

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

MARCOS VINÍCIUS CORRÊA GARCIA

**Rastreabilidade dos dados e controles de qualidade da Sonda de Interface
de Membrana (MIP) e a Ferramenta de Perfis Hidráulicos (HPT) na
investigação de áreas contaminadas**

São Paulo
2024

MARCOS VINÍCIUS CORRÊA GARCIA

Rastreabilidade dos dados e controles de qualidade da Sonda de Interface de Membrana (MIP) e a Ferramenta de Perfis Hidráulicos (HPT) na investigação de áreas contaminadas

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.

Orientadora: Natalia de Souza Pelinson

São Paulo
2024

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

Catálogo-na-publicação

Garcia, Marcos Vinícius Corrêa

Rastreabilidade dos dados e controles de qualidade da Sonda de Interface de Membrana (MIP) e a Ferramenta de Perfis Hidráulicos (HPT) na investigação de áreas contaminadas / M. V. C. Garcia -- São Paulo, 2024.
36 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.Ferramentas de tecnologia de investigação de alta resolução 2.Controle de qualidade 3.Rastreabilidade 4.ABNT NBR 15515-2:2023 I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

RESUMO

Garcia, Marcos Vinícius Corrêa. **Rastreabilidade dos dados e controles de qualidade da Sonda de Interface de Membrana (MIP) e a Ferramenta de Perfis Hidráulicos (HPT) na investigação de áreas contaminadas.** 2024. 36 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Este trabalho aborda o papel fundamental do controle de qualidade e rastreabilidade na investigação geoambiental, especialmente ao utilizar ferramentas de tecnologia de investigação de alta resolução Membrane Interface Probe (MIP) e Hydraulic Profiling Tool (HPT) desenvolvidos pela Geoprobe, apresentando os controles de qualidade necessários para validar cada registro obtido durante as investigações, garantindo a integridade dos dados coletados assim como a rastreabilidade das informações contidas no arquivo INF, garantindo que todas as etapas do processo de utilização da ferramenta desde a verificação dos sensores, coleta e análise final dos dados (pré teste, operação e pós teste) estejam documentados. Para demonstrar esse processo foram selecionados registros de duas sondagens utilizando a sonda MIP durante a investigação ambiental de uma área com a presença de Compostos Orgânicos Voláteis (COV). Esses Logs foram selecionados por apresentarem diferentes respostas no teste de performance, resultando em um comportamento distintos dos sensores PID e FID em especial o sensor XSD ao longo da sondagem. Também foi realizada uma análise crítica sobre o uso da ferramenta PID manual para a seleção de amostragem conforme a norma ABNT. NBR 16.434 – Amostragem de resíduos sólidos, solos e sedimentos – Análise de compostos orgânicos voláteis (COV) – Procedimento. É importante destacar que essas tecnologias de investigação foram incorporadas na nova ABNT NBR 15515-2:2023 Passivo ambiental em solo e água subterrânea Parte 2: Investigação confirmatória. Ao comparar os dois métodos, observou-se que o uso da sonda MIP, oferece uma vantagem significativa na obtenção de dados precisos e detalhados sobre as condições geoambientais, uma vez que existem procedimentos operacionais documentados e validados lastreados pela norma americana ASTM D7352-07 (*Standard Practice for Direct Push Technology for Volatile Contaminant Logging with the Membrane Interface Probe - MIP*).

Palavras-chave: Ferramentas de tecnologia de investigação de alta resolução; Controle de qualidade; Rastreabilidade; ABNT NBR 15515-2:2023.

ABSTRACT

Garcia, Marcos Vinícius Corrêa. **Data traceability and quality controls of the Membrane Interface Probe (MIP) and the Hydraulic Profiling Tool (HPT) in the investigation of contaminated areas.** 2024. 36 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

This work addresses the fundamental role of quality control and traceability in geo-environmental investigation, especially when using high-resolution investigation technology tools such as the Membrane Interface Probe (MIP) and Hydraulic Profiling Tool (HPT) developed by Geoprobe. It presents the necessary quality controls to validate each record obtained during the investigations, ensuring the integrity of the collected data as well as the traceability of the information contained in the INF file, guaranteeing that all steps of the tool usage process, from sensor verification to data collection and final analysis (pre-test, operation, and post-test), are documented. To demonstrate this process, records from two boreholes using the MIP probe during the environmental investigation of an area with Volatile Organic Compounds (VOCs) presence were selected. These logs were chosen for presenting different responses in the performance test, resulting in distinct behavior of the PID and FID sensors, especially the XSD sensor along the borehole. A critical analysis was also performed on the use of manual PID tool for sampling selection according to the Brazilian standard ABNT NBR 16.434 - Sampling of solid waste, soils, and sediments - Analysis of volatile organic compounds (VOCs) - Procedure. It is important to highlight that these investigation technologies have been incorporated into the new ABNT NBR 15515-2:2023 Environmental passive in soil and groundwater Part 2: Confirmatory investigation. When comparing the two methods, it was observed that the use of the MIP probe offers a significant advantage in obtaining precise and detailed data on geo-environmental conditions, since there are documented and validated operational procedures based on the American standard ASTM D7352-07 (Standard Practice for Direct Push Technology for Volatile Contaminant Logging with the Membrane Interface Probe - MIP).

Keywords: High-resolution investigation technology tools; Quality control; Traceability; ABNT NBR 15515-2:2023

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da Sonda MIP	11
Figura 2 - Representação do funcionamento do Detector de Fotoionização (PID).....	12
Figura 3 - Representação do funcionamento do Detector de Ionização de Chama (FID).....	13
Figura 4 - Representação do funcionamento do Detector de Halógeno Específico (XSD).....	15
Figura 5 - Representação do funcionamento do Sensor de Condutividade Elétrica	16
Figura 6 - Representação do funcionamento do Sensor de Condutividade Hidráulica do Solo	17
Figura 7 - Verificação de Trip time.	19
Figura 8 - Verificação da resposta dos detectores, linhas de base e ruído.	20
Figura 9 Respostas nos Detectores PID, FID e XSD dos LOGs MiHPT - EX01 e MiHPT - EX02.....	22
Figura 10 - Respostas sobrepostas dos registros dos detectores PID (verde) e XSD (roxo) e respostas no detector XSD (roxo) dos LOGs MiHPT - EX01 e MiHPT - EX02, para avaliação comparativa entre as magnitudes dos sinais.....	24
Figura 11 - Testes de performance com TCE a 1 ppm no detector XSD dos LOGs MiHPT - EX01 e MiHPT - EX02.	25
Figura 12 - Testes de performance com TCE a 1 ppm no detector XSD dos LOGs MiHPT - EX01 (preto) e MiHPT - EX02 (verde).....	25
Figura 13 - Projecção dos detectores PID e FID dos LOGs MiHPT - EX01 e MiHPT - EX02 e informação de alarme registrado no INF file, informando a temperatura fora da faixa de trabalho.	27
Figura 14 - Procedimento de Triagem e amostragem através de amostadores liner e detector PID.....	31

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	8
2.	OBJETIVOS	9
3.	JUSTIFICATIVA	9
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
4.1	Novas abordagens para investigação de áreas contaminadas	9
4.2	Modelo Conceitual da Área	10
4.3	Tecnologia de Investigação de Alta Resolução	10
4.3.1	Sonda <i>Membrane Interface Probe</i> (MIP)	11
4.3.2	Fotodetector de Ionização (PID).....	12
4.3.3	Detector de Ionização de Chama (FID)	13
4.3.4	Detector Específico de Halogênio (XSD)	14
4.3.5	Condutividade Elétrica (EC)	15
4.3.6	Hydraulic Profiling Tool (HPT)	16
5.	MATERIAL E MÉTODOS.....	17
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
6.1	Controle de Qualidade e testes de performance	18
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1. INTRODUÇÃO

A qualidade dos dados obtidos em investigações ambientais apresenta relevante importância para uma compreensão precisa e abrangente das condições do subsolo de uma área possivelmente contaminada. O avanço tecnológico no campo da amostragem ambiental tem proporcionado uma gama de ferramentas e métodos, cada um com seus próprios benefícios e desafios. Com a atualização da norma ABNT NBR 15515-2:2023, foram incorporadas técnicas e ferramentas de respostas rápida (em inglês “*screening*”) que auxiliam na seleção de amostragens ambientais (ABNT, 2023).

A referida norma técnica ABNT NBR 15515-2:2023, em sua Tabela 1, possui uma lista de ferramentas de respostas rápidas que compõem linhas de evidência de investigação confirmatória, entre elas, a que vamos destacar nesse trabalho a ferramenta MIP (*Membrane Interface Probe*) da Geoprobe. Essa ferramenta emergiu como uma abordagem inovadora para a coleta de dados em subsuperfície, apresentando vantagens significativas em comparação com os métodos tradicionais de como, por exemplo, a seleção de amostras através do equipamento com Detector de Fotoionização conhecido pela sigla PID (do inglês “*Photoionization Detector*”) manual.

A necessidade crítica de garantir a confiabilidade, precisão e rastreabilidade dos dados ambientais, desempenha um papel importante na gestão de áreas contaminadas, uma vez que as informações obtidas assegurem que as estratégias de investigação são confiáveis e assegurem que os potenciais riscos à saúde humana e o meio ambiente possam ser mapeados foram devidamente mapeados, em consonância a Lei Federal nº 6.938/1981 (Brasil, 1981), Decreto Federal nº 97.632/1989 (Brasil, 1989), Lei Estadual nº 13.577/2009 (ALESP, 2009), Decreto Estadual nº 59.263/2013 (ALESP, 2013) e Resolução CONAMA nº 420/2009 (CONAMA, 2009), garantindo qualidade do meio ambiente, uso sustentável dos recursos ambientais assim como a segurança jurídica e financeira dos usos propostos.

Dentro desse contexto, esse trabalho elucida os fundamentos teóricos e práticos que da ferramenta MIP, destacando suas vantagens em termos de eficiência, precisão, e rastreabilidade na aquisição dos dados.

Além disso, serão comparadas as características e desafios associados à amostragem por PID manual, proporcionando uma análise crítica que visa fornecer um direcionamento para a tomada de decisões na escolha de métodos a serem utilizados na investigação de áreas contaminadas.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi apresentar as rotinas de verificação dos controles de qualidade da ferramenta MIP da Geoprobe utilizada para a execução de uma Investigação Ambiental, assim como realizar uma análise crítica aos controles de qualidade existentes na ferramenta PID Manual.

3. JUSTIFICATIVA

Com a aprovação da revisão da norma ABNT NBR 15515-2:2023 “Passivo ambiental em solo e água subterrânea Parte 2: Investigação confirmatória”, muitas estratégias de investigação ambiental passam a ser validadas, entre elas a incorporação de novas ferramentas de detecção rápidas, dentre elas o uso da ferramenta MIP. Cabe ressaltar que todas as ferramentas apresentam potencialidades e limitações em seu uso, porém é importante que a rastreabilidade e controle de qualidade na aquisição dos dados, deva ser um fator a ser considerado na escolha da ferramenta a ser utilizada para as investigações de passivos ambientais. Os resultados obtidos com a aplicação dessas ferramentas subsidiam a geração e ou alteração de modelos conceituais da área (MCA), melhorando a resolução dos estudos e fomentando a adoção de estratégias de gestão dessas áreas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Novas abordagens para investigação de áreas contaminadas

Um dos destaques da atualização da norma ABNT NBR 15515-2:2023, foi a integração de técnicas e ferramentas de resposta rápida (*screening*), as quais desempenham um papel relevante para a seleção de amostras ambientais representativas. Estas novas abordagens buscam uma investigação mais dinâmica e eficiente, trazendo alguns conceitos como o de *Smart Characterization* e TRIAD.

