

USO DA ANÁLISE MULTICRTERIAL NA TOMADA DE DECISÃO PARA A SELEÇÃO DE TECNOLOGIA DE REMEDIAÇÃO SUSTENTÁVEL DE ÁREAS CONTAMINADAS COM SOLVENTES CLORADOS

1. INTRODUÇÃO

A contaminação por solventes clorados, como percloroeteno (tetracloroeteno ou PCE) ocorre em vários locais no mundo e pode representar um risco a saúde humana e ao meio ambiente, pois representam alguns dos contaminantes mais persistentes no solo e nas águas subterrâneas em todo o mundo. Nos últimos 30 anos, as experiências em investigação e remediação de áreas contaminadas com essas substâncias mostraram-se difíceis (podendo chegar a ~ 20 anos), devido a constatação de que muitas décadas são necessárias para a dissolução natural da água subterrânea para dissipar as suas fontes uma vez que essas substâncias tendem a penetrar rocha fraturada e argila e, na maioria dos compartimentos de diferentes características hidrogeológicas (ENVIRONMENT AGENCY, 2003).

Dessa forma, a remediação completa de tais locais pode ser prolongada e envolver várias tecnologias. Com uma abordagem integrada e estratégica de gerenciamento ambiental é possível que o progresso significativo do processo de remediação em um prazo razoável em locais afetados por solventes clorados. Essa abordagem deve ser construída tendo o conhecimento das características do solo e as descrições claras das metas de remediação, resultando em uma estratégia de gerenciamento ambiental com a seleção de tecnologias de remediação aplicadas em sequência ou em paralelo projetadas para otimizar o desempenho e aproveitar os potenciais efeitos sinérgicos. Ressalta-se que o desenvolvimento dessa estratégia deve ser realizado com dados confiáveis, metas de remediação alcançáveis e possuir o desempenho mensurável. De qualquer maneira, deve-se considerar a limitação e a incerteza de se caracterizar totalmente a subsuperfície e distribuição desse tipo de contaminação, incluindo a remoção, recuperação ou limitações das tecnologias de remediação disponíveis (ENVIRONMENT AGENCY, 2003).

Devido a possibilidade de tempo prolongado no processo de remediação de área contaminada com solvente clorados, a tomada de decisão de como remediar e reabilitar essas áreas contaminadas deve envolver mais do que apenas selecionar técnicas de remediação para atender aos regulamentos para um determinado uso. Os responsáveis legais (proprietários) e seus responsáveis técnicos (consultores) também precisam entender aspectos como uso alternativo da área e responsabilidades ambientais, além de incorporar como questões de incerteza podem afetá-los. Dessa forma, imprescindível a busca pela remediação sustentável.

Diversas tecnologias foram desenvolvidas visando a remediação completa e as abordagens para a seleção e a tomada de decisão, que antes era baseada em custos, progrediram com a inclusão de critérios de viabilidade, riscos, sustentabilidade, partes interessadas e o poder público. (CRC FOR CONTAMINATION ASSESSMENT AND REMEDIATION OF THE ENVIRONMENT, 2018). Nesse sentido, foi desenvolvida uma metodologia que possibilita o fornecimento de uma estrutura para que os responsáveis de áreas contaminadas tomem decisões, baseadas em uma abordagem passo a passo para melhorar a tomada de decisão ao contemplar a remediação de áreas contaminadas com solventes clorados, identificando o uso da área, a combinação de critérios de ação corretiva que maximiza os benefícios, equilibrando a mitigação dos riscos e os gastos necessários para alcança-los. Pesquisas futuras devem incluir o desenvolvimento de uma metodologia complementar que incorpore objetivos ecológicos e comunitários, resultando em uma estrutura de decisão unificada (BRINKHOFF, 2011; TAM e BYER, 2002).

2. PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

Existem muitas técnicas para remediação de solventes clorados. No entanto, a remediação pode sofrer problemas ao longo do processo, como altos custos e poluição secundária, que podem afetar a reabilitação de uma área contaminada por solventes clorados. Portanto, a seleção de uma tecnologia adequada é crucial. A tomada de decisão vem se tornando complicada devido ao envolvimento de múltiplas partes interessadas com objetivos conflitantes. Por isso, para contribuir e apoiar a tomada de decisão para a seleção de técnicas de remediação, a análise multicriterial (AMC) tem sido empregada, devido a sua capacidade de classificar opções alternativas de acordo com as preferências das partes interessadas por meio de ponderações, incluindo critérios de viabilidade, riscos, sustentabilidade, partes interessadas e o poder público.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Áreas contaminadas e solventes clorados

Solventes clorados, como tricloroetano (TCE), tetracloroetano (PCE), tetraclorometano (tetracloreto de carbono, CT ou CTET) e cloreto de vinila, fazem parte de um grupo de contaminantes chamados de Fase Líquida não Aquosa mais Densa que a Água (DNAPLs) que tem sido utilizado na indústria desde o início do século XX, para limpeza a seco, eliminação de gorduras de metais, produção farmacêutica, formulação de pesticidas e intermediários químicos (ENVIRONMENT AGENCY, 2003).

