

DA INVESTIGAÇÃO TRADICIONAL À SMART CHARACTERIZATION: IMPACTOS NA PRECISÃO DO MODELO CONCEITUAL E NA ASSERTIVIDADE DA REMEDIAÇÃO EM SITES COMPLEXOS

Tatiane Machado¹ (tatiane.machado@arcadis.com), João Oliveira¹ (joao.melo@arcadis.com), Natália Ruiz¹ (natalia.ruiz@arcadis.com) e Guilherme Varela¹ (guilherme.varela@arcadis.com)

Resumo

Este artigo apresenta um estudo de caso que evidencia a mudança de paradigma na investigação de áreas contaminadas complexas por meio da aplicação da metodologia *Smart Characterization*. A área em questão é considerada complexa devido à presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) de alta densidade, à heterogeneidade geológica com topo rochoso entre 5 e 20 metros de profundidade, à escassez de informações históricas sobre fontes potenciais de contaminação e à proximidade de receptores sensíveis. Além disso, o local possui um histórico de mais de 40 anos de contaminação e múltiplas tentativas de remediação sem êxito, decorrentes das elevadas incertezas associadas à distribuição dos contaminantes e à interação destes com o meio físico.

Diferentemente das abordagens tradicionais, centradas em redes fixas de poços de monitoramento e análises pontuais, a *Smart Characteriza-*

tion integra tecnologias avançadas para caracterização de alta resolução, com coleta e análise de dados em tempo real. Essa abordagem permitiu a construção de um modelo conceitual dinâmico e robusto, identificando fontes secundárias e zonas de transporte anteriormente não mapeadas. Os resultados demonstraram que investir em caracterização inteligente acelera a tomada de decisão, otimiza recursos e gera ganhos ambientais e econômicos significativos. Este estudo reforça a relevância da *Smart Characterization* como ferramenta essencial para o gerenciamento sustentável de áreas contaminadas complexas.

Palavras-chave: *Smart Characterization*, Alta Resolução, Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA), Áreas contaminadas complexas, Tecnologias avançadas de caracterização.

1. Arcadis, São Paulo, Brasil

Abstract

This article presents a case study that demonstrates the paradigm shift in the investigation of complex contaminated areas through the application of the Smart Characterization methodology. The area in question is considered complex due to the presence of high-density polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), geological heterogeneity with bedrock between 5 and 20 meters deep, limited historical information on potential contamination sources, and proximity to sensitive receptors. In addition, the site has a history of more than 40 years of contamination and multiple unsuccessful remediation attempts, resulting from significant uncertainties associated with contaminant distribution and its interaction with the physical environment.

Unlike traditional approaches, focused on fixed networks of monitoring wells and discrete analyses, Smart Characterization integrates advanced technologies for high-resolution characterization, with real-time data collection and analysis. This innovative approach enabled the construction of a dynamic and robust conceptual model, identifying secondary sources and transport zones previously unmapped. The results showed that investing in intelligent characterization accelerates decision-making, optimizes resources, and generates significant environmental and economic benefits. This study reinforces the relevance of Smart Characterization as an essential tool for the sustainable management of complex contaminated areas

Keywords: *Smart Characterization, High-resolution characterization, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH), Complex contaminated areas, Advanced characterization technologies*

1. Introdução

Diferentemente das investigações tradicionais que são baseadas em coletas pontuais de amostras, redes fixas de poços de monitoramento, e análises laboratoriais com longos tempos de resposta, além da avaliação compartimentalizada das matrizes solo e água subterrânea, a metodologia *Smart Characterization* oferece uma abordagem mais eficaz ao proporcionar um entendimento mais detalhado e preciso da distribuição e mobilidade dos contaminantes em suas diversas fases (Suthersan *et al.*, 2015). Essa metodologia integra tecnologias quali-quantitativas avançadas de caracterização ambiental em alta resolução, e as aplica simultaneamente, permitindo um entendimento mais rápido e detalhado tanto da contaminação quanto das características do meio físico.

O gerenciamento de áreas contaminadas por compostos de alta densidade, como os HPA, representa um dos maiores desafios técnicos da engenharia ambiental. No caso estudado, os contaminantes incluem naftaleno (densidade aproximada de 1,14 g/cm³) e benzo(a)pireno (densidade aproximada de 1,24 g/cm³), cujas densidades superiores à da água conferem comportamento similar a líquidos não aquosos densos (DNAPL) e aumentam significativamente a complexidade da investigação e remediação (Pankow; Cherry, 1996). Essa complexidade é agravada por um histórico de contaminação de mais de 40 anos, pela significativa heterogeneidade geológica e pela ineficácia das abordagens tradicionais de investigação, que se caracterizaram por coleta limitada de amostras de solo e baixa densidade de pontos de amostragem de água subterrânea em redes fixas de poços de monitoramento,

resultando em entendimento fragmentado do meio físico e da distribuição subsuperficial dos contaminantes. Como consequência, historicamente os Modelos Conceituais da Área (MCA) apresentaram elevadas incertezas, comprometendo a eficácia das tentativas de remediação realizadas na área.