A Smart Characterization é uma metodologia adaptativa de investigação do solo e da água subterrânea, empregando diversas ferramentas para coletar dados qualitativos e quantitativos. Seu objetivo principal é mapear com precisão as concentrações e a permeabilidade na subsuperfície. Essa abordagem caracteriza-se por uma investigação de alta resolução, ou seja, com uma elevada densidade de dados (Suthersan; Quinnan; Welty, 2015).

A abordagem TRIAD, é realizada através da análise conjunta de três fatores, sendo estes o planejamento sistemático, estratégias dinâmicas de trabalho e medições em tempo real (Crumbling, 2004).

Essencialmente, essa abordagem compreende conceitos previamente estabelecidos, combinados para formar um novo paradigma na gestão de projetos ambientais. Ela está intrinsecamente ligada aos avanços tecnológicos, científicos e de processos, promovendo melhorias potenciais na qualidade e redução de custos, resultando em benefícios significativos e de valor incalculável (ITRC, 2019).

4.2 Modelo Conceitual da Área

Conforme apresentado através do Manual de Gerenciamento de Áreas contaminadas da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB, o Modelo Conceitual da Área, tem como objetivo geral, representar os componentes dos caminhos de exposição, ou seja, as fontes de contaminação primárias, o centro de massa da contaminação, as plumas de contaminação, as fontes de contaminação secundárias e os bens a proteger, assim como as características dos compartimentos do meio ambiente (CETESB, 2021). Este modelo é elaborado em etapas conforme avanço da etapa de investigação e deve ser complementado buscando diminuir incertezas para uma gestão assertiva da área em questão.

Outro aspecto importante que o Manual aborda dentro da etapa de Investigação Confirmatória se refere aos resultados da investigação para o direcionamento das amostragens, que devem contemplar (CETESB, 2021):

- descrição das incertezas que levaram à adoção de métodos de investigação prévios à atividade de amostragem da Investigação Confirmatória;
- descrição dos métodos de investigação utilizados;
- apresentação dos resultados das investigações para direcionamento das amostragens;
- descrição das decisões tomadas para posicionar os pontos de amostragem da Investigação Confirmatória

Além da importância para o subsídio técnico no direcionamento das amostragens ambientais, o uso das tecnologias de investigação de Alta Resolução foi inserido na revisão da norma ABNT NBR 15515-2:2023, o que tornou o uso dessas técnicas e ferramentas particularmente significativo dentro do gerenciamento de áreas contaminadas.

4.3 Tecnologia de Investigação de Alta Resolução

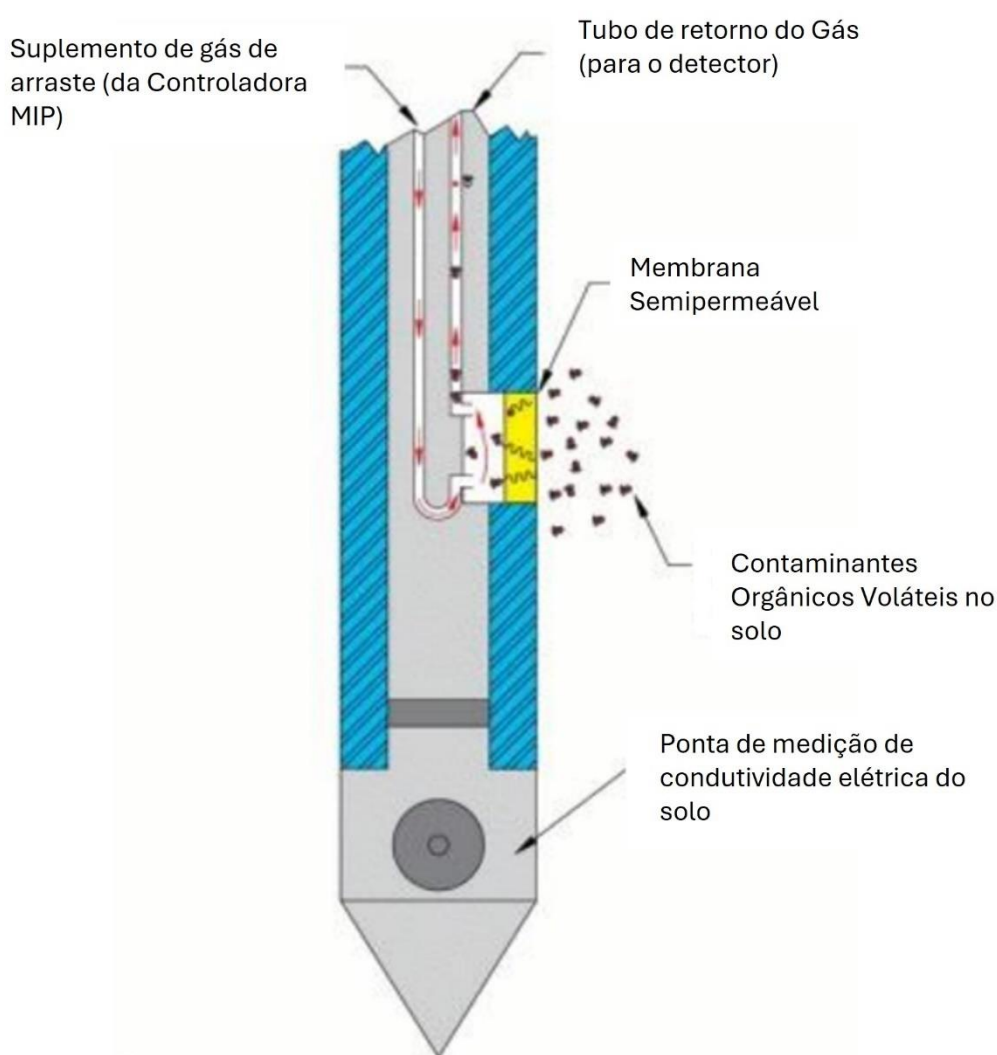
A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) destaca que os HRSCs (*High-Resolution Site Characterization*) oferecem abordagens de remediação mais eficientes e

certeiras. Isso ocorre devido à capacidade desses métodos em reduzir as incertezas, uma vez que conseguem adquirir informações precisas e detalhadas do ambiente físico (CLU-IN, 2023).

4.3.1 Sonda *Membrane Interface Probe* (MIP)

Conforme apresentado por GEOPROBE (2020), A sonda MIP (*Membrane Interface Probe*) (Figura 1) é uma ferramenta desenvolvida para realizar o registro da concentração relativa Compostos Orgânicos Voláteis (COV), oferecendo medições em tempo real enquanto a sonda é inserida na subsuperfície.

Figura 1 - Representação da Sonda MIP



Fonte: Adaptado de Geoprobe (2020)

A partir cravação da sonda contínua em subsuperfície, a sonda aquece o solo que a uma temperatura de aproximadamente 100°C através de uma placa de aquecimento. Os compostos orgânicos voláteis sob um gradiente de concentração (fluxo contínuo de gás transportador inerte), se movem através da membrana semipermeável por meio de difusão através de uma

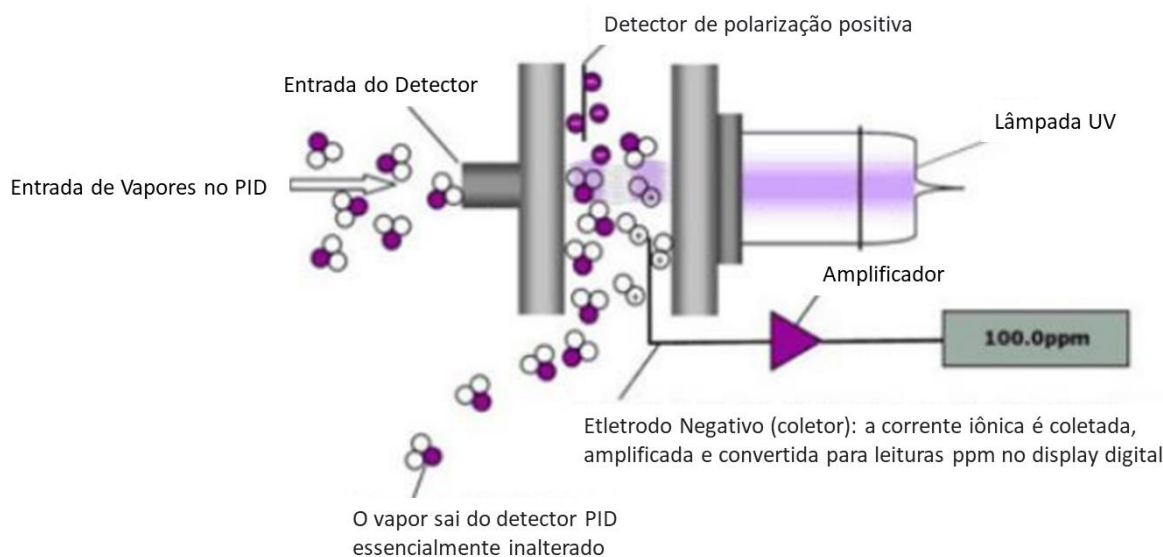
linha tronco e são direcionados para um arranjo de detectores na superfície configurados em um cromatógrafo móvel (GEOPROBE, 2020).

Uma vez que os gases passam pelos sensores as leituras são convertidas em registros gráficos, e através de um equipamento acoplado (*stringpot*), pode-se então distribuir os registros dos detectores de acordo com a respectiva profundidade, gerando assim um log de MIP do perfil, onde as respostas dos detectores químicos, como PID, FID e XSD, são registradas em μV , fornecendo indicações das concentrações relativas da contaminação presentes ao longo do perfil vertical do solo (MILANI & CARVALHO, 2021).

4.3.2 Fotodetector de Ionização (PID)

O primeiro sensor no qual os gases com os compostos orgânicos voláteis são submetidos é o sensor Fotodetector de Ionização (PID do inglês “*Photo Ionization Detector*”) (Figura 2), este sensor não é destrutivo, dessa forma os gases após passarem por ele são direcionados aos demais sensores (GEOPROBE, 2020).

Figura 2 - Representação do funcionamento do Detector de Fotoionização (PID)



Fonte: Adaptado de Geoprobe (2020)

Como princípio de funcionamento, o gás transportador flui através da câmara de ionização dos detectores, onde é constantemente exposto à luz ultravioleta de alta energia. Quando compostos orgânicos voláteis (COV) estão presentes e possuem um potencial de ionização inferior à energia da irradiação (10,6 eV), ocorre a ionização desses compostos. Os íons formados por este processo são direcionados para um eletrodo coletor, gerando uma

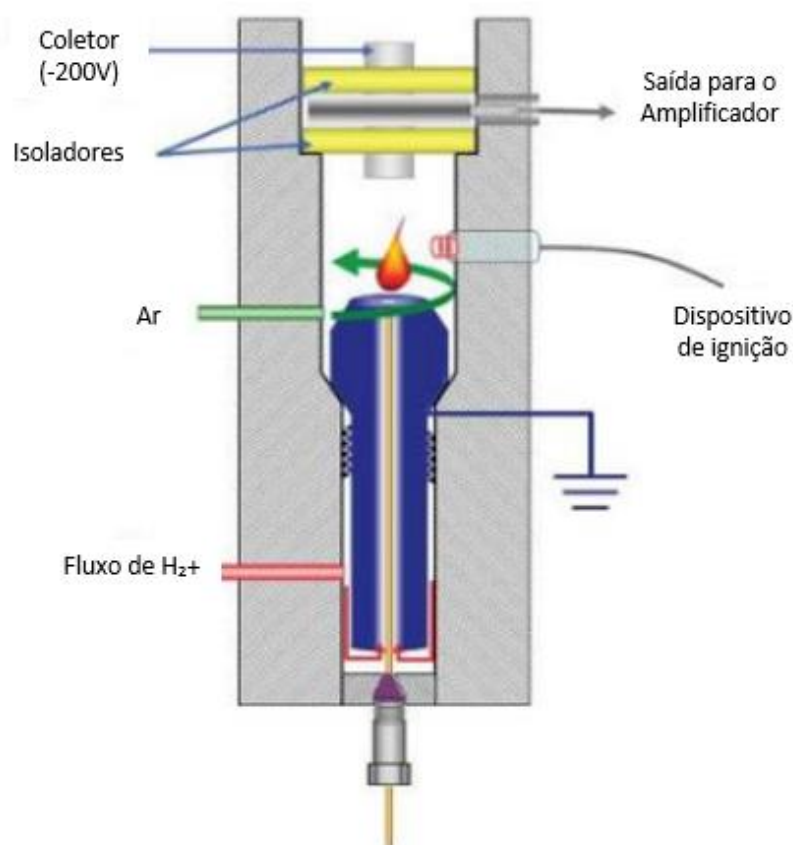
corrente iônica proporcional à massa do composto. A corrente resultante é amplificada, e o sinal de saída é transmitido para o controlador MIP para a produção de registros (GEOPROBE, 2020).

