

DA IDENTIFICAÇÃO À REMEDIAÇÃO: O PAPEL DA CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

Erika von Zuben (erika.zuben@heraconsultoria.com.br)

Resumo

A caracterização de áreas contaminadas enfrenta desafios técnicos significativos devido à complexidade dos processos geoquímicos e hidrogeológicos envolvidos. A presença de contaminantes em diferentes fases – dissolvida, vapor, adsorvida e residual – exige metodologias avançadas para uma avaliação precisa da extensão e magnitude da contaminação. Modelos conceituais tradicionais, baseados apenas em concentrações pontuais de fase dissolvida obtidas em poços de monitoramento podem negligenciar fontes secundárias, comprometendo a eficácia das estratégias de remediação. Além disso, a contaminação em hidrogeologia complexa, grandes profundidades e em zonas de baixa permeabilidade torna a remoção de contaminantes ainda mais desafiadora. Este estudo destaca a necessidade de abordagens multidisciplinares e metodologias científicas para reduzir incertezas e otimizar as estratégias de investigação e remediação de áreas contaminadas.

Palavras-chave: Geoquímica, áreas contaminadas, modelo conceitual, hidrogeologia, remediação.

Summary

The characterization of contaminated sites faces significant technical challenges due to the complexity of the geochemical and hydrogeological processes involved. The presence of contaminants in different phases – dissolved, vapor, adsorbed, and residual – requires advanced methodologies to accurately assess the extent of contamination. Traditional conceptual models, based solely on point concentrations obtained from monitoring wells, may underestimate secondary sources, compromising the effectiveness of remediation strategies. Additionally, contamination at great depths and in low-permeability zones further complicates contaminant removal. This study highlights the need for multidisciplinary approaches and scientific methodologies to reduce uncertainties and optimize investigation and remediation strategies for contaminated areas.

Key-words: *Geochemistry, contaminated sites, conceptual model, hydrogeology, remediation.*

1. Introdução e objetivos

A preocupação com áreas potencialmente contaminadas e seus processos de reabilitação tem se intensificado nos âmbitos científico, jurídico e técnico, refletindo a crescente conscientização sobre a importância dos recursos naturais para a manutenção da vida e dos ecossistemas. Elementos como o ar, o solo e a água são essenciais à saúde humana e ao equilíbrio ambiental, o que torna cada vez mais urgente a compreensão dos impactos gerados por contaminantes nos diferentes compartimentos do meio.

A caracterização ambiental é uma etapa crítica para a delimitação da contaminação, compreensão de seu comportamento e avaliação de riscos associados. Entretanto, esse processo ainda enfrenta desafios técnicos relevantes, que vão desde a heterogeneidade geológica e a complexidade dos processos físico-químicos até limitações nas metodologias convencionais, frequentemente incapazes de oferecer diagnósticos suficientemente representativos. Tais limitações comprometem não apenas a definição de estratégias eficazes de remediação, mas também a previsibilidade dos riscos e a segurança das decisões.

Este estudo tem como objetivo discutir os principais desafios técnicos da caracterização ambiental de áreas contaminadas, com foco nos mecanismos de transporte e transformação dos contaminantes, na influência das propriedades hidrogeológicas e geoquímicas e na dispersão e persistência de fontes secundárias em zonas de baixa permeabilidade. Ao longo da análise, busca-se evidenciar as limitações da abordagem tradicional, fundamentada em técnicas de baixa resolução e centrada na fase dissolvida, bem como defender

a necessidade de metodologias integradas, que aliem alta resolução espacial, análise multiparamétrica e fundamentação geoquímica robusta.

Além disso, pretende-se demonstrar como a adoção de técnicas inadequadas pode comprometer tanto a precisão diagnóstica quanto a efetividade das medidas corretivas. A partir dessa reflexão, o artigo propõe uma revisão crítica das práticas usuais e aponta caminhos para a superação de suas limitações, com vistas à redução de incertezas, à otimização da remediação e ao fortalecimento da segurança jurídica e ambiental das decisões técnicas.

2. Caracterização da contaminação: métodos, limitações e avanços

A identificação da contaminação em uma área depende da formulação de questões-chave que orientam a investigação ambiental. Entre as perguntas fundamentais estão:

- Qual a extensão da contaminação? – Determinar a distribuição dos contaminantes nas diferentes camadas hidroestratigráficas, no ar do solo e na água subterrânea;
- Existem receptores afetados? – Identificar se há, e quais são as populações humanas, ecossistemas ou recursos hídricos potencialmente expostos;
- Qual o nível e a duração da exposição? – Avaliar as concentrações dos contaminantes, as vias de exposição e os tempos envolvidos;
- Quais substâncias estão envolvidas? – Caracterizar as propriedades físico-químicas dos contaminantes e sua interação com o meio;
- Quais medidas são necessárias? – Definir estratégias de remediação eficazes, capazes de mitigar impactos e restaurar a qualidade ambiental.

Essas questões estruturam o planejamento da investigação, que requer abordagens metodológicas robustas e integradas para garantir a precisão na coleta e interpretação dos dados. A caracterização ambiental deve considerar não apenas a presença de contaminantes, mas também as condições geológicas, hidrogeológicas e geoquímicas que governam sua mobilidade e persistência. A heterogeneidade do meio físico, por exemplo, tem papel determinante na forma como os contaminantes se distribuem, interagem e são transportados no subsolo (ZUBEN, 2024).