Conforme discutido por Suthersan *et al.* (2015), a investigação tradicional caracteriza-se pela abordagem compartimentalizada das matrizes solo e água subterrânea, que são usualmente avaliadas de forma separada. Nessa abordagem, a quantidade de amostras de solo coletadas é limitada ou até inexistente, resultando em uma representação inadequada das características do meio físico e dos possíveis contaminantes presentes. Além disso, na investigação tradicional usualmente as amostras de solo são coletadas apenas até a profundidade correspondente à franja capilar, restringindo a compreensão da distribuição do perfil vertical dos contaminantes na zona saturada.

Ainda, os poços de monitoramento em investigações tradicionais costumam ser instalados sem considerar a estratigrafia e as propriedades hidrogeológicas das diferentes camadas que constituem o aquífero local. Normalmente, sua instalação ocorre de forma a interceptar múltiplas camadas, tendo como único objetivo a investigação do nível freático (Riyis *et al.*, 2019).

Como consequência, a investigação tradicional concentra esforços na precisão analítica dos resultados obtidos a partir de um número reduzido de amostras de solo e água subterrânea. Logo, essa abordagem não garante representatividade e exatidão, pois, frequentemente, tanto os poços instalados quanto as amostras de solo coletadas desconsideram a estratigrafia e as propriedades hidrogeológicas das unidades que compõem o aquífero. A Figura 1 ilustra a diferença entre precisão (*precision*) e exatidão (*accuracy*) na investigação

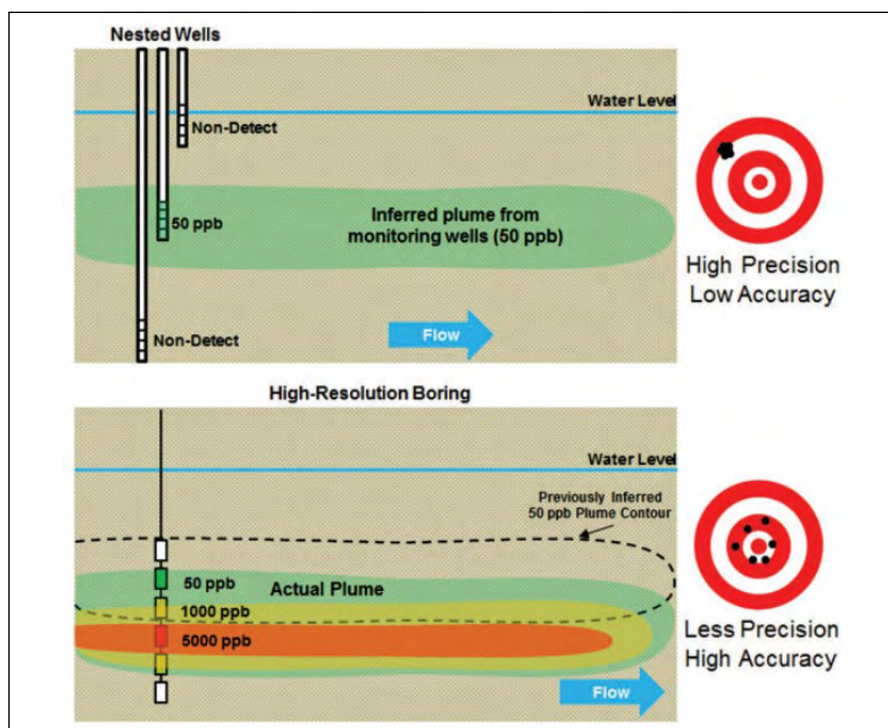


Figura 1: Comparação conceitual entre precisão (*precision*) e exatidão (*accuracy*) em investigação de áreas contaminadas. Fonte: Suthersan *et al.* (2015).

de áreas contaminadas. Enquanto a abordagem tradicional busca alta precisão analítica em pontos discretos, ela falha em garantir exatidão e representatividade espacial, resultando em modelos conceituais fragmentados. Essa limitação reforça a necessidade de metodologias que integrem dados em alta resolução para reduzir incertezas.

Para superar essa lacuna, a metodologia *Smart Characterization* propõe uma mudança de paradigma: o foco no mapeamento de alta resolução do fluxo de massa estratigráfico (*Stratigraphic Mass Flux*), que correlaciona a distribuição dos contaminantes com as propriedades hidrodinâmicas do meio físico.

Essa abordagem permite distinguir entre zonas de transporte, caracterizadas por alta permeabilidade e fluxo preferencial, e zonas de armazenamento, que apresentam baixa permeabilidade e acumulam massa residual. Essas zonas atuam como fontes secundárias, liberando contaminantes lentamente para as zonas de transporte, o que prolonga a duração da contaminação e aumenta a complexidade da remediação. Compreender essa dinâmica é essencial para definir estratégias eficazes de mitigação.