4.3.3 Detector de Ionização de Chama (FID)

Uma vez submetidos ao detector PID, o fluxo de gases é direcionado aos sensores Detector Específico de Halógeno (XSD do inglês “Halogen Specific Detector”) e Detector de Ionização de Chama (FID do inglês “*Flame Ionization Detector*”). No sensor FID (Figura 3), os analitos presentes na corrente do gás transportador do MIP são queimados em uma chama de hidrogênio, resultando na formação de cátions e elétrons.

Conforme apresentado por Geoprobe (2020) o princípio de funcionamento desse detector ocorre da seguinte forma, os íons positivos são atraídos para um coletor com polaridade negativa, enquanto os elétrons, carregados negativamente, são repelidos em direção ao fluxo. Os produtos, ionizados após a queima, atravessam um eletrodo, gerando uma corrente que é convertida em um sinal de voltagem e enviado ao controlador MIP para o registro de dados (GEOPROBE, 2020).

Figura 3 - Representação do funcionamento do Detector de Ionização de Chama (FID)



Fonte: Adaptado de Geoprobe (2020)

A saída de voltagem é diretamente proporcional à quantidade de massa de moléculas à base de carbono presentes no gás transportador, ou seja, o sinal de voltagem gerado pelo FID é dependente da massa (GEOPROBE, 2020). Cabe destacar que, por ser um detector destrutivo, o FID é frequentemente posicionado em série após o PID ou configurado como um detector independente.

4.3.4 Detector Específico de Halogênio (XSD)

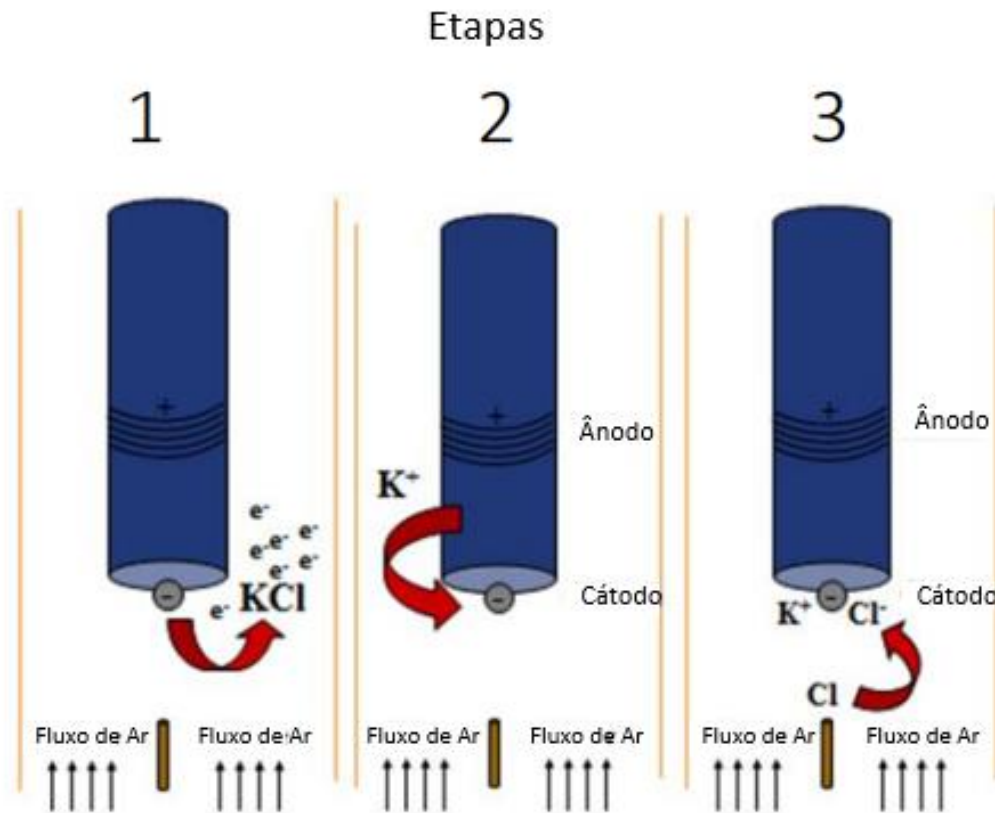
Como mencionado anteriormente, o Detector Específico de Halógeno (XSD) encontra-se posicionado posterior ao detector PID e, assim como o Detector FID, é um Detector destrutivo. No Detector XSD, o reator opera em modo oxidativo, conduzindo a pirólise do gás transportador do MIP. Essa pirólise oxidativa converte eficientemente compostos que contêm halogênios em seus produtos de oxidação e átomos de halogênio livres (GEOPROBE, 2020).

A superfície catódica é ativada pela neutralização de íons alcalinos emitidos pela superfície anódica. A adsorção e reação dos átomos de cloro livre com essa superfície catódica, sensibilizada pelo álcali, resultam em uma emissão termiônica aumentada, composta por elétrons livres e íons de halogênio. A corrente total é medida pelo eletrodo e, geralmente, é convertida em um sinal de saída de 0-1 V (GEOPROBE, 2020).

A presença de oxigênio no reator serve para oxidar os analitos e liberar os átomos de halogênio de suas moléculas parentais. Esse processo de oxidação faz com que a resposta do XSD seja em grande parte independentemente do tipo de molécula (por exemplo, hidrocarboneto de cadeia linear, hidrocarboneto aromático etc.).

A resposta do XSD é dependente da taxa de fluxo e corresponde ao tempo de residência do analito dentro do volume do detector - quanto maior a taxa de fluxo total, menor o tempo disponível para o analito adsorver na superfície catódica e gerar uma resposta, ou seja, a emissão de elétrons (medida como uma corrente e constituindo o 'sinal'). De tal forma pode-se concluir que a resposta é praticamente inversamente proporcional à taxa de fluxo total de gás através do detector (GEOPROBE, 2020). Na Figura 4, pode ser visualizada uma representação do funcionamento do detector XSD, com as etapas descritas anteriormente.

Figura 4 - Representação do funcionamento do Detector de Halógeno Específico (XSD)



Fonte: Adaptado de Geoprobe (2020)

4.3.5 Condutividade Elétrica (EC)

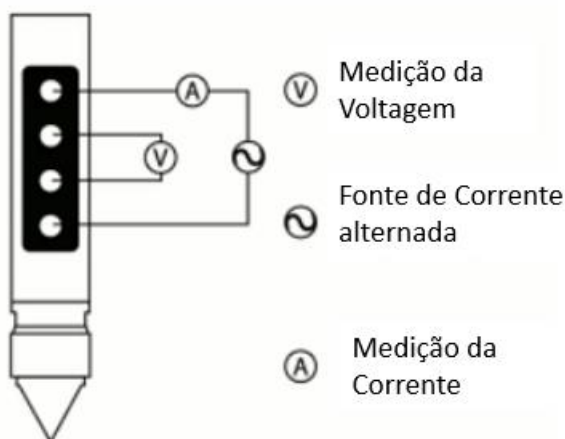
A condutividade elétrica (EC do inglês “Electric Conductivity”) e resistividade do solo (o inverso da condutividade elétrica) são parâmetros amplamente utilizadas para classificar solos. A medição da condutividade elétrica é efetuada por meio de um arranjo de dipolo, neste caso específico, localizado na extremidade da sonda MIP. O instrumento de campo induz uma corrente através do dipolo elétrico e da carcaça da sonda à medida que penetra no solo. O sistema registra tanto a corrente elétrica quanto a voltagem, e a partir desses parâmetros, calcula a condutividade elétrica.

O sensor de condutividade elétrica da sonda funciona através do seguinte princípio, uma corrente é enviada através da formação entre dois contatos da sonda. Essa corrente é medida juntamente com a voltagem resultante. A condutividade então é encontrada através da razão entre a corrente e a voltagem multiplicada por uma constante, e seu valor é expresso em miliSiemens por metro (mS/m) (GEOPROBE, 2015).

A representação esquemática do princípio de funcionamento desse sensor pode ser visualizada através da figura 5.

De modo geral, espera-se que uma condutividade elétrica mais elevada seja o indicativo da presença de sedimentos mais finos, como siltes e argilas, enquanto areias e cascalhos apresentam condutividades notavelmente mais baixas. A presença de contaminantes iônicos no solo ou em fluidos porosos resultará em um aumento na condutividade medida (GEOPROBE, 2021).

Figura 5 - Representação do funcionamento do Sensor de Condutividade Elétrica



Fonte: Adaptado de Geoprobe (2015)

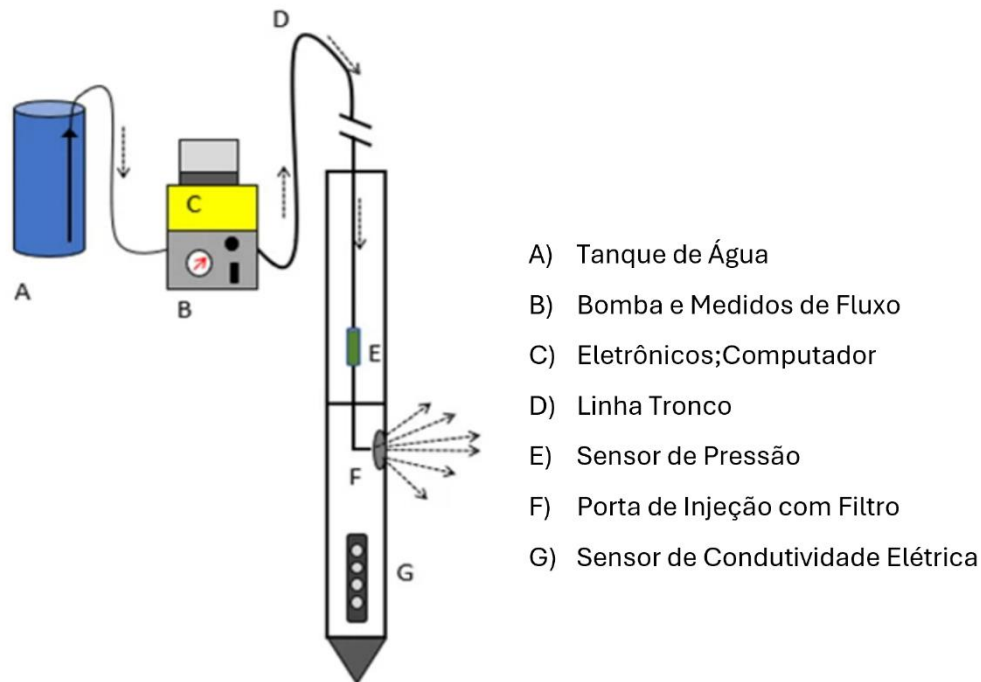
4.3.6 Hydraulic Profiling Tool (HPT)

A Ferramenta de Perfil Hidráulico tem como objetivo a caracterização e mapeamento das unidades hidroestratigráficas por meio da medição da condutividade hidráulica do solo. O equipamento foi desenvolvido para avaliar o comportamento hidráulico do solo (GEOPROBE, 2021).