Há relatos de descarte de solvente clorados residuais e resíduos de destilação dos anos 1940 até o início de 1970 era realizado com o espalhamento dessas substâncias em solo seco para promover a evaporação, além disso há evidências de descarte em tanques de evaporação não revestidos e lagoas vazando tanques de armazenamento e desengraxantes a vapor, vazamento de tubulação e derramamentos acidentais durante o manuseio e transporte. Devido à falta de métodos analíticos e equipamentos adequados para detectar baixas concentrações de compostos orgânicos nas águas subterrâneas, o conhecimento dos riscos dos solventes clorados ocorreu somente a partir da década de 1980. Não se tinha também conhecimento na época da capacidade dos DNAPLs de infiltrar-se rapidamente na subsuperfície, causando poluição do solo e das águas subterrâneas (ENVIRONMENT AGENCY, 2003).

Os DNAPLs são pouco solúveis em água, por isso se apresentam como um fluido imiscível com a água e o ar na subsuperfície. Diferentemente dos chamados Fase Líquida não Aquosa menos Densa que a Água (LNAPLs), como gasolina e óleo (que são menos densos que a água), os DNAPLs (que são mais densos que a água) têm a capacidade de migrar para profundidades significativas abaixo do lençol freático, onde se dissolvem lentamente em águas subterrâneas, dando origem a plumas de fase aquosa (ENVIRONMENT AGENCY, 2003).

Em vários lugares do mundo existem áreas contaminadas com DNAPLs, por exemplo, no Reino Unido há registro de milhares de áreas contaminadas por DNAPL, assim como América do Norte e Europa continental. Muitas dessas contaminações ocorreram em meados do século 20 (coincidente com o aumento da atividade industrial pós-Segunda Guerra Mundial), bem como com as descargas mais recentes (ENVIRONMENT AGENCY, 2003).

A investigação e remediação desse tipo de contaminação é recente. Nos últimos 30 anos os registros mostram que o gerenciamento desse tipo de área contaminada é difícil, pois a possibilidade de DNAPLs penetrar na rocha fraturada e argila dificulta as atividades de reconhecimento e, portanto, remediação, sendo necessário muitas décadas para dissolução natural ou gerenciamento ambiental (ENVIRONMENT AGENCY, 2003).

Em relação ao risco, os DNALPs se mostraram tóxicos para fauna e a flora. De acordo com a International Agency for Research on Cancer (2012) a classificação de alguns DNAPIs como o PCE, TCE e outros derivados varia de cancerígenos e possivelmente cancerígenos para humanos, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos grupos carcinogênicos encontrados na área

Nome do composto	Grupo Carcinogênico*
Tricloroetano (TCE)	grupo 1
Tetracloroetileno (PCE)	grupo 2A
Cloreto de Vinila	grupo 1
1,2-Dicloroetano	grupo 2B
1,1,1,2-Tetracloroetano	grupo 2B
1,1,2,2-Tetracloroetano	grupo 2B

* 1 – cancerígeno para humanos

2A – possivelmente cancerígenos para humanos. Apesar de haver poucas evidências dos efeitos carcinogênicos em humanos, há uma certeza desses efeitos em animais e do mecanismo causador de câncer da própria natureza química da substância.

2B – possivelmente cancerígenos para humanos. Não há evidências suficientes dos efeitos carcinogênicos nos seres vivos, nem há conhecimento suficiente da natureza química da substância.

Fonte: International Agency for Research on Cancer (2012).

Certos compostos DNAPL são altamente móveis na subsuperfície e as águas subterrâneas formam uma parte integrante do ciclo hidrológico, bem como um recurso importante por si só, muito embora nos grandes centros, como por exemplo na região metropolitana de São Paulo, há

Regulamentações que permitem a reabilitação de áreas contaminadas para uso em empreendimentos imobiliários que não façam uso de ingestão de água subterrânea (ENVIRONMENT AGENCY, 2003; COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2017).

