

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

ANA CAROLINA CORREDORI CARRILHO

A aquisição e interpretação de dados em tempo real na investigação de áreas contaminadas: revisão sistemática de literatura

São Paulo

2022

ANA CAROLINA CORREDORI CARRILHO

A aquisição e interpretação de dados em tempo real na investigação de áreas contaminadas: revisão sistemática de literatura

Versão Original

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: Paulo Lojkasek Lima

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

Carrilho, Ana Carolina Corredori

A aquisição e interpretação de dados em tempo real na investigação de áreas contaminadas: revisão sistemática de literatura / A. C. C. Carrilho -- São Paulo, 2022.

30 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. Áreas contaminadas 2. Gestão ambiental 3. Alta resolução 4. Tomada de decisão 5. Modelo conceitual I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Carrilho, Ana Carolina Corredori. **A aquisição e interpretação de dados em tempo real na investigação de áreas contaminadas: revisão sistemática de literatura.** 2022. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à Deus que sempre me amparou, me sustentou e conduziu.

Ao orientador Paulo Lojkasek Lima pela orientação e auxílio na construção do tema.

Agradeço à minha família e meu esposo pelo suporte e incentivo, desde o princípio.

À empresa Finkler Ambiental que me apresentou esse viés ambiental e me auxiliou no que foi possível.

Por fim, agradeço a todos que, de qualquer maneira, torceram por mim e pelo sucesso deste trabalho.

RESUMO

Carrilho, Ana Carolina Corredori. A aquisição e interpretação de dados em tempo real na investigação de áreas contaminadas: revisão sistemática de literatura. 2022. 30 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

A última década trouxe mudanças significativas para o setor de áreas contaminadas no estado de São Paulo, uma referência para outros estados do Brasil. A partir da publicação da Decisão de Diretoria 038 pela CETESB em 2017, foi possível observar que as empresas do setor de áreas contaminadas vêm buscando evolução na maneira de conduzir seus trabalhos, pois as exigências estabelecidas no documento buscam a elaboração de um modelo conceitual da área (MCA) com menos incertezas durante o processo de diagnóstico. Este estudo aborda a importância na agilidade de compreensão dos conceitos e métodos de investigação de alta resolução, especificamente o *Membrane Interface Probe* (MIP), *Optical Image Profile* (OIP), *Electrical Conductivity* (EC) e o *Hydraulic Profiling Tool* (HPT), somados a correta interpretação das unidades hidroestratigráficas e de distribuição das sustâncias químicas de interesse (SQI) para nortear tomadas de decisões e direcionar as próximas etapas, reduzindo incertezas, otimizando custos e facilitando o gerenciamento ambiental.

Palavras-chave: Áreas contaminadas. Gestão ambiental. Alta resolução. Tomada de decisão. Modelo Conceitual.

ABSTRACT

Carrilho, Ana Carolina Corredori. Real-time data acquisition and interpretation in the investigation of affected areas: systematic literature review. 2022. 30 f. Monograph (MBA in Management of Contaminated Areas, Sustainable Urban Development and Revitalization of Brownfields) – Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2022.

The last decade has brought significant changes to the contaminated areas sector in the state of São Paulo, a benchmark for other states in Brazil. From the publication of Board Decision 038 by CETESB in 2017, it was possible to observe that companies in the contaminated areas sector seek evolution in the way they conduct their work, as requirements in the document seek to develop a conceptual model for the area (MCA) with less uncertainty during the diagnostic process. This study addresses the importance of dynamic development of concepts using high resolution investigation methods, specifically the Membrane Interface Probe (MIP), Optical Image Profile (OIP), Electrical Conductivity (EC) and Hydraulic Profiling Tool (HPT). The combination of these tools provide an enhancement of the interpretation of hydrostratigraphic units and mass distribution to suppress uncertainties and guide remedial steps, optimizing costs and facilitating environmental management.

Keywords: Contaminated areas. Environmental management. High resolution. Decision making. Conceptual Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grãos pouco permeáveis e com menor transmissividade nos primeiros 30 ft do registro e maior permeabilidade nos próximos 30 fts.....	15
Figura 2 – Sensores de EC e HPT indicando a presença de sedimentos finos nos primeiros 30 ft, seguidos de sedimentos mais grossos e, logo após, uma camada de armazenamento em 60 ft.....	16
Figura 3 – Indicativo de 64,9% no sensor OIP (Fluorescence) em 24,20 ft de profundidade da perfuração	17
Figura 4 – Log capturado, da esquerda para direita, sensores de EC, HPT, além de PID, XSD e FID com sinais a partir de 12 ft, remetendo a contaminantes clorados ou bromados.	19
Figura 5 – Condutividade elétrica conforme refinamento do solo	21
Figura 6 – Estimativa de NA em 5 ft com base em teste de dissipação	22
Figura 7 – Estágios de evolução de uma pluma por LNAPL	23
Figura 8 – Detecção de hidrocarbonetos em PID e FID entre 25 e 35 ft.....	24
Figura 9 – Sinais em PID, FID e XSD a partir de 13 ft.....	25
Figura 10 – Análise de cor conforme fluorescência do OIP.....	26
Figura 11 – Captação de imagens em um log de OiHPT-UV	26

LISTA DE SIGLAS

BTEX	Benzeno, tolueno, etil-benzeno e xilenos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DD	Decisão de Diretoria
DNAPL	<i>Dense non-aqueous phase liquid</i>
EC	<i>Electrical Conductivity</i>
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
Ft	Pés; Medida de metragem (0,30 m)
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
HPT	<i>Hydraulic Profiling Tool</i>
HRSC	<i>High Resolution Stereo Camera</i>
LNAPL	<i>Light non-aqueous phase liquid</i>
MIP	<i>Membrane Interface Probe</i>
NAPL	<i>Non-Aqueous Phase Liquid</i>
OIP	<i>Optical Image Profiler</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
PCE	Percloroetileno
TCE	Tricloroetileno
SQI	Substância Química de Interesse

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS.....	12
2.1	OBJETIVOS SECUNDÁRIOS.....	12
3.	JUSTIFICATIVA.....	12
4.	METODOLOGIA	13
4.1	MODELO CONCEITUAL	13
4.2	TECNOLOGIAS DE INVESTIGAÇÃO DE ALTA RESOLUÇÃO (HRSC).....	13
4.2.1	HYDRAULIC PROFILING TOOL (HPT)	14
4.2.2	ELECTRICAL CONDUCTIVITY (EC)	15
4.2.3	OPTICAL IMAGE PROFILER (OIP)	16
4.2.4	MEMBRANE INTERFACE PROBE (MIP).....	18
5.	RESULTADOS DA REVISÃO.....	19
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1. INTRODUÇÃO

É notório que fortes preocupações ambientais tiveram seu início como consequência das grandes guerras e, com o processo de industrialização ocorrido, principalmente, a partir da década de 1970. Período este em que se teve, inclusive, a Conferência Internacional das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano, em Estocolmo (1972) com o intuito de “inspirar e guiar os povos do mundo para a preservação e a melhoria do ambiente humano” (ONU).

Após a realização desta conferência, a necessidade de uma maior responsabilidade ambiental começou a se propagar pelo mundo, chegando ao Brasil em 1981 com a criação da PNMA (Lei nº 6.938/81) e, cinco anos após, também com o surgimento da Resolução CONAMA 01/1986 intensificou a discussão sobre os reflexos da relação entre a ação e o aspecto ocasionado.

Conceitos de impactos ambientais estão relacionados a mudanças no meio aquático ou terrestre, ar, sedimento, água subterrânea e biota, decorrente de alguma atividade que gere consequências positivas ou negativas. O CONAMA (1986) relaciona as alterações biológicas, químicas e físicas como resultado de ações antrópicas com consequências na saúde, segurança, bem-estar da população e dos biomas.

Dentre os primeiros passivos ambientais associados ao impacto sobre o solo e à água subterrânea destacam-se os decorrentes do manuseio, armazenamento, transporte e disposição inadequados de substâncias químicas. A ausência de procedimentos para manipulação de substâncias perigosas também é importante (CETESB, 2017), principalmente quando se há conhecimento.

Dentre as várias substâncias impactantes no meio, os derivados de petróleo e subprodutos oriundos da produção industrial chamam atenção por serem comumente persistentes e são classificados como perigosos por sua toxicidade e/ou mutagenicidade, mesmo em baixas concentrações Segundo CONAMA (2009), estas substâncias ocorrem nas fases NAPL (livre e residual) vapor, dissolvida e sorvida e podem ficar retidas no solo, passando a atuar como fonte secundária de contaminação para água subterrânea.

Geralmente encontradas próximas da região onde há ou esteve a fonte primária, tais substâncias têm seu comportamento de migração em subsuperfície associado às características físico-químicas do produto e do meio físico. Ao atingir o nível d’água do aquífero freático,

podem se mover pela zona saturada e no caso da zona insaturada, particiona-se para vapor e, como consequência, é transportado de volta para a superfície, ocasionando um ciclo de contaminação de maior dificuldade de gerenciamento (CONAMA, 2009).

