

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

ANA STELA VICTOR TAKAESU

**PROPOSTA DE METODOLOGIA ADAPTATIVA INTEGRADA PARA GESTÃO DE
ÁREAS CONTAMINADAS COMPLEXAS E MEGASITES NO BRASIL**

São Paulo

2022

ANA STELA VICTOR TAKAESU

**PROPOSTA DE METODOLOGIA ADAPTATIVA INTEGRADA PARA GESTÃO DE
ÁREAS CONTAMINADAS COMPLEXAS E MEGASITES NO BRASIL**

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientadora: Profa. Dra. Marilda Mendonça Guazzelli Ramos Vianna

São Paulo

2022

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

Catálogo na Publicação

Takaesu, Ana Stela Victor

PROPOSTA DE METODOLOGIA ADAPTATIVA INTEGRADA PARA
GESTÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS COMPLEXAS E MEGASITES NO
BRASIL / A. S. V. Takaesu -- São Paulo, 2022.

84 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas,
Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia
Química.

1.Áreas contaminadas 2.Remediação do solo 3.Contaminação do solo
4.Contaminação de águas subterrâneas I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais (*in memorian*), Áurea Celeste e Osvaldo Guiti, por terem me ensinado tão cedo o valor do estudo. Juntos, tínhamos o sonho da minha formação na Universidade de São Paulo.

À minha família, que é a minha base e minha força. Em especial à tia Esmênia, por ser o meu maior exemplo de compromisso, força, moral, fraternidade e respeito. À tia Leitinha (*in memorian*), por todo o carinho. À tia Beth, por me ensinar o real significado do amor. E ao meu irmão, Fernando, por sempre estar por perto.

Ao meu esposo, Ricardo, por seu companheirismo, parceria e amizade. Por sempre me incentivar e me ajudar em todos os momentos.

À professora Marilda Vianna e à tutora Gabriela Paupitz Mendes, pela orientação, paciência e apoio, por acreditarem no tema e pelo incentivo para a finalização deste trabalho.

À *teacher* Érika Taylor, pela amizade, apoio e por sempre me encorajar a dar o meu melhor.

Ao Ricardo Kern, por me apresentar a temática e pelo exemplo de profissionalismo na área de Gerenciamento de Áreas Contaminadas.

RESUMO

Takaesu, Ana Stela Victor. Proposta de metodologia adaptativa integrada para gestão de áreas contaminadas complexas e *megasites* no Brasil. 2022. 84 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

No Brasil, os termos “áreas contaminadas complexas” e “*megasites*” são pouco conhecidos e explorados no gerenciamento de áreas contaminadas (GAC). Tais termos trazem consigo, respectivamente, as metodologias de gerenciamento adaptativo de área (ASM), criado ITRC e estratégia de gerenciamento integrado (IMS), elaborado pelo programa The WELCOME. Neste trabalho foram resumidas e analisadas as suas recomendações, a partir de revisão sistemática da literatura, pesquisa bibliográfica e avaliação de estudos de caso para exemplificar a aplicação das metodologias ASM e IMS. Assim, as áreas reconhecidas como área contaminada complexa ou *complex site* e que possuem aplicação de ASM, compreendem em áreas que apresentam desafios técnicos e não técnicos, que geram grande dificuldade de remediação ambiental em um prazo razoável. ASM foca no atingimento das metas e métricas estabelecidas no projeto e na gestão de maneira estratégica e cíclica, fomentando a atualização de ferramentas de GAC, como por exemplo, o Modelo Conceitual da Área (MCA). As áreas indicadas como *megasites* e que são gerenciadas por IMS, possuem características de contaminação que apresenta grande extensão, com múltiplas fontes de contaminantes e com considerável impacto ao meio ambiente. Também são áreas que necessitam de gerenciamento a longo prazo e envolvimento com os *stakeholders*. O gerenciamento por IMS leva em consideração a divisão do *megasite* em grupos de risco, a fim de organizar os grupos através de suas características comuns, como os desafios técnicos, para determinar os riscos prioritários, a fim de canalizar os esforços técnicos e financeiros de maneira estratégica e eficiente. Os estudos de caso avaliados mostram cenários que são comuns à realidade brasileira: impactos ambientais causados por atividades minerárias, devido ao lançamento de resíduos sólidos industriais de maneira não controlada, atividades industriais e siderúrgicas. Tendo em vista as qualidades de aplicação das metodologias, ambas são importantes para o conhecimento geral de todo público que administra áreas contaminada, ainda que no Brasil seja incipiente nessa gestão. A partir da análise dos termos “áreas contaminadas complexas” (*complex sites*) e “*megasites*”, foi sugerida a criação de uma nova definição para os termos de maneira direcionada para o contexto de GAC no Brasil. Finalmente, a partir da análise e do entendimento de que é possível definir os termos de maneira integrada, assim como as metodologias ASM e IMS, foi proposta a metodologia adaptativa integrada, para ser aplicada em casos de áreas contaminadas complexas e *megasites* no Brasil.

Palavras-chave: Áreas contaminadas complexas. Megasites. Gerenciamento de áreas contaminadas. Gerenciamento adaptativo de área. Estratégia de gerenciamento integrado.

ABSTRACT

Takaesu, Ana Stela Victor. Proposal of an integrated adaptive methodology for the management of complex sites and megasites in Brazil. 2022. 84 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

In Brazil, the terms “complex sites” and “megasites” are little known and explored in the management of contaminated areas (GAC). These terms bring with them, respectively, the methodologies of adaptive site management (ASM), created by ITRC and integrated management strategy (IMS), developed by The WELCOME program. In this work, its recommendations were summarized and analyzed, based on a systematic literature review, bibliographic research and evaluation of case studies to exemplify the application of the ASM and IMS methodologies. Thus, the areas recognized as a complex site and that have ASM application, comprise areas that present technical and non-technical challenges, which generate great difficulty in environmental remediation within a reasonable term. ASM focuses on achieving the goals and metrics established in the project and on management in a strategic and cyclical manner, encouraging the updating of GAC tools, such as the Area Conceptual Model (MCA). The areas indicated as megasites and which are managed by IMS, have contamination characteristics that present great extension, with multiple sources of contaminants and with considerable impact on the environment. These are also areas that need long-term management and stakeholder engagement. Management by IMS considers the division of the megasite into risk groups, in order to organize the groups through their common characteristics, such as technical challenges, to determine priority risks, in order to channel technical and financial efforts in a strategic and efficient way. The case studies evaluated show scenarios that are common to the Brazilian reality: environmental impacts caused by mining activities, due to the uncontrolled release of industrial solid waste, industrial and steel activities. In view of the methodologies application qualities, both are important for the general knowledge of all the public that manages contaminated areas, although in Brazil it is incipient in this management. Based on the analysis of the terms “complex sites” and “megasites”, it was suggested to create a new definition for the terms in a way directed to the context of GAC in Brazil. Finally, from the analysis and understanding that it is possible to define the terms in an integrated way, as the ASM and IMS methodologies, an integrated adaptive methodology was proposed, to be applied in cases of complex sites and megasites in Brazil.

Keywords: Complex sites. Megasites. Management of contaminated areas. Adaptive site management. Integrated management strategy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama da metodologia de Gerenciamento Adaptativo da Área	19
Figura 2 – Diagrama desafios técnicos	21
Figura 3 – Avaliação do potencial de remediação na etapa pós-remediação	24
Figura 4 – Fluxo da ferramenta de Caracterização Integrada da Área.....	25
Figura 5 – Avaliação da taxa de concentração em relação ao tempo	33
Figura 6 – Distrito de Mineração de Bonita	38
Figura 7 – Principais drenagens da área de Bonita e indicação das 48 áreas prioritárias	39
Figura 8 – Pontos prioritários	43
Figura 9 – Estratégia da Área.....	44
Figura 10 – Gerenciamento dos objetivos da área.....	45
Figura 11 – Ciclo anual de planejamento do projeto	47
Figura 12 – Estrutura da estratégia de gerenciamento integrado.....	52
Figura 13 – Iniciando a estratégia de gerenciamento integrado (IMS)	54
Figura 14 – Avaliação de Risco.....	56
Figura 15 – Gestão do cenário de risco	57
Figura 16 – Implementação.....	58
Figura 17 – Localização dos grupos de risco	62
Figura 18 – Fluxograma da Metodologia Adaptativa Integrada para a gestão de áreas contaminadas complexas e <i>megasites</i> no Brasil.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de avaliação do potencial de remediação na etapa pré-remediação	23
Tabela 2 – Exemplo de identificação de técnicas potenciais de remediação	28
Tabela 3 – Exemplo de organização dos componentes de remediação em relação aos objetivos provisórios e métricas de remediação	31
Tabela 4 – Áreas para realização de projeto-piloto – aplicação da metodologia ASM.	37
Tabela 5 – Ações e atividades realizadas, no período de 1990 a 2020, na área de Bonita.	40
Tabela 6 – Análise de custo-benefício da execução das ações	60
Tabela 7 – Resumo da caracterização da contaminação na área do megasite Tarnowskie Góry	61
Tabela 8 – Resumo de cada grupo de risco e suas principais características	63
Tabela 9 – Resumo dos resultados da Avaliação de Risco à Saúde Humana e proposição de metas e objetivos preliminares de redução de risco para o <i>megasite</i>	64
Tabela 10 – Compilado sobre as metodologias ASM e IMS	68

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3.	JUSTIFICATIVA	16
4.	METODOLOGIA	16
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
5.1	GERENCIAMENTO ADAPTATIVO DA ÁREA (ASM).....	17
5.1.1	Desenvolvimento de Modelo Conceitual da Área (MCA) com base nos desafios da área	20
5.1.2	Realização de avaliação do potencial de remediação para decidir se o gerenciamento adaptativo é bem-sucedido, de acordo com os desafios da área 21	
5.1.3	Etapas principais do Gerenciamento Adaptativo da Área	25
5.1.3.1	Refinamento do MCA	25
5.1.3.2	Definição ou Reavaliação dos objetivos da área	25
5.1.3.3	Desenvolvimento dos objetivos provisórios	26
5.1.3.4	Seleção da estratégia adaptativa de remediação.....	27
5.1.4	Desenvolvimento do plano de gestão de longo prazo	29
5.1.4.1	Componentes de remediação	30
5.1.4.2	Objetivos provisórios e métricas de desempenho	32
5.1.4.3	Base para previsão de desempenho e critérios de decisão	32
5.1.4.4	Avaliações periódicas.....	32
5.1.4.5	Decisão lógica para avaliação, otimização, modificação ou transição da remediação	34
5.1.4.6	Estratégia de conclusão	35
5.1.4.7	Stakeholders	35
5.1.5	Força-tarefa do Superfund.....	36
5.1.6	Estudo de caso ASM – O caso de Bonita.....	38

5.1.6.1	Breve caracterização da área.....	38
5.1.6.2	Aplicação da metodologia de gerenciamento adaptativo de site (ASM) em Bonita	42
5.1.6.3	Objetivos iniciais atuais da área	42
5.1.6.4	Pontos prioritários.....	43
5.1.6.5	Tomada de decisão na ASM	45
5.1.6.6	Planejamento Quinquenal	46
5.1.6.7	Ciclo anual de planejamento	47
5.1.6.8	Considerações sobre o estudo de caso	50
5.2	ESTRATÉGIA DE GERENCIAMENTO INTEGRADO (IMS)	51
5.2.1	Iniciando a estratégia de gerenciamento integrado	52
5.2.2	Avaliação de Risco	54
5.2.3	Gestão do cenário de risco	56
5.2.4	Implementação	58
5.2.5	Estudo de caso IMS – O caso Tarnowskie Góry	59
5.2.5.1	Iniciando a estratégia de gerenciamento integrado (IMS)	59
5.2.5.2	Avaliação de Risco	61
5.2.5.3	Gestão do Cenário de Risco	64
5.2.5.4	Implementação	65
5.2.5.5	Considerações sobre o estudo de caso	66
5.3	RELAÇÃO ENTRE O GERENCIAMENTO ADAPTATIVO DA ÁREA (ASM) E A ESTRATÉGIA DE GERENCIAMENTO INTEGRADO (IMS)	66
5.4	AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS NO BRASIL	69
5.4.1	Estudos de caso no Brasil	70
5.5	PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO NO BRASIL	72
5.5.1	Definição dos termos “áreas contaminadas complexas” e “ <i>megasites</i> ” no contexto brasileiro.....	72
5.5.2	Metodologia Adaptativa Integrada	74

5.5.2.1	Desenvolvimento e/ou atualização do Modelo Conceitual da Área (MCA)	74
5.5.2.2	Verificação dos desafios técnicos e não técnicos do MCA.....	75
5.5.2.3	Refinamento dos dados.....	75
5.5.2.4	Avaliação de risco à saúde humana e ecológica.....	75
5.5.2.5	Definição das metas e objetivos finais e determinação das técnicas de remediação viáveis e/ou medidas de contingência necessárias	76
5.5.2.6	Identificar esforços técnicos e financeiros	76
5.5.2.7	Plano de gestão de longo prazo.....	77
5.5.2.8	Avaliações periódicas durante o processo de remediação.....	77
5.5.2.9	Stakeholders	77
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1. INTRODUÇÃO

A partir da revolução industrial ocorrida no século XVIII, resíduos sólidos e substâncias químicas, consequentes do processo industrial e de ações antrópicas, vêm interagindo com o meio ambiente e gerando diversos impactos ambientais negativos, resultando em áreas contaminadas (IPT, 2014). De maneira geral, a problemática da contaminação do solo, da água subterrânea, da água superficial, do sedimento, do ar e da biota é um assunto atual e apresenta um enorme desafio na agenda ambiental.

A principal referência nacional para o gerenciamento de áreas contaminadas (GAC) é a Resolução CONAMA nº 420 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2009), que em seu capítulo IV estabelece, entre outros pontos, o gerenciamento de forma descentralizada, remetendo a “órgão competentes” (municipal, estadual ou federal), a responsabilidade sobre o tema e define as etapas para identificação, diagnóstico e intervenção das áreas estudadas, com a determinação:

[...] critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2009).

Os estados brasileiros que possuem deliberações, padrões e orientações para o GAC são: São Paulo (CETESB), Minas Gerais (FEAM), Rio de Janeiro (INEA), Paraná (IAP), Santa Catarina (FATMA), Rio Grande do Sul (FEPAM), Bahia (INEMA) e Pernambuco (CPRH). Pode-se destacar, as ações colaborativas para definição de procedimentos técnicos, normas e padrões para o GAC no Brasil da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), além da Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT) (IPT, 2014).

Internacionalmente, os Estados Unidos e a União Europeia se destacam com a apresentação e geração de conteúdo pragmático para o GAC. O IPT (2016) explana que, no mercado mundial de remediação de áreas contaminadas, os americanos são considerados como o maior e mais maduro país, aplicando tecnologias que focam na redução de massa de contaminantes.

Nos Estados Unidos, houve a criação da Lei de Resposta, Compensação e Responsabilidade Ambiental Abrangente (*Comprehensive Environmental Response*,

Compensation, and Liability Act – CERCLA), conhecida informalmente como Superfund. Essa lei foi promulgada pelo Congresso Americano em 1980, em resposta às situações de contaminação ambiental e aos riscos à saúde humana e ao meio ambiente gerados pelos casos emblemáticos do *Love Canal* e *Valley of the Drums* (USEPA, 2021b; 2022f).

A CERCLA criou um imposto sobre as indústrias químicas e petrolíferas, onde o valor arrecadado vai para um fundo fiduciário para a intervenção de áreas contaminadas, quando nenhuma parte responsável pode ser identificada. Esta lei também estabelece proibições e requisitos para áreas abandonadas (*Brownfields*) e encerradas com resíduos perigosos, e estabelece responsabilidades pelo causador dos impactos (USEPA, 2021b; 2022f).

Os americanos contam, ainda, com o Conselho Interestadual de Tecnologia e Regulação dos Estados Unidos (ITRC – *Interstate Technology and Regulatory Council*), que é formado por equipes de voluntários dos setores público e privado, liderados por reguladores de órgãos ambientais estaduais americanos. Por esse grupo, são gerados e revisados documentos orientativos e treinamentos acessíveis e gratuitos, que visam reduzir barreiras ao uso de tecnologias e abordagens ambientais inovadoras. Além disso, contribuem para ampliar e aprofundar com qualidade o conhecimento técnico ambiental, a partir da premissa de proteção à saúde humana e apoiam a tomada de decisão regulatória americana (ITRC, 2017; PRICE et al., 2017).

Uma das abordagens aprofundadas sobre a temática de áreas contaminadas, segundo o ITRC (2017), é sobre o gerenciamento adaptativo de área (*Adaptive Site Management – ASM*) de áreas contaminadas complexas (*complex sites*), que definem este último termo como:

“(...) áreas onde o progresso de remediação é incerto, não é esperado que as ações de remediação alcancem o fechamento da área ou até mesmo facilitem a transição desta para um gerenciamento sustentável de longa data em um espaço de tempo razoável (ITRC, 2017. pag.12 – tradução nossa; EKOS BRASIL, 2019)”

Uma das diferenças entre áreas complexas em relação a áreas comuns é a gestão da área a longo prazo, mudando o foco da implementação de ações corretivas tradicionais rápidas e pontuais, tendo em vista os desafios técnicos e não técnicos, que serão detalhados ao longo do texto (ITRC, 2017).

Outro ponto de diferença são os objetivos da remediação, devido a situações de não atingimento de metas estabelecidas pela legislação (valores orientadores, por exemplo). Deve-se, portanto, definir objetivos provisórios, além da dificuldade do estabelecimento de prazos para a intervenção na área. Tendo em vista os atributos das áreas complexas, a remediação ambiental possui um desafio diferente das áreas contaminadas comuns (NRC, 2013; ITRC, 2017).

O ITRC (2017) lançou o guia “*Remediation Management of Complex Sites*” a partir do entendimento da dificuldade de remediar contaminações de algumas áreas dentro de um período de tempo razoável. O termo “*complex site*” ou área contaminada complexa foi explanado por ITRC (2017) com base na pesquisa do Conselho Nacional de Pesquisa (NRC) (NRC, 2013; ITRC, 2017).

Sendo assim, uma área contaminada complexa é definida como:

“Um site com consideráveis desafios técnicos e não técnicos, normalmente, tem um prazo de remediação, custo de remediação e pegada ambiental (como uso de energia ou emissões de carbono) maior, especialmente se os desafios da área contaminada não são adequadamente compreendidos e abordados desde o início de sua gestão. Por outro lado, áreas contaminadas complexas têm um maior potencial de economia de custos, redução da pegada ambiental, reutilização benéfica da terra e outros benefícios sociais (...) Áreas contaminadas complexas constituem uma pequena porcentagem de todas as áreas, mas consomem uma grande proporção dos custos de remediação (ITRC, 2017. pag.13 – tradução nossa)”

Ainda, deve-se destacar, outro termo pouco conhecido e explorado no Brasil: “*megasites*”. Este termo foi definido pelo programa The WELCOME (*Water, Environment and Landscape Management at Contaminated Megasites*), criado na União Europeia, e indica (NICOLE, 2003):

“locais contaminados em grande escala, que representam um grande potencial de risco real de deterioração da qualidade das águas subterrâneas, sedimentos, solo e águas superficiais. (...) *Megasites* são situações de contaminações complexas, não apenas do ponto de vista da técnica, mas também em relação às partes interessadas envolvidas” (NICOLE, 2003. p.15 – tradução nossa)

O programa The WELCOME desenvolveu a metodologia para o gerenciamento destas áreas: Estratégia de Gerenciamento Integrado (*Integrated Management Strategy – IMS*). Pode-se observar na literatura que o termo “*megasites*” é aplicado para o caso de áreas com maior complexidade e extensão de remediação, o que se assemelha com o uso da expressão “áreas complexas”.

Dessa forma, cabe pontuar a carência na literatura, tanto nacional quanto internacional, da abordagem sistêmica científica para a tratativa da relação entre os termos “área complexa” e “*megasite*”, bem como a relação do gerenciamento adaptativo e integrado, abordado em ambos os casos.