Propriedades físicas do solo, como textura, porosidade, permeabilidade e conteúdo de matéria orgânica, influenciam diretamente os processos de adsorção, retenção e transporte dos contaminantes. Da mesma forma, na zona saturada, a dinâmica das águas subterrâneas – fluxo, recarga e dispersão hidrodinâmica – é essencial para compreender os mecanismos de atenuação natural e de remobilização. O uso de modelos hidrogeoquímicos e de fluxo e transporte de massa permite integrar essas variáveis, reduzindo incertezas na previsão do comportamento das plumas contaminantes (CETESB, 2023).

Apesar dos avanços metodológicos, as abordagens convencionais ainda são amplamente utilizadas, mesmo apresentando limitações críticas. Muitas investigações restringem-se à análise da fase dissolvida dos contaminantes, negligenciando a fase retida no solo e a presença de contaminantes na forma livre, como os NAPLs, que atuam como fontes secundárias persistentes. Essa limitação compromete a estimativa da massa total de contaminantes, subestima riscos e pode conduzir à seleção de estratégias de remediação inadequadas.

Além disso, a ausência de integração entre

diferentes técnicas de investigação – como perfilação vertical, modelagem hidrogeológica tridimensional e amostragem discreta – amplia as incertezas e compromete a construção de um modelo conceitual confiável. A predominância de dados obtidos exclusivamente por poços de monitoramento, muitas vezes com seções filtrantes longas, resulta em leituras médias e não representativas da dinâmica real do sistema contaminado (RIYIS *et al.*, 2015; SALE *et al.*, 2013). Essa limitação reforça a inadequação dos poços de monitoramento para a caracterização de áreas contaminadas, tornando-os mais apropriados para o monitoramento contínuo da qualidade da água subterrânea do que para a quantificação da contaminação e da distribuição dos contaminantes no meio subterrâneo.

A instalação dos poços de monitoramento deve ser cuidadosamente planejada de acordo com o objetivo da caracterização. Nas zonas de fluxo, filtros bem posicionados permitem o monitoramento da dinâmica das águas subterrâneas, fornecendo dados essenciais sobre a direção e a velocidade do fluxo e seu papel no transporte de contaminantes. Já nas zonas de armazenamento, os filtros possibilitam a avaliação da capacidade de retenção e liberação dos contaminantes, permitindo o cálculo mais preciso da massa de contaminante presente no aquífero e auxiliando na escolha de estratégias de remediação mais eficazes (CETESB, 2023).

Avanços recentes permitiram o desenvolvimento de modelos conceituais mais precisos, sustentados por dados de alta resolução e técnicas inovadoras de amostragem, como sensores multiparamétricos e perfilações geoquímicas contínuas. No entanto, essas ferramentas ainda enfrentam

resistência de adoção por parte de muitos profissionais, principalmente em contextos regulatórios nos quais sua aplicação não é exigida.

A ausência de coleta de amostras de solo na zona saturada é outro fator crítico. Investigações que ignoram essa etapa – especialmente em áreas impactadas por compostos orgânicos voláteis halogenados (COVH) (RONEN *et al.* 2005) – geram incertezas significativas e subestimam o potencial de remobilização dos contaminantes. A literatura aponta que a fração retida e residual pode representar a maior parte da massa total de contaminantes orgânicos em subsuperfície (RIYIS, 2019). Sem uma quantificação precisa da massa de contaminantes na fase retida e livre, torna-se impossível estimar a extensão da contaminação e seu potencial de remobilização ao longo do tempo.

A superação dessas limitações exige a adoção de protocolos de investigação mais abrangentes, capazes de integrar dados químicos, geológicos e hidrogeológicos. A utilização de tecnologias de alta resolução, aliada à construção de modelos conceituais dinâmicos, proporciona diagnósticos mais representativos e decisões mais assertivas, com impactos positivos na eficiência da remediação, na alocação de recursos e na segurança jurídica das ações.

3. Desafios técnicos na caracterização da contaminação

A caracterização da contaminação é um dos pilares da gestão de áreas contaminadas, pois fornece subsídios técnicos fundamentais para a compreensão do comportamento dos contaminantes e para a seleção de estratégias de remediação. Contudo, sua execução apresenta uma

série de desafios, sobretudo em ambientes com elevada complexidade geológica e hidrogeoquímica. A variabilidade litológica, a presença de zonas de baixa permeabilidade e os processos de retenção e transformação química dificultam a definição de modelos conceituais precisos e aumentam as incertezas envolvidas (ZUBEN, 2024).

De acordo com o ITRC - *Interstate Technology and Regulatory Council* (ITRC, 2017), os principais desafios técnicos na caracterização de áreas contaminadas estão relacionados a cinco grandes grupos:

- I. Condições geológicas: a heterogeneidade dos materiais geológicos, a presença zonas fraturadas e camadas de baixa permeabilidade impõem obstáculos à previsão do comportamento da pluma;
- II. Condições hidrogeológicas: variações sazonais do nível d'água, velocidades de fluxo e presença de contaminação em profundidade afetam o transporte e a atenuação dos contaminantes;
- III. Condições geoquímicas: parâmetros como pH, Eh, alcalinidade e temperatura influenciam diretamente os processos de mobilidade, transformação e retenção dos contaminantes;
- IV. Características dos contaminantes: a presença de líquidos imiscíveis (NAPLs), substâncias recalcitrantes ou misturas complexas representa um desafio à identificação precisa e à remediação eficaz;
- V. Sítios de grande escala: áreas de grande porte, com múltiplos receptores e plumas extensas, dificultam a obtenção de dados representativos e a aplicação de soluções convencionais.