Em áreas contaminadas, os solventes clorados como DNAPLs são frequentemente encontrados como PCE em instalações com processos industriais associados a limpeza a como TCE em instalações associadas a desengraxantes, ou como parte de uma instalação de multicomponentes contendo outros compostos orgânicos, como óleos de bifelinas policloradas, óleos minerais e combustíveis (por exemplo, em uma antiga instalação de reciclagem de solvente ou óleo residual) (ENVIRONMENT AGENCY, 2003).

Os DNAPLs como solventes clorados podem possuir taxas rápidas de migração subsuperficial, devido a densidade e a viscosidade que a maioria desses contaminantes pode apresentar, conforme Tabela 2, portanto, são mais densos que a água e normalmente menos viscosos que a água, além de serem voláteis, indicando que irão originar contaminação por fase vapor em meios insaturados (ENVIRONMENT AGENCY, 2003).

Tabela 2 – Propriedades físico-químicas de alguns solventes clorados

Solvente clorado	Densidade (kg/m ³)	Pressão de Vapor (KPa)	de Viscosidade (cP)	Koc (l/kg)
Tricloroetano (TCE)	1460	9.000	0,57	126
Tetracloroetileno (PCE)	1620	2.600	0,90	364

Os baixos valores de Koc também indicam que as plumas de fase aquosa não serão fortemente retardadas em relação ao fluxo de águas subterrâneas.

Em relação às metas de remediação, normalmente elas são estabelecidas para gerenciar riscos inaceitáveis para a saúde ou ao meio ambiente (ENVIRONMENT AGENCY, 1999 apud (ENVIRONMENT AGENCY, 2003). A seleção das ações de remediação geralmente considera os critérios de: eficácia, praticidade, durabilidade e prováveis custos e benefícios das várias opções de remediação. As agências reguladoras e as legislações vigentes procuram garantir, dentro desta estrutura, a abordagem mais sustentável para a remediação selecionada.

A Agência Ambiental procura garantir que, dentro desta estrutura, a abordagem mais sustentável para a remediação seja selecionada. A área de contaminação que é o foco da remediação pode variar de local para local, mas normalmente envolve um ou ambos os seguintes:

DNAPL presente na zona de origem junto com a contaminação de fase aquosa e adsorvida associada na zona de origem. Se a mídia insaturada estiver envolvida, a contaminação da fase de vapor também pode ser tratada.

3.2 Abordagens de decisões existentes

Nas últimas décadas, uma grande quantidade de tecnologias de remediação foram desenvolvidas e disponibilizadas para diversos contaminantes, incluindo os solventes clorados. Entretanto, ao abordar a questão da contaminação no solo e na água subterrânea, a própria remediação pode causar efeitos negativos nas funções do solo e da água subterrânea, por exemplo, geração de subprodutos potencialmente mais tóxicos (Tabela 1) que os próprios contaminantes (degradação do TCE consequente formação de cloreto de vinila), compactação do solo, perda de matéria orgânica, declínio da biodiversidade e deficiência de nutrientes. Alguns exemplos de técnicas de remediação: i) a lavagem do solo pode diminuir a disponibilidade de nutrientes no solo ii) a redução química pode resultar na geração de subprodutos como cloreto de vinila. Em contrapartida, algumas técnicas podem melhorar as funções ecológicas do solo, tais como a imobilização de contaminantes com alterações e fitorremediação (BROWN et al., 2005; MAKINO et al., 2007; VAN HERWIJNEN et al., 2007; DONI et al., 2012; VOLCHKO et al., 2014).

Sendo o principal objetivo da remediação de áreas contaminadas a redução dos impactos negativos aos seres humanos e ao meio ambiente, os efeitos nas funções ecológicas do solo e o uso de recursos, por exemplo, para alcançar as metas de remediação devem ser levados em consideração ao decidir sobre as alternativas de remediação, juntamente com os critérios de redução de concentração, custos e prazos. Normalmente, as tecnologias de remediação associadas a custos elevados possuem pegadas ambientais significativas em relação à redução dos riscos ambientais. Ao mesmo tempo, a remediação pode proporcionar a reabilitação, o que pode levar a efeitos sociais positivos, por exemplo, melhoramento da recreação e qualidade ambiental de um bairro (VOLCHKO et al., 2014).