Acoplado a sonda MIP, Optical Image Profiler (OIP) e Optical Image Profiler - Green (OIP-G) ou como ferramenta individual, seu funcionamento se dá pelo avanço pelo subsolo a uma velocidade constante enquanto a água é injetada através de uma tela na lateral da sonda. Um sensor de pressão em linha mede a reação do solo à injeção de água. A água é injetada a uma taxa de fluxo predefinida, e o controlador ajusta a pressão necessária para manter a taxa inicialmente estabelecida. Solos compostos por areias e cascalhos demandam pouca pressão para a injeção de água, ao passo que solos com maior presença de partículas de lodo e argila exigem pressões mais elevadas para manter a taxa de fluxo estabelecida.

A resposta à pressão identifica a capacidade relativa do solo em transmitir água. Tanto a pressão quanto a vazão são registradas em função da profundidade (GEOPROBE, 2021). A representação da ferramenta com o sensor de condutividade elétrica encontra-se na Figura 6.

Figura 6 - Representação do funcionamento do Sensor de Condutividade Hidráulica do Solo



Fonte: Adaptado de Geoprobe (2023)

5. MATERIAL E MÉTODOS

Esta metodologia foi desenvolvida para garantir uma abordagem abrangente e fundamentada na pesquisa, analisando os controles de qualidade e rastreabilidade existentes em duas diferentes técnicas utilizadas em investigações de áreas contaminadas.

a. Seleção de métodos de investigação confirmatória e Revisão de Normas Técnicas

Realizou-se uma análise das técnicas de respostas rápidas incorporadas na revisão da norma ABNT NBR 15515-2:2023 de Passivo ambiental em solo e água subterrânea, examinando as rotinas operacionais para garantir a qualidade e rastreabilidade dos dados ambientais.

b. Identificação da ferramenta MIP (*Membrane Interface Probe*) e exploração prática da técnica

Foi conduzida uma análise específica da ferramenta MIP, compreendendo os princípios de funcionamento, aplicações e linhas de evidência na investigação confirmatória. Além disso, realizou-se um estudo dos fundamentos teóricos e práticos que embasam a utilização da ferramenta MIP como instrumento para a investigação de contaminantes. Nesta etapa, foram realizados testes de controle de qualidade apresentados Geoprobe aplicados em uma condição real com dados descaracterizados, a fim de se analisar a eficiência e qualidade do ensaio.

c. Análise Crítica e proposta de Diretrizes de qualidade dos ensaios de investigação confirmatória

Nesta etapa, foram realizadas análises sobre a metodologia apresentada pela Norma Brasileira ABNT NBR 16434/2015 Amostragem de resíduos sólidos, solos e sedimentos — Análise de compostos orgânicos voláteis (COV) — Procedimento. Que abrange os procedimentos associados à amostragem de solo associado aos PID manual (Detector de Fotoionização), buscando entender suas limitações e benefícios em comparação com a ferramenta MIP. Assim como foi realizada uma análise comparativa entre dois Logs gerados através do uso da ferramenta MIP avaliando avaliar a eficiência, precisão e rastreabilidade dos dados.

Desenvolveram-se análise embasadas nos resultados dos logs obtidos, visando destacar as rotinas de controle dos dados existentes na ferramenta MIP, proporcionando direcionamento na escolha de métodos a serem utilizados na investigação de áreas contaminadas, com foco na qualidade dos dados gerados para a aceitabilidade dos resultados.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Controle de Qualidade e testes de performance

Em seu Procedimento Operacional Padrão - SOP No. MK3010, a Geoprobe, fabricante do equipamento MIP, traz inúmeros procedimentos que devem ser realizados antes e depois da execução dos logs. Tais controles têm o intuito de garantir que as informações geradas durante o procedimento de sondagem, sejam confiáveis e rastreáveis.

O primeiro teste realizado são testes de respostas químicas, tem o objetivo de verificar os detectores PID, FID e XSD. O teste de resposta química, tem como objetivo validar cada registro para provar que os sistemas estão íntegros e que os dados apresentados são confiáveis. O teste de performance a respostas químicas consiste em expor a membrana ao contato de

padrões de trabalho (contaminante alvo do local) em concentrações conhecidas por um tempo definido de 45 segundos, este tempo corresponde à exposição da membrana tempo (residência) da sonda em cada intervalo de amostragem durante a operação de sondagem.

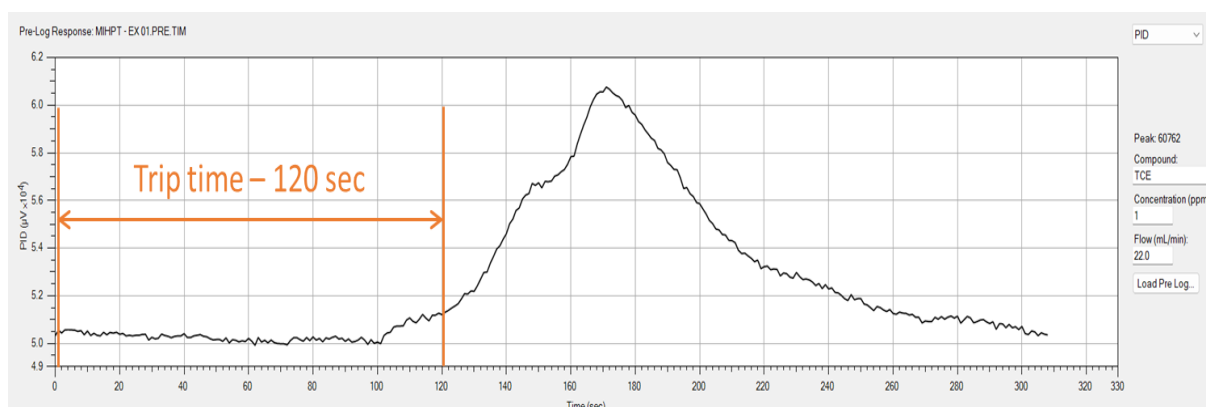
No Procedimento Padrão de Operação (do inglês, *Standard Operating Procedure - SOP*) há recomendação que sejam realizados testes com solução padrão com concentrações de 1, 5 e 25 ppm para um composto de interesse, entretanto as concentrações podem variar conforme compostos e do nível de concentração de interesse, e que os testes sejam realizados pelo menos diariamente no teste de resposta inicial pelos operadores de campo.

O teste descrito anteriormente é uma recomendação, entretanto o procedimento operacional exige que deva ser realizado um teste com uma concentração conhecida entre cada local de registro MIP.

Também é recomendado que, para usar um equipamento com detector MIP (PID e/ou XSD) no local, tal sistema deve ser capaz de manter uma resposta adequada de um padrão de 1 ppm (Benzeno ou Tricloroetileno) durante todo o projeto.

Após a exposição da membrana à solução padrão, avalia-se a *trip-time* (tempo que a solução que foi submetida a membrana leva para percorrer a linha tronco até a chegada aos detectores). Essa informação é inserida no software MIP para traçar com precisão a posição da profundidade dos contaminantes. Na Figura 7, há a representação de um cromatograma de uma substância (Tricloroetileno - TCE), destacando o tempo “morto” a (usualmente chamado de Trip time, neste contexto) no gráfico de resposta do detector PID ao composto TCE a 1 ppm em um fluxo de 22.0 ml/min.

Figura 7 - Verificação de Trip time.

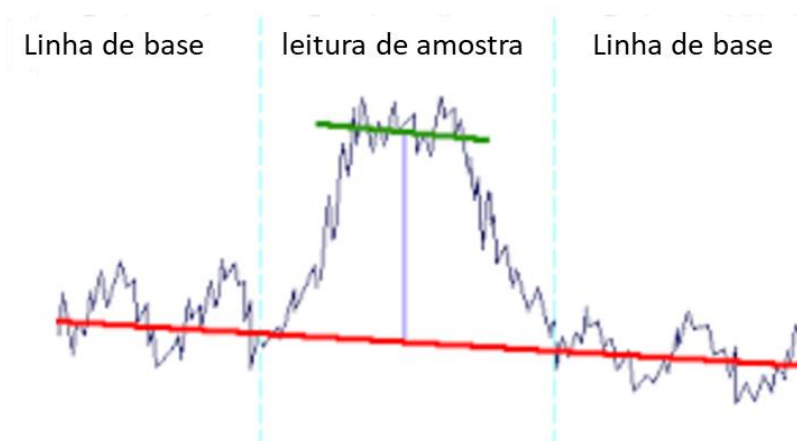


Fonte: Autor (2024).

O mesmo gráfico utilizado para verificar a trip-time (Figura 7) e utilizado para avaliar a detecção dos sensores, uma resposta mínima esperada deve ser uma proporção de 5:1 de resposta ao ruído de linha de base para 1 ppm de Benzeno ou TCE no PID e/ou no XSD. Vale

destacar que na Figura 8, há um exemplo para a verificação das respostas dos sensores e ruído encontrado na linha de base (*baseline* da análise).

Figura 8 - Verificação da resposta dos detectores, linhas de base e ruído.



Fonte: Adaptado de Geoprobe (2021).

Uma vez finalizado o teste de performance as respostas químicas, avalia-se a resposta do sensor de Condutividade Elétrica.

O teste é realizado através de um Gabarito de teste dipolo EC com duas extremidades, sendo uma para verificar Condutividade Elétrica Baixas e Condutividade Elétrica Alta.

As respostas esperadas nesse teste são 55mS/m e 290mS/m + 10%.

Caso o valor encontrado nesse teste esteja fora da faixa esperada (55mS/m e 290mS/m + 10%), o *software* *DI Acquisition* (FI6000), inicia uma série de testes de solução de problemas. Os testes de verificação da calibração irão determinar se o motivo pelo qual as cargas de teste EC falharam foi um problema interno do FI6000 ou se é externo no circuito da sonda da linha tronco.

A próxima etapa de verificação se refere ao Teste de referência HPT. O teste de referência é feito para garantir que o sensor de pressão HPT esteja funcionando bem e para avaliar a condição da tela de injeção HPT. O teste de referência HPT calcula pressão atmosférica no momento do teste, esse dado é utilizado em processamento posterior através de *software* para a obtenção do nível estático da água em subsuperfície assim como para estabelecer os valores de condutividade hidráulica K estimados para a formação.

Cabe ressaltar que cada sensor HPT é calibrado individualmente e possui uma folha de calibração, esses valores devem ser inseridos no *software* *DI Acquisition* com o HPT número

de série do sensor, para garantir a confiabilidade e rastreabilidade dos valores de pressão encontrados durante o log.