2. OBJETIVOS

Avaliar as principais recomendações para o gerenciamento de áreas contaminadas complexas (*complex sites*) e *megasites*, pela abordagem do gerenciamento adaptativo da área (ASM) e pela estratégia de gerenciamento integrado (IMS), respectivamente. Realizar uma análise crítica comparativa entre dois estudos de caso referentes a cada metodologia. Avaliar sobre a importância da aplicação desse tipo de gestão no Brasil, com a proposição de definição dos termos “áreas contaminadas complexas” e “*megasites*” e metodologia de gerenciamento dessas áreas para o contexto brasileiro.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Resumir as recomendações do ITRC para o gerenciamento de áreas complexas, pela abordagem do gerenciamento adaptativo da área e do programa The WELCOME, sobre o gerenciamento de *megasites*, pela estratégia de gerenciamento integrado;
- Avaliar a relação entre ambos os termos (áreas complexas e *megasites*), bem como a relação entre ASM e IMS;
- Buscar exemplos na literatura e em documentos de órgãos ambientais de aplicações do uso de ambas as estratégias (ASM e IMS) para a gestão de áreas contaminadas;
- Avaliar sobre a importância da aplicação das metodologias em áreas contaminadas complexas e *megasites* no Brasil;
- Sugerir uma definição para os termos “áreas contaminadas complexas” e “*megasites*” no contexto brasileiro;
- Propor uma metodologia adaptativa integrada para o gerenciamento das áreas contaminadas (*megasites* e áreas contaminadas complexas) no contexto brasileiro.

3. JUSTIFICATIVA

Como exposto na introdução deste projeto, tanto os Estados Unidos, quanto a União Europeia se destacam com a apresentação e geração de conteúdo pragmático para o gerenciamento de áreas contaminadas (GAC). No Brasil, os termos “áreas contaminadas complexas” e “*megasites*” são pouco conhecidos e explorados. Tais termos trazem consigo, respectivamente, as metodologias de gerenciamento: gerenciamento adaptativo, criado pelo Conselho Interestadual de Tecnologia e Regulação dos Estados (ITRC) e estratégia de gerenciamento integrado elaborado pelo programa The WELCOME.

Tendo em vista a carência na literatura brasileira sobre ambas as temáticas, é muito importante iniciar esta discussão para um melhor entendimento da gestão de áreas contaminadas que possuem características complexas para sua intervenção e longo prazo para administrar. Assim, ao reunir informações a respeito das recomendações do ITRC e do programa The WELCOME, com exemplos de aplicação a partir de estudos de caso, este trabalho poderá servir de referência para futuras Gestões de Áreas Contaminadas Complexas ou *Megasites* no Brasil.

4. METODOLOGIA

A abordagem desta pesquisa é de natureza exploratória e descritiva, a partir de revisão sistemática da literatura e pesquisa bibliográfica. Buscou-se informações sobre a gestão de áreas contaminadas, no que tange as temáticas de áreas contaminadas complexas (*complex sites*) e *megasites*, assim como, sobre as metodologias de gerenciamento adaptativo (ASM) e estratégia de gerenciamento integrado (IMS).

A pesquisa foi realizada através dos materiais elaborados pelo Conselho Interestadual de Tecnologia e Regulação dos Estados (ITRC), programa The WELCOME, Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency – USEPA), a partir de estudo sobre a legislação brasileira que trata sobre áreas contaminadas e nas bases de dados científicos (*Scopus, Web of Science, Scielo e Google Academic*), incluindo livros, artigos de conferências e materiais de discussão.

Foram levantados estudos de caso para exemplificar a aplicação das metodologias ASM e IMS. Para tanto, foi realizada pesquisa documental no site da USEPA, para a metodologia ASM, e foi pelo acesso e pesquisa ao site do programa The WELCOME que se ilustrou o emprego de ISM.

A elaboração da relação entre as metodologias ASM e IMS foi realizada após o levantamento das informações e verificação da aplicação de ambas. Buscou-se compilar os principais pontos de cada metodologia de forma organizada e em tabela.

A avaliação da viabilidade da aplicação das metodologias no Brasil foi realizada com base na pesquisa de legislações ambientais federais e estaduais sobre o tema de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, na verificação de conteúdos lançados pelo Ministério de Meio Ambiente e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Bem como, para a verificação de trabalhos acadêmicos brasileiros, foi lançada a *strig* de busca: *complex sites; ITRC*, na base do Google Acadêmico e os termos: *Integrated Management Strategy; megasites*, no Google.

Por fim, tanto para a definição dos termos “áreas contaminadas complexas” (“*complex sites*”) e “*megasites*” de maneira direcionada ao gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil, como para a proposta de metodologia para aplicação no Brasil, foram realizadas análises críticas sobre as definições estudadas, assim como, sobre as metodologias ASM e IMS.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 GERENCIAMENTO ADAPTATIVO DA ÁREA (ASM)

O gerenciamento adaptativo da área criado pelo ITRC a partir da publicação do documento sobre o gerenciamento de áreas complexas em 2017, refere-se a (PRICE et al., 2017):

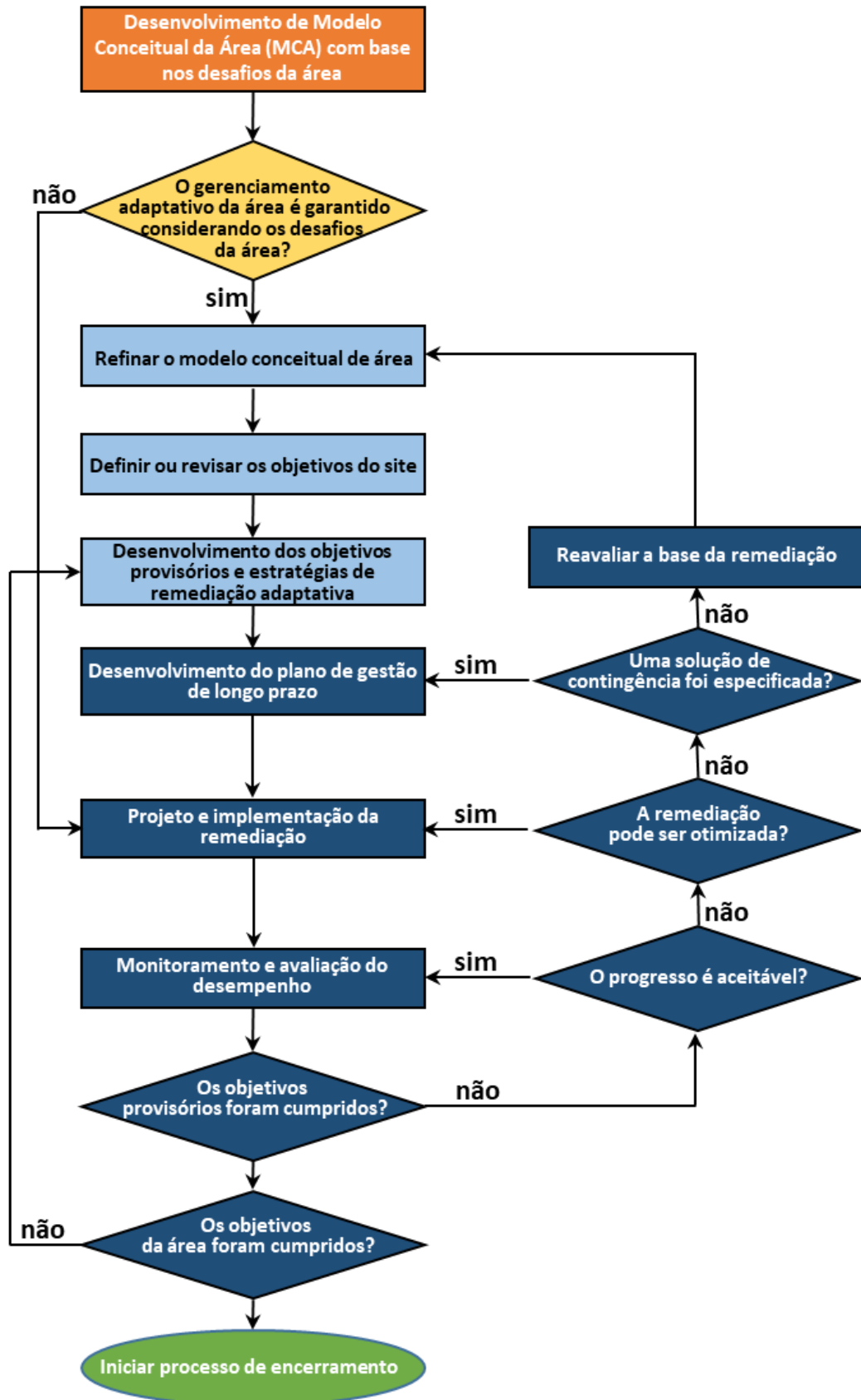
“um processo abrangente, flexível e interativo de gerenciamento de remediação que pode ser útil em áreas complexas. O conceito do gerenciamento adaptativo de *site* é avaliar e ajustar a estratégia para o gerenciamento da remediação em resposta ao seu desempenho, as informações são continuamente incorporadas ao modelo conceitual da área (MCA), tanto o MCA quanto a estratégia para o gerenciamento de remediação melhoram com o tempo e o progresso da remediação continua.” (PRICE et al., 2017. p.2 – tradução nossa)

Cabe destacar que ITRC (2017) indica que qualquer área contaminada pode ser gerenciada por este método (Figura 01), porém tal metodologia é melhor indicada para o uso em áreas complexas, devido às incertezas de desempenho das remediações e assim, maior necessidade de interações no processo de adaptação do gerenciamento da área complexa em comparação às áreas com características mais simples.

Sumariamente, o “gerenciamento adaptativo da área” consiste nas seguintes etapas que serão tratadas em subcapítulos neste trabalho (ITRC, 2017):

1. Desenvolvimento de Modelo Conceitual da Área (MCA) com base nos desafios da área;
2. Realização de avaliação do potencial de remediação para decidir se o gerenciamento adaptativo é bem-sucedido, de acordo com os desafios da área;
3. Refinamento do MCA;
4. Definição ou reavaliação dos objetivos da área;
5. Desenvolvimento dos objetivos provisórios e estratégias de remediação adaptativa;
6. Desenvolvimento do plano de gestão de longo prazo;
7. Projeto e implementação da remediação;
8. Monitoramento e avaliação do desempenho;
9. Aplicação dos critérios de decisão para ajustar, otimizar ou reavaliar a remediação.

Figura 1 – Diagrama da metodologia de Gerenciamento Adaptativo da Área



Fonte: Adaptado de ITRC (2017).

5.1.1 Desenvolvimento de Modelo Conceitual da Área (MCA) com base nos desafios da área

O MCA deve ser reconhecido como a principal ferramenta dinâmica para planejamento do projeto. O primeiro passo é a sua atualização através do seu desenvolvimento avaliando todos os documentos existentes sobre a área para levantar os dados que são válidos, as incertezas remanescentes e/ou as hipóteses acerca da contaminação ambiental. O MCA é um resumo escrito com imagem e/ou tabelas sobre o histórico do uso e ocupação da área e seu entorno, as investigações anteriores, o limite da área, as substâncias químicas de interesse potenciais, reais e suas áreas, caracterização e localização das fontes de contaminação potenciais, suspeitas e reais, caracterização do meio físico, mecanismos de liberação ou retenção dos contaminantes, vias de transporte dos contaminantes (água, ar, solo, sedimento e biota), identificação e caracterização dos receptores e bens a proteger e indicação do uso pretendido da área (ABNT, 2022; ITRC, 2017).

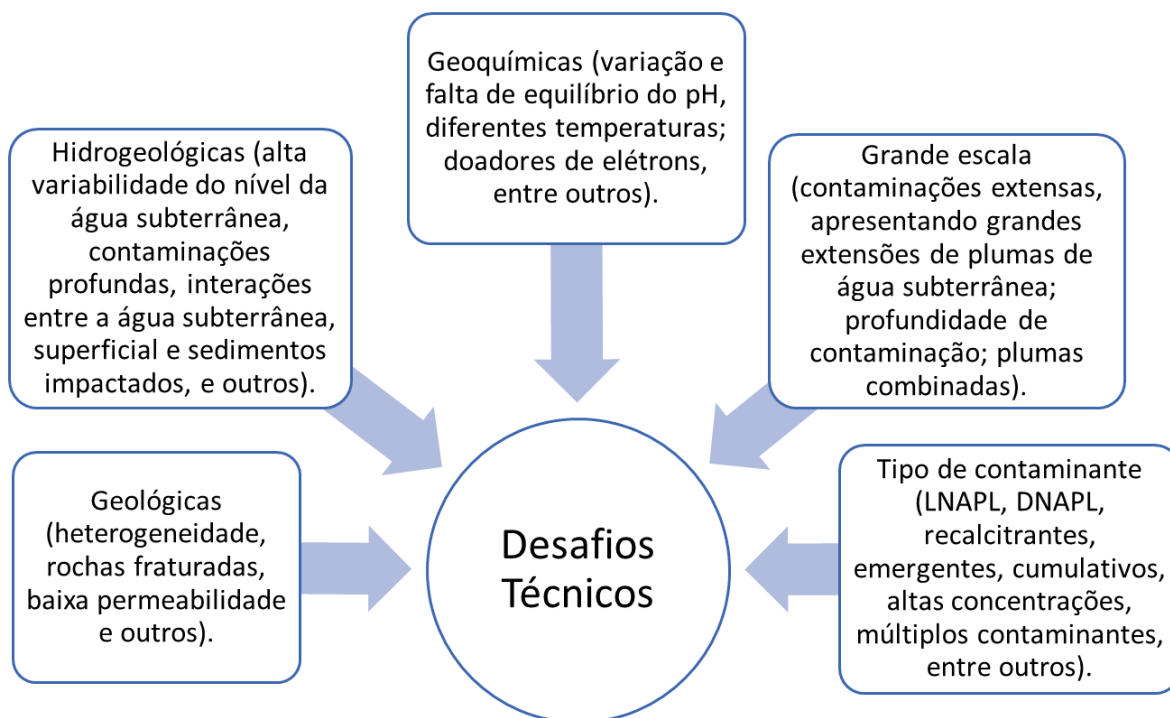
A complexidade de uma área está relacionada às características como: heterogeneidade geológica, contaminações profundas, contaminantes recalcitrantes, contaminações extensas, controles institucionais, entre outros (PRICE et al., 2017; ITRC, 2017).

Os diversos desafios técnicos e não técnicos das áreas complexas geram uma grande dificuldade de remediação ambiental da área em prazo razoável, ou até mesmo pode impedir uma remediação eficiente. Estes desafios devem ser identificados no MCA de maneira clara e com profundidade, levando em consideração os objetivos do local, os objetivos provisórios e a estratégia de remediação inicial, com foco na proteção humana e no meio ambiente (ITRC, 2017).

É nessa etapa do desenvolvimento do modelo conceitual é que se deve iniciar a avaliação da utilização do método do gerenciamento adaptativo (ITRC, 2017).

Os desafios técnicos são associados às condições reunidas na Figura 2 (ITRC, 2017).

Figura 2 – Diagrama desafios técnicos



Fonte: Adaptado de ITRC (2017).

ITRC (2017) elenca também os desafios não técnicos observados:

- expectativas e aceitabilidade social;
- tomada de decisão a partir da gestão de longo prazo;
- sobreposição de responsabilidades regulatórias;
- controles institucionais;
- restrição e mudança de uso de terrenos;
- financiamentos.

5.1.2 Realização de avaliação do potencial de remediação para decidir se o gerenciamento adaptativo é bem-sucedido, de acordo com os desafios da área

A próxima etapa do gerenciamento é a avaliação do potencial de remediação da área, de acordo com a estratégia de intervenção, que deverá ser realizada a partir da análise e pontuação de questionamentos definidos pelo ITRC (que podem ser revistos quando da sua aplicação, com o incremento de outras questões),

relacionados a duas etapas cruciais do gerenciamento de uma área contaminada: pré-remediação e pós-remediação (PRICE et al., 2017; ITRC, 2017).

A Tabela 01 lista os questionamentos, sumariza as informações sobre os critérios de avaliação e indica a matriz de pontuação, para avaliação final do potencial de remediação, em etapa anterior à implantação da remediação na área.

Tabela 1 – Matriz de avaliação do potencial de remediação na etapa pré-remediação

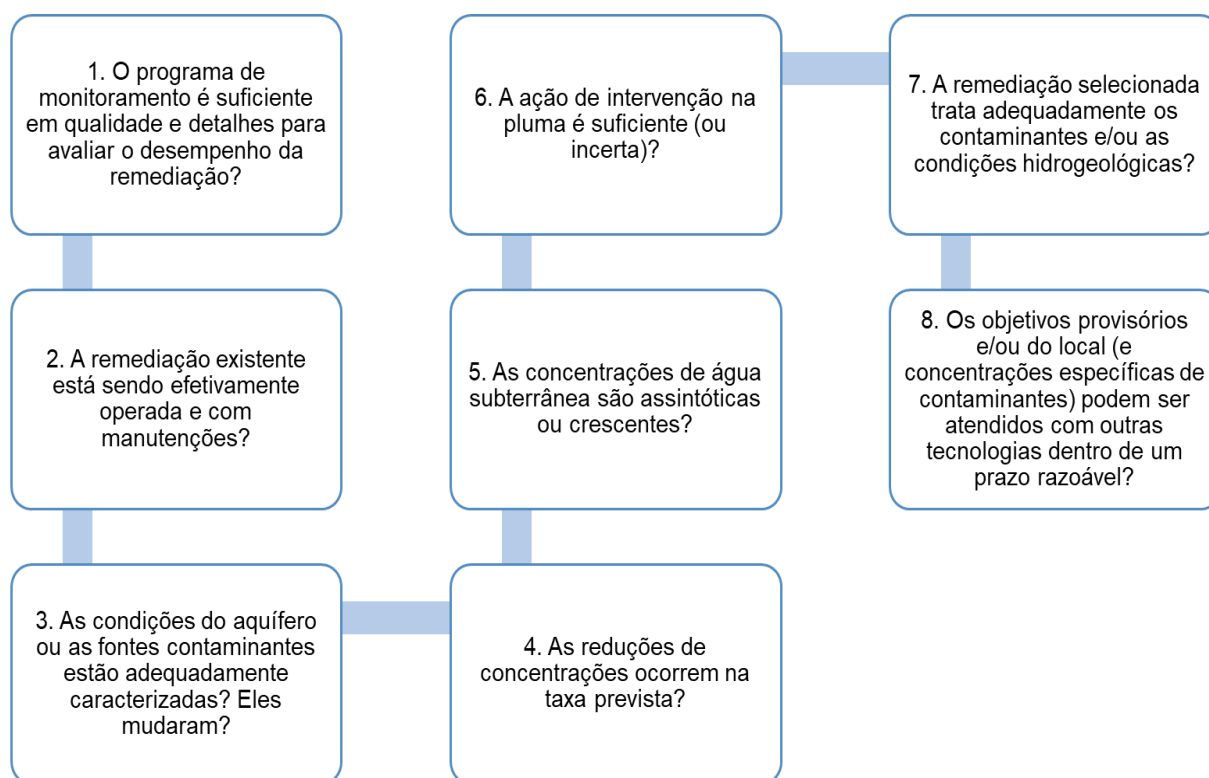
Métrica de Avaliação	Discussão resumida	ALTO	MODERADO	BAIXO
1. Quão difícil é trabalhar na superfície da área?	Quanto da área potencial de tratamento é acessível (para realização de atividades de perfuração ou escavação)? Estão presentes estruturas, unidades de processo ativas, ambientes sensíveis ou outras restrições?			
2. Quão difícil é perfurar no local?	A perfuração é difícil, lenta e consome muitos recursos no local?			
3. Qual é a extensão da contaminação da fonte ou pluma?	Qual é a extensão da contaminação da fonte e da pluma? O potencial de remediação pode ser significativamente menor se o volume da fonte ou a área da pluma for extensa.			
4. Que redução da concentração de contaminantes é necessária?	Qual é a redução necessária em todo a área para atingir os objetivos provisórios? Se for necessária uma redução de várias ordens de magnitude na concentração de contaminantes para atingir as metas de remediação das águas subterrâneas, é mais provável que haja um longo prazo de remediação.			
5. Qual é a taxa estimada de atenuação biótica e abiótica no local?	Qual é a taxa estimada de atenuação biótica e abiótica no local? Se os contaminantes e o ambiente geoquímico forem passíveis de processos naturais de atenuação, é provável que um local seja remediado em um prazo razoável.			
6. Existe massa de contaminante de difícil remoção no local?	Quanto da massa de contaminante é caracterizada como fase líquida não aquosa (NAPL) ou está presente nas zonas de baixa condutividade hidráulica (baixo K) no local? Se uma massa contaminante significativa estiver em zonas de baixo K (ou em leito rochoso fraturado ou cárstico), a pluma provavelmente persistirá por um longo tempo sem remediação da massa. Se contaminantes estiverem presentes como NAPL, a contaminação também pode persistir.			
7. Qual é o desempenho de remediação previsto para as tecnologias de remediação disponíveis?	Existem tecnologias comprovadamente aplicáveis disponíveis para lidar com a contaminação no local? As observações diretas em locais semelhantes indicam incerteza significativa e longos prazos de correção?			
8. Qual é o prazo previsto para atingir os objetivos provisórios ou do local?	Dadas as abordagens de remediação disponíveis, quanto tempo levaria a remediação da área? As ferramentas de cálculo podem ser usadas para prever se qualquer abordagem ou combinação de abordagens pode atingir objetivos provisórios para o local em um prazo razoável.			