Assim sendo, é cada vez mais crescente a necessidade de atenção aos possíveis efeitos contraditórios da remediação pelos tomadores de decisão (Bardos et al., 2011 apud ROSÉN et

al., 2015). Uma série de estratégias e programas foram desenvolvidos tendo uma visão mais holística da remediação a fim de proporcionar uma remediação mais sustentável (ROSÉN et al., 2015).

Em 2006, a União Europeia introduziu sete funções ecológicas, sociais e econômicas do solo para serem contabilizadas na prática de gestão de áreas contaminadas: (i) produção de biomassa, incluindo agricultura e silvicultura; (ii) armazenamento, filtragem e transformação de nutrientes, substâncias e água; (iii) biodiversidade, como habitats, espécies e genes; (iv) ambiente físico e cultural para humanos e atividades humanas; (v) fonte de matéria-prima; (vi) atuar como reservatório de carbono; e (vii) arquivo de geologia e patrimônio arqueológico (COM, 2006 apud VOLCHKO et al., 2014).

A Agência Ambiental dos Estados Unidos da América estabeleceu métricas e métodos relevantes para avaliar a pegada ambiental das ações de remediação. O Fórum no Reino Unido Remediação Sustentável indicou quadro e indicadores (critérios) para uma sustentabilidade abrangente avaliação de ações corretivas, considerando aspectos ambientais positivos e negativos, efeitos econômicos e sociais. The Network for Industrially Contaminated Land in Europe (NICOLE) também sugeriu uma estrutura para avaliação da sustentabilidade (CONTAMINATED LAND: APPLICATIONS IN REAL ENVIRONMENTS, 2011; UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2012; NETWORK FOR INDUSTRIALLY CONTAMINATED LAND IN EUROPE, 2012; ROSÉN et al., 2015).

Para dar suporte na tomada de decisão a análise multicritério é cada vez mais utilizada e a inclusão de critérios de sustentabilidade tem sido realizada. A análise multicritério possui a capacidade para classificar alternativas de remediação com base em uma avaliação integrada de critérios de diferentes tipos de avaliações qualitativas associadas ao meio ambiente, sociocultural, bem como aos domínios econômicos do desenvolvimento sustentável (BELTON e STEWART, 2002; BURGMAN, 2005; HAJKOWICZ e COLLINS, 2007; SIEGRIST et al., 2010; ROSÉN et al., 2015).

A análise multicritério, pode ser qualitativa, quantitativa ou semiquantitativa e inclui uma série de métodos, como por exemplo, análise multicritério, métodos compensatórios e não compensatórios. Algumas deficiências foram observadas nesse tipo de análise: falta de análise de incerteza, definições pouco claras dos limites do sistema, sobreposição de critérios, resultando em contagem dupla de efeitos e definições pouco claras de escalas desempenho (BELTON e STEWART, 2002; ROSÉN et al., 2015).

Uma abordagem interessante da análise multicritério é a sua capacidade de classificar opções alternativas de acordo com as preferências das partes interessadas. Essas preferências podem ser obtidas durante a ponderação no qual os participantes priorizam os critérios de acordo com suas preferências. Existem vários métodos de ponderação, que variam de métodos diretos simples a complexos. ACCORSI, ZIO e APOSTOLAKIS, 1999; BALASUBRAMANIAM e VOULVOULIS, 2005).

A atribuição de pesos é uma maneira de determinar-se uma nota que é uma ponderação dos critérios. No caso de tecnologias de remediação, a que obtiver a melhor nota será recomendada para a implantação. Esses pesos devem ser realizados por processos de discussões em grupos com as partes interessadas (INSITITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

3.3 Estudo de caso

Uma pesquisa com três cenários, variando na escala do problema, foi desenhada e implementada para obter pesos dos participantes usando o método de ponderação para análise multicritério. As preferências de critérios e a variabilidade entre os pesos eliciados foi então

analisada, usando pesos alto, médio, baixo e dependente para fornecer uma hierarquização de técnicas de remediação para envolver na tomada de decisão.

O estudo de caso hipotético foi baseado em uma área contaminada por PCE existente na região sul da cidade de São Paulo elencada na Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas publicada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2020; INSITITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2020).