A superação desses desafios depende da aplicação de metodologias adaptadas às especificidades de cada local e da adoção de ferr-

mentas que permitam aumentar a resolutividade da investigação. A combinação de abordagens geofísicas, geoquímicas e hidrogeológicas integradas possibilita a construção de modelos mais confiáveis e, conseqüentemente, o planejamento de estratégias de remediação mais efetivas.

A seguir, as subseções aprofundam os principais eixos técnicos que condicionam a complexidade da caracterização: geologia, dinâmica hidrogeológica, geoquímica, propriedades dos contaminantes e escala da contaminação.

3. 1. Complexidade geológica

A geologia do local impacta diretamente todas as etapas da caracterização ambiental, desde a formulação do modelo conceitual até a definição de estratégias de remediação. Em áreas com elevada heterogeneidade geológica, a investigação torna-se mais desafiadora, pois a composição, a estrutura e a textura dos materiais influenciam significativamente a mobilidade e o armazenamento de contaminantes.

Zonas com variações abruptas de permeabilidade – como lentes argilosas, camadas de silte intercaladas com areias ou presença de rochas fraturadas – podem promover comportamentos contrastantes no transporte de massa. Enquanto materiais de baixa permeabilidade atuam como barreiras ou reservatórios de contaminação, zonas mais permeáveis funcionam como vias preferenciais de fluxo, aumentando a velocidade de migração da pluma e a complexidade da sua delimitação.

A presença de fraturas em rochas sedimentares ou cristalinas representa um desafio adicional, pois cria caminhos de fluxo que não seguem padrões

horizontais ou verticais previsíveis. Nesses casos, as zonas fraturadas favorecem o transporte rápido de contaminantes a grandes distâncias, dificultando a localização precisa das fontes e exigindo abordagens específicas de amostragem e modelagem.

Para superar essas limitações, a construção de um modelo conceitual robusto deve considerar a integração de dados geofísicos, hidrogeológicos e geoquímicos, incluindo parâmetros como porosidade efetiva, anisotropia, condutividade hidráulica e capacidade de adsorção dos diferentes materiais. A modelagem tridimensional do meio físico, associada à caracterização das zonas de armazenamento e das zonas de fluxo preferencial, permite representar adequadamente a interação entre os contaminantes e o meio geológico.

A migração dos contaminantes em subsuperfície, nesse contexto, é regida por processos altamente não lineares, sensíveis às variações na estrutura geológica. Materiais finos e compactos, como argilas, possuem elevada capacidade de adsorção e são frequentemente associados à presença de contaminantes retidos por longos períodos. Ao mesmo tempo, sua baixa permeabilidade limita a difusão e dificulta a remediação. Assim, compreender as interações entre litologia, hidrodinâmica e geoquímica é crucial para definir estratégias compatíveis com a complexidade local.

3. 2. Dinâmica hidrogeológica

A compreensão da dinâmica das águas subterrâneas é essencial para a caracterização de áreas contaminadas, pois os processos de fluxo, dispersão e atenuação estão diretamente associados às propriedades hidráulicas dos aquíferos. Entretanto,

a heterogeneidade e a anisotropia desses sistemas dificultam a elaboração de modelos conceituais robustos e representam uma das principais fontes de incerteza em investigações ambientais.

Fatores como a velocidade do fluxo subterrâneo, a direção preferencial do escoamento e as flutuações sazonais do nível freático afetam significativamente a mobilidade e a persistência dos contaminantes (ITRC, 2017). Durante períodos de recarga, o aumento do fluxo pode promover tanto a diluição quanto a dispersão da contaminação, expandindo a área afetada. Já em períodos de estiagem, o rebaixamento do nível da água pode concentrar contaminantes na zona não saturada, alterando suas interações geoquímicas e potencializando processos como volatilização e sorção.

Em aquíferos de baixa permeabilidade, a baixa velocidade de fluxo dificulta a dispersão dos contaminantes e favorece o acúmulo de massa na matriz porosa, prolongando o tempo necessário para a remediação. Além disso, essas zonas atuam como reservatórios de contaminantes que podem ser remobilizados por mudanças nas condições hidráulicas ou geoquímicas, contribuindo para a manutenção da pluma ao longo do tempo.

A flutuação do nível freático afeta diretamente a mobilidade dos *Light Non-Aqueous Phase Liquids* (LNAPLs), cuja acumulação na interface entre as zonas saturada e não saturada pode ser alterada em função das variações sazonais. Quando o nível da água subterrânea se eleva ou rebaixa, os LNAPLs podem ser redistribuídos, aprisionados ou remobilizados, formando zonas de contaminação complexas de difícil acesso por métodos convencionais de remediação (ITRC, 2017).