Este artigo apresenta um estudo de caso detalhado no qual a metodologia *Smart Characterization* foi aplicada para reavaliar uma área complexa, contaminada por HPA por mais de 40 anos, onde diversos estudos ambientais já haviam sido executados e mais de 330 poços de monitoramento haviam sido instalados. O objetivo central da mudança de paradigma e adoção da metodologia *Smart Characterization* foi resolver as incertezas que impediram o sucesso das remediações anteriores, de-

envolvendo um MCA robusto para guiar a seleção de técnicas de remediação eficazes e, assim, viabilizar a melhora da qualidade ambiental da área, em conformidade com as normativas ambientais e protegendo os receptores externos.

2. Estudo de caso

2.1. Histórico e complexidade da área de estudo

Na área de estudo ocorreu, entre 1960 e 2000, o uso de uma mistura complexa de HPA em atividades de tratamento de madeira. Os primeiros estudos ambientais, iniciados em 2001, seguiram uma abordagem de investigação tradicional. Ao longo de 20 anos, foram instalados mais de 330 poços de monitoramento e realizadas diversas investigações (confirmatória, detalhada, complementares) e tentativas de remediação, incluindo bombeamento e escavação de fontes secundárias, que se mostraram ineficientes. A complexidade do *site* é acentuada por uma geologia heterogênea, com topo rochoso situado entre 5 e 20 metros de profundidade, e pela presença de uma comunidade socialmente vulnerável em seu entorno. Os principais desafios eram a gestão do vasto volume de dados preexistentes e a impossibilidade de mapear adequadamente as fontes de contaminação e plumas a partir desses dados.

2.2. A metodologia *Smart Characterization*

A metodologia *Smart Characterization* foi adotada entre os anos de 2024 e 2025 de forma a romper o ciclo de investigações que ainda dei-

xavam incertezas e resultavam em tentativas de remediação sem êxito. Seu princípio central consiste na caracterização detalhada das zonas de transporte (zonas de fluxo) e retenção (zonas de armazenamento), correlacionando as variações hidroestratigráficas que controlam a mobilidade dos contaminantes. Essa abordagem não se limita à delimitação das plumas, mas prioriza também a caracterização do meio físico, a identificação das fontes secundárias e da massa residual, elementos críticos para o sucesso da remediação. Ao integrar dados de alta resolução coletados e analisados em tempo real, a metodologia possibilita a construção de um Modelo Conceitual da Área (MCA) dinâmico, capaz de reduzir incertezas e direcionar estratégias eficazes para mitigação.

Ainda, a *Smart Characterization* resulta em um *return on investigation* (ROI, ou retorno sobre a investigação, em português) substancialmente superior em comparação com as abordagens investigativas convencionais (Figura 2). Ao focar na identificação e no mapeamento preciso das zonas

de transporte de massa, a metodologia permite um direcionamento cirúrgico dos esforços de remediação. Conforme Suthersan *et al.* (2015), o investimento em técnicas de caracterização de alta resolução para definir o fluxo de massa pode gerar um ROI de três a cinco vezes, ou mais, na redução dos custos totais de remediação. Isso se manifesta na otimização do planejamento, na redução da necessidade de múltiplos ciclos de investigação e na diminuição significativa do número de poços de monitoramento, o que impacta diretamente nos custos operacionais e de longo prazo, garantindo que os recursos sejam alocados de forma mais estratégica e eficaz.

2.3. Estratégia de investigação e ferramentas de alta resolução

A estratégia de investigação (Figura 3) foi planejada para obter uma compreensão tridimensional da interação entre a contaminação e o meio físico. Para isso, foram empregadas, de forma combinada, as seguintes ferramentas:

- **Optical Image Profiler – Green (OIP-G):** esta

ferramenta utiliza um laser de luz verde (comprimento de onda de 520 nm) para induzir fluorescência em HPA, adequado para investigação dessa classe de substâncias, pois não fluorescem sob luz ultravioleta (UV) (ITRC, 2019). O OIP-G foi essencial para a identificação e delimitação de fases não aquosas (NAPL) em 47 perfis de sondagem (OiHPT), permitindo o mapeamento preciso das fontes secundárias. A aplicação da ferramenta OIP e variações como o OIP-G para investigação de áreas contaminadas é normatizada pela norma ASTM WK66935 de 2019;