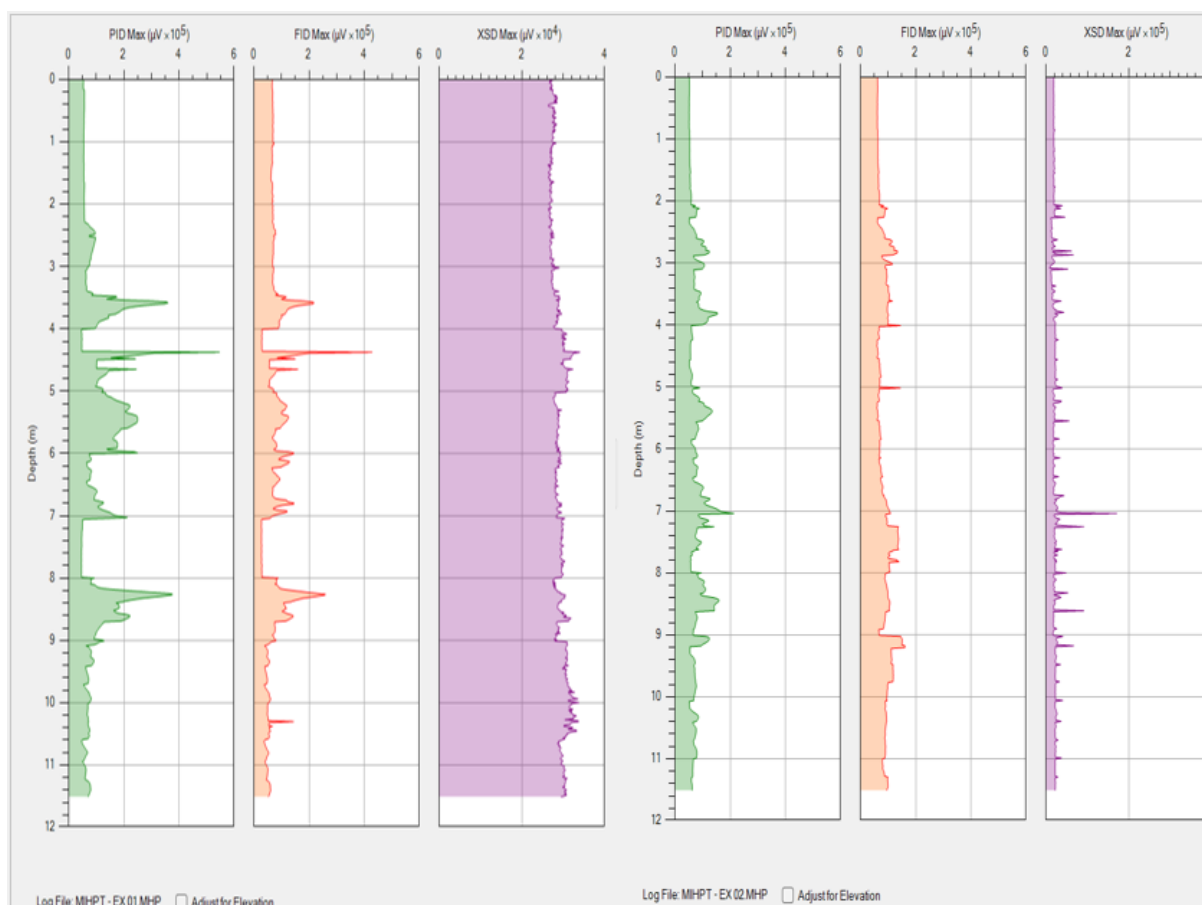
O teste de verificação do sensor é realizado através da imersão da sonda dentro de um tubo teste com dimensões conhecidas, dotado de uma abertura lateral com uma válvula. A bomba então é acionada e realizada a primeira leitura, fecha-se a válvula e completa-se o tubo teste com água e realiza-se a segunda leitura, desliga-se a bomba e aguarda até que a pressão exercida pela bomba seja dissipada e então realiza-se uma terceira leitura, após essa leitura, é realizada a abertura da válvula para que a água retorne ao nível inicial do teste e então é feita mais uma leitura, o software realiza as comparações entre as pressões encontradas no teste, estabelecendo assim a condição de pressão atmosférica no momento do teste.

Os dados obtidos durante os testes de performance podem ser rastreados através do arquivo INF file, esse arquivo apresenta também informações sobre o comportamento dos detectores, anomalias, alarmes, e toda informação de operação para assegurar a confiabilidade das informações apresentadas.

Para contextualizar a importância dos controles de qualidade mencionados ao longo do texto exercem influência sobre a interpretação dos dados obtidos, foram selecionados dois LOGs de MiHPT resultantes de uma investigação em um site com a presença de Compostos Orgânicos Voláteis (COV), realizados em uma mesma área distantes aproximadamente 1 metro, algumas informações sensíveis sobre a localização e data de execução foram alterados mantendo o enfoque na apresentação dos resultados dos gerados.

Os LOGs foram gerados através do *software Direct Image Acquisition* versão 3.6 durante a operação de sondagem e sua análise e geração dos gráficos foram realizados através do *software Direct Image Viewer* versão 3.6, ambos os *softwares* fornecidos pela Geoprobe Systems. Os LOGs foram denominados de MiHPT - EX 01 e MiHPT - EX 02. A Figura 9, apresenta as respostas dos sensores PID (verde), FID (laranja) e XSD (roxo).

Figura 9 Respostas nos Detectores PID, FID e XSD dos LOGs MiHPT - EX01 e MiHPT - EX02.

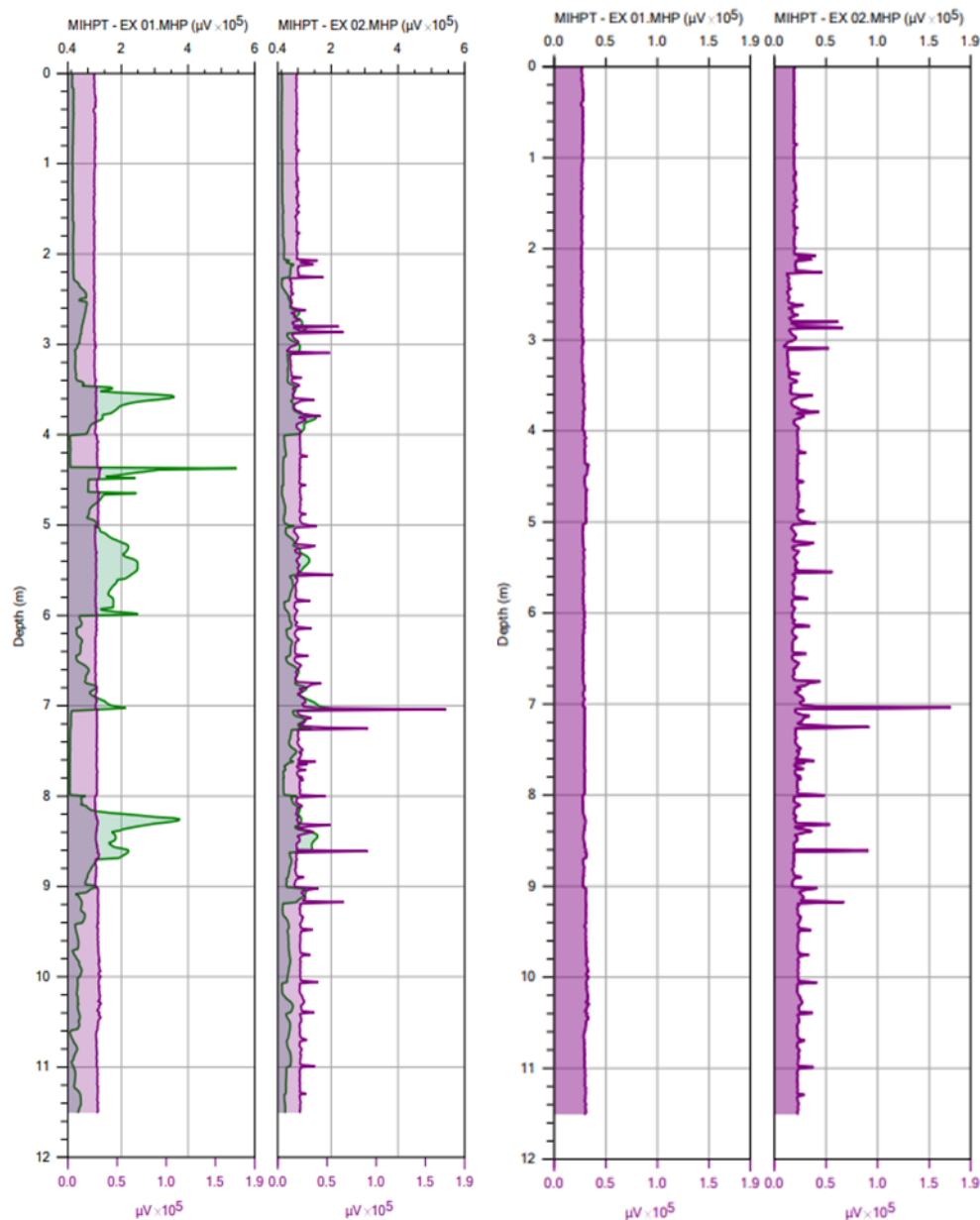


Fonte: Autor (2024).

Ao analisar os dois logs de maneira conjunta, alguns pontos devem ser destacados, os gráficos das respostas devem estar da mesma escala, dessa forma a comparação entre as respostas dos detectores pode ser realizada de forma correta, evitando assim alguma interpretação subestimada ou superestimada em decorrência do fundo de escala. Outro aspecto relevante é que os detectores XSD no primeiro exemplo e o FID no segundo exemplo, apresentam linhas de base mais elevadas e comportamento distinto dos demais detectores em decorrência de ajustes após os gases terem passado pelo detector PID. No MiHPT - EX 01, observa-se que os registros dos detectores PID e FID no primeiro log, apresentam comportamento semelhante e que essa sincronicidade no detector XSD, foi observada somente nos maiores picos detectados nos demais sensores. No segundo log, o detector XSD se mostrou muito mais sensível, apresentando mais picos e um comportamento mais próximo aos registros verificados no detector PID, essa análise comparativa fica mais perceptível ao se observar a Figura 10, onde foram agrupados os registros sobrepostos dos detectores PID (verde) e XSD (roxo) assim como as repostas no detector XSD, no MiHPT - EX 01 E MiHPT - EX 02.

Ao verificar os registros dos testes de performance realizados conforme exigência do controle de qualidade da ferramenta MIP, utilizando TCE a 1 ppm, nota-se que no MiHPT - EX 01, houve uma curva de resposta a presença da solução de controle, entretanto, a mesma foi insuficiente para ser aprovada, ou seja, não atendeu a condição estabelecida de respostas 5 vezes acima do ruído verificado da linha de base. Já no MiHPT - EX 02, para o teste de performance utilizando a mesma solução de controle, a condição de validação do detector foi atendida, o que em termos práticos resultou em uma sensibilidade maior e registros mais precisos na presença de contaminantes em concentração mais baixa.

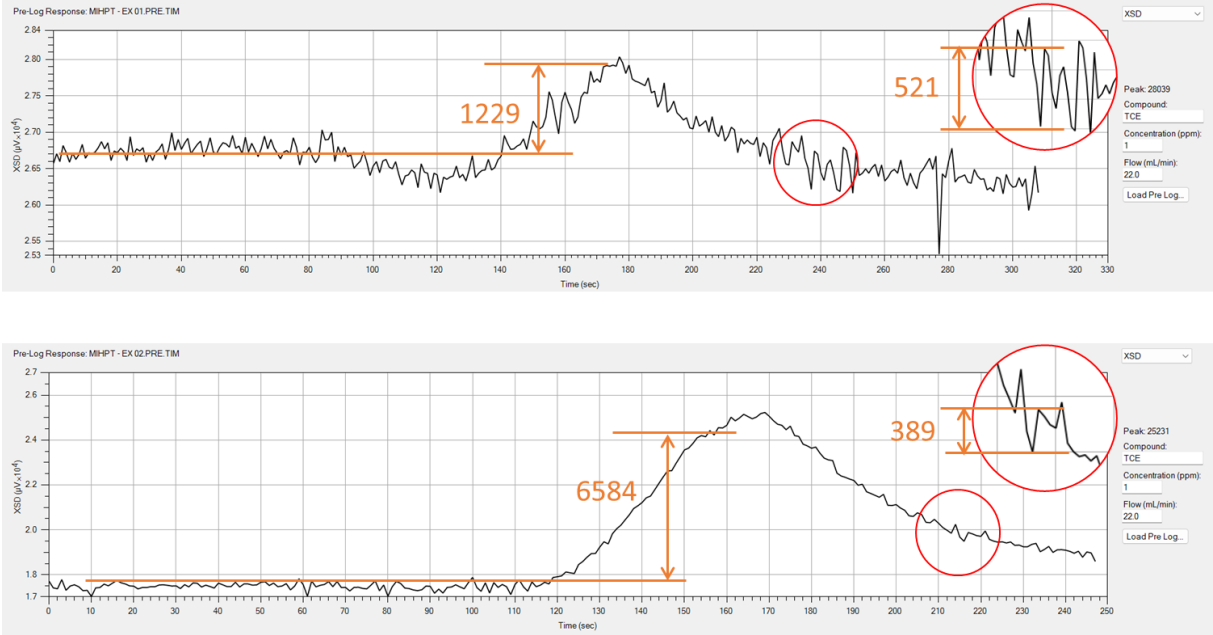
Figura 10 - Respostas sobrepostas dos registros dos detectores PID (verde) e XSD (roxo) e respostas no detector XSD (roxo) dos LOGs MiHPT - EX01 e MiHPT - EX02, para avaliação comparativa entre as magnitudes dos sinais.