Envolveu a aplicação de uma abordagem de análise multicriterial para selecionar uma ou duas opções de remediação, após uma década de tentativas de remediações químicas empregadas e escavações realizadas sem sucesso. O procedimento proposto para a estratégia de tomada de decisão para a seleção de técnicas de remediação utilizou a combinação do processo de análise multicriterial e o processo de hierarquização com ponderação. Os critérios de triagem incluíram indicadores econômico, ambiental, de tempo e de eficácia (FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE, 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O procedimento considerou a remediação completa da área para três cenários. Para o desenvolvimento do estudo, adotou-se as metodologias desenvolvidas por Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2014), utilizando-se os critérios e ponderações estabelecidos pela Federal Remediation Technologies Roundtable (2020) e o critério impacto ambiental, considerando os elementos centrais da Remediação Verde (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION ANGENCY, 2008). A incorporação de pesos contribuiu na análise multicriterial como ferramenta de decisão, pois buscou-se uma solução adequada objetiva mesmo com a subjetividade inerente à tomada de decisão ambiental.

Foi realizado um levantamento das melhores tecnologias disponíveis e desenvolvida uma matriz com critérios da análise multicriterial pontuados para ajudar na tomada de decisão.

Para facilitar o desenvolvimento da matriz e, posteriormente, na avaliação das possibilidades de técnicas de remediação na área, foi realizada uma divisão de compartimentos k_i ($i=1,2$), de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 – Definição dos compartimentos para triagem de tecnologias

Compartimentos	
Compostos organoclorados voláteis para ambientes fechados a partir da água subterrânea (fases aquosa e vapor)	k_1
Compostos organoclorados voláteis a partir do solo (fase adsorvida e vapor)	k_2

Para o desenvolvimento da matriz para tomada de decisão, adotou-se as metodologias desenvolvidas por Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2013), adicionando-se os critérios estabelecidos pela *Federal Remediation Technologies Roundtable* (2015) e os critérios de eficácia e ordem de magnitude em relação a concentração para o meio físico, estabelecidos pelo *Department of Defense Environmental Security Technology Certification Program* (2011). Além desses critérios, foi estabelecido o critério impacto ambiental, considerando os elementos centrais da Remediação Verde (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION ANGENCY, 2008).

Ressalta-se que a análise multicriterial realizada neste artigo foi de caráter teórico e que os critérios considerados são permeados por incertezas inerentes ao processo de avaliação. Um dos pontos de incerteza refere-se ao fato de que a definição dos critérios, bem como dos pesos aplicados a cada técnica de remediação, foi realizada a partir de dados da literatura internacional.

A equação de ponderação utilizada para esta comparação, atribuindo pesos para cada critério (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014):

$$N_{kj} = a_1 * f_1(R_{kj}) + a_2 * f_2(C_{kj}) + a_3 * f_3(P_{kj}) + a_4 * f_4(E_{kj})$$

onde, utilizando o exemplo do Quadro 1:

k é a área contaminada;

j é o plano de intervenção, com j = k1; k2;; kn

ai, i = 1, 2, 3 e 4, é o peso para cada critério, sendo a1 + a2 + a3 + a4 = 1;

Rkj é a redução de contaminação (%) aplicando o plano de intervenção j na área k;

Ckj é o custo de remediação, em valores monetários, aplicando o plano de intervenção j na área k;

Pkj é o prazo para remediação (dias ou meses) aplicando o plano de intervenção j na área k;

Ekj é o indicador de efeitos colaterais (ACV) aplicando o plano de intervenção j na área k;

f1(Rkj) é uma função de normalização para os valores de redução de contaminação, com f1(pior Rkj, de todos k e j) = 0 e f1(melhor Rkj, de todos k e j) = 100, e o f1 para um valor intermediário de Rkj pode ser obtido proporcionalmente (regra de três). Essa normalização deve também ser realizada para f2(Ckj), f3(Pkj) e f4(Ekj) (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

A definição dos pesos (ai, i = 1, 2, 3 e 4), conforme estabelecido por Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2014) foi dada parte por stakeholders e parte levantada em literatura. A ponderação dos critérios por categorias para cada plano foi obtida por meio da análise de atribuição de pesos para comparar os planos. Aos critérios de viabilidade foram atribuídos pontos, de acordo com as categorias (alto, médio, baixo e dependente), conforme Tabela 3.

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise multicriterial e a pontuação qualitativa das tecnologias considerando os critérios de confiabilidade, custos, impactos ambientais, tempo e eficácia.