MOREIRA e DOURADO (2005) afirmam que o aumento no consumo de derivados do petróleo, especialmente diesel e gasolina, o crescimento na demanda por postos de combustíveis, trazem consequência negativa devido ao uso e manipulação de hidrocarbonetos, gerando resíduos e efluentes altamente poluidores. Além disso, os autores indicam que a manutenção e a fiscalização *in loco* de manutenções preventivas e/ou corretivas, permanece precária, ocasionando a fácil identificação de inúmeras áreas com índice de contaminação.

Visando minimizar os impactos ambientais ocasionados por essas contaminações, órgãos responsáveis passaram a exigir relatórios mais minuciosos e gerenciamentos com maior rigorosidade no intuito de reduzir os riscos e impactos ao meio, gerando uma crescente necessidade de se obter resultados mais precisos, auxiliando o desenvolvimento e a utilização de novas tecnologias.

A União Europeia e os Estados Unidos da América são uns dos principais locais geradores de receita pelo mercado de remediação (IPT, 2016). Os problemas ambientais e a necessidade de investigação são assuntos conhecidos nestas localidades, e no caso da abordagem de *High Resolution Site Characterization* (HRSC), é altamente elogiada através da plataforma “CLU-IN” (US-EPA), referência em informações do mercado de áreas contaminadas. Segundo a Agência de Proteção Ambiental (USEPA) – desenvolvedora do site – esta abordagem é recomendada em todos os tipos de *sites*, independentemente de seu tamanho, pois traz detalhes refinados e uma redução significativa de incertezas que auxiliam na compreensão da problemática e posteriores etapas de resolução.

No estado de São Paulo, atualmente, os procedimentos para a proteção da qualidade do solo e das águas subterrâneas, mediante identificação, quantificação e qualificação das fontes de contaminação do solo, seguem a normativa DD-38 da CETESB, datada de 2017, a qual recomenda na fase de investigação detalhada a realização da investigação e a análise de risco à saúde humana por meio da “utilização de métodos de alta resolução na investigação de áreas com complexidades associadas ao meio físico e à distribuição das substâncias químicas de interesse” (CETESB, 2017).

Motivado nestas atuais exigências e regulamentações, o mercado ambiental como um todo, carece de tomadas de decisões precisas com base em informações concisas e detalhadas do contaminante e o exato mapeamento do local de intervenção para maximização da eficiência no método de intervenção a ser aplicado.

Tomando por este princípio, o emprego da tecnologia de alta resolução (HRSC) para caracterização de áreas proporciona as delimitações verticais e horizontais, com a indicação da presença de produto combustível em fase residual ou em fase livre e as propriedades litológicas dos meios subterrâneos envolvidos, bem como as zonas de fluxos e determinação da condutividade hidráulica, auxiliando assim, na rápida tomada de decisão.

2. OBJETIVOS

Analizar e revisar a influência dos dados obtidos com alta resolução para tomada de decisão em tempo real para melhoria dos resultados em projetos de investigação em áreas impactadas.

2.1 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

- Interpretar informações obtidas *in loco/on site* com HRSC e correlacioná-los com ganhos de projeto;
- Destacar vantagens e limitações das ferramentas MIP, OIP, HPT e EC.

3. JUSTIFICATIVA

A ferramenta de investigação adequada, utilizada de forma assertiva e interpretada corretamente traz inúmeros ganhos ao executor do projeto de investigação, a quem contrata os serviços de investigação e aos órgãos reguladores. Há inúmeros relatos sobre os benefícios da alta resolução, entretanto, pouco se diz sobre a correta forma de interpretar e utilizá-la em prol da agilidade nas decisões. É, exatamente, esta correlação a ser abordada para facilitar a

compreensão, aproveitamento das técnicas e otimização de todo o trabalho e custos empregados.

4. METODOLOGIA

4.1 MODELO CONCEITUAL

Pode-se tomar como grande propulsor da expansão do emprego da tecnologia de alta resolução, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) que, ao dispor sobre a normativa DD-38/2017, descreve em seu anexo os procedimentos para o gerenciamento de áreas contaminadas, além da necessidade de informações à constar no modelo conceitual como a identificação das SQIs, das fontes de contaminação, dos mecanismos de liberação das substâncias, dos meios de transporte das substâncias e das vias de ingresso das substâncias nos receptores (CETESB, 2017).

No que se refere a gestão de áreas contaminadas, o modelo conceitual primário segue como ponto de partida, pois realiza o cruzamento de dados obtidos imediatamente em campo, somados ao conhecimento detalhado e atualizado do comportamento dos contaminantes no vapor, no solo e na água subterrânea (SANTOS *et al.*, 2015), embasando assim, uma investigação assertiva e adequada para o estudo de gerenciamento da área em questão, principalmente se tratando de locais complexos contaminados, podendo aprimorar a gestão de todo o projeto a longo prazo (HART *et al.*, 2021).

4.2 TECNOLOGIAS DE INVESTIGAÇÃO DE ALTA RESOLUÇÃO (HRSC)

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), HRSCs proporcionam remediações mais ágeis e assertivas, pois trazem consigo uma minimização de incertezas, uma vez que conseguem obter dados concisos e precisos do meio físico (CLU-IN, 2016).

O método adotado para este trabalho será a “Abordagem Tríade” (TRIAD), na qual possui três principais pilares para investigação: um exaustivo e sistemático planejamento com estabelecimento claro de objetivos, estratégias dinâmicas de ação e tomada de decisão, além de

um sistema de obtenção de dados em tempo real (ITRC, 2003). Basicamente, consiste em ideias anteriormente formuladas, unidas para desenvolver um novo paradigma para a gestão de projetos ambientais. É dependente de avanços tecnológicos, científicos e de processo que oferecem potencial melhorias na qualidade e redução de custos, acarretando inestimáveis resultados (ITRC, 2019).

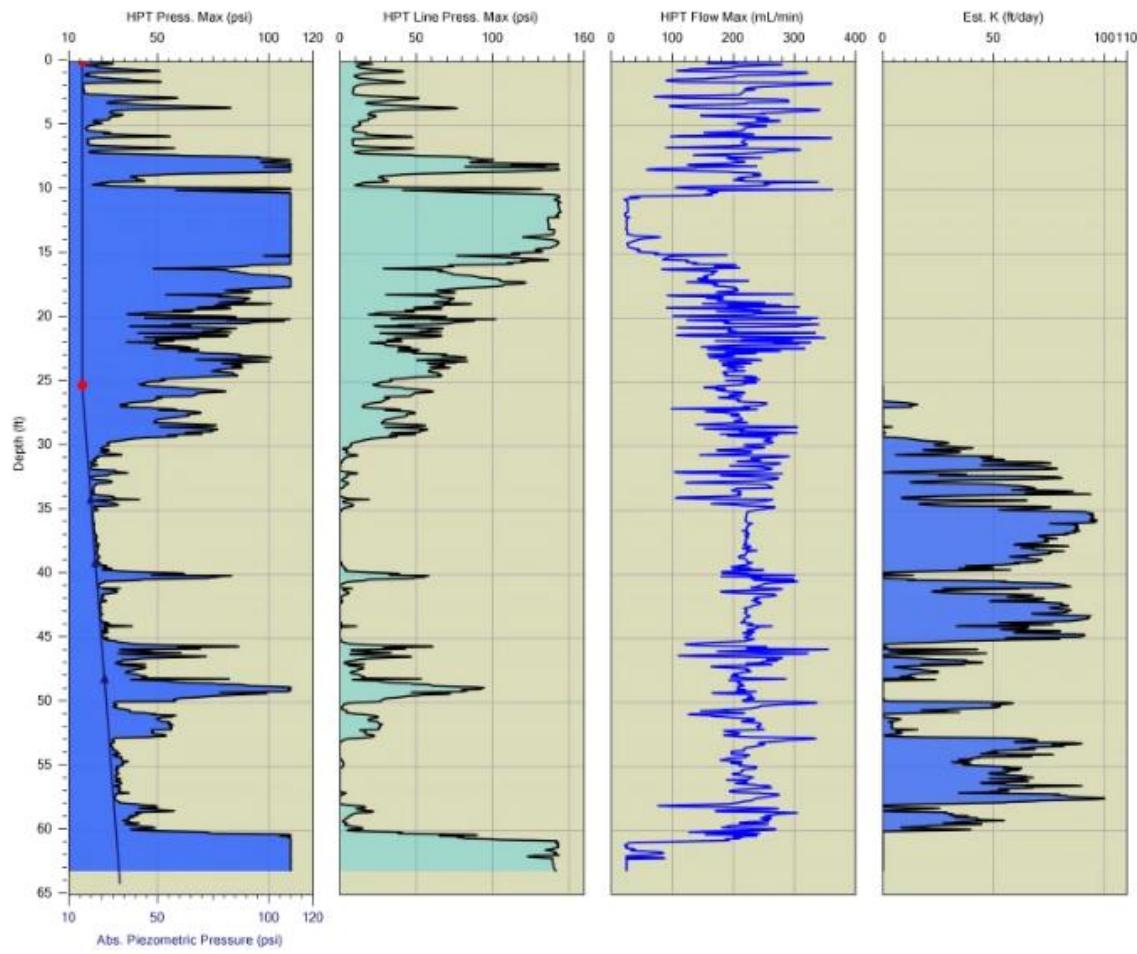
A necessidade dessa objetividade na obtenção e entendimento dos dados, traz como propósito principal do trabalho de investigação ambiental de alta resolução (HRSC), refinar o modelo conceitual de modo encontrar e caracterizar eventuais fontes secundárias de contaminação em sua fase LNAPL que não tenham sido ou que não pudessem ser identificadas pelos métodos investigativos tradicionais e entender a sua expansão horizontal utilizando as ferramentas de caracterização química ou de *screening* de concentração dos compostos como é o caso do MIP e o OIP, bem como as de especificação do meio estratigráfico HPT e EC (RIYIS, 2012), definidos pela *Geoprobe Systems* ®, criadora e detentora dos direitos, como:

4.2.1 HYDRAULIC PROFILING TOOL (HPT)

Utilizado como ferramenta para mapeamento das unidades hidroestratigráficas através da medição de permeabilidade do solo, ou seja, é uma ferramenta utilizada para avaliação do comportamento hidráulico do solo, realizando medidas da pressão necessária para injetar um fluxo de água constante no solo à medida que a sonda avança em profundidade, além de realizar medidas da pressão hidrostática sob a condição de fluxo zero (ensaios de dissipação) em zona saturada.

De acordo com o fabricante (GEOPROBE, 2019), respostas menores de pressão podem indicar granulometrias e transmissividade maiores, enquanto elevadas respostas de pressão são esperados grãos menores e denotam dificuldade de transmissão e permeabilidade, como é possível observar na Figura 1:

Figura 1 – Grãos pouco permeáveis e com menor transmissividade nos primeiros 30 ft do registro e maior permeabilidade nos próximos 30 fts.



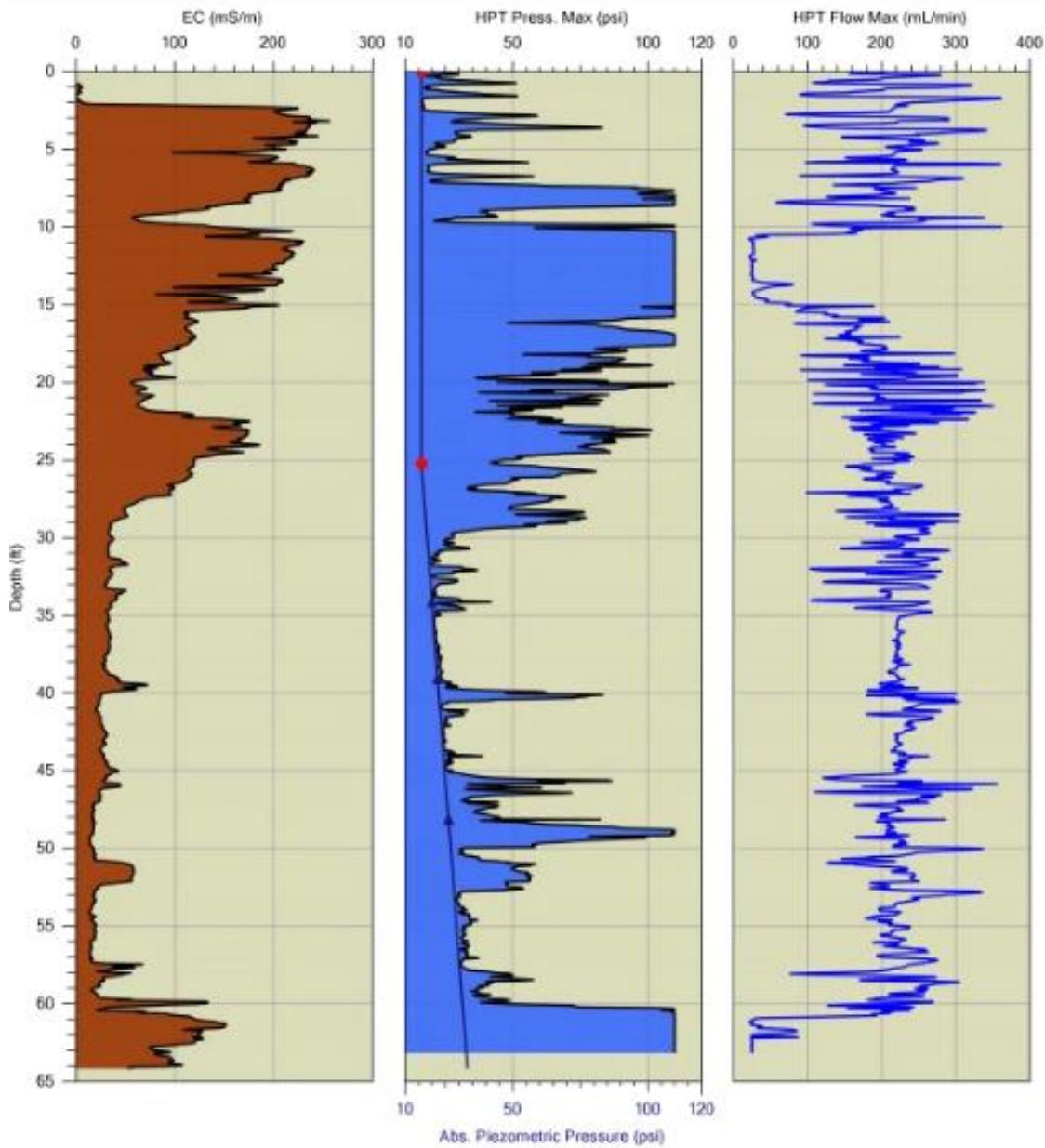
Fonte: Adaptado de GEOPROBE, 2021.

4.2.2 ELECTRICAL CONDUCTIVITY (EC)

O sensor de captação de condutividade elétrica (EC) corresponde a um conjunto de eletrodos que mede a resposta do solo à injeção de corrente elétrica, medida em mili-Siemens por metro (mS/m) (FREITAS *et al.* 2017). É um instrumento utilizado para auxiliar na classificação do solo, pois em geral, argilas apresentam leituras de condutividade elétrica mais altas do que areias e cascalhos. É indicado que o sistema seja observado em conjunto aos resultados de permeabilidade do HPT, pois facilita o entendimento de zonas de migração e retenção (GEOPROBE, 2021).

Na Figura 2 é possível notar que litologias com elevada presença de finos propendem a resultados mais elevados de HPT e EC, onde o inverso normalmente ocorre em verticais mais porosas e sedimentos maiores, mais grosseiros, principalmente, em locais que não houve muita intempérie ou ação humana e biológica.

Figura 2 – Sensores de EC e HPT indicando a presença de sedimentos finos nos primeiros 30 ft, seguidos de sedimentos mais grossos e, logo após, uma camada de armazenamento em 60 ft.



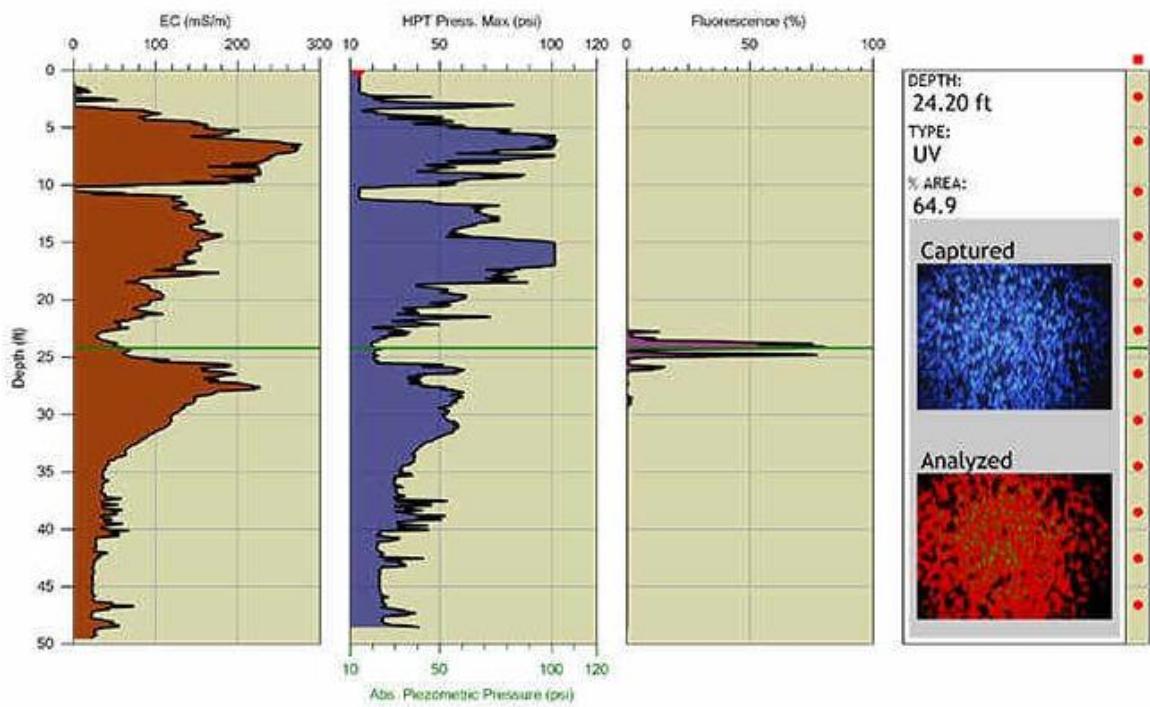
Fonte: Adaptado de GEOPROBE, 2021.