Fonte: Adaptado de ITRC (2017).

A partir desta avaliação, pode-se aferir três tipos de resultados para o potencial de remediação, etapa pré-remediação: alto, moderado e baixo. De acordo com o resultado final, é possível avaliar a real necessidade de utilização da metodologia de gerenciamento adaptativo, sendo indicado por ITRC (2017) resultado onde o potencial de remediação se apresenta como baixo. Caso se apresente como moderado, o ITRC (2017) indica reavaliar as questões com maior profundidade e também inserir outros questionamentos, como por exemplo: custo da remediação; existência de tecnologias disponíveis para o tratamento e também fornecedores/consultorias para a realização das atividades, entre outros. Para o potencial de remediação alto, o ITRC (2017) não indica a aplicação da metodologia, sendo explanado que o direcionamento das ações de gerenciamento da área de maneira sistêmica já é o bastante.

A etapa de pós-remediação diz respeito aos projetos que já estão em andamento. ITRC (2017) elenca para esta etapa, oito questionamentos chave, a fim de avaliar se é pertinente a utilização da metodologia (a remediação da área é difícil ou se apresenta em longo prazo). Essa é considerada uma boa forma de se avaliar a otimização da remediação em andamento ou a transição para outra técnica/tecnologia (Figura 3) (ITRC, 2017).

Figura 3 – Avaliação do potencial de remediação na etapa pós-remediação



Fonte: Adaptado de ITRC (2017).

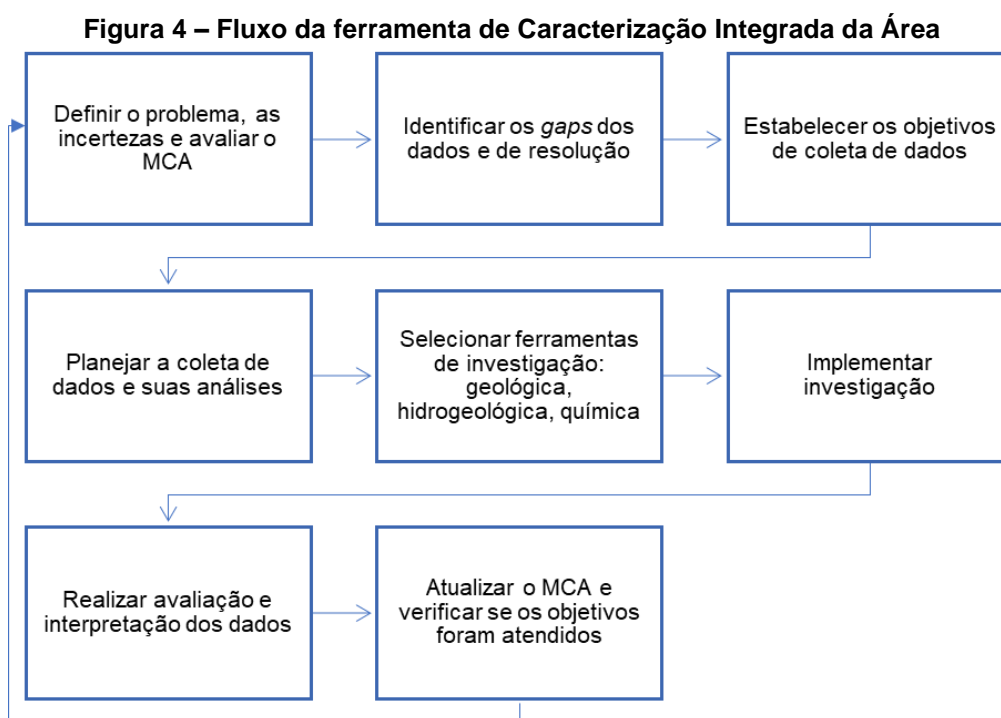
5.1.3 Etapas principais do Gerenciamento Adaptativo da Área

Esta etapa diz respeito aos itens: (3) Refinamento do MCA; (4) Definição ou reavaliação dos objetivos da área; e (5) Desenvolvimento dos objetivos provisórios e estratégias de remediação adaptativa, conforme item 5.1 deste texto.

5.1.3.1 Refinamento do MCA

O refinamento e atualização periódica do modelo conceitual da área durante todo o ciclo do projeto é de suma importância para a tomada de decisão de ações corretivas, como por exemplo no ajuste dos objetivos da área, objetivos provisórios, na estratégia de remediação e outros (PRICE et al., 2017).

Cabe destacar que para este refinamento, o ITRC (2017) recomenda outra ferramenta desenvolvida pelo grupo: Caracterização Integrada da Área (*Integrated Site Characterization*). De maneira geral, tal ferramenta consiste nas etapas apresentadas na Figura 4 (ITRC, 2015).



Fonte: Adaptado de ITRC (2017).

5.1.3.2 Definição ou Reavaliação dos objetivos da área

O ITRC (2017) e Price et al. (2017) explanam que as metas e os objetivos de remediação são, geralmente, estabelecidos de acordo com a legislação e

regulamentação ambiental federal e estadual. Tendo em vista que a abordagem aqui descrita é de origem americana e toda a sua metodologia fora criada nos EUA, é natural que os autores exponham a ideia embasado nas premissas legais americanas. Contudo, o âmago do conteúdo é de interesse para o entendimento da aplicação da metodologia.

Desta forma, cabe destacar a diferenciação da descrição em dois termos para o entendimento de metas e objetivos de remediação, de acordo com o grupo ITRC (2017):

- **Objetivos da área:** medidas corretivas de longo prazo, estabelecidas em metas e objetivos de uma determinada área, visando o atendimento aos requisitos e normas aplicáveis, assim como o atingimento de concentrações em níveis do risco alvo, ou então, tendo como alvo a intervenção ambiental para o uso pretendido, com a proteção da saúde humana e do meio ambiente.
- **Objetivos provisórios:** medidas corretivas de curto prazo, estabelecidas em marcos, etapas ou atividades. São objetivos lançados para o atingimento final dos objetivos da área, sendo utilizadas para o avanço em curto prazo das etapas, formadas por sequencias de ações corretivas ao longo do tempo. Podem ser específicos para uma técnica ou fonte (por exemplo, decaimento de massa de uma determinada substância). Medidas em métricas.

Conforme apresentado no Diagrama da metodologia do Gerenciamento Adaptativo da Área (Figura 1), é importante avaliar os objetivos provisórios e também os objetivos da área, para entender se ambos os objetivos estão sendo alcançados.

5.1.3.3 Desenvolvimento dos objetivos provisórios

Em relação aos objetivos provisórios, Price et al. (2017) indica que no gerenciamento adaptativo das áreas, estes devem ser definidos inicialmente ao processo em métricas pré-estabelecidas de remediação (específico, mensurável, atingível, relevante e vinculado ao tempo) e revisados em marcos do projeto, à medida que a remediação, a coleta de dados de desempenho e o refinamento do MCA avançam.

Exemplos de métricas para o estabelecimento de objetivos provisórios são:

- Fluxo de massa de contaminante ou diminuição de descarga em porcentagem (%) por medida de tempo (meses, anos etc.);
- Taxa de degradação alvo atingida em determinado tempo;
- Taxa ou eficiência de remoção, redução de concentração do contaminante;
- Volume de remoção de solo impactado e entre outros.

É ressaltado pelo ITRC (2017) que o MCA deve estar atualizado e revisado antes do estabelecimento dos objetivos provisórios ou as métricas de remediação, pois imprecisões no MCA podem afetar a implementação da técnica de remediação e, assim, o seu monitoramento de desempenho. Além disso, os resultados obtidos pelas medições e a avaliação destes resultados é de suma importância, pois se apoia na otimização do projeto ou, ainda, na tomada de decisão para eventuais transições nas técnicas de remediação.

Por fim, ITRC (2017) aponta que o cumprimento dos objetivos provisórios é um excelente indicador de que as medidas de intervenção estabelecidas para a área estão sendo válidas e há progresso no processo de remediação.

5.1.3.4 Seleção da estratégia adaptativa de remediação

Tendo em vista que o desenvolvimento deste gerenciamento está associado às áreas complexas, é interessante analisar todas as opções de técnicas de remediação, métodos de contenção, outras técnicas ou abordagens de gestão para áreas contaminadas e não apenas as tradicionais. Deve-se, ainda, avaliar as formas de aplicações e as combinações para o atingimento do objetivo final, de acordo com cada área fim (PRICE et al., 2017; ITRC, 2017).

A Tabela 2 apresenta exemplo de identificação de técnicas potenciais de remediação para uma área complexa, de forma organizada, com as informações em relação às técnicas potenciais de remediação e os objetivos da área ou provisórios, dividido em fonte (área com pluma em fase livre e/ou retida) e pluma em fase dissolvida.

Tabela 2 – Exemplo de identificação de técnicas potenciais de remediação

Objetivos da área/provisórios	Técnicas potenciais para fonte (área com pluma em fase livre e/ou retida)	Técnicas potenciais para pluma em fase dissolvida
Remediar a contaminação	Tratamento <i>in situ</i> Extração aprimorada ¹ Tratamento térmico	Tratamento <i>in situ</i> Atenuação aumentada Atenuação natural monitorada
Controle de migração	Redução do fluxo da fonte Extração aprimorada Barreira reativa permeável	Tratamento <i>in situ</i> Atenuação aumentada Atenuação natural monitorada
Prevenir a exposição	Medidas de engenharia, cercas, controles institucionais, abastecimento alternativo de água	Controles institucionais Abastecimento alternativo de água

Fonte: Adaptado de ITRC (2017).

Salienta-se que no documento sobre o gerenciamento adaptativo da área são apresentadas a exemplificação e descrição das técnicas de intervenção, com a indicação de bibliografia que aborda sobre o assunto de maneira aprofundada (ITRC, 2017).

Para avaliar as medidas de remediação em áreas complexas, o ITRC (2017) elenca as oito considerações a seguir:

1. Como cada alternativa potencial de remediação aborda os problemas de complexidade da área;
2. Confiança em cada alternativa potencial de remediação em termos de implementação e controle de exposição durante o período de remediação;
3. Para as abordagens em fases, avaliar se a primeira fase do potencial de remediação poderia impedir o uso posterior de outras soluções ou abordagens;
4. Se a alternativa potencial de remediação é particularmente adequada para modificações posteriores ou é sinérgica com outras tecnologias/alternativas;
5. O tipo de informação que pode ser obtida com a implementação da remediação e se essa informação poderia ser utilizada para atualizar o MCA e melhorar a tomada de decisões de remediação futuras;
6. A capacidade de ajustar e otimizar a remediação com base em desempenho dos dados;

¹ Extração aprimorada, termo traduzido de “*enhanced extraction*” – pode-se entender também como técnica de extração melhorada, como por exemplo as técnicas de extração aprimorada de vapores (*steam enhanced extraction*), de aplicação de surfactante para aumentar a capacidade de extração de contaminantes de um aquífero etc. (ITRC, 2017),

7. A robustez do projeto da estratégia de remediação, com definições claras sobre os objetivos provisórios, métricas de desempenho e sobre a coleta de dados que podem ser usados para monitorar o desempenho;
8. Se é necessário quaisquer análises preditivas de desempenho da remediação, para o apoio na sua seleção ou para o fornecimento de linha de base para avaliar o desempenho após a sua implementação.

De maneira prática, é interessante avaliar essas considerações realizando uma comparação com base no atendimento da possível medida de intervenção, aplicando critérios de pontuação. É importante, também, considerar nesta ponderação os objetivos finais estabelecidos, além de ter em vista a regulamentação legal (PRICE et al., 2017; ITRC, 2017).

Cabe lembrar que, após a determinação da medida potencial de remediação (podem ser várias, combinadas etc.), deve-se estabelecer os objetivos provisórios de cada uma, conforme explanado no item anterior.

5.1.4 Desenvolvimento do plano de gestão de longo prazo

Pode-se estabelecer que o gerenciamento de longo prazo para áreas complexas é iniciado na etapa de projeto de intervenção da área e inclui todas as fases após implantação do sistema de remediação/intervenção. Uma das definições para áreas complexas é o tempo necessário para seu encerramento, que podem durar décadas. Assim, muitas vezes, os prazos projetados para o atendimento dos objetivos apresentam baixo desempenho ao longo do tempo, ou até mesmo acabam por não atender esses objetivos. Desta forma, o gerenciamento adaptável, indicado pelo grupo do ITRC (2017) se apresenta como uma metodologia capaz de melhorar a compreensão do andamento do progresso da intervenção, com o estabelecimento de objetivos provisórios e métricas, observando o desempenho com o agendamento e realização de avaliações periódicas e definições de critérios de decisão para a otimização, ajuste, modificação ou transição da remediação. Destarte, o processo de gerenciamento adaptativo apoia os tomadores de decisão para rastrear a operação e o progresso da remediação.

ITRC (2017) elenca três etapas do processo do gerenciamento adaptativo na fase da gestão de longo prazo, que devem ser repetidas até que sejam cumpridos os

objetivos provisórios (ou métricas), bem como o objetivo final (tais etapas equivalem à etapa de Gestão de Longo Prazo do Diagrama da Figura 01):

1. Preparar plano de gestão de longo prazo com modelo definido de desempenho e métricas;
2. Realizar avaliações periódicas para comparar o progresso com o desempenho esperado/planejado;
3. Acompanhar a estratégia pré-definida para avaliar, ajustar, otimizar, modificar ou realizar a transição para outra tecnologia ou aplicação de ações de contingência, se necessário.

Não obstante, o plano de gestão de longo prazo é detalhado por sete pontos chave para o atingimento dos objetivos (PRICE et. Al., 2017), conforme será explanado a seguir.

1. Componentes de remediação;
2. Objetivos provisórios e métricas de desempenho;
3. Base para previsão de desempenho e critérios de decisão;
4. Avaliações periódicas;
5. Decisão lógica para avaliação, otimização, modificação ou transição da remediação;
6. Estratégia de conclusão;
7. Stakeholders.

5.1.4.1 Componentes de remediação

Descritos como ações de atenuação natural monitorada, controle institucional etc., devem ser planejados a longo prazo, juntamente com outras técnicas de remediação ou intervenção, com cronograma específico e deve ser estabelecido monitoramento para avaliação periódica de desempenho. A Tabela 3 exemplifica a organização dos componentes de remediação em relação aos objetivos provisórios e métricas de remediação.

Tabela 3 – Exemplo de organização dos componentes de remediação em relação aos objetivos provisórios e métricas de remediação

Objetivos do site	Fonte (área com pluma em fase livre e/ou retida)		Pluma em fase dissolvida	
	Componente de remediação	Objetivos provisórios e métricas	Componente de remediação	Objetivos provisórios e métricas
Remediar a contaminação	Tratamento <i>in situ</i>	Reduzir as concentrações de contaminantes em uma ordem de grandeza X	Atenuação aumentada	Reduzir as concentrações em poços específicos para as concentrações alvo
Controlar migração	Tratamento <i>in situ</i>	Reduzir o fluxo de massa da área de origem em 50%	Atenuação natural monitorada	Confirmar se o tamanho da pluma está estável ou é decrescente e as concentrações de contaminantes
	Extração aprimorada			
Prevenir a exposição	Medidas de engenharia	Manter medidas de engenharia em operação com plano de manutenção	Controles institucionais	Trabalhar com agências locais ou estaduais para declarar restrições de uso de águas subterrâneas na área
	Controles institucionais	Restringir o uso do solo e de águas subterrâneas indicados em registros e documentos oficiais	Abastecimento alternativo de água	Fornecer abastecimento alternativo de água para usuários de águas subterrâneas dentro da área

Fonte: Adaptado de ITRC (2017).

5.1.4.2 Objetivos provisórios e métricas de desempenho

Estabelecimento de objetivos provisórios e métricas de desempenho, conforme explanado no item 5.1.3.3.

5.1.4.3 Base para previsão de desempenho e critérios de decisão

É recomendada a avaliação das condições iniciais do cenário de contaminação da área de maneira aprofundada, visando o estabelecimento documentado e estruturado da base de informações sobre o site (PRICE et al., 2017; ITRC, 2017).

Assim, estruturar as informações de maneira organizada por local, tipo de contaminante, zona ou meio, com a determinação das estimativas de massa, concentração dos contaminantes, taxa de migração, de atenuação, de maneira indicada para cada tipo, simplifica o entendimento do material. Também é importante apresentar considerações sobre a avaliação do desempenho para o cumprimento dos objetivos provisórios, taxa de diminuição das concentrações, estabilidade da pluma, mitigação de intrusão de vapores, remoção de massa etc. (PRICE et al., 2017; ITRC, 2017)

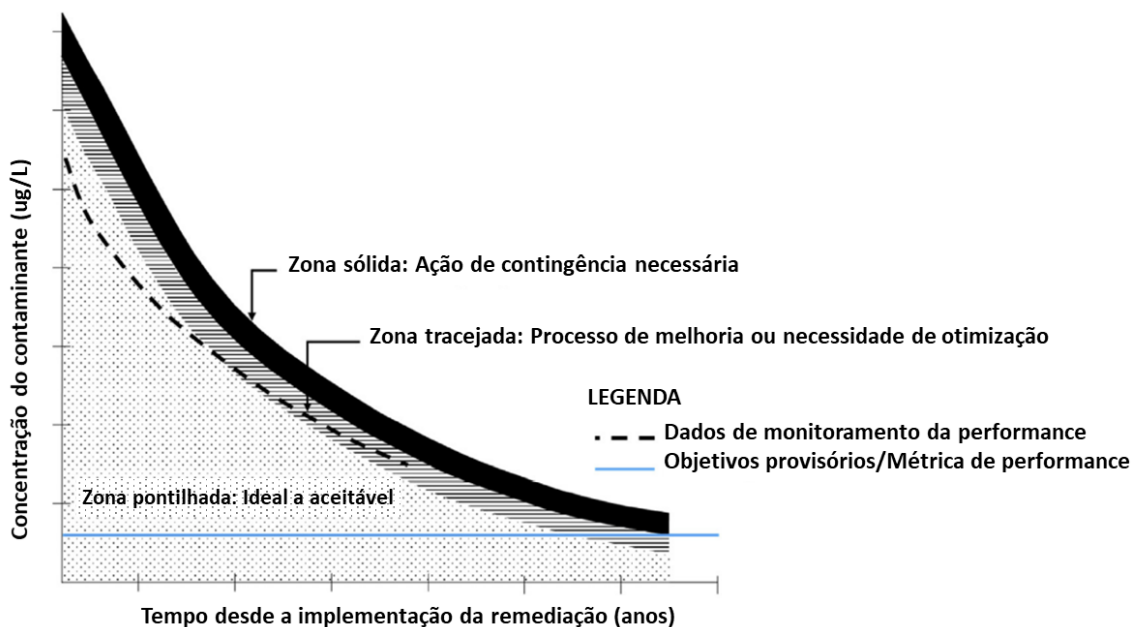
O estabelecimento de critérios de decisão para a validação do progresso de remediação é fundamental para o entendimento do desempenho do projeto. Estes critérios precisam estar associados aos objetivos provisórios e às métricas de remediação.