Tabela 3 – Pontuação dos critérios de acordo com as categorias

Critério	Categorias				
	Alto (●)	Médio(●)	Baixo (○)	Dependente(◇)	
Confiabilidade	4	3	2	1	
Custo	4	3	2	1	
Tempo	4	3	2	1	
Impactos ambientais	1	2	3	4	
Eficácia	Demonstração em diferentes escalas	4	3	2	1
	Ordens de magnitude	3 (99,9% de redução da concentração)	2 (99,0% de redução da concentração)	1 (90% de redução da concentração)	0 (menor que 9% de redução da concentração, da massa ou de descarga de massa)

Tabela 4 – Triagem de tecnologias de remediação aplicadas à área e informações qualitativas sobre a eficácia e o tempo

Compartimento	Técnicas de remediação	Hierarquização ^a	Confiabilidade	Custos	Impactos ambientais	Eficácia			Tempo
						Demonstrada no piloto ou completa	Fonte de contaminação	Pluma de contaminação	
						Baixa permeabilidade	Transmissivo	Baixa permeabilidade	
	Redução química in situ (ferro zero valente) - in situ	18	●	●	●	●	●	○	◇
	Térmica – Aquecimento por condutividade	15	●	●	●	◇	○	●	●
	Barreira reativa permeável – ferro zero valente	14	●	●	●	●	●	●	○
	Oxidação Química in situ (incluindo permanganato, peróxido, persulfato e ozônio)	13	●	●	●	●	○	○	●
	Controle hidráulico - in situ	13	●	●	●	●	○	●	●
k1	Bombeamento e tratamento (pump & treat)	13	●	○	●	●	○	○	○
	Biorreatores (tratamento biológico ex situ)	13	●	●	●	●	○	○	●
	Biorremediação aprimorada in situ	12	●	●	○	●	○	○	◇
	Bioslurping- in situ	12	●	●	●	●	○	○	●
	Poços direcionados horizontalmente - in situ	12	●	●	●	●	○	○	●
	Atenuação Natural Monitorada	12	●	●	○	●	○	○	◇
	Air Stripping	11	●	●	●	●	○	○	○
	Escavação/ tratamento por Biopilhas – ex situ	18	●	●	●	◇	◇	◇	●
	Escavação/ tratamento térmico ex situ por incineração	17	●	○	●	●	◇	◇	●
	Escavação/ tratamento por Redução química ex situ – assumindo a escavação	17	●	●	●	●	◇	○	●
	Térmica in situ	16	●	●	●	○	◇	○	●
k2	Escavação/ tratamento por Dehalogenação	16	○	○	●	●	●	○	●
	Escavação/ tratamento por dessorção térmica	16	●	●	●	●	●	●	●
	Extração de Vapor do solo (SVE)	13	●	●	○	●	●	●	●
	Biorremediação aprimorada in situ	10	●	●	○	●	●	●	●
	Oxidação Química in situ	9	●	●	●	●	●	●	●

Legenda

Fatores	● acima da média	● média	○ abaixo da média	Outros ◇											
Impacto ambiental Pegadas ambientais e de energia da remediação do local	Baixo grau de intensidade	Grau médio de intensidade	Alto grau de intensidade	Nível de eficácia altamente dependente do contaminante específico e sua aplicação / projeto											
Confiabilidade / Manutenção do Sistema A taxa esperada de confiabilidade e manutenção demonstrada em relação a outras tecnologias efetivas	Alta confiabilidade e baixa manutenção	Confiabilidade média e manutenção média	Baixa confiabilidade e alta manutenção												
Tempo Tempo padrão necessário para remediar uma área	<table border="1"> <tr> <td>solo in situ</td> <td>> que 1 ano</td> </tr> <tr> <td>solo ex situ</td> <td>< que 0,5 anos</td> </tr> <tr> <td>água subterrânea</td> <td>< que 3 anos</td> </tr> </table>	solo in situ	> que 1 ano		solo ex situ	< que 0,5 anos	água subterrânea	< que 3 anos	<table border="1"> <tr> <td>1-3 anos</td> </tr> <tr> <td>0,5-1 ano</td> </tr> <tr> <td>3-10 anos</td> </tr> </table>	1-3 anos	0,5-1 ano	3-10 anos	<table border="1"> <tr> <td>> que 3 anos</td> </tr> <tr> <td>> que 1 ano</td> </tr> <tr> <td>> que 10 anos</td> </tr> </table>	> que 3 anos	> que 1 ano
solo in situ	> que 1 ano														
solo ex situ	< que 0,5 anos														
água subterrânea	< que 3 anos														
1-3 anos															
0,5-1 ano															
3-10 anos															
> que 3 anos															
> que 1 ano															
> que 10 anos															
Contaminantes tratados (eficácia) Contaminantes são classificados em cada grupo: - COVs não halogenados - COVs halogenados - SVOCs não halogenados	<table border="1"> <tr> <td>- SVOCs halogenados</td> <td>- Combustíveis</td> </tr> <tr> <td>- Inorgânicos</td> <td>- Radionuclídeos</td> </tr> <tr> <td>- Explosivos</td> <td></td> </tr> </table>	- SVOCs halogenados	- Combustíveis	- Inorgânicos	- Radionuclídeos	- Explosivos		Eficácia demonstrada em piloto ou piloto completo ou escala completa	Eficiência limitada demonstrada em piloto ou em escala total	Nenhuma Eficácia Demonstrada em Piloto ou Escala Completa	N/A “Não avaliado”				
- SVOCs halogenados	- Combustíveis														
- Inorgânicos	- Radionuclídeos														
- Explosivos															