4.2.3 OPTICAL IMAGE PROFILER (OIP)

Conforme menciona a Geoprobe Systems®, trata-se de um instrumento cujo objetivo é detectar a presença de contaminantes combustíveis derivados de petróleo e hidrocarbonetos no solo – conhecido como fase livre ou residual e óleos leves – contribuindo para identificação de

fontes primárias e secundárias por meio do efeito de fluorescência gerada quando esses compostos são expostos à luz ultravioleta.

Figura 3 – Indicativo de 64,9% no sensor OIP (Fluorescence) em 24,20 ft de profundidade da perfuração.



Fonte: GEOPROBE, 2021.

Sua utilização se dá para delimitação de produtos em fase líquida não aquosa especificamente de HPAs de petróleo e óleos. É utilizada uma fonte de luz ultravioleta (UV) para induzir a fluorescência presente no solo e uma luz branca visível, para a fotografia do solo. Uma câmera captura a imagem e é analisada para determinação da área percentual do campo de visão, chamada de percentual de fluorescência.

Segundo especificações da fabricante, o comprimento de onda de alcance do diodo emissor de luz UV (LED) utilizado no estudo é de 275 nanômetros (nm), e, de acordo com BUJEWSKI e RUTHERFORD (1997) para a detecção das substâncias químicas de interesse (SQI), é necessário comprimento de onda mínimo de 266 nm.

A luz ultravioleta faz com que os elétrons nas moléculas saltem para um estado de energia mais alta e, após um curto período, os elétrons voltem ao estado normal de energia mais baixa, liberando um fóton de luz (fluorescência) (ITRC, 2019). Em um segundo, é possível a captação de até 30 imagens com luz UV e luz visível e os resultados são dados em área de porcentagem de fluorescência por área total da imagem captada.

4.2.4 MEMBRANE INTERFACE PROBE (MIP)

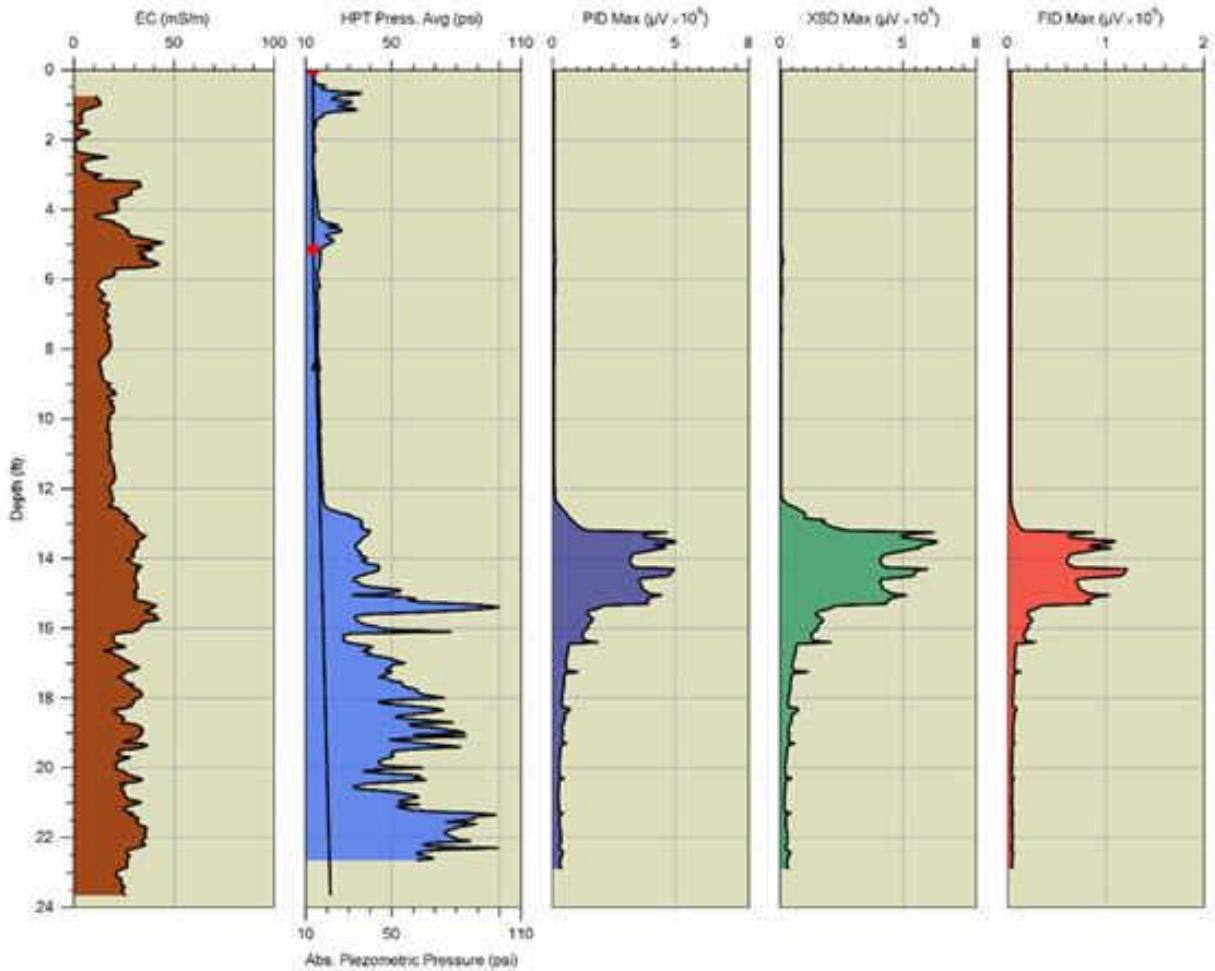
É uma tecnologia de pressão direta desenvolvida para registrar a concentração relativa de COVs a partir do aquecimento da sonda cravada em profundidade no solo que possui uma membrana permeável capaz de captar voláteis e leva-los até o cromatógrafo móvel para realizar leitura dos COVs e transportá-los, utilizando um gás inerte de arraste (normalmente nitrogênio) até os detectores portáteis de campo e realizar a medição dos mesmos, direcionando a origem do contaminante, o movimento de uma pluma, definindo a massa do contaminante para remediação ou investigando a eficácia de um tratamento de remediação.

Os detectores de campo são o photo-ionization detector (PID), adequado para ionizar a maioria dos compostos aromáticos, como o BTEX que identifica e quantifica hidrocarbonetos em suas cadeias. Este, tem pouca sensibilidade a hidrocarbonetos alifáticos e boa sensibilidade para COVs de ligações múltiplas, mas pouca sensibilidade para os de ligação simples.

Já o sensor flame-ionization (FID) provoca a combustão dos compostos trazidos pelo gás de arraste e um eletrodo coletor que atrai os íons negativos para o amplificador de elétrons para reprodução um sinal analógico. Geralmente apresenta ótima resposta para hidrocarbonetos alifáticos, além de ser altamente sensível ao metano.

A Figura 4 apresenta um perfil de solo homogêneo. Há uma leve alteração na compactação e aumento sólidos mais finos a partir de 12 ft, coincidentemente, onde apresenta o indicativo de contaminante nos 3 sensores, podendo ser ocasionado pela maior retenção nessa região.

Figura 4 – Log capturado, da esquerda para direita, sensores de EC, HPT, além de PID, XSD e FID com sinais a partir de 12 ft, remetendo a contaminantes clorados ou bromados.



Fonte: Adaptado de GEOPROBE, 2021.

5. RESULTADOS DA REVISÃO

Para atingir os objetivos propostos, foi realizado um levantamento bibliográfico de artigos e trabalhos anteriormente publicados referente ao gerenciamento de áreas contaminadas, com intuito de estruturar uma aplicação prática da metodologia de alta resolução.