Além de organizar as informações de maneira documentada é interessante organizá-las de maneira ilustrativa, por meio de tabelas, esquemas e diagramas, visando o entendimento de maneira simplificada e fácil de todo o material.

5.1.4.4 Avaliações periódicas

Para a avaliação do cumprimento do progresso da intervenção em relação aos objetivos provisórios e métricas, é necessário realizar avaliações do desempenho de maneira periódica. Na Figura 5 é apresentado graficamente a avaliação da taxa de concentração de determinado contaminante em relação ao tempo.

Figura 5 – Avaliação da taxa de concentração em relação ao tempo



Fonte: Adaptado de Price et al., (2017).

Na Figura 5, a área indicada em pontinhos representa a faixa de valores de desempenho projetada como desempenho aceitável; na área hachurada de maneira sólida são indicados valores que representam resultados com necessidade de ações de contingência para melhorar o desempenho; já a região hachurada em listras retrata desempenho que pode ser otimizado com melhorias/ajustes no processo. A linha tracejada representa os valores obtidos nos monitoramentos realizados e a linha em azul ou contínua horizontal, corresponde ao objetivo provisório a ser atingido (PRICE et al., 2017; ITRC, 2017).

O exemplo de modelo de performance exemplifica bem o estabelecimento de critérios de decisão e a avaliação dos resultados de acordo com os valores obtidos pelos monitoramentos.

Ainda, ITRC (2017) elenca em seu documento um *checklist* apresentando exemplos de questionamentos, por temática (caracterização da fonte, modelo conceitual, comportamento da pluma e hidrogeologia e outros), para realizar quando houver avaliação periódica das condições da intervenção. O objetivo, é de entender a

situação do processo, e verificar se a intervenção está apresentando um avanço eficiente para o atingimento das metas estabelecidas.

5.1.4.5 Decisão lógica para avaliação, otimização, modificação ou transição da remediação

Com base nos resultados das avaliações periódicas e a partir da base de informação da área estabelecida, é recomendada a aplicação de critérios para a tomada de decisão para implementação de estratégias de remediação adaptativas. Price et al. (2017) cita os seguintes potenciais resultados das avaliações periódicas e as possíveis tomadas de decisão:

- O desempenho da remediação está progredindo adequadamente em direção aos objetivos provisórios e/ou locais. É indicada a continuidade da operação sem modifica-la.
- Os resultados atingidos estão de acordo com os objetivos provisórios para a transição para a operação de medidas menos agressivas, como por exemplo atenuação natural monitorada (MNA);
- Os resultados indicam desempenho não adequado para o atingimento dos objetivos provisórios e/ou locais da operação da remediação. Recomenda-se a identificação da causa do progresso inadequado, exemplos:
 - As condições operacionais estão fora da faixa de projeto ou especificações;
 - A eficiência do tratamento não está sendo alcançada (taxas de extração/injeção não estão sendo atendidas);
 - As concentrações dos contaminantes não estão diminuindo conforme o projetado, apesar da operação do sistema estar dentro da faixa do projeto;
 - Pluma de contaminação está se expandindo ou migrando de maneira não esperada, devido a mudanças de condições do local;

É importante ressaltar que ITRC (2017) indica a oportunidade de utilizar as métricas de desempenho (conforme exemplificado na Figura 5) para especificar critérios de decisão para a implementação de ações de contingência. Estas devem estar amarradas em resultados não atingidos, de acordo com os objetivos provisórios, para assim obter, de maneira eficaz, o cumprimento destes objetivos. Como por

exemplo: ações de contingência devem ser desencadeadas (ações já estabelecidas e avaliadas como pertinentes à complementação da intervenção), se concentrações de determinado contaminante não forem reduzidas em X mg/L, ou menos, nos primeiros três anos de tratamento.

5.1.4.6 Estratégia de conclusão

O plano de gerenciamento de longo prazo deve incluir estratégia de conclusão da área, que é uma prática necessária para o planejamento de ações que visam o cumprimento do objetivo final estabelecido para o site.

O conceito linear do estabelecimento de uma estratégia para o cumprimento das metas é substituído por uma abordagem interativa/adaptativa em áreas complexas, incluindo a transição para aplicação de técnicas menos agressivas de intervenção como atenuação natural monitorada.

As estratégias de conclusão são geralmente desenvolvidas em um processo colaborativo, com diversos *stakeholders* envolvidos, sendo importante a consideração de opções para maximizar o uso futuro do local. A organização e estruturação de documentos de decisão, planos de trabalho e memorandos, para registrar acordos são de suma importância para o adequado gerenciamento da área (PRICE et al., 2017; ITRC, 2017).

O time do ITRC apresenta diversas outras orientações para o gerenciamento de áreas contaminadas, e ainda apresenta de maneira aprofundada sobre o tema de desenvolvimento de estratégias de conclusão (ITRC, 2006).

5.1.4.7 Stakeholders

ITRC (2017) explana que o envolvimento das partes interessadas (*stakeholders*) no início do processo é de suma importância para o gerenciamento da área. A participação cria a oportunidade de envolver a todos os interessados, o que gera maior apoio e, ainda, ITRC (2017) indica que este envolvimento pode ajudar na redução do custo de remediação e no gerenciamento de longo prazo.

Além disso, é apresentado no documento que os *stakeholders* se preocupam com a eficácia, eficiência e proteção a longo prazo, e precisam ter a clareza de que os valores despendidos no processo não são transferidos para o público ou para as

gerações futuras. É necessário que os responsáveis e os reguladores tenham bom relacionamento com a comunidade, apresentando o projeto de maneira real, com elucidação da redução dos riscos e proteção dos recursos. Assim, o gerenciamento adaptativo, quando vem apresentar mudança nas estratégias e tecnologias, tendo como base a otimização/revisão do projeto, será, provavelmente, aceito, independente do efeito nos valores de intervenção (ITRC, 2017).

No documento, há apresentação de sugestões para o gerenciamento de área complexa com o envolvimento dos *stakeholders* de maneira a mitigar as preocupações tradicionais observadas nesse tipo de processo (ITRC, 2017).

5.1.5 Força-tarefa do Superfund

Em julho de 2018, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency – USEPA*) lançou um memorando intitulado “*Superfund Task Force Recommendation #3: Broden the Use of Adaptive Managment*” (Recomendação da Força-Tarefa do Superfund # 3: Ampliar o uso do gerenciamento adaptativo), o qual define o gerenciamento adaptativo como:

“(...) Abordagem formal e sistemática de gerenciamento da área ou do projeto, centrada em um planejamento rigoroso e em um entendimento firme das condições e incertezas da área. Essa técnica, enraizada no uso correto da ciência e tecnologia, incentiva a reavaliação contínua e a priorização de gerenciamento das atividades da área para levar em conta novas informações e mudanças nas condições da área. Um processo estruturado e contínuo de planejamento, implementação e avaliação permite que a USEPA, estados, outras agências federais ou partes responsáveis direcionem as decisões de gerenciamento e recursos com o objetivo de reduzir as incertezas e apoiando o progresso contínuo da área.” (USEPA, 2018, pag.2 – tradução nossa).

Pode-se observar que a definição da metodologia ASM por USEPA é similar à definição pelo time do ITRC. Sendo apenas enfatizado pela Agência Americana que ASM permite o direcionamento de decisões de gerenciamento e de recursos para a redução de incertezas em áreas contaminados.

Neste memorando foi delineado um plano de implementação da metodologia para o uso nas áreas do Superfund, destinado principalmente à aplicação em áreas complexas, que apresentam grande extensão e com recursos limitados, onde as partes interessadas variam com diversas perspectivas e prioridades, e que causam impacto na tomada de decisão e no progresso da remediação. O objetivo é aumentar

a eficiência nas áreas a partir da construção de um consenso entre as partes interessadas; da garantia na adesão de boas práticas de engenharia e requisitos legais; e do estabelecimento de documentação transparente com apresentação dos riscos e incertezas no projeto e na abordagem do gerenciamento adaptativo da área (USEPA, 2018).

O processo de implementação foi estabelecido em duas fases. A Fase I consiste em projetos piloto da aplicação da ASM, onde o grupo de trabalho, estabelecido para tanto, desenvolverá critérios que serão utilizados para verificar se os objetivos estão sendo atingidos e determinará o método e as métricas de avaliação. Já a Fase II diz respeito à análise dos projetos piloto e desenvolvimento de políticas ou diretrizes formais da metodologia de gerenciamento adaptativo (USEPA, 2018).

Assim, foram estabelecidas seis áreas para a realização do projeto-piloto, sendo três com características de áreas complexas de mineração e três de áreas que apresentam complexidade para água subterrânea. Cabe destacar que não foram observados detalhes sobre a complexidade das áreas indicadas no documento (USEPA, 2019). Os objetivos dos projetos estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Áreas para realização de projeto-piloto – aplicação da metodologia ASM.

Site	Localização	Objetivo
Bonita Peak Mining District Superfund Site	Silverton, Colorado	Desenvolver um plano de gerenciamento adaptativo de site que inclua o desenvolvimento de metas de remediação de alto nível e formação de uma estrutura para atingir essas metas, priorizando ações de resposta futuras.
Ore Knob Mine Superfund Site	Ashe County, North Carolina	Demonstrar como uma estrutura formal de gerenciamento adaptativo pode ser descrita em um documento de decisão de remediação para o Superfund.
Baytown Township Ground Water Plume Superfund Site	Baytown Township, Minnesota	Demonstrar como um plano de gerenciamento adaptativo pode direcionar recursos e tomadas de decisão estruturadas com o objetivo de promover uma área com uma solução de controle provisória para uma solução final.
10th Street Superfund Site	Columbus, Nebraska	Demonstrar como o gerenciamento adaptativo pode ser aplicado como suporte na tomada de decisões em uma área com operação e manutenção em água subterrânea, com o objetivo de acelerar o encerramento da área.
Bunker Hill Mining & Metallurgical Complex Superfund Site	Coeur d'Alene Basin, Idaho	Demonstrar como um plano de gerenciamento adaptativo pode ser desenvolvido em uma área de mineração complexa e grande, com foco nos esforços de remediação sob um registro de decisão.
Naval Undersea Warfare Engineering Station Superfund Site	Keyport, Washington	Demonstrar como o gerenciamento adaptativo pode apoiar o desenvolvimento de uma possível abordagem de remediação para um local em operação e manutenção que não está atendendo a legislação para águas subterrâneas e superficiais.

Fonte: Adaptado de USEPA (2019).

Atualmente, apenas a área de Bonita, no Colorado, está sendo gerenciado a partir da aplicação da metodologia adaptativa. Para as demais áreas, não foi

encontrado menção da aplicação da metodologia nas páginas online da USEPA, seção do Superfund (USEPA, 2022e).

A seguir será apresentado de maneira sumarizada a caracterização da área e as informações declaradas no documento produzidos pelo grupo de trabalho da USEPA como um estudo de caso de aplicação da ASM, em um projeto piloto em andamento (USEPA, 2020).

5.1.6 Estudo de caso ASM – O caso de Bonita

5.1.6.1 Breve caracterização da área

O Distrito de Mineração de Bonita (*Bonita Peak Mining District*) está localizado no sudoeste do Colorado, no Condado de *San Juan* (Figura 6). A área apresenta três córregos principais (*Mineral Creek*, *Cement Creek* e *Upper Animas River*), que deságuam no rio *Animas River* em *Silverton*, Colorado (USEPA, 2020).

Figura 6 – Distrito de Mineração de Bonita

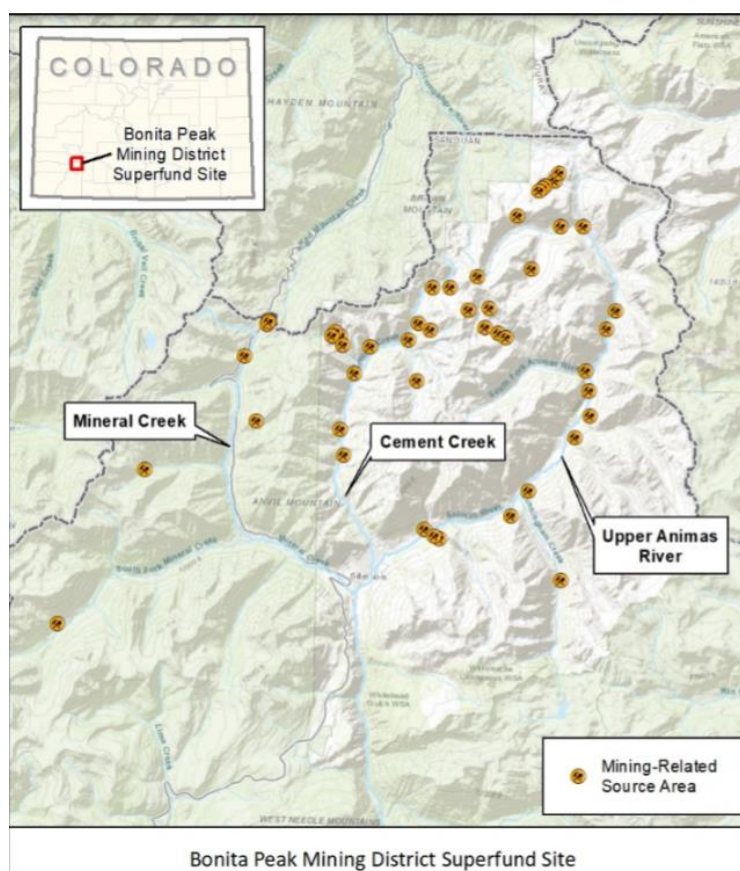


Fonte: USEPA (s.d).

Essas drenagens cobrem mais de 360 km² e contém mais de 400 minas inativas, onde foram palco de pequenas e grandes operações minerárias do tipo

*hardrock*². Dentro da região de Bonita, 48 áreas estão listadas como prioritárias, e foram classificadas como fontes ou fontes potenciais de contaminação que afetam o solo, as drenagens supracitadas e a água subterrânea da região por metais pesados (Figura 7). Essas 48 áreas são formadas por 35 minas, 7 túneis, 4 represas de rejeitos e 2 acampamentos, as áreas são caracterizadas por presença de estéril, lagoas de rejeitos, escória de fundição e descarga de drenagem de mina (em associação com uma ou mais) (USEPA, 2016 apud USEPA, 2020).

Figura 7 – Principais drenagens da área de Bonita e indicação das 48 áreas prioritárias



Fonte: USEPA (2020).

USEPA (2022d) indica que, visando uma resposta mais eficiente da remediação em um site complexo, é possível dividi-lo em unidades de acordo com as suas especificidades, por exemplo geográfica, litológica, segundo o sistema aquífero, problemas específicos etc., e/ou onde uma ação particular é requerida. Essas

² *Hardrock* é um termo americano para designar atividades minerárias associadas principalmente aos minérios e metais de ouro, prata, cobre, chumbo, zinco, níquel (ABANDONED MINES, 2021).

unidades são revistas e modificadas durante todo o tempo do processo de intervenção na área.

O site Bonita foi organizado em quatro unidades (USEPA, 2020):

- UN1: Abrange todo o site Bonita;
- UN2: Lagoas de rejeitos de Mayflower e outras;
- UN3: Sistema de águas subterrâneas da área de Bonita;
- UN4: Mina Bem Franklin.

Sumariamente, a Tabela 5 apresenta informações sobre as ações e atividades realizadas durante o período de 1990 a 2020 na área de Bonita (USEPA, 2022a).

Tabela 5 – Ações e atividades realizadas, no período de 1990 a 2020, na área de Bonita.

Ano/Período	Descrição resumida
1990s	Iniciou-se a avaliação da área, pela USEPA e pelo Departamento de Saúde Pública e Meio Ambiente do Colorado; o resultado da avaliação indicou impactos severos por metais pesados de ocorrência natural e relacionados às atividades minerárias, ameaçando a vida aquática do <i>Upper Animas River</i> e seus afluentes. Porém, devido ao esforço colaborativo da comunidade e com a condição de progresso para a melhora na qualidade da água do rio citado, a USEPA adiou a indicação deste local na Lista de Prioridades Nacionais do Superfund.
Até 2005	Até 2005 a qualidade da água do <i>Upper Animas River</i> estava melhorando. Contudo, a partir de 2005, a qualidade da água não melhorou.
2005 - 2014	Tendo em vista o declínio da qualidade da água desde 2005, a USEPA apoiou financeiramente diversas ações de coleta de dados da área, investigação, remediação e fechamento de locais, avaliação de risco ecológico, entre outras.
2015 - 2016	USEPA apoiou a realização de diversas ações para o entendimento dos impactos causados pelas atividades minerárias e obras de contenção. Em 2016, o site foi oficialmente adicionado na Lista de Prioridades Nacionais do Superfund.
2017 - 2018	A equipe do local, incluindo a USEPA, o Serviço Florestal dos EUA, o Gabinete de Gestão de Terras e o Departamento de Saúde Pública e Meio Ambiente do Colorado conduziram uma Investigação para remediação/Estudo de Tratabilidade (RI/FS) no local. Isso incluía Avaliação de Risco à Saúde Humana, Avaliação de Risco Ecológico e um estudo hidrológico do sistema de águas subterrâneas da região de Bonita. Ações de engajamento da comunidade também foram estabelecidas.
2019	Avaliação de Risco Ecológico e de Risco à Saúde Humana foram concluídas pela USEPA; Investigação em andamento e finalização do Relatório de Caracterização de Infiltrações, Nascentes e Drenagem de Minas. Além da continuidade das ações já estabelecidas, no ano de 2019 outras ações foram desenvolvidas, como: instalação de poços de monitoramento, gerenciamento do lodo da estação de tratamento de água, estudo piloto com aplicação de técnicas inovadoras etc.
2020	Finalizados: Plano de Gerenciamento Adaptativo da Área; Avaliação de Risco Ecológico da Linha de Base Terrestre; Obras de melhoria para minimização dos impactos das atividades minerárias; Em andamento: Investigação para remediação; Avaliação do Impacto na água subterrânea; Gerenciamento do lodo da estação de tratamento de água; Estudo

Ano/Período	Descrição resumida
	piloto com aplicação de técnicas inovadoras; Ações de engajamento da comunidade.

Fonte: Adaptado USEPA, 2022d.

A avaliação de risco à saúde humana foi realizada considerando a utilização do distrito de mineração para uso recreativo, como uso de quadriciclo, camping, caminhadas, pesca e práticas esportivas.

USEPA (2022C) explana que:

“As operações de mineração perturbaram muito a terra, aumentando as condições altamente mineralizadas existentes em muitas áreas do local. A rocha estéril mineralizada exposta ao ar e à água provoca condições ácidas para mobilizar a liberação de metais pesados para o meio ambiente. Esses metais pesados chegaram ao *Animas River* e seus afluentes e viajaram mais a jusante.” (USEPA, 2022c – tradução nossa).