Fonte: Autor (2024).

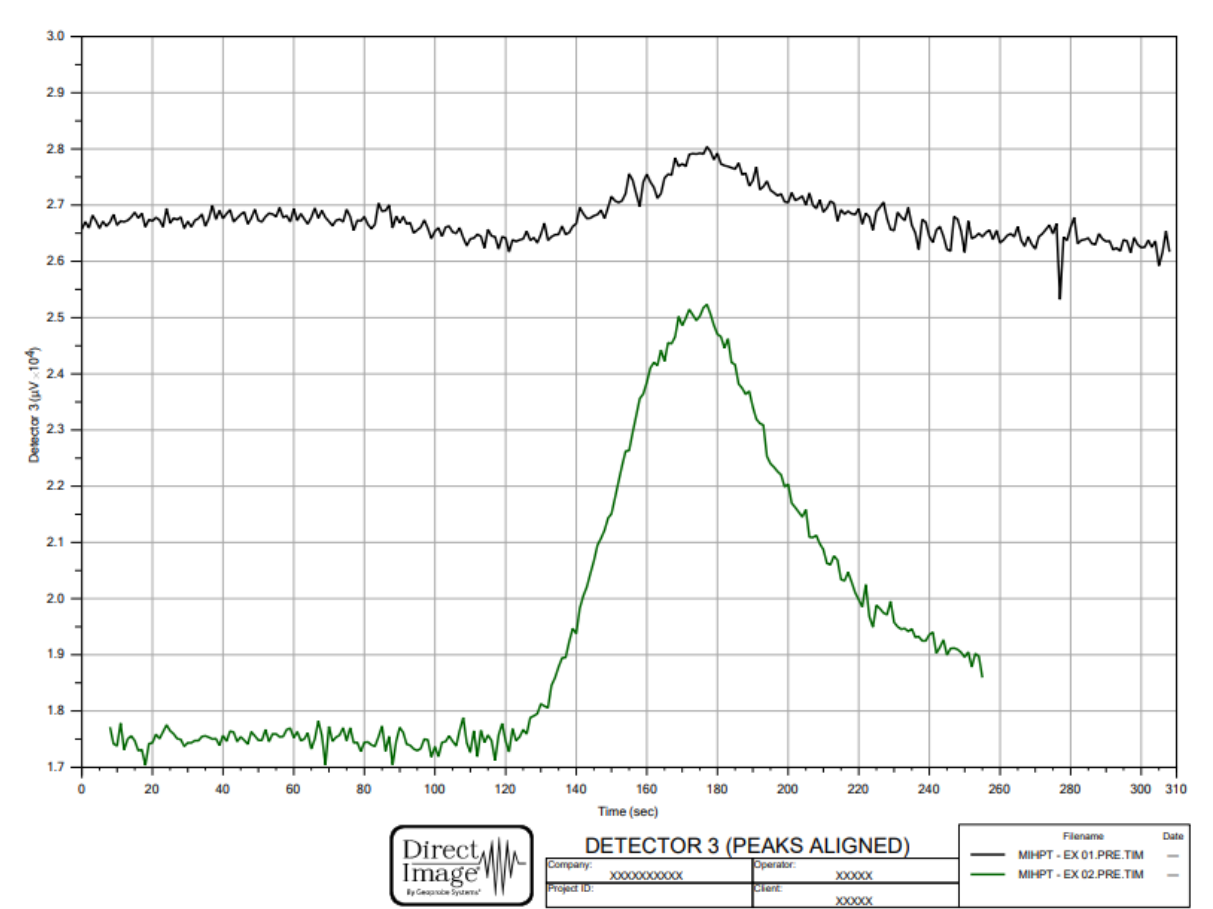
Na Figura 11, é possível verificar a curva de resposta dos testes de performance com TCE a 1 ppm no detector XSD e a figura 12 apresenta os testes de performance alinhados dentro da mesma escala, para efeito comparativo.

Figura 11 - Testes de performance com TCE a 1 ppm no detector XSD dos LOGs MiHPT - EX01 e MiHPT - EX02.



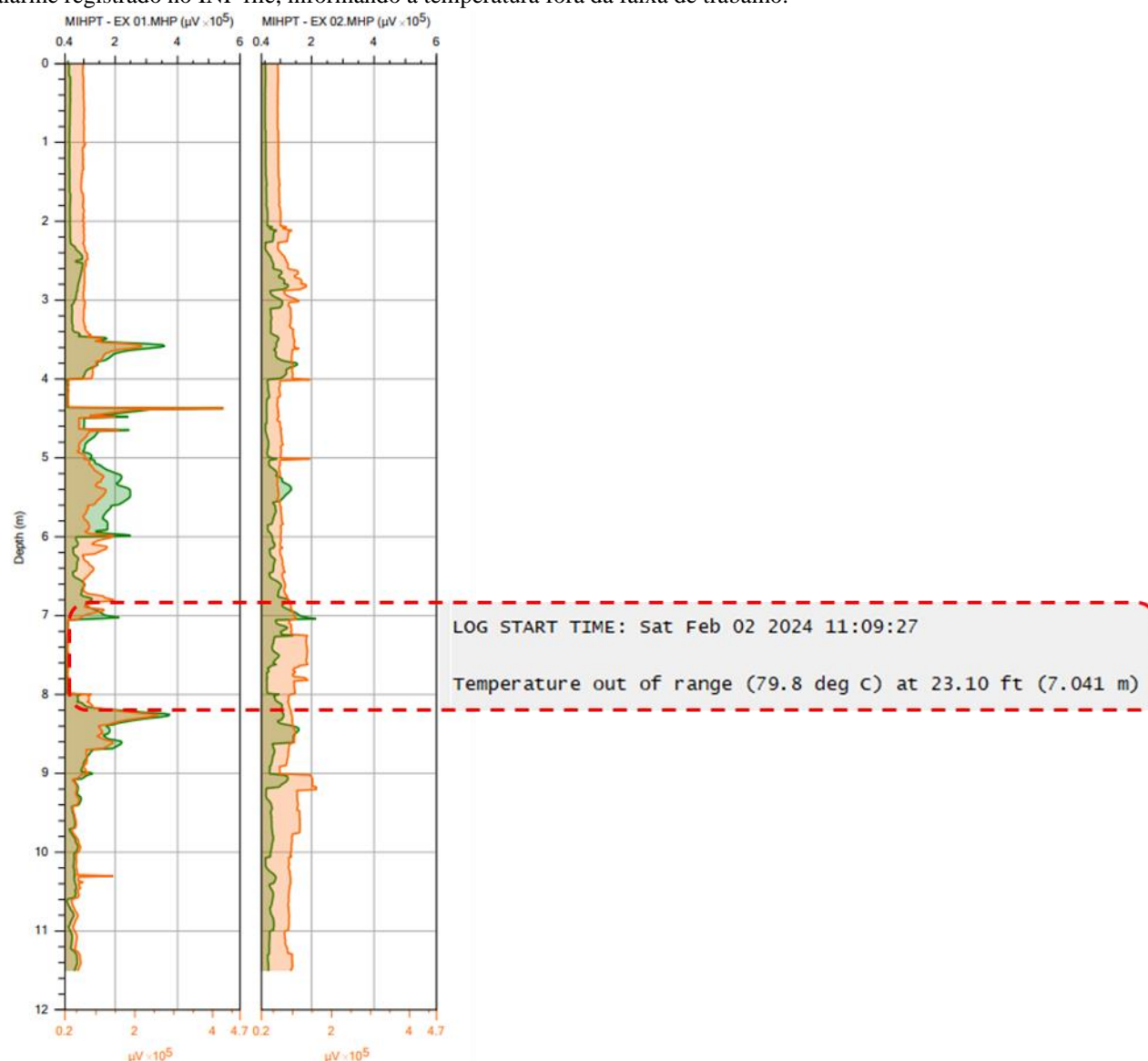
Fonte: Autor (2024).

Figura 12 - Testes de performance com TCE a 1 ppm no detector XSD dos LOGs MiHPT - EX01 (preto) e MiHPT - EX02 (verde).



Analisando o log MiHPT - EX 01, onde os sensores PID e FID apresentam as respostas sincronizadas, é possível observar que os registros retornam aos valores da linha de base (valores iniciais no início da operação) próximo as sete metros de profundidade mantendo-se assim por aproximadamente um metro, verificando o log MiHPT - EX 02 observa-se que na mesma profundidade apesar de não elevados os detectores registraram sinais, ao comparar os dois exemplos apresentados na figura 12, torna-se ainda mais evidente que a ausência de registros no MiHPT-01 tem característica de alguma falha no sistema. Ao abrir o INF file, observou-se que ao atingir a profundidade de aproximadamente sete metros, a temperatura de operação encontrava-se fora da faixa de trabalho, e que em virtude disso os compostos presentes nessa faixa podem não terem volatilizados e consequentemente não registrados pelos detectores.

Figura 13 - Projecção dos detectores PID e FID dos LOGs MiHPT - EX01 e MiHPT - EX02 e informação de alarme registrado no INF file, informando a temperatura fora da faixa de trabalho.



Fonte: Autor (2024).

Como parte integrante dos controles de qualidade e de rastreabilidade, todos os Logs apresentam o arquivo NFO/INF. Este arquivo contém todas as informações do registro, incluindo nome do arquivo, data e hora de início do log e profundidade final. O comprimento do *stringpot* e da haste, tipo de sonda, também estão incluídos neste arquivo os registros dos dados de controle de qualidade, como testes de CE, Teste de referência HPT e testes de resposta química MIP. Este arquivo incluirá a profundidade que quaisquer alarmes foram emitidos durante o registro. Nomes dos detectores MIP e as configurações de atenuação associadas, bem como quando mudanças foram feitas. Os dados de GPS e elevação são salvos aqui, bem como as notas do usuário.

O arquivo INF File do MiHPT - EX 01 pode ser observado na tabela 1 como exemplo de checagem das informações registradas o que garante a confiabilidade nos dados gerados.

Tabela 1 - Exemplo da verificação do arquivo INF. do log MiHPT – EX 01, onde podem ser acompanhadas as etapas de controle de qualidade e validação dos dados gerados.