Criação de cenários conceituais e teóricos elucidativos e utilização de dados disponíveis para interpretação e fundamentação do entendimento necessário para otimizar custos em um processo de investigação.

A análise e demonstração da eficácia da ferramenta será demonstrada através da correlação da utilização forma adequada, concomitante à correta interpretação dos dados, somada a informações disponíveis sobre o local. O emprego da ferramenta de investigação ambiental

(HRSC) se dá aos casos em que é necessário um entendimento por completo do local, da hidrogeologia, das fontes de contaminação e das formas de se mitigar essa problemática. Ou seja, quando se tem a real necessidade de compreender a área, como se visualizasse todo o perfil de solo abaixo dos pés em três dimensões, bem à frente.

Sem dúvidas, é necessária uma avaliação preliminar – ou entendimento de estudos anteriores – para elaboração do escopo e identificação da área como um todo, onde a atividade está situada é de extrema importância para compreensão macro pertinente a formação geológica e hidrogeológica da região de background (SILVA, 2005).

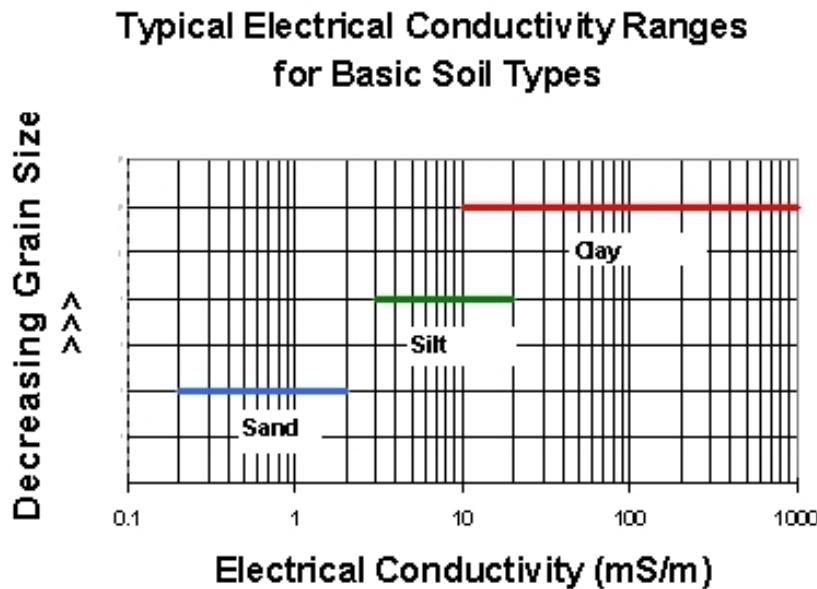
Em consonância, deve-se entender o local de interesse como um todo: desde antigas instalações, processos e *layouts*, até a estruturação mais recente ou atual, quando ativa. Essa junção de todos os dados técnicos do site (VOLZ, 2012) se faz essencial para nortear a localização de possíveis áreas fontes, mesmo que já desativadas ou desmobilizadas, para então, correlacioná-las com os dados obtidos.

Após conhecidos esses dados, é necessário definir a ferramenta a ser utilizada, para que os resultados e leituras sejam fiéis ao cenário. Optou-se por empregar o sistema MiHPT (combinação de MIP com HPT) e OiHPT (junção de OIP com HPT), em consonância ao sensor EC, em virtude dos resultados a serem apresentados pelas ferramentas.

Previamente as sondagens, é imprescindível realizar os testes de desempenho dos sensores PID, FID e XSD da ferramenta MIP com soluções de clorofórmio e butano conhecidas. Medição de fluorescência também são realizadas através da captação de figura visível, *black box*, óleo de motor e óleo de interesse no sensor OIP para valores esperados, além de teste de fluxo e pressão no HPT e condutividade elétrica do EC em latão e em aço, conforme recomendação e padrões estabelecidos pelo fabricante, minimizando assim, a probabilidade de erro na ferramenta e garantido confiabilidade nos resultados.

Os sensores de EC e HPT traçam respostas interpretáveis com base nas propriedades de formação do solo e de litologia. Granulometrias mais finas e compactas tendem a ocasionar maiores valores de EC e elevada pressão de injeção do HPT, enquanto sedimentos mais grosseiros e porosos normalmente indicam uma redução em ambos.

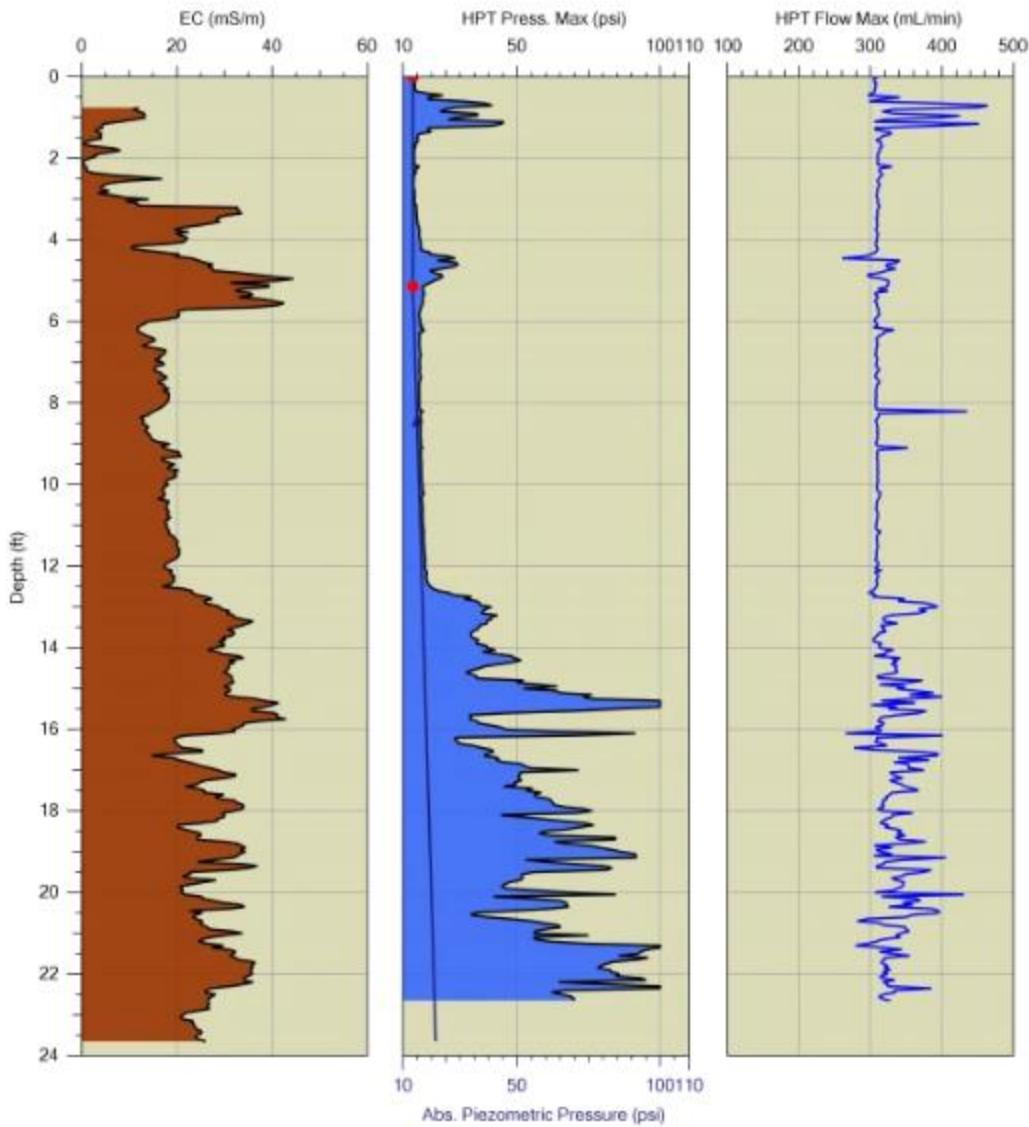
Figura 5 – Condutividade elétrica conforme refinamento do solo.



Fonte: GEOPROBE, 2021.

No HPT, além de medida da pressão necessária para injetar determinado fluxo de água conforme avança em profundidade, também pode ser usado para medir a pressão hidroestática sob a condição de fluxo zero (GEOPROBE, 2021). Neste caso, é realizado um teste de dissipação, onde, com a bomba de injeção desligada é possível traçar um perfil de pressão piezométrica absoluta, estimando assim, a posição do lençol freático.

Figura 6 – Estimativa de NA em 5 ft com base em teste de dissipação.