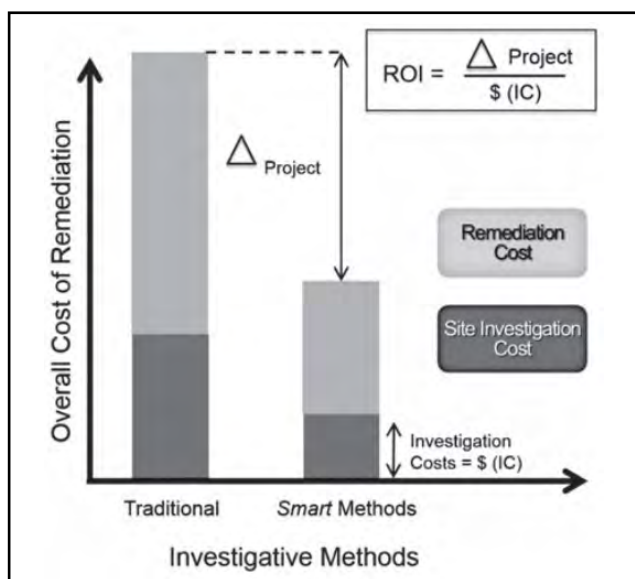


Figura 2: Ilustração do conceito de *return on investigation* (ROI). Fonte: Suthersan *et al.* (2015).

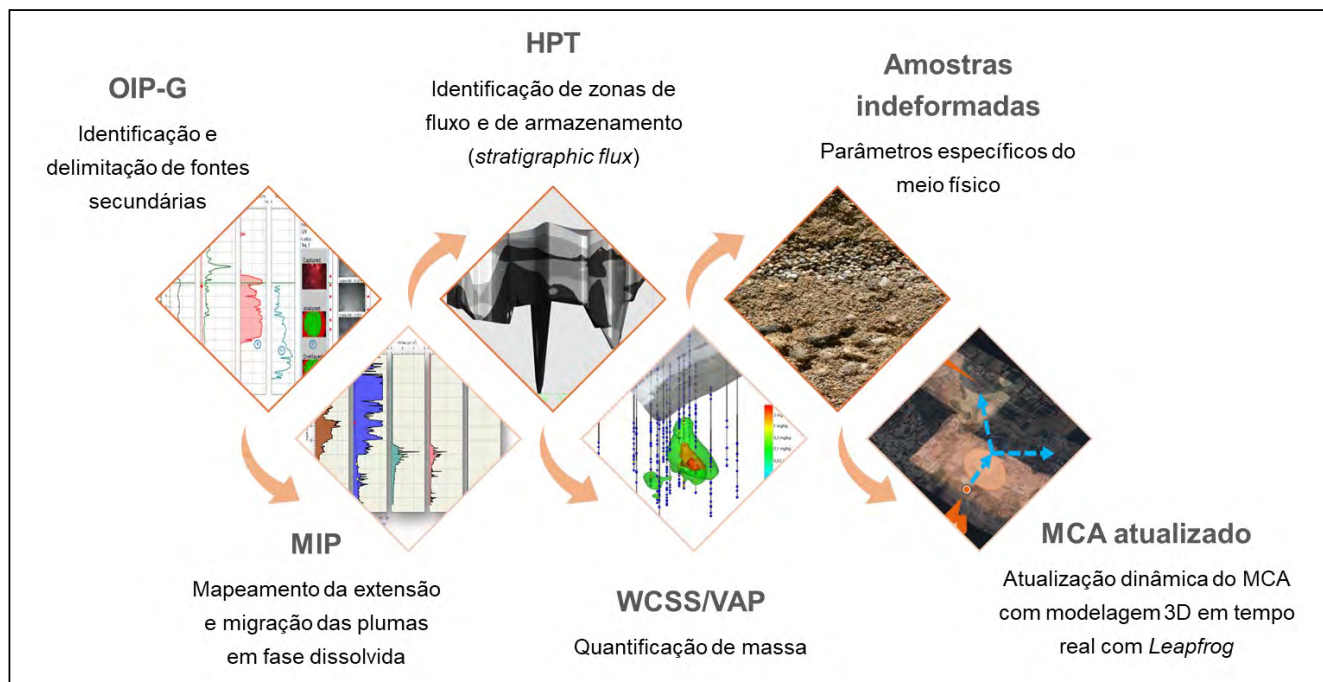


Figura 3: Fluxo de aplicação das técnicas de investigação adotadas no estudo de caso.