Medidas de desempenho para o alcance de resultados ambientais específicos são implementadas pelo programa de remediação do Superfund. Em relação ao estudo de caso em questão, foram considerados: (i) exposição humana sob controle; (ii) migração sob controle de águas subterrâneas; (iii) construção física concluída (por exemplo construção de sistema de tratamento de água subterrânea), pronto para uso. Para todas essas medidas o status é negativo, o que significa que de maneira respectiva: (i) um nível inseguro de contaminação foi detectado no local e existe uma expectativa razoável de que as pessoas possam ser expostas; (ii) a USEPA revisou todas as informações sobre contaminação de águas subterrâneas conhecidas e razoavelmente esperadas, e a migração de águas subterrâneas contaminadas não está estabilizada; e (iii) a construção física não está completa ou ainda são necessárias ações para lidar com a contaminação (USEPA, 2022c).

Para o risco ecológico, foram ponderadas evidências de impacto na comunidade de invertebrados bentônicos; toxicidade para as espécies de trutas; impacto na ictiofauna por metais. Populações de pássaros ou mamíferos não experimentam efeitos negativos significativos de metais na região do *Animas River* (USEPA, 2022c).

Cabe destacar que na Unidade 01, que abrange toda a área de Bonita, as substâncias químicas que apresentam risco inaceitável para a saúde humana ou para o meio ambiente são: arsênio e chumbo (USEPA, 2022b).

5.1.6.2 Aplicação da metodologia de gerenciamento adaptativo de site (ASM) em Bonita

USEPA (2020) explana que, para o sucesso da aplicação da metodologia ASM, é fundamental o desenvolvimento de um planejamento estratégico. Importante ressaltar que tanto o planejamento quanto a execução da ASM devem ser conduzidos de maneira que as partes interessadas estejam envolvidas durante todo o processo.

Portanto, componentes-chave para a fase de planejamento da metodologia são desenvolvidos a partir das informações das áreas, e consistem nas metas, objetivos e estratégias dos projetos e a estruturação do processo de tomada de decisão.

Para planejar, priorizar, tomar decisões e adaptar as atividades em andamento, visando a remediação da área, a etapa de tomada de decisão pela ASM deve ser feita de modo interativo, para que os resultados obtidos a partir das atividades anteriores sejam considerados na fase de planejamento para as ações futuras (USEPA, 2020).

Para a aplicação da ASM, USEPA (2020) resumiu as etapas indicadas por ITRC (2017) em quatro etapas principais:

- Etapa 1: Planejamento e priorização;
- Etapa 2: Execução da atividade;
- Etapa 3: Monitoramento e Avaliação;
- Etapa 4: Integração do Conhecimento.

Pode-se considerar que a Etapa 1 inclui em relação a metodologia ASM: (i) Desenvolvimento de Modelo Conceitual da Área (MCA) com base nos desafios da área; (ii) Realização de avaliação do potencial de remediação para decidir se o gerenciamento adaptativo é bem sucedido, de acordo com os desafios da área; (iii) Refinamento do MCA; (iv) Definição ou reavaliação dos objetivos da área; (v) Desenvolvimento dos objetivos provisórios e estratégias de remediação adaptativa; (vi) Desenvolvimento do plano de gestão de longo prazo. A Etapa 2 está relacionada ao (vii) Projeto e implantação da remediação. A Etapa 3: (viii) Monitoramento e avaliação do desempenho. E por fim, a Etapa 4: (ix) Aplicação dos critérios de decisão para ajustar, otimizar ou reavaliar a remediação (USEPA, 2020; ITRC, 2017).

5.1.6.3 Objetivos iniciais atuais da área

Para o estabelecimento dos objetivos iniciais, USEPA considerou as condições e informações sobre o site, resultados de avaliações de risco ecológico e de saúde humana e considerações das partes interessadas (*stakeholders*). Assim, foram

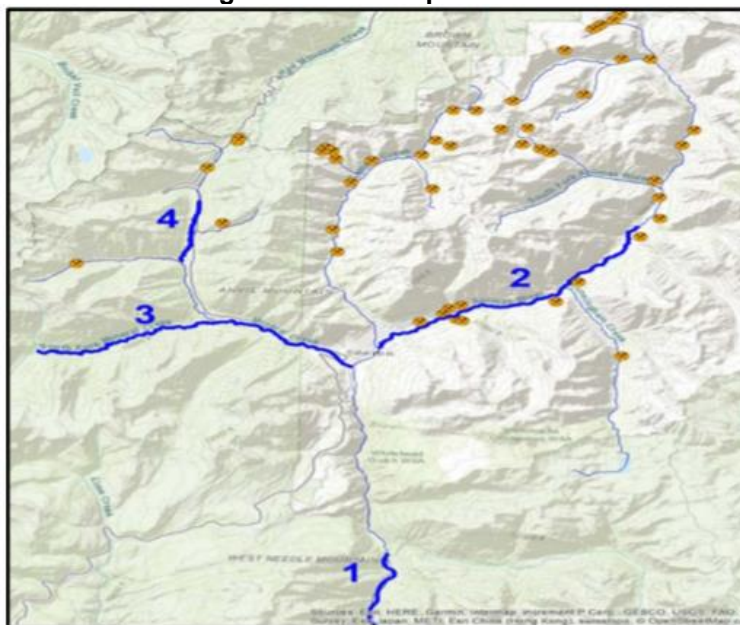
definidos três objetivos principais iniciais do projeto, em 2019 (USEPA, 2020, 2021a): (i) melhorar a qualidade da água, com foco na drenagem de mina; (ii) estabilizar as áreas de origem, com foco nas erosões; (iii) minimizar lançamentos não planejados;

Além disso, foram estabelecidos dois objetivos específicos para a melhoria da qualidade da água (USEPA, 2020, 2021a): (a) Identificar ações necessárias para alcançar e atender o padrão de referência (*Table Value Standards*) na região do *Animas River* à jusante de *Elk Creek*; (b) Melhorar a qualidade da água para atender ou exceder ao padrão de referência de água estadual.

5.1.6.4 Pontos prioritários

De maneira estratégica e para concentrar os esforços, a USEPA estabeleceu quatro pontos prioritários para a área, considerando habitat, interferências de *background*, saúde humana, risco ecológico e carreamento de metais na bacia hidrográfica. Conforme a Figura 8, os pontos foram: (1) *Canyon Reach*; (2) *Upper Animas downstream of Eureka*; (3) *South Fork Mineral Creek*; (4) *Upper Mineral Creek* (USEPA, 2020).

Figura 8 – Pontos prioritários



Fonte: Adaptado de USEPA (2020).

A USEPA desenvolveu objetivos exclusivos para o fluxo dentro de cada um desses pontos (USEPA, 2020):

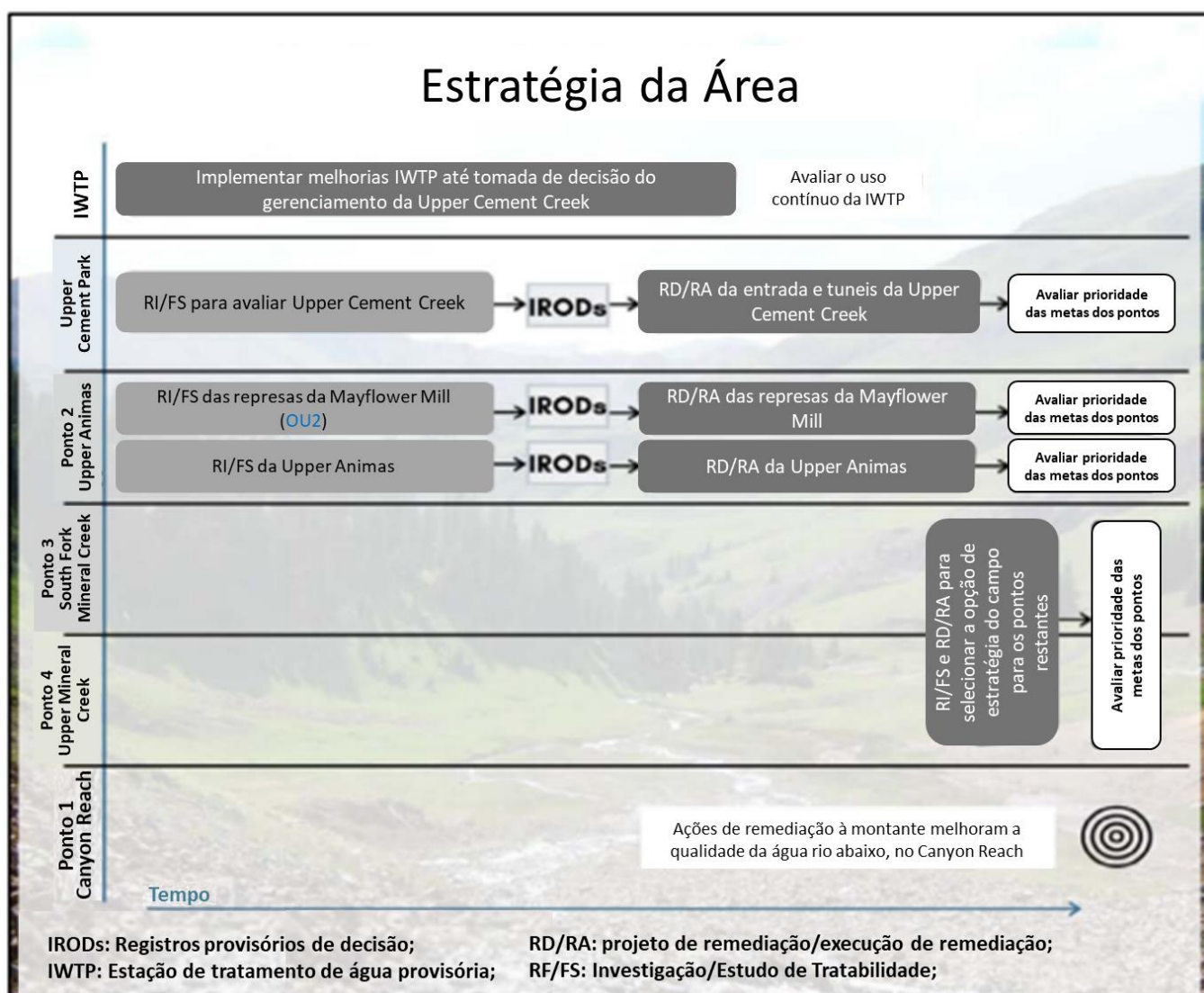
- Ponto 1: Realizar atividades necessárias para atender ao padrão de referência (*Table Value Standards*) no *Animas River* em um local abaixo de *Elk Creek*

(com a possível exceção de alumínio, devido a altas concentrações background);

- Ponto 2: Melhorar o número e a extensão espacial da pesca de trutas existente;
- Ponto 3: Melhorar o número e a diversidade da pesca existente; melhorar a comunidade de macroinvertebrados bentônicos e proteger/reforçar o corredor de trutas pelo *Animas River*;
- Ponto 4: Investigar o potencial de expansão e melhoria da pesca em *Mineral Creek*, e melhorar a comunidade de macroinvertebrados bentônicos.

Para cada ponto prioritário, e reconhecendo a necessidade de considerar tempo e recursos para o atendimento das metas e objetivos da área, em 2019 a USEPA desenvolveu a Estratégia da Área, em colaboração com os *stakeholders*, como mostra a Figura 9 (USEPA, 2020).

Figura 9 – Estratégia da Área



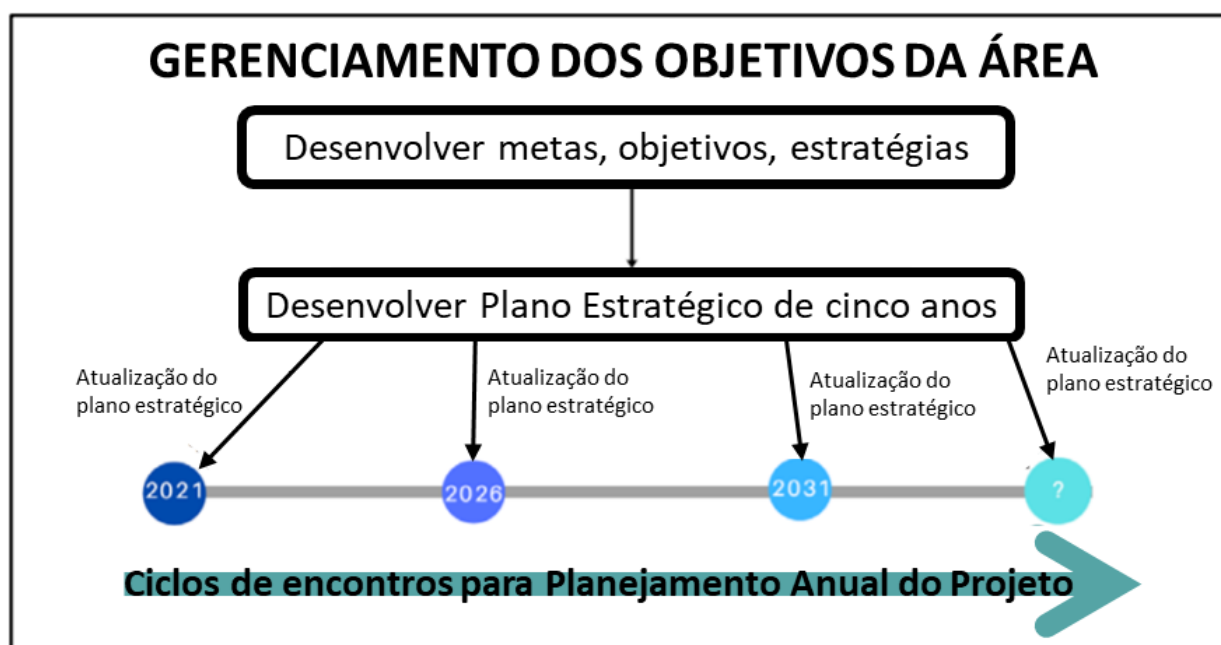
Fonte: Adaptado de USEPA (2020).

5.1.6.5 Tomada de decisão na ASM

Dando continuidade ao gerenciamento adaptativo do site (ASM), USEPA (2020) indicou o novo estabelecimento de objetivos iniciais atuais da área, uma vez que o item anterior apresentou a fase de planejamento e priorização já realizados pela USEPA e *stakeholders* em 2019.

Assim, no documento de 2020, USEPA indica que, para garantir que o progresso do projeto e dos recursos sejam alocados na área de maior necessidade, a tomada de decisão da ASM para a área complexa incluirá o planejamento estratégico anual e quinquenal, de forma interativa. Desta forma, deverá ser avaliada novamente a proposta atualizada dos objetivos da área, de maneira estruturada pela USEPA e pelos *stakeholders* envolvidos (agências federais e estaduais), com possíveis modificações das metas, objetivos e estratégia da área já estabelecidos (Figura 10) (USEPA, 2020).

Figura 10 – Gerenciamento dos objetivos da área



Fonte: Adaptado de USEPA (2020).

USEPA (2020) explica que o objetivo do planejamento estratégico é:

“(...) Desenvolver marcos intermediários com prazos e medidas específicos para orientar o planejamento do projeto e demonstrar o progresso na

Estratégia do Site, assim como visa o alcance dos objetivos e metas do site.” (USEPA, 2020. p.29 – tradução nossa)

Importante ressaltar a indicação de que o Plano Estratégico deve incluir (USEPA, 2020):

“Um resumo dos resultados do trabalho executado no Plano Estratégico dos 5 anos anterior, conforme aplicável; Marco(s) estabelecido(s) para cada meta e objetivo do site; Ações prioritárias para cada componente da Estratégia do Site para atingir os marcos; e uma sequência de atividades e um cronograma geral para conclusão.” (USEPA, 2020. p.30 – tradução nossa)

Ainda que USEPA (2020) não explicita em seu documento uma relação entre essa etapa com as etapas apresentadas por ITRC (2017), pode-se relacioná-la com a fase de “avaliações periódicas”, conforme explanado neste trabalho na seção 5.1.4.4. Pois, ambas estão relacionadas à sugestão de realização de avaliações de desempenho de maneira periódica, para a ponderação do progresso da intervenção em relação aos objetivos provisórios e métricas de uma área.

5.1.6.6 Planejamento Quinquenal

Para o desenvolvimento do plano estratégico para o site Bonita de cinco anos, USEPA (2020) explana a seguinte estrutura:

- O gerente do projeto de remediação da USEPA consultará grupos de trabalho da Agência para o desenvolvimento de atividades, cronogramas e marcos para cada item principal indicado no plano estratégico;
- A USEPA realizará a verificação de projetos semelhantes para avaliação de potenciais oportunidades para alavancar recursos, alinhar as prioridades, garantir que os marcos sejam realistas, assim como o orçamento.
- O rascunho do plano estratégico de Bonita de cinco anos será enviado aos *stakeholders* para revisão e comentários. Após o recebimento do *feedback*, o plano será finalizado e compartilhado online publicamente no site de Bonita (Bonita, 2018).

Cabe destacar que o *site* de Bonita foi criado com o propósito de ser uma ferramenta de acesso direto aos *stakeholders*, com a apresentação de todas as ações e documentos que estão sendo desenvolvidas na área. No site de Bonita (2018) pode-se observar informações sobre a área complexa, com diversos documentos, registros de reuniões etc., o grupo formador das partes interessadas ou *stakeholders* com os

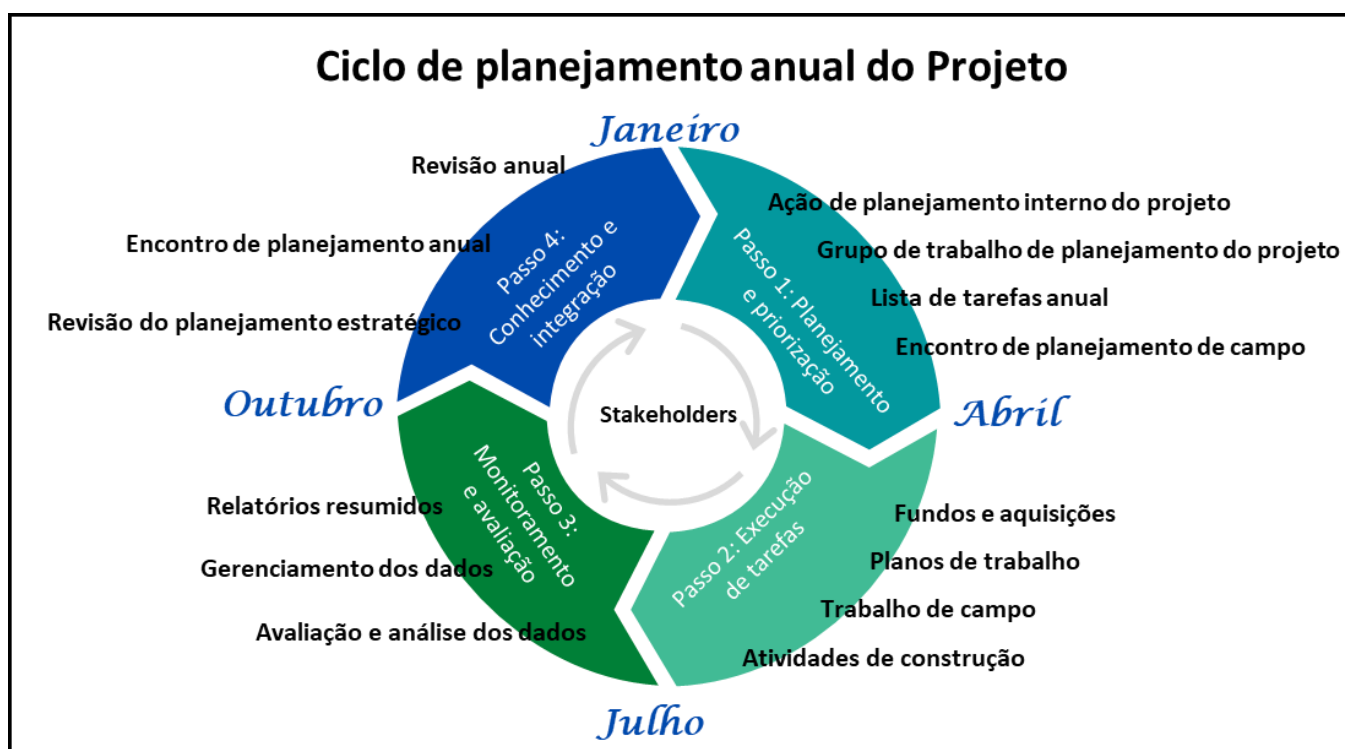
membros descritos, há local para se inscrever como parte interessada e endereços de e-mail para entrar em contato (Bonita, 2018).