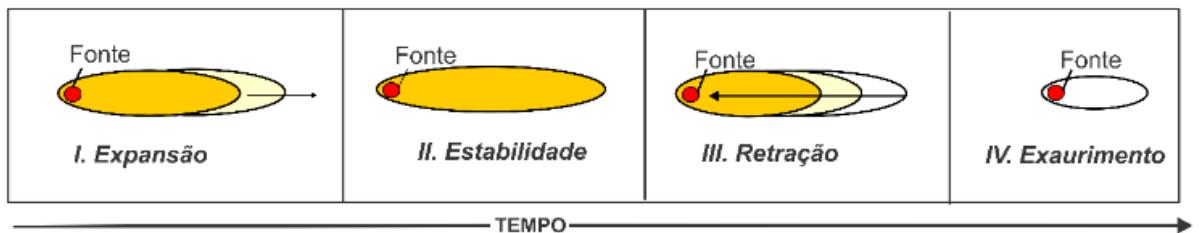


Fonte: GEOPROBE, 2021.

Além de se ter o conhecimento da região de estudo e identificar o a localização do nível de água, compreender o tipo de contaminante é fundamental para discernir uma contaminação mais recente de algo que já está em processo de deterioração a mais tempo. Por exemplo, o diesel e a gasolina intemperizados, possuem grande número de moléculas com ponto de ebulição mais alto que acarretam em maior tempo para ser dessorvidos (GEOPROBE, 2021), além de que muitos NAPLs podem ser subprodutos de compostos químicos orgânicos também oriundos do refino de petróleo (FETTER, 1999), entretanto, por tratar-se de uma mistura, além de hidrocarbonetos, podem conter fósforo, enxofre, nitrogênio e metais (FAUST & MONTROY, 1996).

No caso dos hidrocarbonetos monoaromáticos – conhecidos por BTEX – possuem uma quantidade maior de frações leves, designadas LNAPLs que, consequentemente, são mais solúveis e tóxicas por sua volatilidade ágil (SILVA, 2005). Nesse caso, sua presença, pode ser um indicativo de uma pluma mais recente, normalmente, em expansão (espalhamento e crescimento das concentrações) ou estabilidade (limitante de solubilidade) antes de atingir a retração (diminuição dos valores) e o exaurimento, como menciona TERAMOTO, BAESSA & CHANG 2019.

Figura 7 – Estágios de evolução de uma pluma por LNAPL.



Fonte: Adaptado de CONNOR *et al.* (2015)

Podemos também citar HPAs – compostos oriundos da inacabada combustão de carvão, madeira e derivados de petróleo – que, apesar de uma menor solubilidade e, por vezes, maior retenção próximo a fonte, são considerados substâncias semivoláteis, muito bem detectáveis conforme o aumento em sua cadeia carbônica.

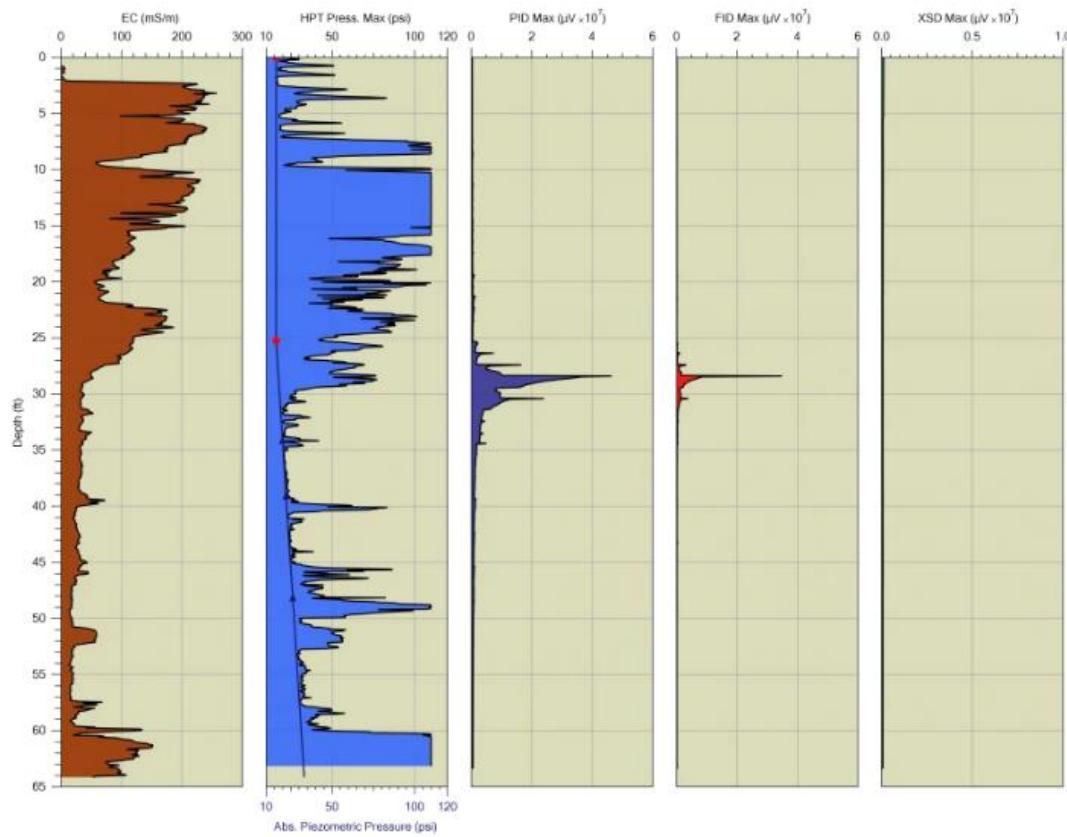
Em ambos os hidrocarbonetos – mono e poli – a detecção é clara quando se encontram em concentrações acima de 0,2 ppm. Cabe ressaltar que a ferramenta MiHPT não determina a quantificação do composto, mas serve como indicativo qualitativo da sua localização. As variáveis que influenciarão a resposta incluem tipo de solo, conteúdo de água, desgaste da membrana, produtos químicos presentes e possíveis misturas. (GEOPROBE, 2021)

I) Cenário 01:

Na Figura 8 é possível observar o registro de hidrocarbonetos nos sensores PID e FID – ausência de detecção em XSD devido ao tipo de componente – a partir de 25 ft e com indicativo da maior massa de contaminante até, aproximadamente, 32 ft com posterior redução e leve arraste até 35 ft. Em conjunto, os sensores de EC e HPT também apresentam uma mudança no tipo de solo nesta mesma profundidade, partindo de uma granulometria mais fina e de maior compactação, por isso a elevação da pressão de injeção – para uma mais grossa e menos permeável, como é o caso da transição de solo argiloso para um mais arenoso. Além disto, com

a linha preta desenhada sobre os dados de HPT é possível observar que um teste de dissipação foi realizado e o NA estima-se no topo da contaminação. A junção de todas estas informações nos direciona a interpretação de contaminante solubilizado no nível freático, provavelmente, algo mais recente, em expansão ou estabilidade. Pontos estratégicamente alocados ao entorno deste, indicarão onde há redução na escala ou aprofundamento dos sinais – indicado o sentido da borda da pluma – e onde há intensificação deles, remetendo assim, à área fonte.

Figura 8 – Detecção de hidrocarbonetos em PID e FID entre 25 e 35 ft.



Fonte: Adaptado de GEOPROBE, 2021.

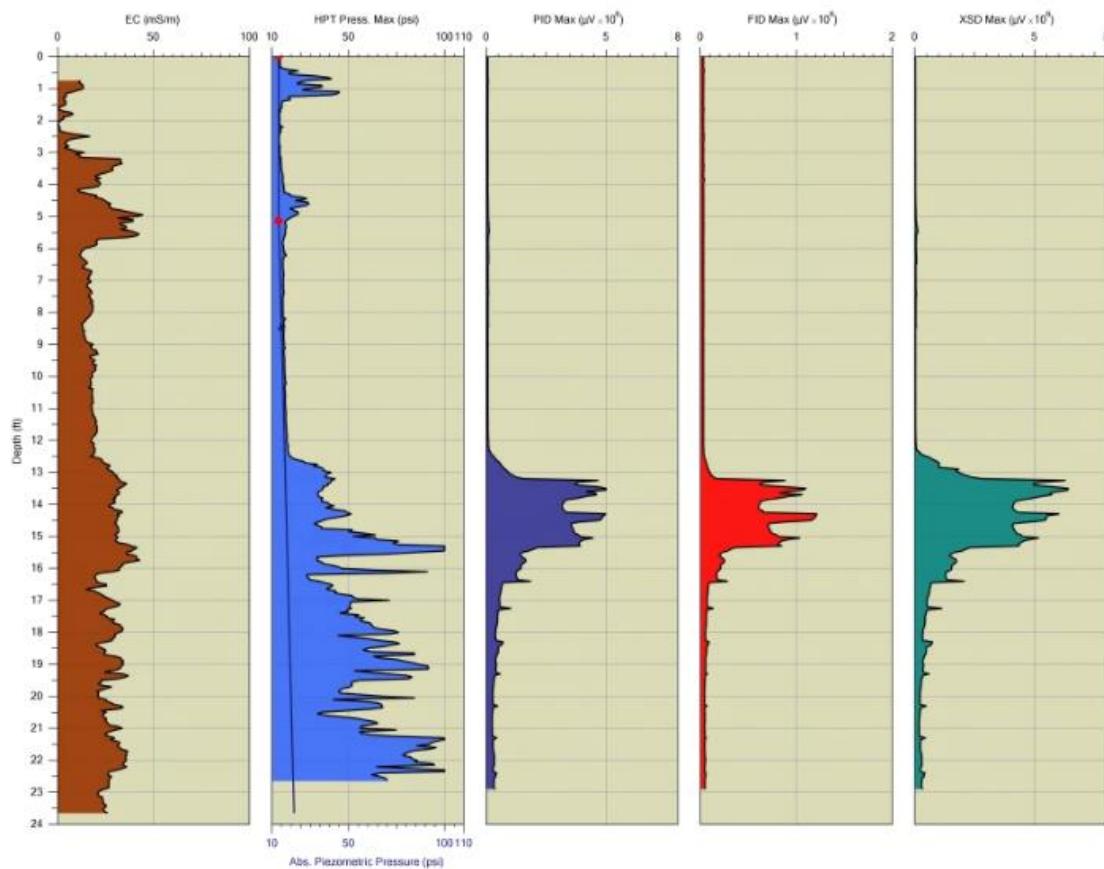
Destaca-se que o sensor FID responde a COVs que possuem concentração elevadas, devido a sua sensibilidade menor para analitos comuns do que outros detectores. Também é utilizado como resposta de confirmação em conjunto com o PID e o XSD, no entanto, é o detector primário para mapear os impactos do metano, uma vez que não aparece nos outros detectores (GEOPROBE, 2021).