- **Membrane Interface Probe (MIP):** o MIP foi empregado para indicar a presença de contaminantes em fase dissolvida, principalmente nas regiões afastadas das fontes secundárias, permitindo inferir a extensão e a migração das plumas no aquífero. A sonda aquece o solo e a água, promovendo a difusão de compostos orgânicos voláteis (VOC) e alguns semivoláteis (SVOC) através de uma membrana semipermeável até os detectores na superfície – *Photoionization Detector* (PID) e *Flame Ionization Detector* (FID) (ITRC, 2019). Foram realizados 59 perfis (MiHPT), fornecendo subsídios para direcionar a amostragem de água subterrânea e complementar o mapeamento da contaminação em fase dissolvida. A aplicação da ferramenta MIP para investigação de áreas contaminadas é normatizada pela norma ASTM D7352-18 de 2018;

- **Hydraulic Profiling Tool (HPT):** aplicado simultaneamente ao OIP-G e MIP em 106 perfis, o HPT mede a pressão, em kPa, necessária para injetar um fluxo constante de água (em torno de

300 mL/min) no subsolo. O resultado é um perfil contínuo de permeabilidade relativa, que permite a identificação de zonas de fluxo (alta permeabilidade) e zonas de armazenamento (baixa permeabilidade). A aplicação da ferramenta HPT para investigação de áreas contaminadas é normatizada pela norma ASTM D8037/D8037M-16 de 2024;

- **Whole Core Soil Sampling (WCSS) e Vertical Aquifer Profiling (VAP):** guiados pelos resultados da varredura de alta resolução com OIP-G, MIP e HPT, foram realizadas sondagens mecanizadas revestidas conforme as diretrizes da NBR 15492 para coleta de 183 amostras de solo e 75 amostras água subterrânea, objetivando aquisição de dados quantitativos, permitindo a quantificação de massa dos contaminantes, calibração dos dados qualitativos apresentados pelo OIP-G e do MIP, e dados para a etapa de Avaliação de Risco à Saúde Humana. As amostras de solo foram coletadas pelo método de *Whole Core Soil Sampling* (WCSS, ou Amostragem de Solo de Perfil Completo – ASPC,

em português) de acordo com metodologia descrita em Riyis (2019). A aplicação da técnica *Vertical Aquifer Profiling* (VAP) de amostragem discreta de água subterrânea para fins de investigação de áreas contaminadas é normatizada pela norma ASTM D6001/D6001M-20 de 2020;

- **Amostras indeformadas de solo:** com o objetivo de obter parâmetros específicos do meio físico, foram coletadas quatro amostras de solo indeformadas utilizando amostrador tipo Shelby. As amostras foram direcionadas para unidades hidroestratigráficas representativas da área de estudo, previamente identificadas durante a etapa de investigação. Essa seleção buscou garantir a melhor representatividade das principais zonas de fluxo e retenção de contaminantes no *site*.

A amostragem, preparo, preservação e acondicionamento das amostras indeformadas foram realizados conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 9820/1997.

No total, foram identificadas quatro principais unidades hidroestratigráficas na área, sendo as amostras indeformadas distribuídas de forma a contemplar a variabilidade do meio físico e a representatividade das unidades de interesse. Cabe destacar que, além das amostras coletadas nesta etapa, outras amostras já haviam sido coletadas em estudos anteriores e foram reaproveitadas para consultas e análises complementares, contribuindo para a robustez dos dados utilizados na avaliação.

2. 4. Gerenciamento de dados e modelagem 3D dinâmica

A grande quantidade de dados gerados exigiu uma plataforma robusta para gerenciamento e visualização do modelo 3D. A integração das ferramentas QGIS, QField e *Leapfrog Works* foi um pilar da metodologia empregada.

Inicialmente, a equipe de escritório utilizou o QGIS para o planejamento dos pontos de inves-



Figura 4: Fluxo de gerenciamento de dados realizado durante o estudo de caso.