A investigação de contaminação em grandes profundidades impõe desafios adicionais. Métodos tradicionais de amostragem muitas vezes não atingem essas zonas com precisão, exigindo o uso de tecnologias como poços multiníveis, perfisagens verticais de alta resolução e amostragem discreta para detectar e caracterizar as plumas dissolvidas com maior fidelidade.

Para lidar com essas limitações, é essencial integrar dados de monitoramento hidrogeológico com modelagem matemática, considerando não apenas os gradientes hidráulicos e os parâmetros físico-químicos, mas também as interações entre as zonas de fluxo preferencial e as zonas de armazenamento. Essa abordagem é indispensável para reduzir incertezas e orientar decisões mais eficazes na seleção e no dimensionamento de estratégias de remediação.

3. 3. Influência da geoquímica

A geoquímica do meio subterrâneo exerce influência determinante sobre a mobilidade, transformação e persistência dos contaminantes. Parâmetros como pH, potencial de oxirredução (Eh), alcalinidade, salinidade, temperatura e composição mineralógica afetam processos cruciais, como adsorção, precipitação, dissolução e biodegradação, interferindo diretamente na eficácia das estratégias de remediação.

O pH, por exemplo, controla a solubilidade de diversos metais e compostos orgânicos. Em ambientes ácidos, os metais pesados tendem a se tornar mais solúveis e móveis, enquanto em pH alcalino podem precipitar como hidróxidos. Variações no pH também afetam a atividade microbiana, po-

dendo inibir ou favorecer processos de biodegradação. No caso da remediação de solventes clorados por decloração redutiva, o pH inferior a 6 pode comprometer a atividade de microrganismos como *Dehalococcoides mccartyi*, essenciais para a degradação de compostos organoclorados (GROSTERN & EDWARDS, 2005; DUHAMEL & EDWARDS, 2006). No ambiente natural, essa espécie anaeróbia estrita utiliza exclusivamente o hidrogênio molecular (H_2) como doador de elétron para sua atividade metabólica, desempenhando um papel crucial na transformação de compostos organoclorados em produtos menos tóxicos (GROSTERN & EDWARDS, 2005). Dessa forma, variações no pH podem não apenas inibir a atividade microbiana benéfica, mas também alterar a eficácia de estratégias de remediação baseadas na estimulação biológica.

A alcalinidade, por sua vez, está associada à capacidade do aquífero de tamponar variações de pH. Valores muito baixos podem levar à acidificação do meio, prejudicando reações redox e a atividade biológica. Em contrapartida, alcalinidade elevada pode favorecer a geração de dióxido de carbono durante a fermentação de substratos orgânicos, resultando na formação de bolhas gasosas na zona saturada. Esse fenômeno reduz a condutividade hidráulica do solo e dificulta a distribuição uniforme de soluções remediadoras (ITRC, 2017).

A composição mineralógica do solo também exerce papel importante nos mecanismos de sorção. Minerais como argilas e óxidos de ferro possuem elevada capacidade de adsorção, retardando o transporte de contaminantes. A presença de matéria orgânica natural pode atuar tanto como barreira quanto como facilitadora da migração, de-

pendendo da afinidade com os contaminantes e das condições redox do sistema.

A salinidade e a condutividade elétrica influenciam a competição por sítios de adsorção e podem afetar o desempenho de técnicas baseadas em reações eletrocinéticas. Já a temperatura regula a cinética das reações químicas e a atividade microbiana. Temperaturas elevadas favorecem reações de hidrólise e oxidação, enquanto temperaturas muito baixas podem desacelerar significativamente processos biológicos essenciais, comprometendo a efetividade de estratégias baseadas em biodegradação (ITRC, 2017).

Em ambientes com alta dureza – caracterizada pela presença de íons cálcio e magnésio – a complexação e precipitação de contaminantes pode ser alterada, interferindo na disponibilidade de reagentes e na eficiência das técnicas de remediação. Além disso, a dureza pode influenciar processos como a formação de incrustações em sistemas de extração e tratamento de água.

A temperatura do meio subterrâneo afeta diretamente as taxas cinéticas da reação química e a atividade microbiana envolvida nos processos de biodegradação. Temperaturas elevadas podem acelerar reações de oxidação, promovendo a hidrólise de etanos clorados, compostos notoriamente recalcitrantes à biodegradação, enquanto temperaturas reduzidas podem desacelerar processos bioquímicos essenciais, comprometendo a eficácia de estratégias baseadas na injeção de reagentes (ITRC, 2017).

Esses processos dependem da reatividade química e da atividade microbiana para promover a degradação ou imobilização dos contaminantes, e a redução da temperatura pode diminuir a taxa de

difusão dos reagentes, impactando sua dispersão e efetividade. Além disso, em cenários onde há plumas extensas ou contaminação em profundidade, temperaturas mais baixas podem prolongar substancialmente o tempo necessário para a remediação, restringir as opções tecnológicas disponíveis e elevar os custos operacionais do processo (ITRC, 2017). Nessas condições, a escolha da estratégia de remediação deve considerar não apenas a geoquímica e a hidrogeologia do local, mas também a influência térmica no desempenho dos tratamentos aplicados.

A avaliação detalhada dos parâmetros geoquímicos deve, portanto, fazer parte das etapas iniciais da caracterização ambiental, permitindo o diagnóstico mais preciso das condições do meio e a seleção de abordagens remediadoras compatíveis com as limitações e potencialidades locais. A negligência desses fatores pode comprometer seriamente a efetividade da intervenção, gerar custos adicionais e prolongar o tempo de reabilitação da área impactada.