Etapa	Imagem da Etapa do Arquivo INF.
Identificação do LOG	<pre> MiHPT - EX 01.zip SITE INFORMATION -- DIRECT IMAGE MIP+HPT PROBE Geoprobe DI Acquisition Software for windows Version: 3.6 Build: 22041 </pre>
Teste de Condutividade Elétrica (Pré-Log)	<pre> Pre-Log EC Load Tests Test Target (mS/m) Actual (mS/m) % Diff P/F Low 55.0 55.0 0.0 PASS High 360.0 358.3 0.5 PASS </pre>
Identificação geral	<pre> COMPANY: XXXXXXXXXXXX OPERATOR: XXXXX CLIENT: XXXXX UNITS: METRIC PROBE AND ARRAY: MH6534 MiHPT Probe with Top Dipole PROBE SERIAL NUMBER: 8065 LOCATION: XXXXXXXXXXXX 100 INCH STRING POT USED ROD LENGTH: 5 feet </pre>
Teste de Resposta Química (Pré-Log)	<pre> MIP PRE-LOG RESPONSE TEST FILENAME: MiHPT - EX 01.pre.tim COMPOUND: TCE CONCENTRATION: 1 ppm FLOW: 22.0 mL/min RESPONSE TEST START TIME: Sat Feb 02 2024 10:09:11 RESPONSE TEST ATTENUATION CHANGES TIME DET1 DET2 DET3 DET4 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 TRIP TIME: 110 sec Gas Used: nitrogen </pre>
Teste de Referência do HPT (Pré-Log)	<pre> PRE-LOG HPT REFERENCE TEST VALUES PRE TEST TIME: Sat Feb 02 2024 10:33:52 TEST HPT PRESSURE (psi) FLOW (mL/min) HPT PRESSURE (kPa) TOP with FLOW=0 15.350 0.0 105.840 TOP with FLOW>0 15.742 145.7 108.530 BOTTOM with FLOW=0 15.129 0.0 104.310 BOTTOM with FLOW>0 15.515 149.2 106.970 EXPECTED FLOW=0 HPT DIFF.: 0.22 psi (1.5 kPa) +/- 10% ACTUAL FLOW=0 HPT DIFF.: 0.22 psi (1.5 kPa) TRANSDUCER TEST PASSED </pre>
Identificação dos Sensores	<pre> DETECTOR NAME: PID FID XSD (none) HPT IDEAL COEFFS: 2.2696e1,-2.2356 HPT SENSOR CAL NUMBERS: XD31223A,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,9.9540e-1,-1.2240 </pre>
Informação sobre a Sondagem	<pre> LOG START TIME: Sat Feb 02 2024 11:09:27 </pre>

Etapa	Imagem da Etapa do Arquivo INF.																														
Anomalias ocorridas durante a sondagem	<div>Temperature out of range (79.8 deg C) at 23.10 ft (7.041 m)</div>																														
Alteração da sensibilidade dos detectores	<div>ATTENUATION CHANGES DEPTH (ft) DEPTH (m) DET1 DET2 DET3 DET4 0.00 0.000 1 1 1 1</div>																														
Profundidade Final e horário de término da sondagem	<div>LOG END DEPTH: 37.75 ft (11.506 m) LOG END TIME: Sat Feb 02 2024 15:57:39</div>																														
Informações Geográficas	<div>LATITUDE: 0.000000000 LONGITUDE: 0.000000000 ELEVATION: 0.000 METERS 0.00 FEET GPS Quality: None</div>																														
Teste de Resposta Química (Pós-Log)	<div>MIP POST-LOG RESPONSE TEST FILENAME: M1HPT - EX 01.post.tim COMPOUND: TCE CONCENTRATION: 1 ppm FLOW: 20.0 mL/min RESPONSE TEST START TIME: Sat Feb 02 2024 17:04:20 RESPONSE TEST ATTENUATION CHANGES TIME DET1 DET2 DET3 DET4 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1</div>																														
Teste de Referência do HPT (Pós-Log)	<div>POST-LOG HPT REFERENCE TEST VALUES POST TEST TIME: Sat Feb 02 2024 17:12:19 <table><tr><th>TEST</th><th>HPT PRESSURE (psi)</th><th>FLOW (mL/min)</th><th>HPT</th></tr><tr><td>PRESSURE (kPa)</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>TOP with FLOW=0</td><td>15.383</td><td>0.0</td><td>106.070</td></tr><tr><td>TOP with FLOW>0</td><td>15.664</td><td>195.0</td><td>108.000</td></tr><tr><td>BOTTOM with FLOW=0</td><td>15.183</td><td>0.0</td><td>104.690</td></tr><tr><td>BOTTOM with FLOW>0</td><td>15.434</td><td>194.6</td><td>106.410</td></tr></table> EXPECTED FLOW=0 HPT DIFF.: 0.22 psi (1.5 kPa) +/- 10% ACTUAL FLOW=0 HPT DIFF.: 0.20 psi (1.4 kPa) TRANSDUCER TEST PASSED</div>	TEST	HPT PRESSURE (psi)	FLOW (mL/min)	HPT	PRESSURE (kPa)				TOP with FLOW=0	15.383	0.0	106.070	TOP with FLOW>0	15.664	195.0	108.000	BOTTOM with FLOW=0	15.183	0.0	104.690	BOTTOM with FLOW>0	15.434	194.6	106.410						
TEST	HPT PRESSURE (psi)	FLOW (mL/min)	HPT																												
PRESSURE (kPa)																															
TOP with FLOW=0	15.383	0.0	106.070																												
TOP with FLOW>0	15.664	195.0	108.000																												
BOTTOM with FLOW=0	15.183	0.0	104.690																												
BOTTOM with FLOW>0	15.434	194.6	106.410																												
Teste de Condutividade Elétrica (Pós-Log)	<div>Post-Log EC Load Tests <table><tr><th>Test</th><th>Target (mS/m)</th><th>Actual (mS/m)</th><th>% Diff</th><th>P/F</th></tr><tr><td>Low</td><td>55.0</td><td>62.2</td><td>13.2</td><td>FAIL</td></tr><tr><td>High</td><td>360.0</td><td>364.7</td><td>1.3</td><td>PASS</td></tr></table> Post-Log EC Troubleshooting Tests <table><tr><th>Test</th><th>value</th><th>P/F</th></tr><tr><td colspan="3">Instrument Calibration Tests</td></tr><tr><td>10 Ohms:</td><td>10.4 Ohms</td><td>PASS</td></tr><tr><td>100 Ohms:</td><td>101.2 Ohms</td><td>PASS</td></tr><tr><td>1000 Ohms:</td><td>1024.0 Ohms</td><td>PASS</td></tr></table> WARNING: ONE OR MORE EC TESTS FAILED, SO EC DATA FOR THIS LOG MAY BE UNRELIABLE</div>	Test	Target (mS/m)	Actual (mS/m)	% Diff	P/F	Low	55.0	62.2	13.2	FAIL	High	360.0	364.7	1.3	PASS	Test	value	P/F	Instrument Calibration Tests			10 Ohms:	10.4 Ohms	PASS	100 Ohms:	101.2 Ohms	PASS	1000 Ohms:	1024.0 Ohms	PASS
Test	Target (mS/m)	Actual (mS/m)	% Diff	P/F																											
Low	55.0	62.2	13.2	FAIL																											
High	360.0	364.7	1.3	PASS																											
Test	value	P/F																													
Instrument Calibration Tests																															
10 Ohms:	10.4 Ohms	PASS																													
100 Ohms:	101.2 Ohms	PASS																													
1000 Ohms:	1024.0 Ohms	PASS																													

Fonte: Autor (2024).

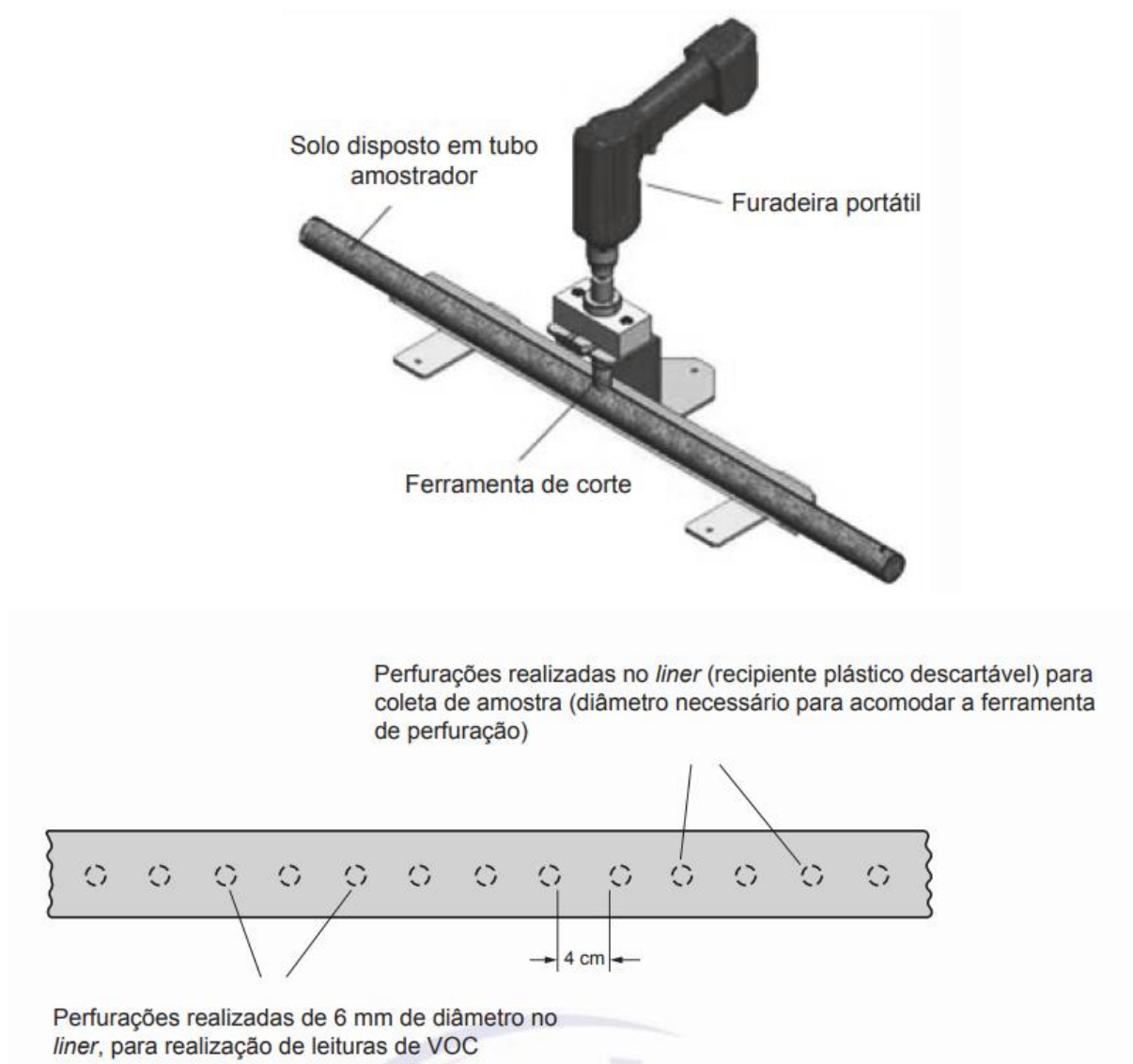
Uma vez entendida a abordagem de varredura através da ferramenta MIP, serão abordados os procedimentos de verificação da presença de COV através da ferramenta PID manual, comumente utilizado para a identificação de compostos orgânicos voláteis em amostras de solo, durante o processo de Investigação Geoambiental. Na abordagem de medição de COVs

através de PID manual, a verificação da presença de tais compostos somente pode ser realizada após a amostragem de solo. Segundo a norma ABNT NBR 16.434/2015, às ferramentas de amostragem de solo utilizados para obter amostras para análise de COV são os amostradores tubulares providos de recipiente plástico descartável (liner), que são concebidos para obter núcleos cilíndricos (testemunho) de material, com a menor deformação possível.