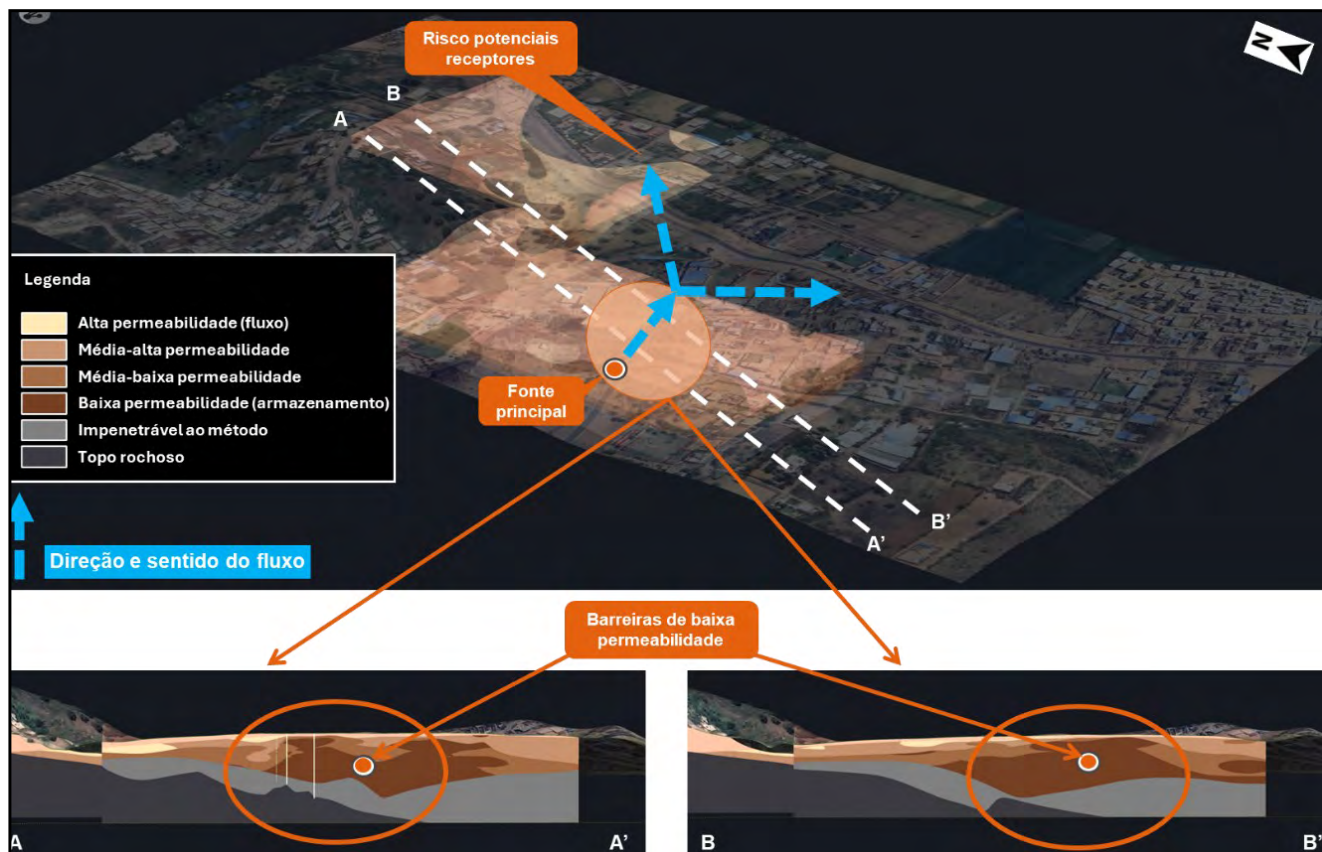


Figura 5: Modelo Conceitual da Área (MCA) obtido com a metodologia *Smart Characterization*.

tigação, os quais eram continuamente revisados e ajustados em tempo real, conforme o recebimento dos resultados e o avanço das atividades de campo. As informações atualizadas eram então transmitidas à equipe de campo, que utilizava o QField para receber as novas localizações dos pontos de amostragem e executar as atividades conforme o planejamento revisado com base nos resultados da caracterização.

Diariamente, e de forma síncrona, a equipe de campo fornecia os resultados observados ao longo do dia para a equipe de escritório, permitindo uma tomada de decisão dinâmica e assertiva. Estes dados alimentavam o *software Leapfrog Works*, possibilitando a atualização contínua e em tempo real do modelo 3D do *Leapfrog Works*. Essa abordagem adaptativa viabilizou tomadas de decisão rápidas, com o redirecionamento de pontos de

investigação durante a mesma campanha de campo, otimizando tempo e recursos, além de garantir maior representatividade e precisão na caracterização do local. O fluxo de dados e informações do projeto é ilustrado na Figura 4.

2. 5. Modelo Conceitual da Área (MCA) atualizado

A aplicação da *Smart Characterization* resultou em um MCA radicalmente aprimorado. Com relação ao meio físico, a partir do MCA atualizado foi identificada uma barreira de baixa permeabilidade na área central do *Leapfrog Works*, a qual não se tinha conhecimento anteriormente. Esta camada atua como um divisor de águas, ocasionando a divisão do fluxo da água subterrânea para duas direções – uma para sudeste, e uma para nordeste, em direção a potenciais receptores sensíveis

(residentes de comunidade socialmente vulnerável) presentes no entorno da área (Figura 5). Tal descoberta subsidiou o direcionamento prioritário dos esforços de investigação para priorização desta área de forma a considerar a proteção desses receptores.

Além disso, foram identificadas e delimitadas tridimensionalmente quatro fontes secundárias de contaminação que não haviam sido mapeadas anteriormente. A análise do fluxo de massa revelou que 74% do volume do aquífero contaminado refere-se a zonas com potencial de mobilidade (19% em zonas de transporte e 55% em zonas de advecção média), enquanto 26% correspondem a zonas de armazenamento (Quadro 1). Este novo MCA permitiu uma compreensão clara da arquitetura da contaminação, incluindo a localização das fontes, as vias de migração preferenciais e as barreiras de baixa permeabilidade que controlam o fluxo.