Caso sejam verificados atrasos em atividades essenciais do projeto, que afetam diretamente os cronogramas ou o atingimento de metas, a atualização do plano estratégico quinquenal deverá ter a identificação de ações ou recursos necessários para lidar com esses atrasos. É também recomendado que o plano não seja atualizado nestes pontos, mas que toda a informação sobre o não cumprimento dos prazos sejam documentadas para sua integração na Etapa 01 (planejamento e priorização) dos futuros planejamentos (USEPA, 2020).

5.1.6.7 Ciclo anual de planejamento

O ciclo anual de planejamento, indicado pela USEPA (2020) para o Gerenciamento Adaptativo do Site (ASM) de Bonita, é um processo contínuo e iterativo que segue as quatro etapas já explanadas neste capítulo. A Figura 11 resume e ilustra o ciclo anual de planejamento do projeto, incluindo os *stakeholders*.

Figura 11 – Ciclo anual de planejamento do projeto



Fonte: Adaptado de USEPA (2020).

- Etapa 1: Planejamento e priorização

A cada ano será iniciado um novo ciclo de planejamento e priorização dos projetos desenvolvidos na área de Bonita. Desta forma, USEPA (2020) afirma que a estratégia do site será revisitada para a verificação dos projetos ou conjunto de projetos que deverão ser desenvolvidos, visando o atingimento das metas e métricas estabelecidas.

O grupo de trabalho formado para o gerenciamento do *site* irá estabelecer/revisar: metas aplicáveis ao local e objetivos prioritários; definição de escopo de projeto; pontos de referência; atividades de resposta e cronograma planejado com foco nos próximos 5 anos; informações e necessidades de contratação e orçamento; ações de fiscalização em andamento ou planejadas; necessidades-chave do projeto, específicas para o gerenciamento de dados, acesso, recursos culturais e comunicações.

USEPA (2020) estabeleceu para o site que todo ano, no mês de fevereiro, será lançada a Lista de Tarefas Anual, onde serão especificadas as ações planejadas para o ano. Por exemplo, o monitoramento anual de determinados locais do site de Bonita para avaliação da qualidade da água.

Toda tomada de decisão e todo o planejamento será documentado na Lista de Tarefas Anual e deverão ser apresentados no Calendário da área de Bonita para o acesso público (USEPA, 2020).

- Etapa 2: Execução da atividade

Após a divulgação da Lista de Tarefas Anuais de Bonita, a USEPA e as outras agências (Departamento de Saúde Pública e Meio Ambiente do Colorado, Grupo de Planejamento do Distrito Mineiro de Bonita Peak Silverton etc) irão implementar e executar as tarefas planejadas. Para esta etapa, USEPA (2020) explana que a parte de orçamentos, financiamentos e compras será realizada pela agência líder, e essa fase ocorrerá em paralelo à fase de planejamento executivo do trabalho de campo, como por exemplo plano de trabalho, plano de gestão de qualidade etc. Após concluída esta fase, será iniciada a fase de trabalho de campo que, no caso da área de Bonita, deverá ser realizado na temporada de verão. Assim, concluídos os trabalhos de campo, serão desenvolvidos relatórios específicos para revisão da USEPA com o prazo de fechamento antes do início das atividades de planejamento do ano seguinte (USEPA, 2020). Todo o processo deverá ser divulgado online, para acesso público (Bonita, 2018).

- Etapa 3: Monitoramento e Avaliação

A terceira etapa diz respeito ao monitoramento e avaliação do progresso das atividades realizadas em relação às metas e métricas estabelecidas no plano estratégico do site. Sendo, também, importante para a análise e entendimento do progresso na fase no planejamento quinquenal (o que resultará na seleção e priorização das ações futuras) (USEPA, 2020).

Para o site Bonita, será desenvolvido o plano de monitoramento a longo prazo e planos de monitoramento específicos que sejam necessários. Cabe destacar que todo o processo de monitoramento, aquisição de dados e avaliação serão realizados em conjunto com os *stakeholders*, e haverá divulgação online para acesso público dessas informações (USEPA, 2020).

- Etapa 4: Integração das Informações

Após a temporada de aquisição de novos dados, a fase de integração das informações passa pela análise e avaliação dos dados obtidos e atualização das ferramentas de gestão, como por exemplo modelo conceitual da área, avaliação de riscos e outras, para auxiliar na reavaliação e repriorização de ações futuras (USEPA, 2020).

Para a área de Bonita, USEPA (2020) indica:

“Na preparação da reunião de planejamento anual, após a conclusão da temporada de campo e antes do desenvolvimento da Lista de Tarefas Anuais de Bonita, a USEPA, em consulta com os *stakeholders*, reunirá os dados coletados e documentos gerados durante o ano e fará uma avaliação preliminar e análise dos resultados.” (USEPA, 2020. p.34 – tradução nossa).

Nesta etapa, serão gerados materiais que mostrem os resultados anuais, para apresentação em reuniões com os *stakeholders*, cujo objetivo é a reflexão e a discussão destes resultados visando a identificação de melhorias no processo (USEPA, 2020).

USEPA (2020) reforça que a discussão, avaliação dos resultados e a busca por feedbacks dos *stakeholders* corrobora na garantia do entendimento da atualização do projeto por todos os envolvidos. Além disso, o envolvimento dos *stakeholders* ajuda na integração de seus interesses, sendo esse ponto importante para o planejamento do ano seguinte.

Após a conclusão da fase de discussão e análise dos resultados anuais, a USEPA irá atualizar todas as ferramentas e registros associados à área. Também, irá aprofundar-se na análise crítica dos resultados, para identificação de causas que afetaram o cronograma, o escopo e o orçamento. E assim, será realizada a análise de causa raiz para criação de estratégias de mitigação do risco, além da documentação de toda a avaliação para considerar como aprendizado para as ações futuras (USEPA, 2020).

Por fim, USEPA (2020) explana que será realizada a revisão do planejamento do projeto por todos os *stakeholders*, e as atualizações deverão ser indicadas. Além disso, toda a informação será atualizada no site online para acesso público. Desta forma, o ciclo anual é fechado para dar início novamente à Etapa 01.

5.1.6.8 Considerações sobre o estudo de caso

A partir do estudo de caso da área de Bonita, pode-se caracterizar a área como área contaminada complexa, por apresentar incertezas no progresso de remediação, tais como, melhorar a qualidade da água, estabilizar as áreas de origem e minimizar lançamentos não planejados, além da necessidade de gerenciamento a longo prazo. O site está em processo de gestão desde meados de 1990 (USEPA, 2020; ITRC, 2017).

Também, vale destacar os desafios técnicos e não técnicos relacionados às áreas complexas. A área de Bonita apresenta para os desafios técnicos condições geológicas, com a apresentação de erosões na área; hidrogeológicas, devido à contaminação da água subterrânea, superficial e de sedimentos em larga escala; geoquímicas, com o impacto da drenagem de mina; relacionadas ao tipo de contaminante (arsênio e chumbo), indicados no estudo risco ecológico e de saúde humana, devido às concentrações de metais e entre outros; e por ser uma área que apresenta grande escala, as drenagens impactadas cobrem mais de 360 km² e área contém mais de 400 minas inativas (USEPA, 2020; ITRC, 2017).

Já os desafios não técnicos também são observados na área de Bonita, pois a área sofre pressão para utilização como recurso de água potável, para realização de atividades de recreação, como pesca e camping etc. A tomada de decisão a partir da gestão de longo prazo é evidente, a área vem sendo gerenciada há aproximadamente 30 anos, além da verificação de sobreposição de responsabilidades regulatórias e

controles institucionais e necessidade de financiamentos, apesar do site estar considerado no programa Superfund (USEPA, 2020; ITRC, 2017).

É válido observar que a aplicação por USEPA (2020) do gerenciamento adaptativo na área de Bonita foi dada de forma que todas as etapas indicadas por ITRC (2017) tenham sido cumpridas. USEPA (2020) resumiu as etapas em quatro e também, lançou a aplicação destas etapas no processo anual e quinquenal. Desta forma, a gestão do projeto é dada de maneira cíclica conforme indicado por ITRC (2017), nas fases de avaliações periódicas e decisão lógica para avaliação, otimização, modificação ou transição da remediação. Contudo, o documento lançado por USEPA (2020) não apresenta as ferramentas indicadas por ITRC (2017) de maneira clara, como por exemplo a atualização do MCA (ou até mesmo o MCA atual), seleção da estratégia adaptativa de remediação e componentes de remediação.

Por fim, cabe destacar que o projeto apresenta interação direta com os *stakeholders*, tendo sido estruturado os papéis e responsabilidades de cada parte, além da construção de um site para acesso a todo público, de maneira que as informações acerca das tomadas de decisão para o gerenciamento da área sejam compartilhadas de forma transparente e sempre atualizadas (BONITA, 2018; USEPA, 2020).

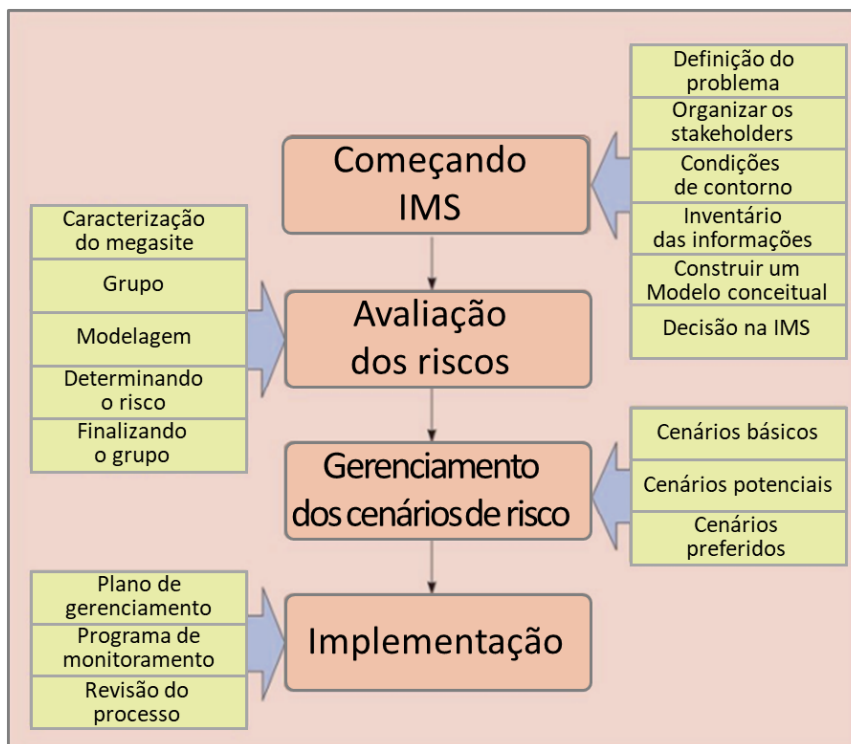
5.2 ESTRATÉGIA DE GERENCIAMENTO INTEGRADO (IMS)

A metodologia de gerenciamento de *megasites*, denominada como Estratégia de Gerenciamento Integrado foi criada pelo programa The WELCOME, projeto da União Europeia, devido ao desafio de remediação das áreas caracterizadas como *megasites*. O *megasite* é uma área contaminada que apresenta grande extensão de influência de migração das águas subterrâneas, superficiais e/ou aéreas, que pode variar entre 1 a 10 km, com múltiplas fontes de contaminantes, apresenta considerável impacto ao meio ambiente e que não é possível remediar em um prazo razoável (IMS, 2021e; MALINA et al., 2006).

O cerne da metodologia é constituído pela avaliação de risco integrada que leva em consideração os *stakeholders*, o cenário envolvido (características químicas e físicas) e a viabilidade técnica e econômica das ações de intervenção em um *megasite*. Com aplicação gradual, em etapas e de maneira cíclica, a metodologia tem como objetivo final minimizar os custos do projeto e maximizar a sua eficiência,

canalizando os investimentos para os locais mais comprometidas da área. A Figura 12 apresenta a estrutura da estratégia de gerenciamento integrado (IMS, 2021e).

Figura 12 – Estrutura da estratégia de gerenciamento integrado



Fonte: Adaptado de IMS (2021e)

Sumariamente, a “estratégia de gerenciamento integrado” consiste em quatro principais etapas conforme Figura 12. As informações e ações que devem ser levantadas e realizadas para a adequada execução da metodologia serão apresentadas nos itens subsequentes, de maneira concisa.

5.2.1 Iniciando a estratégia de gerenciamento integrado

O IMS (2021e) apresenta esta etapa como “colocando as coisas em ordem”, com o objetivo de “fornecimento de todos os critérios necessários para definir um local como *megasite* e derivar as tarefas de gerenciamento específicas”.

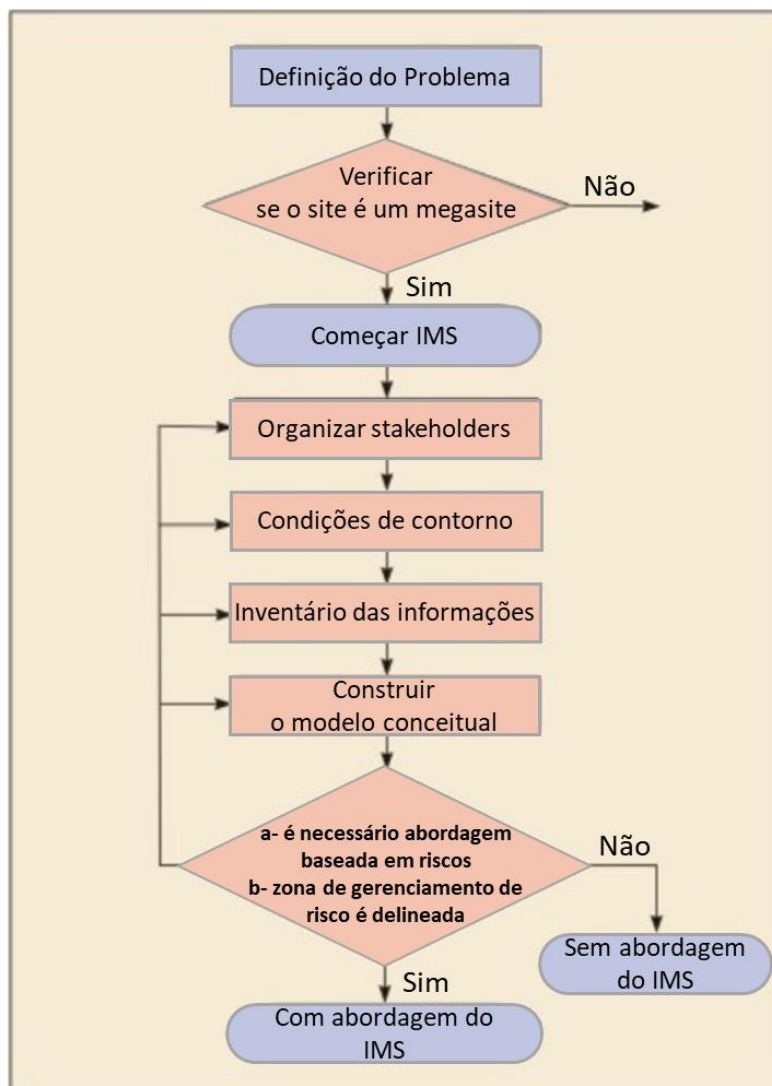
A fim de determinar os critérios específicos para a tomada de decisão de prosseguir com o IMS e para organizar as tarefas de gestão, devem ser realizadas as seguintes atividades (Figura 13) (IMS, 2021e):

- Decidir se o local é um *megasite* e se a estratégia de gestão integrada (IMS) é uma abordagem apropriada;

- i. identificação de local ou região, com apresentação de informações de escala, qualidade e quantidade.
- b. Formar um comitê de partes interessadas (*stakeholders*);
 - i. Organização de um comitê de coordenação do *megasite*, envolvidos no processo de tomada de decisão, com identificação de responsabilidades, estabelecimento de interações e definição de conflitos de interesse.
- c. Realizar revisão geral das condições de contorno;
 - i. Definição das condições deve ser realizada antes do início de qualquer atividade de intervenção, com verificação de legislação federal, estadual e municipal, interesse público, fatores de sustentabilidade, custos e opções de financiamento.
- d. Realizar um inventário das informações do *megasite*;
 - i. Levantamento de todas as informações importantes para o gerenciamento do *megasite*. Etapa cíclica que deve ser repetida a cada obtenção de novas informações.
- e. Construir um modelo conceitual da área (MCA), incluindo as condições de contorno do *megasite* e o gerenciamento de risco.
 - i. Identificação dos potenciais contaminantes;
 - ii. Determinação da extensão e distribuição espacial da contaminação;
 - iii. Identificação do fluxo e transporte dos contaminantes;
 - iv. Identificação dos potenciais receptores e uso futuro da área;
 - v. Desenvolver hipótese sobre a gestão de risco nas fronteiras da área;
 - vi. Integrar a gestão de risco no plano de gestão da bacia hidrográfica.

Exemplo de um ponto importante a ser avaliado, visando ao prosseguimento da aplicação do IMS, é a verificação da presença de contaminação na zona saturada em grande escala que apresente dificuldade na viabilidade de tratamento tanto técnico, legal e/ou econômico em um prazo definido (IMS, 2021e).

Figura 13 – Iniciando a estratégia de gerenciamento integrado (IMS)



Fonte: Adaptado de IMS (2021e)

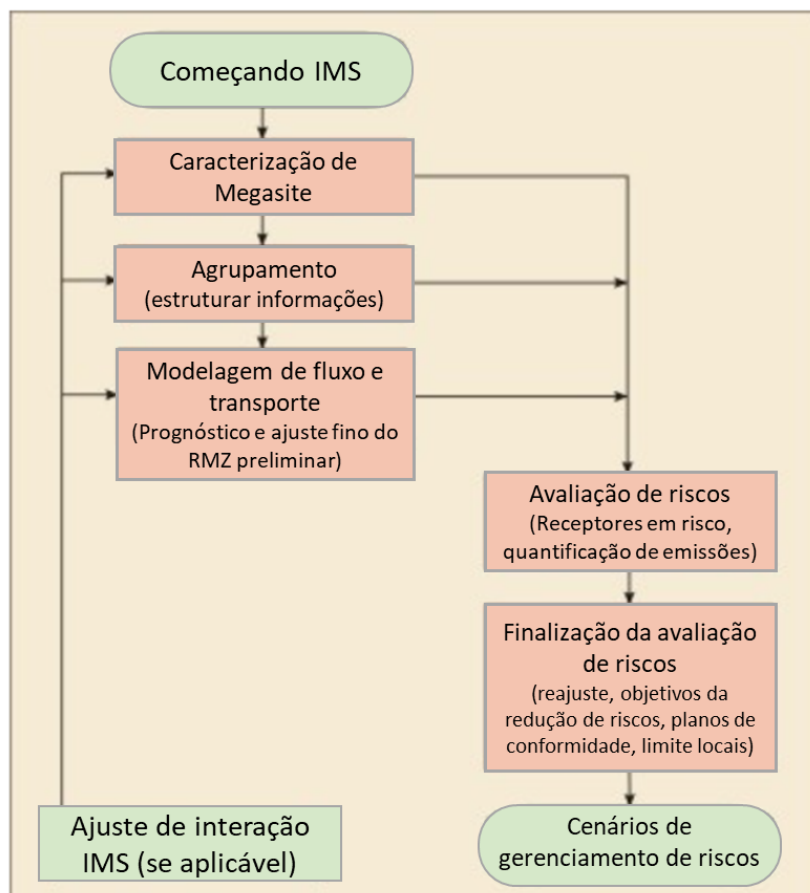
5.2.2 Avaliação de Risco

O IMS (2021e) apresenta esta etapa como “fluxo e efeito de contaminantes” com os seguintes passos a serem verificados para a avaliação de risco (Figura 14):

- a. Realizar a caracterização do *megasite* (indicado utilizar como apoio a ferramenta GIS);
 - i. A situação da contaminação e suas fontes;
 - ii. Os sistemas naturais e infraestrutura do *megasite*;
 - iii. Os receptores e o uso funcional (critérios de qualidade relacionados)
- b. Definir potenciais grupos de risco;

- i. Aferição dos contaminantes prioritários específicos por via de transporte e potenciais receptores;
 - ii. Aferição das vias de transferência entre as fontes de contaminação e potenciais receptores;
 - c. Executar modelagem de fluxo e transporte de contaminantes;
 - i. Critérios dos riscos para potenciais receptores;
 - ii. Confiabilidade da descrição da água subterrânea e processos de transporte de contaminantes;
 - iii. Caracterização detalhada das vias de transporte e fluxo de contaminantes, das fontes para os receptores.
 - d. Determinar riscos;
 - i. Os riscos devem ser determinados e quantificados levando em consideração cada grupo, os caminhos preferenciais de cada fonte e receptor, conforme avaliado no MCA.
 - ii. Relação das possíveis medidas de mitigação, planos de conformidade com base nos resultados da modelagem.
 - e. Finalizar grupos de riscos.
 - i. Os grupos de risco e a gestão de risco devem ser finalizados de acordo com os resultados da modelagem e avaliação de risco.