Na presença de contaminantes identificáveis também no sensor XSD (a partir de 0,2 ppm), como é o caso dos halogenados – compostos por, ao menos um átomo do grupo dos halogênios, tais como cloro, iodo, flúor e bromo – indica-o como um excelente detector em plumas de mistura de combustível e solvente (GEOPROBE, 2021).

II) Cenário 2:

Neste segundo caso, há sinais nos três sensores entre 13 e 16 ft, remetendo a presença de organoclorados, por exemplo, principalmente por se tratar de um DNAPL e estar localizado metros abaixo do nível de água estimado que se encontra em, aproximadamente, 5 ft (Figura 9). Com base no aumento de pressão do HPT, é possível notar que a maioria da massa do contaminante está na porção superior de um nível menos permeável, considerada uma potencial camada de armazenamento, a qual facilita a retenção de solutos, principalmente os organoclorados mais densos, como é o caso do TCE, PCE, pesticidas, DDT.

Figura 9 – Sinais em PID, FID e XSD a partir de 13 ft.

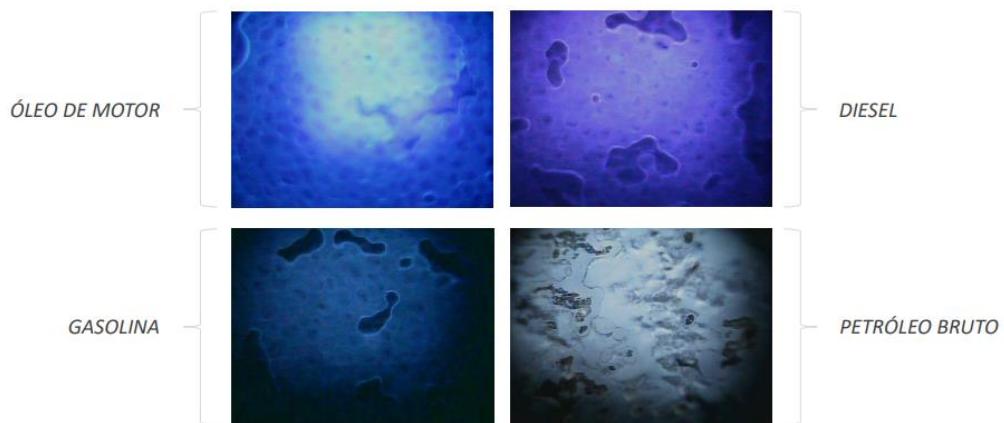


Fonte: Adaptado de GEOPROBE, 2021.

O sensor PID não é tão sensível a pequenas concentrações de clorados ADAMSOM *et al.* (2013) se comparado ao sensor XSD, por este motivo a redução no resultado apresentado em escala, ao comparar ambos. Já o sensor FID obtém uma resposta mais sensível e próxima quando se trata de compostos clorados, mesmo que em presença menor.

No caso de componentes imiscíveis em água ou que possuam NAPL residual, como combustíveis e óleos leves são de fácil detecção no sensor OiHPT, uma vez que possuem HPAs que fluorescem com a luz UV emitida pela sonda, conforme cada tipo de composto.

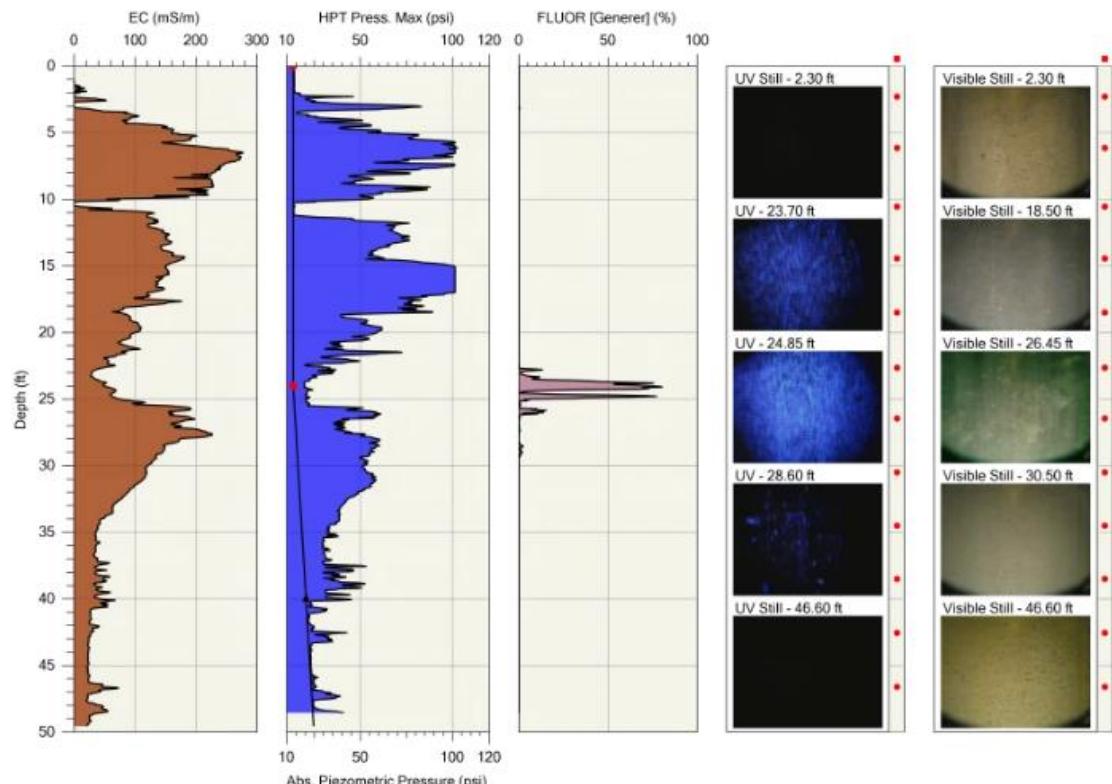
Figura 10 – Análise de cor conforme fluorescência do OIP.



Fonte: FINKLER.

Onde não há NAPL ou residual presente, as imagens capturadas são pretas. Já onde o NAPL de hidrocarboneto está presente, aparece a fluorescência azul (GEOPROBE, 2021).

Figura 11 – Captação de imagens em um log de OiHPT-UV.



Fonte: GEOPROBE, 2021.

Com base nas dez imagens capturadas – sendo, cinco pela lente UV com indicativos em alguns pontos de fluorescência e cinco pela lente visível em mesma profundidade – é possível observar fluorescência de produto a partir de 23,7 ft com pico em 24,85 ft e tendo seu fim em 28,6 ft. Coincidemente, este produto é encontrado junto ao NA estimado e têm a maioria de sua massa contaminante presente imediatamente acima de uma camada de argila (ADAMSON *et al.* 2013), ou seja, remete a um NAPL que se encontra sobrenadante em uma zona de fluxo.

Ou seja, tanto as respostas dos sensores de MiHPT, quanto de OiHPT devem ser analisadas em conjunto com os resultados de EC e HPT, estimativa de nível d'água local após teste de dissipação ou, ao menos, em NA histórico e variação com base no contexto histórico da área.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados obtidos *in loco* devem ser observados e manuseados através um olhar crítico de todo o contexto local para que seja peça chave na identificação precoce de problemas e interpretação eficaz dos dados (LANDALE, RICHARDS e BLICKLE, 2006). A ferramenta é de todo útil, extremamente avançada, mas não anula a necessidade de conhecimento e entendimento do correto uso para um bom desfecho.