3. 4. Características dos contaminantes

A caracterização adequada dos contaminantes é essencial para compreender sua mobilidade, persistência e toxicidade no ambiente subterrâneo. As propriedades físico-químicas das substâncias – como densidade, solubilidade, volatilidade, pressão de vapor e coeficientes de partição – determinam sua interação com os diferentes compartimentos ambientais e influenciam diretamente as estratégias de investigação e remediação.

A natureza dos contaminantes exerce influência direta nos desafios associados à caracterização da contaminação, exigindo abordagens

diferenciadas conforme suas propriedades físico-químicas. Os líquidos imiscíveis, conhecidos como NAPLs (*Non-Aqueous Phase Liquids*), impõem desafios específicos à caracterização e ao tratamento de áreas contaminadas. Esses compostos formam uma fase separada da água e migram de maneira independente, podendo acumular-se em zonas de baixa permeabilidade ou em estruturas geológicas complexas. Dentro desse grupo, distinguem-se os DNAPLs (*Dense Non-Aqueous Phase Liquids*), que afundam na coluna de água subterrânea devido à sua densidade elevada, e os LNAPLs (*Light Non-Aqueous Phase Liquids*), que tendem a flutuar sobre o nível freático. Portanto, durante uma investigação, as características de migração e retenção no subsolo devem ser consideradas.

Os DNAPLs, como solventes clorados, devido à sua densidade superior à da água subterrânea, tendem a migrar para zonas mais profundas através de descontinuidades e fraturas até encontrarem barreiras de baixa permeabilidade. Nesses locais, podem permanecer retidos por décadas, liberando gradualmente contaminantes para a fase dissolvida por meio de processos de difusão e retrodifusão – um fenômeno que torna a remediação extremamente desafiadora (ITRC, 2011). A sua baixa solubilidade garante que mesmo pequenas quantidades de produto residual possam sustentar concentrações elevadas na pluma dissolvida por longos períodos.

Por outro lado, os LNAPLs – frequentemente derivados de petróleo – acumulam-se na zona não saturada ou flutuam na interface água-solo. Embora mais acessíveis à investigação inicial, esses compostos também representam fontes contínuas de

contaminação dissolvida e gasosa. Sua mobilidade está relacionada a fatores como tensão capilar, variações do nível d'água e heterogeneidade do meio poroso, que afetam sua redistribuição espacial ao longo do tempo. E embora sua distribuição possa parecer mais previsível, que a dos DNAPLs, os LNAPLs podem resultar em contaminação difusa, favorecendo a formação de plumas dissolvidas e a retenção de hidrocarbonetos no solo, o que prolonga a persistência da contaminação e complica as estratégias de remediação (NRC, 2013).

Os NAPLs, por serem fluidos não molhantes, tendem a ocupar o centro dos poros do solo. Nessa posição, permanecem relativamente imóveis, a menos que condições específicas – como pressões capilares elevadas e alta conectividade dos poros – favoreçam seu deslocamento. Ainda assim, mesmo em estado aparentemente estático, esses compostos podem atuar como fontes contínuas para as fases dissolvida e gasosa, contribuindo para a manutenção da contaminação a partir de sua fração retida ou residual. Nessa posição, mesmo que imobilizados, os NAPLs podem atuar como fontes contínuas de contaminação em fase dissolvida, desde que contenham compostos solúveis e haja fluxo de água suficiente – fluido molhante – atravessando esses poros. Assim, a presença de NAPL, seja LNAPL ou DNAPL, representa um aporte contínuo de massa de contaminante para as fases aquosa e gasosa do solo, independentemente do mecanismo envolvido, seja por difusão ou retrodifusão.

As zonas de baixa permeabilidade, como argilas e siltes, representam um desafio particular: embora funcionem como barreiras ao fluxo, têm elevada capacidade de retenção, acumulando con-

taminantes que, posteriormente, podem ser liberados para zonas mais permeáveis por difusão reversa. Essa característica transforma essas zonas em fontes secundárias persistentes, prolongando a duração das plumas dissolvidas e dificultando a reabilitação completa da área impactada (ITRC, 2017).

Além disso, a migração de compostos voláteis no ar do solo requer atenção especial. A volatilização e a intrusão de vapores representam vias relevantes de exposição humana, especialmente em áreas urbanas. Técnicas específicas de amostragem de vapores, modelagens de fluxo gasoso e análise de risco por intrusão devem ser incorporadas às investigações, ampliando a compreensão da dinâmica de contaminantes gasosos em subsuperfície.

Misturas complexas de contaminantes – como aquelas compostas por solventes clorados, hidrocarbonetos e metais – representam um nível adicional de complexidade. A interação entre substâncias com diferentes comportamentos pode alterar sua solubilidade, toxicidade e sorção, dificultando previsões e limitando a eficácia de tratamentos isolados. Interações sinérgicas ou antagonistas podem, por exemplo, inibir processos de biodegradação ou potencializar efeitos tóxicos cumulativos (ZUBEN, 2024).