Figura 14 – Avaliação de Risco



Fonte: Adaptado de IMS (2021e)

5.2.3 Gestão do cenário de risco

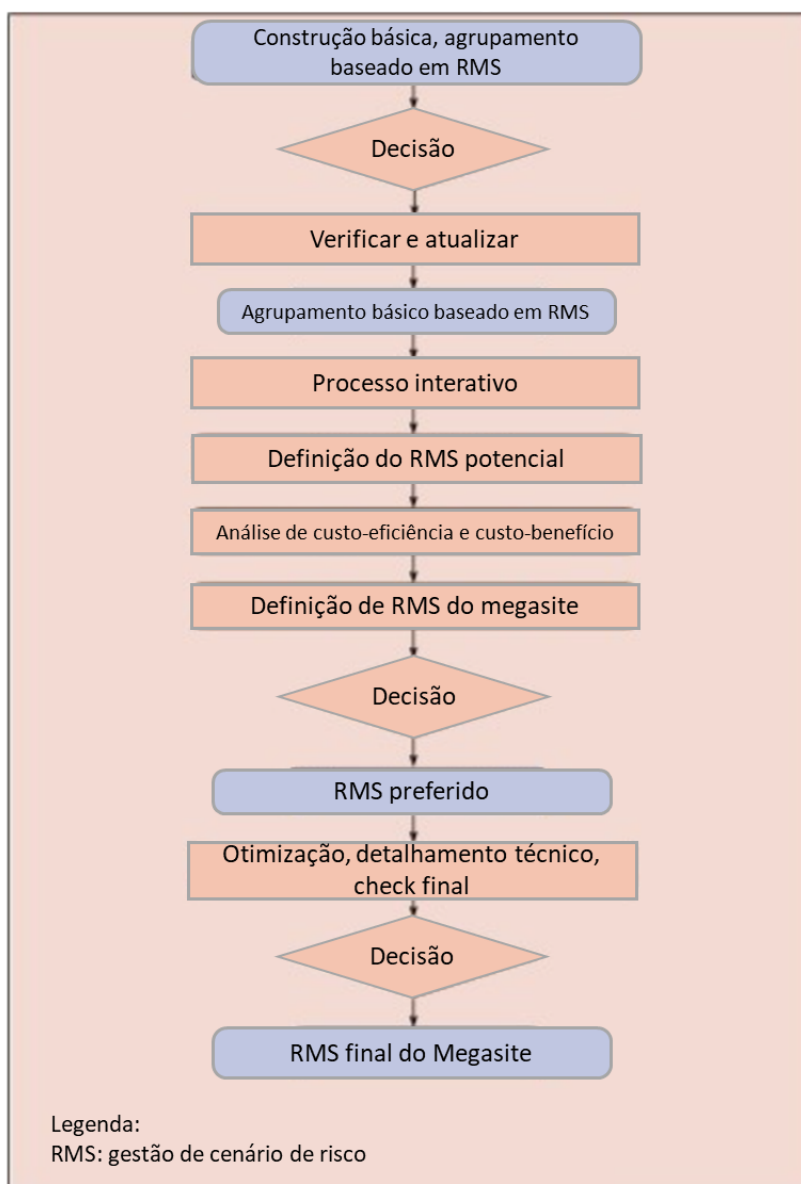
O IMS (2021e) apresenta esta etapa como “viabilidade, prioridades e prazos para ações de intervenção”, com o objetivo de “definir cenários de manejo a longo prazo que sejam econômicos e sustentáveis, levando em consideração as condições e critérios limitantes”.

As seguintes ações devem ser realizadas para a execução da gestão (Figura 15) (IMS, 2021e):

- a. Definir a viabilidade de gerenciamento de cada cenário (incluindo objetivos de redução de risco e prioridade);
 - i. Avaliar os resultados obtidos nas etapas anteriores, bem como identificar os grupos prioritários e os impactos nos receptores. Os objetivos e os riscos prioritários devem ser definidos pelas partes interessadas, levando em consideração o período de tempo do

- impacto e a aplicação de técnicas que podem ser aplicadas, de acordo com as características do *megasite*.
- b. Realizar análise de custo-benefício e redução de risco;
 - i. determinar os custos de intervenção a longo prazo dos cenários especificados.
 - c. Priorizar e otimizar cenários de gestão para o *megasite*;
 - i. decisão final dada pelos *stakeholders* envolvidos no projeto;
 - ii. avaliação integral é necessária para apoiar na tomada de decisão.

Figura 15 – Gestão do cenário de risco



Fonte: Adaptado de IMS (2021e)

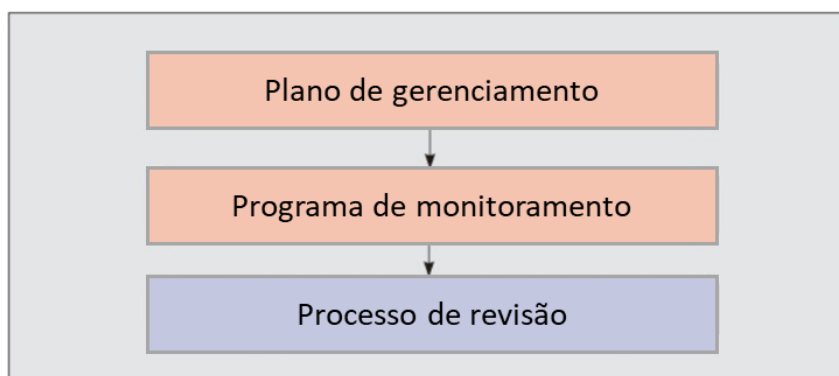
5.2.4 Implementação

Apresentado de maneira homogênea ao ciclo PDCA (planejar, executar, checar e agir), o IMS (2021e) indica esta etapa como o desenvolvimento de plano de implementação, monitoramento e revisão para a execução bem-sucedida da gestão do cenário de intervenção (Figura 16).

- a. Realizar o plano de gerenciamento do *megasite*;
 - i. Gestão de riscos e gestão econômica relacionadas aos impactos no solo e água subterrânea e atingimento aos objetivos estabelecidos do projeto, de maneira que todas as partes interessadas estejam de acordo.
- b. Realizar o programa de monitoramento;
 - i. Controle de desempenho das medidas implementadas, bem como avaliação das condições químicas da zona saturada e entre outras avaliações necessárias estabelecidas no processo.
- c. Revisar todo o processo;
 - i. Procedimento necessário para ajustar os planos de gerenciamento, objetivos e programa de monitoramento, incluindo as medidas de redução de risco implementadas.

Cabe destacar que o IMS (2021e) indica a necessidade de realização de plano de contingência para aplicação em situações de mudanças do cenário do *megasite*, sejam mudanças na legislação, nos objetivos das partes interessadas, seja nas condições químicas e físicas da área de intervenção.

Figura 16 – Implementação



Fonte: Adaptado de IMS (2021e)

5.2.5 Estudo de caso IMS – O caso Tarnowskie Góry

O programa The WELCOME desenvolveu e testou a estratégia de gerenciamento integrado em quatro *megasites* situados na Europa. As áreas são (IMS, 2021e):

- Área industrial química na cidade alemã de Bitterfeld;
- Fábrica de produtos químicos na cidade polonesa de Tarnowskie Góry; e
- Portos fortemente industrializados de Roterdã e Antuérpia.

Visando exemplificar a aplicação da estratégia de gerenciamento integrado, será apresentada, de maneira sucinta, estudo de caso de Tarnowskie Góry.

5.2.5.1 Iniciando a estratégia de gerenciamento integrado (IMS)

Em Tarnowskie Góry, situado na Província da Silésia, na Polônia, uma fábrica de produtos químicos, caracterizada como área industrial de grande escala, operou no período de 1921 até 1995. Aproximadamente 1,7 milhão de toneladas de resíduos perigosos contendo bário, boro, zinco, cobre e estrôncio foram despejados em uma área de 34 ha, dentro da área da planta química e seus arredores. A contaminação gerada pelo lançamento sem controle dos resíduos perigosos impactou o sistema aquífero da região, o qual era utilizado pela população local para abastecimento de água. O objetivo principal da gestão desta área contaminada era a proteção do reservatório de água subterrânea para o abastecimento de água potável. Tendo em vista a complexidade do cenário, características dos contaminantes, aspectos regulatórios e organizacionais, e o custo para a remediação da área, o programa The WELCOME realizou a aplicação da estratégia de gerenciamento integrado visando gerenciar os riscos da contaminação da região para os receptores finais (IMS, 2021c; MALINA, 2006).

A identificação das partes interessadas (*stakeholders*) para o projeto de Tarnowskie Góry foi dada com a triagem de organizações existentes; contatos diretos com as organizações atuantes na área; e através da experiência e do conhecimento das comunidades locais e das autoridades administrativas. Foram convidados para o grupo de *stakeholders*: proprietários de poços, autoridades locais, filiais dos governos nacionais e regionais, instituições de financiamento público (IMS, 2021c).

Os *stakeholders* desempenharam e representaram papéis e aspectos diferentes na gestão do *megasite*. Desta forma, foram organizados em grupos, da seguinte maneira (IMS, 2021c):

- Atribuição (representante de interesses particulares, gestão de fundos públicos etc.);
- Interesse (econômico, social, ambiental etc.);
- Tipo (proprietário do problema, autoridades responsáveis, financiadores etc.);
- Organização (município de Tarnowskie Góry, Ministério do Meio Ambiente, Fundo Nacional para Proteção Ambiental e Gestão da Água etc.);
- Função (autoridade responsável pela gestão do solo e águas subterrâneas; apoio financeiro a projetos ambientais etc.).

Os *stakeholders* foram solicitados a assumir compromissos formais em relação à sua participação no processo de tomada de decisão, com envolvimento estratégico a partir de fornecimento de informações e como parte interessada no desdobramento das ações realizadas no *megasite* (IMS, 2021c).

As condições de contorno levantadas para o *megasite* Tarnowskie Góry foram da ordem do interesse público e fatores sociais. A Tabela 6 sumariza a análise de custo-benefício da execução das ações no *megasite*.

Tabela 6 – Análise de custo-benefício da execução das ações

Benefícios e/ou Perdas esperadas	Implementando as ações	Fazendo nada
Impactos nos valores das propriedades vizinhas	Gerar possibilidades de desenvolvimento na área	Maior deterioração econômica e social do distrito
Empregos	Impacto indireto positivo	Perda de oportunidades
Estabilização das taxas sobre receitas	Impacto indireto positivo	Aumento dos custos sociais
Infraestrutura	Sem efeitos diretos, redesenvolvimento requer investimentos complementares	Sem efeitos
Meio ambiente e saúde	Melhorias	Aumento dos perigos locais

Fonte: adaptado de IMS (2021c).

Visando à atualização do modelo conceitual da área, foi realizado o levantamento das informações para o projeto, sendo elencadas as seguintes dificuldades quanto à aquisição dos dados: (i) a maioria dos dados se encontravam em relatórios digitalizados ou em papel; (ii) diferentes instituições possuíam as

informações sobre a contaminação do solo e da água subterrânea do *megasite*; (iii) o processo de aquisição dos dados por essas instituições foi demorado e dependeu de boas relações com os proprietários dos dados, sendo indicado que na Polônia as instituições públicas se mostraram com melhor acesso em relação às empresas de consultoria; (iv) foram verificados erros na integridade do dados de topografia, gerando inconsistência nos modelos geológicos e hidrogeológicos; (v) qualidade duvidosa dos dados que descreviam as fontes potenciais e reais de contaminação do solo e da água subterrânea (IMS, 2021c).

O modelo conceitual da área para o *megasite* Tarnowskie Góry diz respeito aos resíduos sólidos perigosos depositados durante a operação da planta química, sendo a fonte primária de contaminação. Como fonte secundária de contaminação, são indicados o solo, os sedimentos e o aquífero contaminados pela lixiviação dos depósitos de resíduos (IMS, 2021c; MELINA, 2006).

Desta forma, o modelo conceitual da área separou em três domínios os impactos observados no *megasite*:

- Camada Superior: contaminação do nível do solo e da água superficial;
- Camada Quaternária com contaminação secundária de leito rochoso e corpo d'água;
- Camada de Aquífero Triássico com dispersão de pluma.

5.2.5.2 Avaliação de Risco

A Tabela 7 resume a caracterização da contaminação na área do *megasite* Tarnowskie Góry (IMS, 2021b). Destaca-se que não foi indicado no documento IMS (2021b) o critério definição para baixa, moderada e alta.

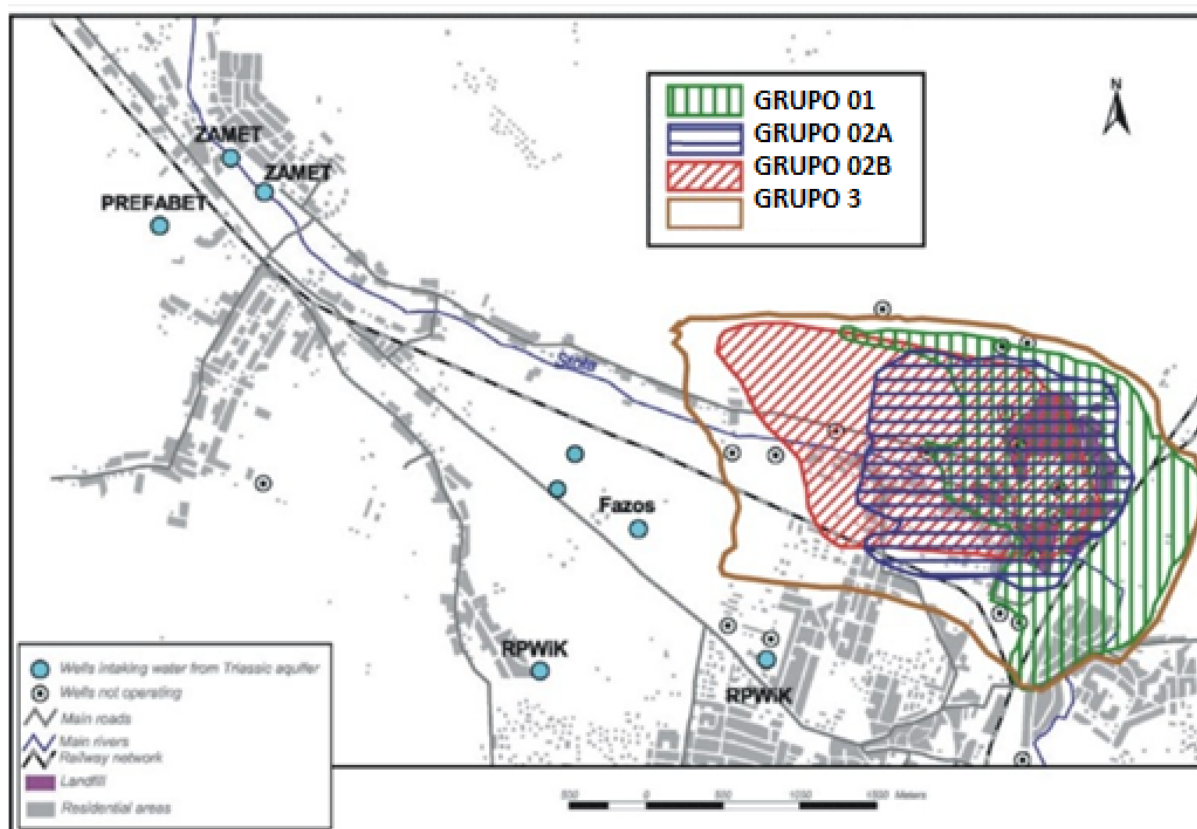
Tabela 7 – Resumo da caracterização da contaminação na área do *megasite* Tarnowskie Góry

Contaminante	Frequência de ocorrência	Potencial de atenuação natural	Toxicidade	Potencial mobilidade	Disponibilidade dos dados
Arsênio (As)	Moderada	Alta	Alta	Baixa	Moderada
Bário (Ba)	Alta	Alta	Moderada	Baixa	Moderada
Boro (B)	Alta	Baixa	Moderada	Alta	Moderada
Cádmio (Cd)	Moderada	Moderada	Alta	Baixa	Moderada
Estrôncio (Sr)	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Moderada
Zinco (Zn)	Alta	Moderada	Moderada	Baixa	Moderada

Fonte: adaptado de IMS (2021b).

Três grandes grupos de risco foram definidos (I, II e III) para o gerenciamento do *megasite*, sendo necessário subdividir o grupo II em dois (IIa e IIb) devido às particularidades de cada subgrupo (plumas de contaminação combinadas, risco, fontes etc.). A Figura 17 apresenta a localização dos grupos e a Tabela 8 apresenta o resumo de cada grupo de risco e suas principais características (IMS, 2021b; MELINA 2006).

Figura 17 – Localização dos grupos de risco



Fonte: adaptado de IMS (2021b).

Tabela 8 – Resumo de cada grupo de risco e suas principais características

Aspecto	Grupo I	Grupo IIa	Grupo IIb	Grupo III
Contaminante	B, Cd, Zn, As, Ba, Sr	B, Cd, Zn, As, Ba, Sr	B	B
Aspecto principal do risco	Exposição humana complexa	Contaminação complexa	Expansão da pluma	Expansão da pluma
Aspecto principal do gerenciamento	Uso terrestre	Uso aquático	Regime hidrológico	Regime hidrológico
Fontes	Primário e secundário	Primário e secundário	Secundário (Plumas quaternárias e triássicas)	Secundário (Plumas quaternárias e triássicas)
Área	<i>Megasite</i>	<i>Megasite</i>	Zona de gerenciamento de risco	Zona de gerenciamento de risco
Receptores/Interesse	Proprietário do terreno	Proprietários dos poços fechados	Proprietários dos poços em operação	Proprietários dos poços em operação

Fonte: adaptado de IMS (2021b).

A Modelagem de Transporte de Águas Subterrâneas gerou o modelo conceitual das condições hidrogeológicas, que foi construído com base na área de pesquisa de 116,3 km², cuja abrangência considerou os principais poços de captação de água subterrânea e o impacto nas condições hidrodinâmicas. O modelo conceitual das condições hidrogeológicas foi convertido em modelo digital (IMS, 2021b):

“A modelagem digital do sistema de circulação de águas subterrâneas e as simulações de fluxo de água foram feitas usando o software MODFLOW-96. Simulações do fluxo advectivo foram realizadas utilizando PMPATH e migração de contaminação - utilizando MT3D.” (IMS, 2021b – tradução nossa)

Ademais, foi realizada modelagem de migração do contaminante boro, cujo principal objetivo foi avaliar os cenários atuais e futuros da sua migração em águas subterrâneas dentro dos aquíferos do Triássico (IMS, 2021b).