A norma ABNT NBR 16.434/2015 também aborda que as amostras coletadas em recipiente plástico descartável (liner) não podem ser armazenadas neste recipiente com propósito de análise para COV, uma vez que esse tipo de acondicionamento não garante uma vedação hermética. E destaca questões importantes sobre a operação de amostragem, indicando que uma vez iniciado o procedimento, o resgate à superfície deve ocorrer o mais rápido possível, também que o liner deve ser mantido intacto sem perturbações, e sem exposição ao Sol até serem reamostrados. E que a amostragem do volume de material deve ocorrer imediatamente depois que ele for trazido à superfície. É importante que isso ocorra desta forma, pois nos procedimentos de amostragem, o material é diretamente exposto à atmosfera com possibilidade de o COV ser perdido.

Ao analisar o procedimento de varredura de COV no liner através do medidor manual PID, previsto da Norma a ABNT NBR 16.434/2015 conhecida no Brasil como Amostragem de Solo em Perfil Completo (ASPC), observa-se que inicialmente são realizadas inúmeras perfurações e medições ao longo do liner (Figura 14) e infere-se que os pontos com maiores leituras apresentam uma maior presença de contaminantes.

Figura 14 - Procedimento de Triagem e amostragem através de amostradores liner e detector PID.



Fonte: ABNT NBR 16434:2015

Algumas questões importantes sobre essa metodologia são apresentadas por Evald (2021), a perturbação gerada no meio durante a cravação do ferramental para coleta do liner com solo subsuperficial afetaria a precisão da localização dos pontos com maiores concentração na amostra em função da mobilidade de COV, e que os registros adquiridos através do detector PID diretamente no liner apenas indica que naquele dado intervalo coletado, há presença de compostos em qualquer ponto dele.

Considerando ainda a distribuição heterogênea de contaminantes e características hidrogeológicas do meio essa abordagem demanda a adoção de critérios adicionais para a seleção de pontos amostrais, o que aumenta os níveis de incerteza dada a utilização desta abordagem.

Evald (2021), apresenta ainda resultados dos trabalhos desenvolvidos por (RIYIS, (2019); VILAR et al., (2018) *apud* Evald, (2021) que demonstram a falta de correlação entre as leituras feitas pelo sensor PID diretamente no liner e a presença real de compostos orgânicos voláteis (VOCs) em um ponto específico do mesmo. Ambos os trabalhos observaram que a maior concentração de VOCs ocorreram em camadas litológicas com menor granulometria ou maior compactação, característica de camadas de armazenamento.

Quanto a rastreabilidade dos dados, a norma não apresenta requerimentos ou indicativos de fazê-lo ou de como manter esses registros, em ambos os trabalhos consultados também não existe informação sobre os controles de qualidade adotados, dessa forma subentende-se que todos os registros foram realizados em fichas de campo preenchidas manualmente.

Riyis (2019) apresenta ainda uma metodologia de aquecimento de amostras para a complementação a ASPC abordada na normativa NBR 16434:2015, com objetivo de aumentar a volatilização dos contaminantes adsorvidos nas amostras em especial em matrizes argilosas, apesar de apresentar como uma boa prática, tal procedimento cabe ressalvas como a geração de resíduos contaminados com metanol, uma vez que para se obter um MCE robusto são necessários vários pontos amostragem.

Outro ponto abordado Riyis (2019) que merece atenção se refere a informação que a existência de três sensores de detecção no MIP também não acrescentaria muita informação para a varredura, uma vez que a Avaliação Preliminar haveria identificado as Substâncias Químicas de Interesse (SQI), então somente o detector PID seria suficiente para executar a varredura. Deve-se ter cautela ao ser dependente somente da Avaliação Preliminar para a identificação dos compostos, uma vez que as informações pretéritas podem não estar disponíveis em sua totalidade, ademais, diferentes compostos químicos apresentam leituras nos detectores de maneira distinta, podendo não apresentar respostas no detector PID e identificadas no sensor XSD como Freon 12 (Diclorodifluorometano) por exemplo, sendo assim, essa amostra com base no valor apresentado no detector PID seria descartada, inferindo que essa porção investigada estaria isenta de concentrações significativas do contaminante.

Contanza et al. (2002) trazem outro ponto relevante referente aos efeitos da temperatura no sistema MIP. Onde, demonstram a influência da temperatura e pressão na correlação da volatilização de Tricloroeteno (TCE). Ao avaliar o exemplo do MiHPT – EX 01 onde foi identificado no arquivo INF uma falha no sistema de aquecimento, foi observada que nessa faixa os não ocorreram registros do Detector PID, dessa forma houve uma rastreabilidade da inconsistência dessa informação, o que não seria possível através do aquecimento direto das

amostras apresentado por Riyis (2019), em alguma eventual oscilação de temperatura, o que levaria a interpretação de que nessa porção analisada não ocorre a presença de contaminantes.

Como apresentado nos exemplos de log os detectores do sistema MIP trabalham de maneira conjunta, onde em uma eventual falha de um de alguma parte do sistema, estaria coberto por um registro, e não ocorreria a perda do registro dessa informação, ademais a densidade de registros provenientes do sistema MIP é superior a proposta apresentada.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante destacar que todas as metodologias, abordagens técnicas e equipamentos apresentam limitações e, portanto, conhecer e executar os procedimentos de controles de qualidade associados a cada uma delas é de extrema importância para a validação dos dados adquiridos.

Como objetivo principal, esse trabalho cumpriu a sua proposta, uma vez que trouxe luz aos controles de qualidade da ferramenta MIP, entendendo que os controles de qualidade desempenham um papel importante na validação dos registros obtidos durante as investigações, assegurando a integridade dos dados coletados. A calibração adequada dos sensores, a verificação regular dos equipamentos e a avaliação sistemática da precisão dos resultados são aspectos críticos desse processo. Além disso, a rastreabilidade de todas as etapas do procedimento de investigação, desde a preparação do equipamento até a análise final dos dados, é fundamental para garantir a confiabilidade e transparência do processo.

Ao enfatizar a importância desses controles, este estudo destaca a necessidade de adotar práticas robustas de controle de qualidade e rastreabilidade em todas as etapas das investigações geoambientais. A implementação eficaz dessas práticas não apenas garante a precisão dos resultados, mas também fornece uma base sólida para tomada de decisões informadas em relação à gestão de áreas contaminadas e planejamento de estratégias de remediação.

Dessa forma o arquivo INF, da ferramenta MIP apresenta uma garantia de confiabilidade das informações uma vez que rastreia a funcionalidade dos detectores, acompanhamento do processo operacional e validação dos registros através dos testes de performance executados antes e depois de cada log, o que torna um documento de consulta indispensável para a análise dos dados apresentados.

Quanto a utilização do PID manual como ferramenta para detecção da presença dos compostos orgânicos voláteis é importante em primeiro ponto salientar que a normativa a qual ela está referenciada na norma ABNT NBR 15515-2:2023, informa que a utilização do sensor

PID deve ser somente utilizada como método qualitativo para se definir o método de extração da amostra, com preservação em metanol ou não, e não se deve utilizar o mesmo para definir profundidades de coleta de amostras. Sobre o aquecimento de amostras, esta deve ser considerada como uma boa prática de adaptação a ASPC e não um procedimento padrão, uma vez que não está sustentada por nenhuma normativa, ademais, a falta de padronização dos procedimentos reconhecida por órgão regulamentador e susceptibilidade à interferências como, experiência do responsável pelo procedimento além de condições externas durante a manipulação das amostras podem representar incertezas que devem ser consideradas nos resultados dos estudos.

Em suma, não se pode negligenciar a importância dos controles de qualidade. Eles influenciam na validade e utilidade dos dados obtidos em investigações geoambientais. Portanto, sua implementação sistemática e rigorosa é crucial para garantir que os dados coletados sejam precisos, confiáveis e verdadeiramente representativos da realidade do local em questão.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALESP. Secretaria do Meio Ambiente. Lei n. 13577, 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. São Paulo, 2009. Legislação Estadual.

ALESP. Decreto Nº 59.263, de 05 de junho de 2013. Regulamenta a Lei nº 13.577, de 08 de julho de 2009, que dispõe sobre as diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá providências correlatas. São Paulo. 2013. Legislação Estadual.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D7352-07 - Standard Practice for Direct Push Technology for Volatile Contaminant Logging with the Membrane Interface Probe (MIP), 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 16.434 – Amostragem de resíduos sólidos, solos e sedimentos – Análise de compostos orgânicos voláteis (COV) - Procedimento. Rio de Janeiro. 2015.

BRASIL. Lei Federal nº 6.938. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. 1981

BRASIL. Decreto nº 97.632. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. 1989.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Manual do Gerenciamento de Áreas Contaminadas, 1999. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas->

contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/informacoes-gerais/apresentacao-2/>. Atualizado em abril/2021. Acesso em: 30/01/2024.

CLU-IN. Characterization and Monitoring. U.S. EPA Office of Superfund Remediation and Technology Innovation. <<http://www.clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/hrscintro.cfm>> Atualizado em Abril/2023. Acesso em 30/01/2024.

CONAMA. Resolução nº 420. Conselho Nacional do Meio Ambiente - Ministério do Meio Ambiente. [S.l.]. 2009.

CONSTANZA, J. et al. **Effect of Temperature and Pressure on the MIP Sample Collection Process. Third International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds**. Monterey: Batelle Press. 2002. p. 8.

CRUMBLING, Deana M. Summary of Triad Approach. U.S. Environmental Protection Agency Office of Superfund Remediation and Technology Innovation: Superfund Triad Support Team. 2004.

EVALD, M. K. **Avaliação das Incertezas Inerentes a Amostragem de Solo e a Importância para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas – Estudos com Abordagens de Alta Resolução e TRIAD**. Centro Universitário SENAC Santo Amaro. p.40. 2021.

EPA. Method 3815 - Screening Solid Samples for Volatile Organics. [S. l.: s. n.], 2007. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-3815-screening-solid-samples-volatile-organics>.

GEOPROBE®. Geoprobe® Membrane Interface Probe (MIP) Standard Operating Procedure. Geoprobe®. Salina, KS, p. 53. 2021.

GEOPROBE®. Geoprobe® Electrical Conductivity (EC) Standard Operating Procedure. Geoprobe®. Salina, KS, p. 12. 2015.

GEOPROBE®. Geoprobe® Hydraulic Profiling Tool (HPT) Standard Operating Procedure. Geoprobe®. Salina, KS, p. 24. 2021.

GEOPROBE®. Geoprobe® MIP Detector System. Geoprobe®. Salina, KS, p. 21. 2020.

ITRC. Implementing Advanced Site Characterization Tools. Technical/Regulatory Guidance. Interstate Technology Regulatory Council. Dec. 2019.

MCCALL, W. et al. **Field Application of the Combined Membrane-Interface Probe and Hydraulic Profiling Tool (MiHpt)**. Groundwater Monitoring&Remediation, 22 April 2014. 85-95.

MILANI, M.G., Carvalho, A.C.M.G. **Estudo de tecnologias de investigação ambiental em alta resolução para refinamento do modelo conceitual — estudo de caso: Duque de Caxias (RJ), Brasil**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES.v.26 n.2. mar/abr 2021. 327-337.

RIYIS, Marcos Tanaka. **Contribuição para Investigação de Áreas Contaminadas com Abordagem de Alta Resolução. 162 f. 2019.** - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, [s. l.], 2019.

SUTHERSAN, S.; QUINNAN, J.; WELTY, N. The New ROI: **Return on Investigation by Utilizing Smart Characterization Methods.** Groundwater Monitoring & Remediation, v. 35, n. 3, p. 25-33, Summer 2015.