Dessa forma, a caracterização precisa das propriedades dos contaminantes – isoladamente e em mistura – é condição *sine qua non* para o planejamento eficiente da remediação. Essa abordagem requer o uso de técnicas analíticas avançadas e integração com modelos de fluxo e transporte, permitindo a identificação de *hotspots*, a delimitação de plumas e a seleção de tecnologias compatíveis com as características físico-químicas dos poluentes presentes.

3. 5. Escala e extensão da contaminação

A extensão espacial e a profundidade da contaminação são fatores determinantes na complexidade das investigações ambientais e no sucesso das estratégias de remediação. Áreas contaminadas de grande porte exigem volumes expressivos de dados para garantir uma caracterização representativa, demandando o uso de ferramentas avançadas de modelagem, interpolação geoespacial e técnicas de amostragem com alta resolução.

Modelos tridimensionais de fluxo e transporte permitem simular a dispersão dos contaminantes ao longo do tempo e avaliar a influência de variáveis hidrogeológicas em diferentes cenários. Essa abordagem é especialmente útil na delimitação de plumas dissolvidas e na identificação de zonas de retenção ou *hotspots*, possibilitando a alocação eficiente de recursos e a definição de estratégias de remediação adaptadas à complexidade local.

A proximidade da contaminação em relação a zonas urbanizadas, aquíferos de abastecimento público ou ecossistemas sensíveis amplia a criticidade da área e eleva os riscos socioambientais. Nesses casos, a avaliação de risco à saúde humana deve ser conduzida com rigor, considerando diferentes vias de exposição, características dos receptores e a persistência da contaminação ao longo do tempo. A integração de dados hidrogeológicos, geoquímicos e toxicológicos é essencial para garantir um diagnóstico robusto e orientar ações de mitigação direcionadas.

Contudo, a complexidade de uma área contaminada não se resume à sua dimensão física. A presença de múltiplas plumas, compostos com propriedades físico-químicas distintas e receptores

variados aumenta a incerteza associada à investigação e dificulta a aplicação de soluções padronizadas. Essa multiplicidade de fatores impõe a necessidade de abordagens integradas e customizadas, capazes de lidar com as interações entre contaminantes, meio físico e condições ambientais locais.

A profundidade em que os contaminantes se encontram também influencia diretamente a viabilidade técnica e econômica da investigação e da remediação. Contaminações mais superficiais podem ser abordadas com técnicas de menor complexidade e custo, enquanto aquelas que atingem grandes profundidades – especialmente em sistemas fraturados ou em unidades de baixa permeabilidade – requerem tecnologias específicas, maior esforço amostral e tempo prolongado para sua reabilitação. Nessas situações, o uso de ferramentas como poços multiníveis, perfuração contínua e sensores de leitura em tempo real torna-se essencial para reduzir incertezas e subsidiar a seleção de estratégias mais eficazes.

Portanto, compreender a escala e a extensão da contaminação é fundamental não apenas para a caracterização técnica, mas também para a definição de metas realistas de remediação, o dimensionamento de investimentos e a avaliação de riscos regulatórios e jurídicos. A negligência desses aspectos compromete a efetividade das ações corretivas e pode gerar custos adicionais, atrasos no processo de reabilitação e riscos persistentes à saúde humana e ao meio ambiente.

4. Discussão

Apesar dos avanços nas tecnologias de caracterização ambiental, sua adoção no campo continua limitada por entraves como os custos iniciais

e a falta de infraestrutura especializada. Como consequência, práticas convencionais permanecem amplamente utilizadas, mesmo quando comprometem a precisão na delimitação da contaminação e elevam os custos de remediação no longo prazo.

Embora os métodos tradicionais tenham historicamente sustentado a evolução das investigações ambientais, atualmente revelam-se insuficientes frente à complexidade dos processos geoquímicos e hidrogeológicos que controlam o comportamento dos contaminantes. O uso exclusivo de poços de monitoramento, aliado à ausência de amostras de solo na zona saturada e à negligência das fases retida e residual, compromete sistematicamente a construção de modelos conceituais realistas e, por consequência, o sucesso das estratégias de remediação. O diagnóstico de uma área contaminada exige uma abordagem integrada e multidisciplinar, capaz de capturar as dinâmicas físico-químicas e biológicas envolvidas nos processos de transporte e retenção de contaminantes. Modelos conceituais robustos são a base para decisões técnicas eficazes, e sua construção depende diretamente da qualidade, resolução e representatividade dos dados coletados.

No entanto, a aplicação recorrente de poços de monitoramento como principal ferramenta de investigação compromete esse processo. Estudos como os de WELTY *et al.* (2016) e SALE *et al.* (2013) demonstram que essa técnica, projetada para o acompanhamento temporal da qualidade da água subterrânea, apresenta limitações significativas para a caracterização espacial da contaminação. O uso de seções filtrantes longas, por exemplo, dilui concentrações e mascara heterogeneidades cruciais,

gerando uma média ponderada da condutividade hidráulica pouco representativa das zonas de fluxo ou de armazenamento. Além disso, a ausência de amostras de solo na zona saturada – particularmente grave em casos envolvendo COVH – impede a estimativa precisa da massa total de contaminantes e a identificação de fontes secundárias.