3. Conclusão

O gerenciamento de áreas contaminadas complexas envolve desafios técnicos significativos, especialmente em locais com histórico de investigações tradicionais, heterogeneidade hidrogeológica e múltiplas tentativas de remediação sem êxito. As abordagens tradicionais, centradas em poucas amostras de solo e em redes fixas de poços de monitoramento, com análises laboratoriais pontuais, mostraram-se insuficientes para compreender a interação entre contaminantes e meio físico, resultando em modelos conceituais fragmentados e prolongamento do risco ambiental por décadas.

A aplicação da metodologia *Smart Characterization* representou uma mudança de paradigma

Zonas de transporte	Condutividade hidráulica (cm/s)	Volume impactado
Transporte (zonas de fluxo)	$K \geq 10^{-3}$	19%
Advecção média	$10^{-3} < K \leq 10^{-5}$	55%
Retenção (zonas de armazenamento)	$K < 10^{-5}$	26%

Quadro 1: Distribuição das zonas de mobilidade e volumes impactados no aquífero.

ao integrar ferramentas de alta resolução e dados em tempo real para caracterizar zonas de transporte e retenção, identificar fontes secundárias e compreender a dinâmica do fluxo de massa. Essa abordagem permitiu a construção de um MCA robusto, revelando zonas de baixa permeabilidade, vias preferenciais de migração e a arquitetura tridimensional da contaminação. Diferentemente da prática anterior, que se apoiava em uma rede de mais de 330 poços de monitoramento que não se mostrava suficiente para a delimitação das fontes, a *Smart Characterization* utilizou tecnologias, sondagens e perfis de alta resolução para subsidiar a instalação de apenas 20 novos poços de monitoramento, com objetivo de complementar a amostragem e calibrar os modelos, e não como método primário de identificação. A comparação entre os ganhos obtidos com a *Smart Characterization* e as limitações da abordagem tradicional é ilustrada na Figura 6, evidenciando a evolução significativa alcançada em apenas um ano.

Os resultados indicaram que 74% do volume impactado corresponde a zonas com potencial de mobilidade, enquanto 26% são zonas de armazenamento, que atuam como fontes secundárias. Essa informação é crítica para definir estratégias de remediação direcionadas, priorizando as zonas de

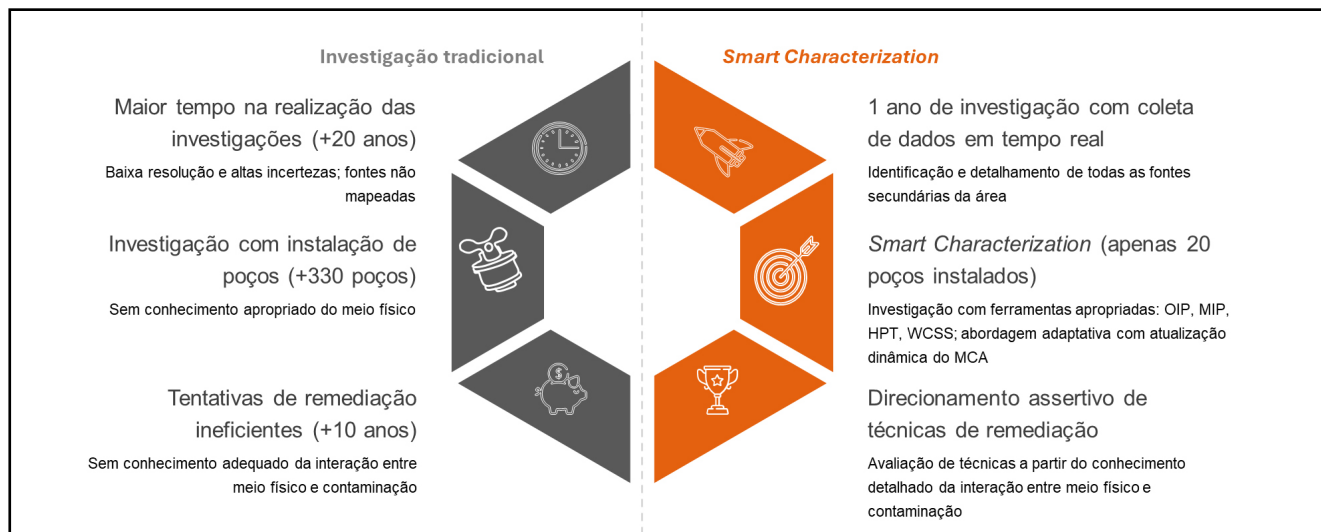


Figura 6: Ilustração dos ganhos da *Smart Characterization* em relação à investigação tradicional.

maior risco aos receptores sensíveis e propondo técnicas específicas para camadas de fluxo e retenção, além de etapas de polimento. Embora os ganhos da metodologia sejam evidentes — maior representatividade, redução de incertezas e otimização do ROI — é importante reconhecer que permanecem incertezas, como a influência da barreira de baixa permeabilidade no direcionamento do fluxo, que requerem testes adicionais para confirmação.