Fontes: adaptado de Department of Defense Environmental Security Technology Certification Program, 2011; Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2014; Federal Remediation Technologies Roundtable, 2020.

O resultado das hierarquizações das tecnologias consideradas sustentáveis para os critérios avaliados nesse artigo foram:

- Compartimento k1 - Compostos organoclorados voláteis para ambientes fechados a partir da água subterrânea (fases aquosa e vapor): Redução química in situ (tempo padrão de remediação indeterminado dependente do projeto e aplicação) ou a térmica com aquecimento por condução (tempo padrão de remediação menor que 3 anos); e
- Compartimento k2- Compostos organoclorados voláteis a partir do solo (fase adsorvida e vapor): Escavação/ tratamento por Biopilhas – ex situ (tempo padrão de remediação entre 0,5 e 1 ano) ou Escavação/ tratamento térmico ex situ por incineração (tempo padrão de remediação menor que 0,5 ano).

5. CONCLUSÕES

A metodologia de tomada de decisão descrita neste artigo propõe avanços em como as decisões podem ser feitas para a remediação sustentável de áreas contaminadas, com a inclusão de critérios e ponderações considerando, não somente os stakeholders mas também dados de literatura. Enquanto outras abordagens se concentram em encontrar remediação levando em consideração somente as metas de redução da concentração, custos e/ou prazo de remediação. Enfatiza-se que o objetivo desta metodologia foi ajudar a tomada de decisão a partir da perspectiva de múltiplas partes interessadas; seus resultados não devem ser tomados como a decisão final. Esta abordagem é vantajosa ao apresentar a perspectiva dos responsáveis pela área (tanto do proprietário quanto de outras partes interessadas) que são essenciais para o processo de tomada de decisão geral, uma vez que podem fornecer informações sobre questões importantes, como saúde ecológica e objetivos da comunidade. Esta metodologia, em consulta com outras partes, deve levar a melhores decisões finais sobre a remediação de áreas contaminadas.