A permanência de abordagens centradas apenas na fase dissolvida resulta em diagnósticos incompletos e subestima a massa total de contaminantes no sistema. Essa prática, ainda recorrente em diversas regiões, mesmo diante do avanço técnico-científico, perpetua erros históricos e reforça um ciclo de reavaliações, retrabalhos e ineficiência. Além disso, ao ignorar mecanismos como difusão reversa e armazenamento em zonas de baixa permeabilidade, tais métodos contribuem para a persistência de fontes secundárias e a recontaminação de áreas já remediadas, aumentando custos e prazos.

Esse tipo de lacuna é mais do que uma deficiência técnica: representa um risco à saúde pública e à integridade dos ecossistemas, além de enfraquecer tecnicamente decisões administrativas e judiciais. Quando a maior parte da massa de contaminantes está retida no solo e não é devidamente quantificada, há subestimação dos riscos e seleção de estratégias de remediação inadequadas.

A permanência do modelo tradicional de investigação – centrado em etapas sequenciais, poços de monitoramento e amostragem esparsa – evidencia uma desconexão entre o conhecimento científico consolidado nas últimas décadas e as práticas de campo ainda adotadas, mesmo em países com estrutura técnica avançada.

A lógica investigativa predominante falha ao

presumir que a contaminação pode ser delimitada por interpolação entre poucos pontos de amostragem. Essa abordagem é estatisticamente frágil, ignora heterogeneidades geológicas relevantes e frequentemente subestima a extensão lateral e vertical da massa contaminante. O resultado é a criação de modelos conceituais simplificados, que sustentam decisões técnicas frágeis e, em última instância, comprometem os objetivos centrais da remediação: a proteção da saúde humana e do ambiente.

Essa crítica se torna ainda mais grave quando considerada sob a ótica da responsabilidade técnica e jurídica dos profissionais que assinam esses modelos. A omissão de dados críticos, como a ausência de amostragem direta de solo na zona saturada ou a não consideração de mecanismos como difusão reversa e sorção irreversível, compromete a validade do modelo conceitual. Como afirmam FALTA *et al.* (2021), negligenciar os processos físico-químicos que controlam o destino e transporte de contaminantes equivale a construir diagnósticos ambientais com base em premissas falsas.

A consequência mais visível é a recorrente seleção de tecnologias de remediação ineficazes, com base em premissas equivocadas sobre a localização e a massa residual de contaminantes. Essa falha técnica, embora muitas vezes tratada como limitação do “estado da arte”, é na verdade reflexo da ausência de uma cultura de investigação crítica e de qualidade. A mera conformidade com requisitos legais mínimos não é compatível com a complexidade dos processos que governam a dinâmica de contaminantes em meio poroso.

Nesse contexto, torna-se imperativo desconstruir o modelo tradicional de investigação ambien-

tal. Isso não significa apenas propor a substituição de técnicas, mas sim mudar o paradigma: sair de uma lógica linear e burocrática para uma abordagem adaptativa, baseada em hipóteses, em constante refinamento, e sustentada por ferramentas de alta resolução. Técnicas como MIP (*Membrane Interface Probe*), LIF (*Laser-Induced Fluorescence*), perfilagem vertical e investigação direta da zona saturada com recuperação de solo devem ser incorporadas de forma sistemática, e não apenas como “complementos” opcionais. A seleção da ferramenta deve ser guiada pela pergunta investigativa, não pelo orçamento predefinido.

Essa transição metodológica exige mais do que capacitação técnica: requer revisão das normas técnicas, mudança nos critérios de aceite de órgãos reguladores e responsabilidade compartilhada entre consultores, responsáveis legais e instituições de ensino. O atual modelo técnico-normativo estimula a produção de dados previsíveis, que servem mais para satisfazer exigências formais do que para apoiar decisões robustas. A superação desse modelo passa pela valorização do pensamento crítico, pela adoção de protocolos orientados à redução de incertezas e pela reformulação dos indicadores de qualidade da investigação ambiental.

Portanto, enquanto persistir a aceitação de modelos conceituais baseados em dados escassos, sem representatividade estatística ou amostral, continuará havendo contaminações subdimensionadas, remediações fracassadas e riscos ambientais invisibilizados. O custo real dessa falha recai sobre a sociedade – na forma de água contaminada, solos improdutivos, gastos públicos e perda de confiança nos instrumentos de controle ambiental.

É imperativo romper com a lógica da investigação baseada exclusivamente em pontos de monitoramento com baixa resolução. Propõe-se a obrigatoriedade de abordagens integradas baseadas em ferramentas de alta resolução (e.g., perfilagem vertical, sensores *in situ*, piezocône com resistividade), uso de modelos numéricos tridimensionais, coleta sistemática de solo na zona saturada e análise da massa total de contaminantes em múltiplas fases. Além disso, é essencial o fortalecimento de políticas públicas e normativas que exijam a aplicação das melhores técnicas disponíveis (BAT – *Best Available Techniques*), desestimulando práticas que, embora usuais, são comprovadamente ineficientes.

Diante desse cenário, ao integrar fundamentos científicos sólidos, métodos analíticos robustos e interpretação crítica dos processos naturais e antrópicos que regem o comportamento dos contaminantes, a geoquímica permite construir modelos conceituais verdadeiramente representativos. Seu uso não pode ser restrito à complementação estética de relatórios ou à produção de gráficos de concentração; deve ser central na definição de hipóteses, na seleção de pontos críticos de investigação, na estimativa de massa contaminante e na avaliação da efetividade das tecnologias de remediação.