O emprego da alta resolução – como MiHPT e OiHPT – principalmente, em *sites* de determinada complexidade ou urgência, permite a rápida descrição e mapeamento de centros de massa, limites de plumas de contaminação, além da hidroestratigrafia, delineando a presença de zonas de armazenamento e fluxo presentes na área, aditando um entendimento do potencial de migração e retenção de contaminantes que subsidia e norteia de forma mais eficaz etapas posteriores de investigação e confirmação, como instalação de poços e coletas de amostras.

Cabe ressaltar que informações analíticas de solo e água subterrânea são necessárias para complementação dos resultados, delimitação e quantificação da massa de contaminantes. As ferramentas trazem corretos subsídios à criação de modelos conceituais, com redução significativa de incertezas. Esse cenário reforça a eficiência da abordagem TRIAD com o extenuante planejamento sistemático para entendimento do local, estratégicas dinâmicas e corretas tomadas de decisão – direcionadas *on site* – com base em informações e mapeamento obtidos em tempo real que agregam redução significativa no tempo de execução, entrega e, consequentemente, diminuição nos custos de projeto e pessoal envolvido, demonstrando que esta abordagem é consideravelmente mais rentável do que confiar apenas em métodos tradicionais de investigação e dados analíticos de laboratório (RAVELLA *et al.* 2007).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMSON, D.T *et al.* **Membrane Interface Probe Protocol for Contaminants in Low-Permeability Zones. Groundwater.** NGWA. 2013. Disponível em: <https://www.academia.edu/33675895/Membrane_Interface_Probe_Protocol_for_Contaminants_in_Low_Permeability_Zones?pop_sutd=false>. Acesso em 30 nov 2021.
- BUJEWSKI, G., RUTHERFORD, B. **The rapid Optical Screening Tool (ROST) Laser-Induced Fluorescence (LIF) System for Screening of Petroleum Hydrocarbons in Subsurface Soils.** 1997. In: EPA Rep. EPA/600/R-97/020, Environmental Protection Agency, Washington/DC.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Decisão de diretoria nº 038/2017/C, de 07 de fevereiro de 2017.** Dispõe sobre a aprovação do “Procedimento para proteção da qualidade do solo e das áreas subterrâneas da revisão do “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” e estabelece “Diretrizes para Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental”. Diário Oficial do Estado de São Paulo, Poder Executivo, SP, 10 fev. 2017. Seção 1, p. 47-52. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/>>. Acesso em: 02 set 2021.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas.** 2º edição. São Paulo: 2001. 389 p.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução Nº 001, de 23 de janeiro de 1986.** Considera a necessidade de se estabelecerem as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. IBAMA, 23 jan. 1986
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução 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 União, 30 dez. 2009
- CLU-IN. **Characterization and Monitoring,** c2016. Introduction. Disponível em: <<https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/hrscintro.cfm>>. Acesso em: 09 set 2021.
- CLU-IN (EPA). **Technologies.** Characterization and Monitoring. About Characterization and Monitoring Technologies. HRSC. HRSC Introduction. What is HRSC? Characterization and Monitoring. Disponível em: <<https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/hrscintro.cfm#introwhy>>. Acesso em 27 set 2021.
- CONNOR, J. A. *et al.* **Review of quantitative surveys of the length and stability of MTBE, TBA, and benzene plumes in groundwater at UST sites.** Groundwater, v, 53, n, 2, p, 195-206, 2015.
- FAUST, C. R.; MONTROY, M. O. **How to Effectively Recover Free Product at Leaking Underground Storage Tank Sites: A guide for state regulators.** EPA/510/R/96/001, USEPA, 1996.

FETTER, C. W. **Contaminant Hydrology**. Macmillan Publishing Co, New York, NY, 1999, 498 p.

FINKLER. **OIP – Optical Image Profiler**. Tecnologia de investigação de alta resolução (HRSC). Disponível em: <http://www.finklerambiental.com.br/pdf/apresentacao_oip.pdf>. Acesso em 04 nov 2021.

FREITAS, L. G. et al. **Aplicação de técnicas direct push para caracterização litoestratigráfica de alta resolução em ambiente aluvionar**. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Revista Águas Subterrâneas. October 2017.

GEOPROBE. Geoprobe direct image, c2021. **Direct Image**. Disponível em: <<https://geoprobe.com/geoprobe-direct-image>>. Acesso em: 02 set 2021.

HART, S. T. et al. **Temporal conceptual model of contaminated complex sites applied for the management of a former supply well area in tropically weathered bedrock**. Sustainable Water Resources Management [S.l.], n., p. -, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40899-021-00488-x>>. Acesso em 29 nov 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Panorama do setor de gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil**. 2016. Disponível em: <http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CTGeo/livros/60-panorama_do_setor_de_gerenciamento_de_areas_contaminadas_no_brasil.htm>. Acesso em 27 set 2021.

INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL (ITRC). Technical/Regulatory Guidance. **Technical and Regulatory Guidance for the Triad Approach: A New Paradigm for Environmental Project Management**. December 2003. Disponível em: <<https://itrcweb.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=8a60049b-349c-44fa-be1b-6efc082f587b&forceDialog=0>>. Acesso em 27 set 2021.

INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL (ITRC). Technical/Regulatory Guidance. **Implementing Advanced Site Characterization Tools**. December 2019. Disponível em: <https://asct-1.itrcweb.org/asct_full_pdf_12_15_19.pdf>. Acesso em 26 set 2021.

LANDALE, B.; RICHARDS, K. A.; BLICKLE, F. W. **Rapid, Continuous Profiling of Stratigraphy and VOC Contaminants Using MIP Technology**. Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. Proceedings of the Fifth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. Monterey, CA. May 2006.

MOREIRA, C. A.; DOURADO, J. C. **Análise de contaminantes de fase líquida não aquosa (NAPLs) por aplicação do método eletromagnético indutivo (EM)**. Revista Brasileira Geofísica, v. 23, n. 3, jul/set 2005. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbg/a/Yzh8rYQgry4Ppy4w6SYp6LC/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 06 set 2021.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **A ONU e o meio ambiente**, [s.d.]. Meio Ambiente. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>>. Acesso em: 08 set 2021.

RAVELLA, M. et al. **Application of the Membrane Interface Probe (MIP) to delineate subsurface dnapl contamination**. American Academy of Environmental Engineers and Scientists. Environmental Engineer: Applied Research and Practice. Volume I. 2007.

RIYIS, M. T., DERRITE, R. M. **Investigação de alta resolução (HRSC) para estimativa do fluxo de massa em área contaminada por solventes clorados em Jurubatuba.** 2019. Águas Subterrâneas. Disponível em: <<https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.29648>>. Acesso em 27 out 2021.

RIYIS, M. T. **Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução.** Marcos Tanaka Riyis. -. 2012. 149 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/92963>>. Acesso em 27 out 2021.

RIYIS, M. T. et al. **Investigação geoambiental de áreas contaminadas com elaboração do modelo conceitual em campo utilizando ferramentas de alta resolução (HRSC).** Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. 3, n. 1, p. 125-137, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/135309>>. Acesso em 26 out 2021.

SANTOS, A. D. et al. **Aprimoramento do modelo conceitual da área através do uso de ferramentas de investigação de alta resolução.** InterfacEHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade, São Paulo: Centro Universitário SENAC, v. 10, n. 2, p. 3-22, dez. 2015. Disponível em: <<http://www3.sp.senac.br/hotsites/>>. Acesso em: 02 set 2021.

SILVA, A. B. L. **Investigação Geoambiental de uma Área Contaminada por Resíduos Industriais.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005.

SOUSA, L. F. A., RIYIS, M. T. **Aquisição de dados para confecção de modelo conceitual: investigação convencional versus investigação de alta resolução.** 2021. Águas Subterrâneas. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29316>>. Acesso em 26 out 2021.

TEIXEIRA, C. E.; MOTTA, F. G.; MORAES, S. L. Panorama GAC [livro eletrônico]: **mapeamento da cadeia de gerenciamento de áreas contaminadas/organização.** 1. ed.; São Paulo. IPT, 2016. (Publicação IPT; 3024)

TERAMOTO, E. H.; BAESSA, M. P. M.; CHANG, H. K. **Simulações da migração de plumas dissolvidas de compostos BTEX geradas por LNAPL trapeado.** 2019. Águas Subterrâneas, 33(3), 280–291. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29529>

VOLZ, C. **Conceptual Site Models for Exposure Assessment.** Lecture 2, Part 1. Disponível em <http://www.chec.pitt.edu/Lecture%202_Part_1_Conceptual%20Site%20Models_volz.pdf>. Acesso em: 28 out 2021.