas_Contaminadas___1a_edicao_revisada.pdf). Acesso em: 26 fev. 2022

ISTO É, DINHEIRO (2020). **Passivo ambiental de empresas se torna fator de risco e afasta investidor.** Disponível em: <https://www.istoeedinheiro.com.br/passivo-ambiental-de-empresas-se-torna-fator-de-risco-e-afasta-investidor/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

ITRC (2003). **Technical and Regulatory Guidance for the Triad Approach: A new Paradigm for Environmental Project Management.** ITRC Technical and Regulatory Guidance. Disponível em: <https://www.itrcweb.org/GuidanceDocuments/SCM-1.pdf>.

KGS – Kansas Geological Survey (1996). **Definition and delineation of hydrostratigraphic units.** Disponível em: <https://www.kgs.ku.edu/Dakota/vol1/hydro/hydro02.htm>.

MCCALL, W. (2011) **Application of the Geoprobe® HPT Logging System For Geo-Environmental Investigations.** Disponível em: [https://geoprobe.com/sites/default/files/storage/pdfs/mk3184\\_application\\_of\\_hpt\\_for\\_geo-environmental\\_investigations\\_0\\_0.pdf](https://geoprobe.com/sites/default/files/storage/pdfs/mk3184_application_of_hpt_for_geo-environmental_investigations_0_0.pdf).

MCCALL, W.; CHRISTY, T. M.; EVALD, M. K. Applying the HPT-GWS for Hydrostratigraphy, Water Quality and Aquifer Recharge Investigations. **Groundwater Monitoring and Remediation**, v. 37, n. 1, p. 78–91, 2017.

MCCALL, W.; CHRISTY, T. M.; PIPP, D. A.; JASTER, B.; WHITE, J.; GOODRICH, J.; FONTANA, J.; DOXTADER, S. Evaluation and application of the optical image profiler (OIP), a direct push probe for photo-logging UV-induced fluorescence of petroleum hydrocarbons. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 10, p. 1–15, 2018.

MCCALL, W.; CHRISTY, T. M.; PIPP, D.; TERKELSEN, M.; CHRISTENSEN, A.; WEBER, K.; ENGELSEN, P. Field Application of the Combined Membrane-Interface Probe and Hydraulic Profiling Tool (MiHpt). **Groundwater Monitoring and Remediation**, v. 34, n. 2, p. 85–95, 2014.

OLIVEIRA, L. R.; MEDEIROS, R. M.; TERRA, P. B.; QUELHAS, O. L. G. Sustentabilidade: da evolução dos conceitos à implementação como estratégia nas organizações. **Produção**, v. 22, n. 1, p. 70-82, 2012.

ONU – Organização das Nações Unidas. Assembleia Geral A/42/427, de 4 de agosto de 1987. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.** 4 ago. 1987. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Global Compact - participantes**, 2022a. Disponível em: <https://www.unglobalcompact.org/what-is-gc/participants>. Acesso em: 23 jan. 2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil**, 2022b. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 23 jan. 2022.

PACTO GLOBAL. **Os dez princípios.** Disponível em: <https://www.pactoglobal.org.br/10-principios>. Acesso: em 23 jan. 2022.

PARADIS, D.; TREMBLAY, L.; LEFEBVRE, R.; GLOAGUEN, E.; RIVERA, A.; PARENT, M.; BALLARD, J. M.; MICHAUD, Y.; BRUNET, P. Field characterization and data integration to define the hydraulic heterogeneity of a shallow granular aquifer at a sub-watershed scale. **Environmental Earth Sciences**, v. 72, n. 5, p. 1325–1348, 2014.

RESET (2020). **O ESG finalmente chegou ao buyside brasileiro – e esse relatório do Itaú mostra que não é só impressão.** Disponível em: <https://www.capitalreset.com/o-esg-finalmente-chegou-ao-buyside-brasileiro-e-esse-relatorio-do-itau-mostra-que-nao-e-so-impressao/>. Acesso em: 23 jan. 2022.

RIYIS, M. T. **Contribuição para Investigação de Áreas Contaminadas com Abordagem de Alta Resolução.** 2019. 162 f. Tese (Doutorado) – Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

RIYIS, M. T.; GIACHETI, H. L.; DERRITE, R. M. **Investigação de alta resolução para remediação de áreas contaminadas utilizando o piezocone de resistividade (RCPTU).** In: III Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo, n. 15, p. 4, 2013.

SÃO PAULO (Estado). Assembleia Legislativa. Projeto de Lei nº 368, de 8 de junho de 2005. Estabelece diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas. São Paulo: **Assembleia Legislativa**, 2005. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/propositura/?id=576746>. Acesso em: 08 nov. 2021.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 59.263, de 5 de junho de 2013. Regulamenta a Lei nº 13.577, de 8 de julho de 2009, que dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá providências correlatas. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo:** Executivo, p.3, 06 jun. 2013. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/norma/170437>. Acesso em: 08 nov. 2021.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 13.577, de 08 de julho de 2009. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo:** Executivo, p.1, 9 jul. 2009. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/norma/156934>. Acesso em: 08 nov. 2021.

SCHULMEISTER, M. K.; BUTLER, J. J.; HEALEY, J. M.; ZHENG, L.; WYSOCKI, D. A.; MCCALL, G. W. Direct-Push Electrical Conductivity Logging for High-Resolution Hydrostratigraphic Characterization. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 23, n. 3, p. 52–62, 2007.

SOUTO, S.; MALTA-OLIVEIRA, C.; CHAVES, C.; EVALD, M. K.; VARELA, G.; SATURNINO, M.; CORREDORI, A. C. **Complete Redefinition of Conceptual Site Model based on a High-Resolution Site Characterization Approach – A Case study of a High-Risk Site Contaminated by Chlorinated Compounds.** In: REMTECH EXPO 2020, Italy. Anais REMTECH EXPO 2020, Italy, 2020.

SUTHERSAN, S.; QUINNAN, J.; WELTY, N. The new ROI: return on investigations by utilizing smart characterization methods. **Groundwater Monitoring and Remediation**, v. 35, n. 3, p. 25–33, 2015.

THE GLOBAL IMPACT (2004). **Who Cares Wins.** Connecting Financial Markets to a Changing World. Disponível em: [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/de954acc-504f-4140-91dc-d46cf063b1ec/WhoCaresWins\\_2004.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPA\\_CE-de954acc-504f-4140-91dc-d46cf063b1ec-jqeE.mD](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/de954acc-504f-4140-91dc-d46cf063b1ec/WhoCaresWins_2004.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPA_CE-de954acc-504f-4140-91dc-d46cf063b1ec-jqeE.mD).

USP – UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Laboratório de Sustentabilidade.** Sustentabilidade – conceituação, 2022. Disponível em: [http://www.lassu.usp.br/sustentabilidade/conceituacao/?doing\\_wp\\_cron=1642973064.9756329059600830078125](http://www.lassu.usp.br/sustentabilidade/conceituacao/?doing_wp_cron=1642973064.9756329059600830078125). Acesso em: 23 jan. 2022.

VILAR, J.; JARDIM, L.; RIYIS, M. T.; CUNHA, R. C. A. Smart Characterization para mapeamento da distribuição de contaminantes em área fonte impactada por solventes clorados. **InterfaceEHS - Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 13, n. 1, p. 17–41, 2018.

WHO - World Health Organization. Regional Office for Europe. (2021). Urban redevelopment of contaminated sites: a review of scientific evidence and practical knowledge on environmental and health issues. Regional Office for Europe. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/340944>.