Ao incorporar a lógica pericial – baseada na análise de causa,nexo e consequência –, o processo investigativo se qualifica tecnicamente e ganha densidade jurídica. É nesse ponto de inflexão que este artigo propõe se posicionar: na superação do tecnicismo automático e na construção de um novo olhar, mais profundo, criterioso e comprometido com a verdade técnica e ambiental.

5. Conclusões

A caracterização ambiental de áreas contaminadas permanece como um dos maiores desafios técnicos e conceituais na gestão de passivos ambientais. Embora os avanços científicos e tecnológicos tenham ampliado significativamente as ferramentas disponíveis, a adoção generalizada de metodologias convencionais – muitas vezes desatualizadas e baseadas em premissas simplificadas – compromete a precisão dos diagnósticos e a efetividade das ações de remediação. O presente artigo demonstrou que, em um cenário marcado pela heterogeneidade geológica, pela complexidade geoquímica e pela presença de contaminantes com comportamentos diversos, abordagens tradicionais são frequentemente insuficientes para capturar a real extensão e dinâmica da contaminação.

Entre os principais entraves identificados, destacam-se a negligência da fração retida e residual, a ausência de amostragem sistemática na zona saturada, o uso indiscriminado de poços de monitoramento com filtros longos e a subvalorização dos parâmetros geoquímicos que controlam a mobilidade e transformação dos contaminantes. Essas lacunas metodológicas resultam em modelos conceituais frágeis, capazes de induzir a escolhas inadequadas de tecnologias de remediação, prolongando os impactos ambientais e elevando os custos do processo. Além disso, a manutenção de práticas investigativas pouco resolutivas pode comprometer decisões administrativas e judiciais, perpetuando a exposição humana a riscos evitáveis e atrasando a reabilitação de áreas críticas.

Neste contexto, é imperativo abandonar definitivamente a lógica da “investigação mínima” –

muitas vezes limitada à fase dissolvida e orientada por exigências legais mínimas – e adotar uma postura crítica e propositiva quanto à chamada “investigação tradicional”. Não se trata apenas de incorporar novas ferramentas, mas de reconhecer que os paradigmas que sustentaram a gestão de áreas contaminadas no século XX já não respondem à complexidade dos problemas contemporâneos. A adoção de protocolos integrados e resolutivos, que articulem tecnologias de alta resolução, modelagem tridimensional e conhecimento aprofundado da geoquímica local, é a única forma de avançar em direção a uma gestão ambiental mais eficiente, segura e juridicamente sólida.

Assim, este artigo reforça que uma caracterização robusta não é um fim em si, mas uma etapa essencial para garantir decisões técnicas mais bem fundamentadas, intervenções mais eficazes, economia de recursos e segurança para os diversos atores envolvidos. Mais do que uma questão técnica, trata-se de uma responsabilidade ética, ambiental e institucional com a sociedade e com as gerações futuras.

6. Referências

CETESB. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. 3ª. ed. São Paulo: CETESB, 2023.

DUHAMEL, M.; EDWARDS, E. A. Microbial composition of chlorinated ethene-degrading cultures dominated by Dehalococcoides. **FEMS Microbiology Ecology**, Oxford, v. 58, n. 3, p. 538–549, 2006.

FALTA, R.W., BASU, N., RAO, P.S.C. A methodology for evaluating back diffusion from low-permeability zones in groundwater remediation. **Ground Water**, 43(6), 947–956, 2005.

GROSTERN, A.; EDWARDS, E. A. Growth of Dehalobacter and Dehalococcoides spp. during degradation of chlorinated ethanes. **Applied and Environmental Microbiology, American Society for Microbiology**, v. 72, n. 1, p. 428-436, 2005.

ITRC. **Green and sustainable remediation: a practical framework**. Washington, D.C.: ITRC, 2011.

ITRC. **Remediation management of complex sites**. RMCS-1. Washington, D.C.: ITRC, 2017.

NRC. **Alternatives for managing the nation's complex contaminated groundwater sites**. Washington, D.C.: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2013.

RIYIS, M. T.; DERRITE, R. M.; RIYIS, M. T. Estimativa de massa retida de contaminantes utilizando ferramentas de alta resolução (HRSC). **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)**. v 5, nº 2, 2015. pp. 38-49, 2015.

RIYIS, M. T. **Contribuição para investigação de áreas contaminadas com abordagem de alta resolução**. 2019. 162 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019.

RONEN, D.; LAOR, Y.; KAPLAN, I.; GRABER, E. R. Volatile organic compounds in the saturated–unsaturated interface region of a contaminated phreatic aquifer. **Vadose Zone Journal**, v. 4, n. 1, p. 337–344, 2005.

SALE, T.; PARKER, B.; NEWELL, C.; DEVLIN, J. F.; ADAMSON, D.; CHAPMAN, S.; SALLER, K. Management of contaminants stored in low permeability zones: a state of the science review. **SERDP Project ER-1740, Strategic Environmental Research and Development Program**, Arlington, Virginia, 2013.

WELTY, N.; CURRY, P.; QUINNAN, J. Smart characterization and return of investigation. In: **Advances in remediation: a new way of thinking**. p.13-18, 2016.

ZUBEN, E. V. **Geoquímica aplicada à perícia ambiental**. 2024. 275 f. Tese (Doutorado em Geoquímica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2024.