A remediação de áreas contaminadas com solventes clorados é um problema de múltiplas partes interessadas e os processos de análise multicriterial podem incluir todos os grupos de interesse de forma democrática, incluindo a sustentabilidade ambiental. Os resultados do presente estudo permitiram a indicação de tecnologias adequadas para os dois cenários estudados, algumas diferentes das tecnologias que já havia sido aplicada na área durante uma década de gerenciamento ambiental. A ponderação pode ajudar a minimizar a subjetividade envolvida. Para que esse tipo de análise seja mais assertivo é fundamental que os dados a serem disponibilizados sejam de qualidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCORSI, R.; ZIO, E.; APOSTOLAKIS, G.E.. Developing utility functions for environmental decision making. *Prog. Nucl. Energ.* 34, 387–411.1999.
- BALASUBRAMANIAM, A.; VOULVOULIS, N. The appropriateness of multicriteria analysis in environmental decision-making problems. *Environ. Technol.* 26, 951–962. 2005
- BELTON, V.; STEWART, T.J. *Multiple Criteria Decision Analysis: An integrated Approach.* Kluwer Academic Publishers. 2002
- BRINKHOFF, P. *Multi-Criteria Analysis for Assessing Sustainability of Remedial Actions - Applications in Contaminated Land Development - A Literature Review.* (REPORT NO. 2011:14). Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, 2011. 111p.
- BROWN, S.; SPRENGER, M.; MAXEMCHUK, A.; COMPTON, H. Ecosystem function in alluvial tailings after biosolids and lime addition. *J Environ Qual* 2005;34:139–48.
- BURGMAN, M.A. *Risks and Decisions for Conservation and Environmental Management.* Cambridge University Press. 2005.
- CONTAMINATED LAND: APPLICATIONS IN REAL ENVIRONMENTS. Annex 1: the SuRF-UK indicator set for sustainable remediation assessment, final November 2011.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Instrução técnica N° 039.Diretoria de Controle e Licenciamento Ambiental (2017).
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2020/02/TEXTO-EXPLICATIVO-2019-12.02.20.pdf>> Acesso em: 08.02.2020.
- CRC FOR CONTAMINATION ASSESSMENT AND REMEDIATION OF THE ENVIRONMENT. Guideline on establishing remediation objectives. National Remediation Framework: Australia, nov. 2018.
- DEPARTMENT OF DEFENSE ENVIRONMENTAL SECURITY TECHNOLOGY CERTIFICATION PROGRAM. *A Guide for Selecting Remedies for Subsurface Releases of Chlorinated Solvents.* (ESTCP Project ER-200530). Orgn.: Sale, Tom and Newell Charles. 2011.
- DONI, S.; MACCI, C.; PERUZZI, E.; ARENELLA, M.; CECCANTI, B.; MASCIANDARO, G. In situ phytoremediation of a soil historically contaminated by metals, hydrocarbons and polychlorobiphenyls. *J Environ Monit* 2012;14:1383–90.
- ENVIRONMENT AGENCY. *An illustrated handbook of DNAPL transport and fate in the subsurface.* R&D Publication 133, Bristol, 2003.
- FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide (Version 4.0),* 2015. Disponível em:<https://frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.pdf> Acesso em: 19 ago. 2020.
- HAJKOWICZ, S.; COLLINS, K. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resour. Manag.* v.21, 1553–1566. 2007.
- INTERNACIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. *Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, and some other Chlorinated Agents.* V.106, Lyon, 2012.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Guia para elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas.* Organ.: Sandra Lucia de Moraes, Claudia Echevengua Teixeira, Alexandre Magno de Souza Maximiano. Ed.1 rev.,IPT. São Paulo, 2014.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Análises da eficácia das técnicas de intervenção aplicadas em antiga área industrial.* São Paulo: IPT, 2020. (Parecer Técnico 21 206-301).

NETWORK FOR INDUSTRIALLY CONTAMINATED LAND IN EUROPE. How to implement sustainable remediation in a contaminated land project? NICOLE Sustainable remediation work group report. 2012.

ROSÉN, L.; BACK, P.-E.; SÖDERQVIST, T.; NORRMAN, J.; BRINKHOFF, P.; NORBERG, T.; VOLCHKO, Y.; NORIN, M.; BERGKNUT, M.; DÖBERL, G. SCORE: A novel multi-criteria decision analysis approach to assessing the sustainability of contaminated land remediation. *Science of the Total Environment*. v. 511. p.621-638. 2015.

MAKINO, T.; KAMIYA, T.; TAKANO, H.; ITOU, T.; SEKIYA, N.; SASAKI, K.; MAEJIMA, Y.; SUGAHARA, K. Remediation of cadmium-contaminated paddy soils by washing with calcium chloride: Verification of on-site washing. *Environmental Pollution* 2007;147(1):112–9.

VAN HERWIJNEN, R.; AL-TABBAA, A.; HUTCHINGS, T.R.; MOFFAT, A.J.; OUKI, S.K.; JOHNS, M.L. The impact of waste compost-based soil amendments on the leaching behavior of a heavy metal contaminated soil. *Environ Eng Sci* 2007; 24(7):897–904.

VOLCHKO, Y.; NORRMAN, J.; ROSÉN, L.; BERGKNUT, M.; JOSEFSSON, S.; SÖDERQVIST, T.; NORBERG, T.; WIBERG, K.; TYSKLIND, M. Using soil function evaluation in multi-criteria decision analysis for sustainability appraisal of remediation alternatives. *Science of the Total Environment*, 2014, v485-486, p. 785-791.

SIEGRIST, R. OESTERREICH, R. WOODS, L. CRIMI, M. Improved Monitoring Methods for Performance Assessment During Remediation of DNAPL Source Zones. (SERDP Project ER-1490 – Final Report). Washington, 2010.

TAM, E. K, L.; BYER, P. H. Remediation of contaminated lands: a decision methodology for site owners. *Journal of Environmental Management*, v. 64, p. 387-400. 2002.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION ANGENCY. Green Remediation: Incorporating Sustainable Environmental Practices into Remediation of Contaminated Sites. OHIO: National Service Center for Environmental Publication, 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION ANGENCY. Methodology for Understanding and Reducing a Project's Environmental Footprint. USEPA Office of SolidWaste and Emergency Response. (EPA 542-R-12-002). OHIO: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2012.