Em síntese, a experiência deste estudo de caso demonstra que um maior investimento inicial em caracterização gera economias substanciais nas etapas subsequentes e aumenta a eficácia das ações corretivas. A *Smart Characterization* se consolida como ferramenta indispensável para lidar com a complexidade de *sites* contaminados por compostos recalcitrantes, oferecendo um caminho mais rápido, econômico e sustentável para a reabilitação ambiental e a proteção da qualidade de vida.

4. Referências

ASTM (American Society for Testing and Materials). **ASTM D6001/D6001M-20**: Standard Guide for Direc-

t-Push Groundwater Sampling for Environmental Site Characterization. 2020.

ASTM (American Society for Testing and Materials). **ASTM D8037/D8037M-16**: Standard Practice for Direct Push Hydraulic Logging for Profiling Variations of Permeability in Soils. 2024.

ASTM (American Society for Testing and Materials). **ASTM WK66935**: New Practice for Detection of Hydrocarbon Liquids in Soils by Fluorescence with the Optical Imaging Profiler Using Direct Push Methods. 2019.

ASTM (American Society for Testing and Materials). **ASTM D7352-18**: Standard Practice for Volatile Contaminant Logging Using a Membrane Interface Probe (MIP) in Unconsolidated Formations with Direct Push Methods. 2018.

ITRC (Interstate Technology Regulatory Council). **Implementing Advanced Site Characterization Tools**. ITRC, 2019. Disponível em: <https://asct-1.itrcweb.org/>. Acesso em: 05/01/2026.

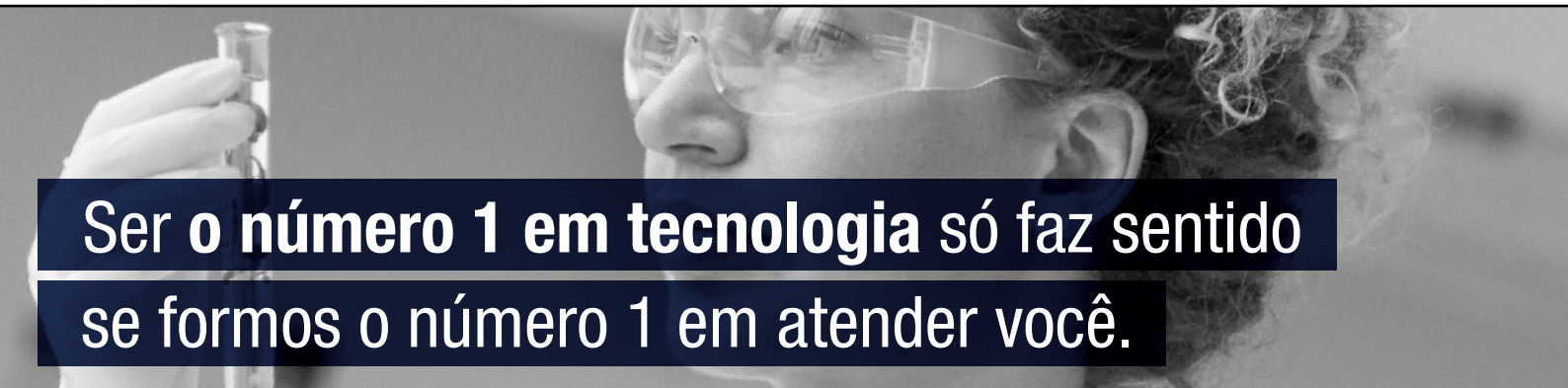
Pankow, J. F.; Cherry, J. A. **Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater: history, behavior, and remediation**. Portland: Waterloo Press, 1996. Disponível em: <https://gw-project.org/books/dense-chlorinated-solvents-and-other-dnapls-in-groundwater/>. Acesso em: 05/01/2026.

Riyis, M. T.; Arakaki, E.; Riyis, M. T.; Giacheti, H. L. A

importância da amostragem de solo de perfil completo (ASPC) para a investigação de alta resolução em áreas contaminadas. **Águas Subterrâneas – Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas**, 2019.

Riyis, M. T. **Contribuição para Investigação de Áreas Contaminadas com Abordagem de Alta Resolução**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Sorocaba, 2019.

Suthersan, S.; Quinnan, J.; Welty, N. **The New ROI: Return on Investigations by Utilizing *Smart Characterization* Methods**. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 35, n. 03, p. 25-31, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gwmr.12118>. Acesso em: 05/01/2026.



Ser o número 1 em tecnologia só faz sentido se formos o número 1 em atender você.



Pioneirismo técnico e acesso fácil ao time de especialistas.
O equilíbrio que a sua consultoria precisa.

Pioneiros em Análise de Compostos Orgânicos no Brasil.

Líderes no método TO-15 e análise de metano em canister.

Vanguarda em análises de PFAS (ISO/IEC 17025).

MAS O QUE MAIS GOSTAMOS É **ATENDER VOCÊ.**