A Avaliação de Risco à Saúde Humana, foi realizada em duas etapas: (i) com base em limites regulatórios; e (ii) com base em cenários de exposição. Também foi considerada a via de ingresso de ingestão da água subterrânea da população da área. Desta forma, as metas e objetivos preliminares de redução de risco para o *megasite*, de acordo com os grupos de risco, foram realizados a partir dos resultados obtidos pelas Modelagens e pela Avaliação de Risco à Saúde Humana (IMS, 2021b).

Assim, a tabela a seguir resume os resultados da Avaliação de Risco à Saúde Humana e a proposição de metas e objetivos preliminares de redução de risco para o *megasite* (IMS, 2021b):

Tabela 9 – Resumo dos resultados da Avaliação de Risco à Saúde Humana e proposição de metas e objetivos preliminares de redução de risco para o *megasite*

Resultados	Grupo I	Grupo IIa	Grupo IIb	Grupo III
Avaliação de Risco à Saúde Humana	Contaminação para o receptor; o padrão legal nacional é excedido.	Contaminação para o receptor; o padrão legal nacional é excedido mais de 100 vezes (extensões de plumas de bário, boro, cádmio, arsênio e zinco).	Não há contaminação para o receptor; concentrações estão abaixo do padrão legal nacional.	Não há contaminação para o receptor; concentrações estão abaixo do padrão legal nacional.
Metas e objetivos preliminares	De acordo com a avaliação de risco, não há necessidade de outras medidas de remediação além das já estabelecidas no programa remediação da planta química. Não há necessidade de estabelecer outras metas de gestão.	Redução a curto prazo da contaminação depositada nas camadas do Quaternário (controle da fonte de contaminação secundária), redução de curto prazo dos fluxos de contaminação para o grupo de risco IIb (controle/contenção de plumas), remediação de longo prazo de águas subterrâneas contaminadas nos aquíferos do Triássico.	Eliminação a curto prazo do risco de contaminação de poços em operação, inversão de curto prazo das tendências de deterioração da qualidade das águas subterrâneas ("tendências de reversão"), melhoria a longo prazo da qualidade da água dentro da área até que o status de "boa qualidade" seja alcançado.	Redução a curto prazo dos fluxos de contaminação nas águas subterrâneas do aquífero triássico.

Fonte: adaptado de IMS (2021b).

5.2.5.3 Gestão do Cenário de Risco

Para o *megasite* Tarnowskie Góry, os cenários de risco foram desenvolvidos de acordo com as metas e os objetivos preliminares de redução de risco, conforme explanado anteriormente, além da verificação da viabilidade técnica. Assim, as seguintes possibilidades de medidas técnicas foram avaliadas (IMS, 2021d; MELINA, 2006):

- Orientadas à fonte: limitação ou remoção das fontes primárias e imobilização das fontes secundárias;
- Orientada pelo fluxo: construção de barreiras hidráulicas internas e/ou externas;

- Orientada para o receptor: monitoramento e regime de extração e desenvolvimento de água dos poços dos receptores como barreira hidráulica.

A partir da avaliação da eficácia dos cenários de risco no cumprimento das metas de gestão, concluiu-se que a consideração dos cenários de risco de maneira separada não é eficaz o suficiente para o atingimento das metas (IMS, 2021d).

A revisão das condições de contorno e o estabelecimento de plano de gestão oficial para o *megasite* foram estabelecidas a partir de reunião com o grupo de *stakeholders* envolvidos no projeto. Desta forma foi acordado: (i) construção de um aterro controlado para resíduos perigosos, com área de 16 ha, com capacidade de 1,6 milhões de m³, de forma que cumpra os requisitos legais da Polônia e da União Europeia; (ii) revitalização do rio Stola; (iii) recuperação da área de 50 ha de depósitos de resíduos existentes; (iv) monitoramento contínuo de longo prazo do solo, da água e do ar (IMS, 2021d; MELINA, 2006).

Com a construção do aterro de resíduos, estudos de simulação indicaram a melhoria da qualidade das águas subterrâneas a curto (30 anos) e médio (60-80 anos) prazo, bem como, os riscos que ocorrem na superfície do *megasite* sejam moderados ou eliminados. Por fim, cabe destacar que os custos relacionados a medida de descomissionamento de construções industriais, a construção do aterro e a remoção de resíduos e descontaminação do solo, foram estimados em 12 milhões de euros (IMS, 2021d).

5.2.5.4 Implementação

Conforme item anterior, a partir do desenvolvimento dos cenários de risco, foram estabelecidos três cenários de gerenciamento do risco finais (IMS, 2021a; MELINA 2006):

- S1: atenuação natural controlada (remoção de fontes + monitoramento/controlado do regime hidrológico);
- S2: remediação ativa de águas subterrâneas (remoção de fontes + limpeza de águas subterrâneas + monitoramento); e
- S3: atenuação natural aumentada (remoção de fontes + aumento da extração de águas subterrâneas + monitoramento).

Entre os três cenários de gerenciamento de risco finais, apenas o cenário S1 estava sendo implementado no *megasite*. O grupo de *stakeholders* não decidiu a

respeito da seleção do cenário final, devido às incertezas das condições de contorno (IMS, 2021a; MELINA 2006).

5.2.5.5 Considerações sobre o estudo de caso

O estudo de caso de Tarnowskie Góry é apresentado de maneira estruturada e alinhada à metodologia da estratégia de gerenciamento integrado (IMS). Pode-se observar que foram considerados todos os pontos indicados na metodologia, de maneira prática, clara e exemplificada.

Deve-se ressaltar que a informações explanadas foram adquiridas no website do programa The WELCOME e para informações atualizadas sobre o andamento do gerenciamento do *megasite* apresentado, deve-se realizar pesquisa direcionada (IMS, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e).

5.3 RELAÇÃO ENTRE O GERENCIAMENTO ADAPTATIVO DA ÁREA (ASM) E A ESTRATÉGIA DE GERENCIAMENTO INTEGRADO (IMS)

Ambas as metodologias são importantes para o conhecimento geral de todo público que administra áreas contaminadas.

Enquanto ASM foca no atingimento das metas e métricas estabelecidas no projeto, IMS foca na redução do risco. Contudo, ao avaliar de maneira aprofundada, ambas metodologias buscam o mesmo objetivo final: realizar a gestão de área contaminada de maneira estratégica, em áreas que possuem características complexas para sua intervenção, longo prazo para administrar, com necessidade de revisar o processo de maneira integrada e sistemática e com a avaliação de riscos. Cabe destacar que ambas indicam a necessidade de avaliação de medidas de contingência, caso a intervenção não seja bem sucedida, além da participação sistemática dos *stakeholders*.

De maneira resumida, tanto para a aplicação da metodologia ASM quanto para a IMS, deve-se primeiro questionar se a área fim possui características que a enquadre como uma área contaminadas complexa ou um *megasite*, a partir da verificação de atributos complexos com apoio do Modelo Conceitual da área (MCA). Bem como, deve-se refinar o MCA, avaliando o potencial de remediação.

Além disso, ASM foca na definição ou revalidação do objetivo final da área, com estabelecimento de metas, métricas, estratégia de correção adaptativa e

desenvolvimento de plano de gestão de longo prazo. Já IMS propõem a avaliação de risco com a determinação de grupos de riscos associados por suas características comuns e o respectivo estabelecimento de metas e objetivos preliminares, para a gestão de cenário de risco.

Em sequência, é possível observar que, para ASM e IMS, é recomendado que a solução projetada deva ser executada, para então monitorar e avaliar o desempenho. Por fim, seguindo a lógica de decisão pré-definida, será necessário avaliar, ajustar, otimizar, modificar ou realizar transição da estratégia corretiva para manter a remediação e progredir em direção aos objetivos, metas e métricas, ou seja, revisar todo o processo de maneira cíclica e interativa.

Assim, é interessante estudar as duas metodologias para verificar qual delas é mais aplicável para a gestão da área em questão. ASM apresenta a vantagem de indicar de maneira bem prática a verificação sistemática das metas e métricas de remediação a longo prazo, o que apoia a validação da técnica escolhida e, portanto, ajuda na tomada de decisão rotineira do projeto. Dessa forma, é possível verificar sempre se são necessárias outras medidas, ou até mesmo a aplicação de medidas de contingência. IMS, por sua vez, foca na gestão dos cenários de risco, com a organização das áreas do *megasite* em grupos de risco para a sua gestão de maneira estratégica, com validação de metas e objetivos provisórios.

Ainda que ITRC (2017) indique a aplicação de ASM apenas para áreas complexas, é necessário entender a metodologia para aplicar as ferramentas de gestão indicadas, como por exemplo, o refinamento do MCA, a avaliação periódica dos resultados de remediação etc. Portanto, não é recomendado determinar o uso de uma metodologia em detrimento da outra: ambas são válidas e importantes para os gestores de áreas contaminadas, e devem ser selecionadas de acordo com as características de cada situação. A Tabela 10 apresenta um compilado por assunto entre as metodologias estudadas.

Tabela 10 – Compilado sobre as metodologias ASM e IMS

Assunto	Gerenciamento Adaptativo da Área (ASM)	Estratégia de Gerenciamento Integrado (IMS)
Grupo, local, data de criação/publicação da metodologia	<ul style="list-style-type: none"> • Conselho Interestadual de Tecnologia e Regulação dos Estados Unidos (<i>ITRC – Interstate Technology and Regulatory Council</i>); • Estados Unidos; • 2017. 	<ul style="list-style-type: none"> • Programa The WELCOME (Water, Environment and Landscape Management at Contaminated <i>Megasites</i>). • União Européia; • 2004.
Termo de definição de área contaminada utilizado	Área complexa (<i>complex site</i>): “(...) áreas onde o progresso de remediação é incerto, não é esperado que as ações de remediação alcancem o fechamento da área ou até mesmo facilitem a transição desta para um gerenciamento sustentável de longa data em um espaço de tempo razoável.	<i>Megasites</i> : “Locais contaminados em grande escala, que representam um grande potencial de risco real de deterioração da qualidade das águas subterrâneas, sedimentos, solo e águas superficiais. (...) <i>Megasites</i> são situações de contaminações complexas, não apenas do ponto de vista da técnica, mas também em relação às partes interessadas envolvidas.”
Metodologia	<p>Processo abrangente, flexível e interativo para aprender, testar, avaliar e modificar ou melhorar as intervenções, com a meta de atingir os objetivos da área.</p> <p>Quatro principais etapas podem ser elencadas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Desenvolvimento de Modelo Conceitual da Área (MCA) com base nos desafios da área; 2. Realização de avaliação do potencial de remediação para decidir se o gerenciamento adaptativo é bem sucedido, de acordo com os desafios da área; 3. Etapas principais do Gerenciamento Adaptativo da Área; 4. Desenvolvimento do plano de gestão de longo prazo. 	<p>Processo genérico e flexível, que inclui a participação das partes interessadas, indicação de custos e é baseado nos princípios técnicos científicos das características da área.</p> <p>Quatro principais etapas podem ser elencadas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Iniciando a estratégia de gerenciamento integrado (IMS); 2. Avaliação de Risco; 3. Gestão do cenário de risco; 4. Implementação.
Detalhamento	Metodologia bem detalhada, de fácil entendimento e apresentação de esquemas de aplicação prática.	Metodologia detalhada, de fácil entendimento, com diagramas ilustrando a sua aplicação.
Apresentação	Apresentação de maneira estruturada em documento consolidado, com formato possível de ser adquirido em download via PDF. Apresenta fácil entendimento de navegação, de maneira intuitiva.	Apresentação em site não oficial, com difícil entendimento da estrutura. Sendo necessário navegação da página online para acesso ao conteúdo em formato não estruturado.
Aplicação das ações indicadas de maneira prática	Apresentação exemplificada de tabelas e gráfico, de maneira detalhada, para realização de diversas ações para aplicação metodologia.	Apresentação em diagramas e não há exemplificação prática em tabelas e gráficos. Porém, os estudos de caso com a aplicação da metodologia exemplificam de maneira prática.

Assunto	Gerenciamento Adaptativo da Área (ASM)	Estratégia de Gerenciamento Integrado (IMS)
Estudos de caso com aplicação da metodologia	<p>É apresentado no documento oficial sobre a metodologia 16 estudos de caso, sendo a grande maioria apresenta o potencial de aplicação do ASM.</p> <p>EPA está realizando uma força-tarefa para aplicação da metodologia de gerenciamento adaptativo da área (ASM) em 6 áreas complexas estratégicas que fazem parte do programa Superfund. Uma área já está com a aplicação em andamento – estudo de caso da área de Bonita.</p> <p>Observado em literatura, estudo de caso brasileiro com a menção sobre o termo “<i>Complex Site</i>” e gestão de longo prazo.</p>	<p>Diversos estudos de caso são observados, com três casos emblemáticos europeus: Tarnowskie Góry na Polónia, Bitterfeld na Alemanha, Porto de Roterdã na Holanda.</p> <p>Ainda, observou-se na literatura a aplicação da metodologia em área do Brasil.</p>

Fonte: adaptado de EKOS BRASIL (2019); IMS (2021e); ITRC (2017); MELINA et al. (2006); NICOLE (2003); PRICE et al. (2017); USEPA (2019, 2020).

5.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS NO BRASIL

De acordo com Ministério de Meio Ambiente (2020), a maior parte das áreas contaminadas cadastradas no país tem origem nas atividades de Postos de Combustíveis (71%) e Indústrias (19,5%). 99% do total de áreas cadastradas estão localizadas nos estados de São Paulo (85%), Minas Gerais (9,5%) e Rio de Janeiro (4,7%). Ainda, é explanado no documento que devem ser levados em consideração os lixões e os aterros controlados como fontes de contaminação do solo e da água subterrânea, ainda que não estejam sendo representativos nos cadastros de áreas contaminadas no país.

No ano de 2000, havia 4.642 lixões e 1.231 aterros controlados no Brasil (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012). Atualmente, existem 2.707 lixões em operação no país (BRASIL, 2021). Ainda que esse número tenha sido significativamente reduzido, deve-se levar em consideração o histórico de atividades desses depósitos de resíduos e rejeitos inadequados, que são um enorme passivo ambiental brasileiro.

A Resolução CONAMA nº 420/2009 em seu Capítulo IV estabelece as diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas, que deve ser dado com ações de investigação e gestão, e com a aplicação das etapas de identificação, diagnóstico e intervenção. A fase de identificação da contaminação deve ser composta pelos

estudos de avaliação preliminar e investigação confirmatória. A fase de diagnóstico é composta pela investigação detalhada e avaliação de risco. Por fim, a etapa de intervenção diz respeito ao plano de intervenção e monitoramento, devendo ser considerada a reabilitação da área para o uso pretendido.

De acordo com Ministério de Meio Ambiente (2020), a maior parte das áreas contaminadas cadastradas brasileiras estão na fase de monitoramento para reabilitação (23,9%) e em processo de remediação (21,9%). Quando a área não está sendo encerrada, ou apresenta longo prazo para encerramento, é interessante avaliá-la com a aplicação das metodologias de gestão apresentadas neste trabalho (ASM e IMS), caso a área seja caracterizada como uma área contaminada complexa e/ou um *megasite*.

Devido ao pequeno número de áreas contaminadas industriais cadastradas no Brasil, Ministério do Meio Ambiente (2020) informa que é necessário um levantamento mais detalhado quanto à sua presença no território brasileiro. Os órgãos ambientais estaduais deveriam criar instrumentos legais, à exemplo da CETESB (2017) e do COPAM (2017), para que quando as empresas solicitem um licenciamento ambiental e/ou a sua renovação, a realização de investigação ambiental do empreendimento seja uma das exigências para tal, a fim de verificar possíveis passivos ambientais em sua área.

Cabe destacar, ainda, que há dificuldade no mapeamento de áreas contaminadas no Brasil (IPT, 2016), diante da falta de documentação acerca da situação em muitos estados brasileiros. É importante considerar, para esse compilado de informações, os passivos ambientais relacionados às atividades siderúrgicas, minerárias, refinarias, polos petroquímicos, aterros ou lixões industriais e sanitários, atividades relacionadas à complexos militares etc.

5.4.1 Estudos de caso no Brasil

No Brasil, os termos “áreas contaminadas complexas” (*complex sites*) e “*megasites*” são pouco conhecidos e explorados. Não foram observados trabalhos relacionados aos termos supracitados, bem como com as metodologias ASM e IMS, a partir de buscas nas bases de dados científicos *Scopus*, *Web of Science* e *Scielo*, considerando trabalhos brasileiros (que apresentem relação com o Brasil, como

estudo de caso no território brasileiro, criadas a partir de Universidades brasileiras etc.).

Contudo, ao lançar a *strig* de busca: “*complex sites; ITRC*” na base do Google Acadêmico foi observado um artigo científico com um estudo de caso na região metropolitana de São Paulo, que cita o termo “*complex sites*” e metodologia de gestão a longo prazo (HART et al., 2021). Já ao lançar os termos: “*Integrated Management Strategy; megasites*”, observou-se, a partir do *site* do grupo NICOLE Latin America, um estudo de caso de aplicação da metodologia IMS em uma indústria siderúrgica brasileira, considerada como *megasite* (GOUVÊA JR.; SOARES; VIANNA, 2018).

Hart et al. (2021) cita o termo *complex sites* e gestão a longo prazo. Porém, não trata sobre nenhuma das metodologias indicadas por ITRC (ASM) e pelo grupo The WELCOME (IMS). Os autores explanam sobre a importância da realização de Modelo Conceitual Temporal para sumarizar os resultados e revisões de dados de uma determinada área, para entender melhor a sua evolução e, assim, aprimorar os trabalhos de gestão, incluindo a melhoria da remediação, eficácia de monitoramento, avanço da comunicação com os *stakeholders* e os planos locais de uso e ocupação. O estudo de caso é referente a uma área de abastecimento de água, localizada na Região Metropolitana de São Paulo, caracterizada por complexidades técnicas devido à contaminação por solventes clorados em rochas cristalinas fraturadas em região tropical úmida. A área está sendo gerenciada há 20 anos e demanda pelo gerenciamento de longo prazo, no local houve mudança de uso e ocupação do solo, de maneira pós-industrial (HART et al., 2021).

Gouvêa Jr., Soares e Vianna (2018) descrevem a aplicação do IMS em uma indústria siderúrgica, caracterizada como *megasite*, contaminado por hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH) e metais, que podem ser encontrados em fase adsorvida no solo, em fase livre e dissolvida em águas subterrâneas. A área está localizada no município de Volta Redonda, Rio de Janeiro. De maneira geral, a aplicação da metodologia teve como resultado a divisão do *megasite* em grupos de risco, sendo definido para cada grupo metas de redução de risco a longo prazo. Foi indicada a elaboração de planos para o gerenciamento integrado, como: (i) plano de classificação das áreas de interesse (visando a priorização das áreas de acordo com os receptores e potencial de migração dos contaminantes); (ii) plano de investigação e programa de monitoramento; (iii) delimitação dos limites e áreas de contorno, utilizando modelagem matemática. Por fim, o estudo conclui sobre a viabilidade da aplicação do IMS no

megasite e o potencial de aplicação da metodologia nos demais *megasites* do Brasil (GOUVÊA JR.; SOARES; VIANNA, 2018).

Assim, percebe-se de maneira incipiente a aplicação dos termos “*complex site*” e “*megasite*”, bem como da metodologia IMS em trabalhos acadêmicos brasileiros.

Desta forma, a partir dos quatro estudos de caso (GOUVÊA JR.; SOARES; VIANNA, 2018; HART et al., 2021; IMS, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e; USEPA, 2020) apresentados neste trabalho é possível aferir cenários que são comuns à realidade brasileira: impactos ambientais causados por atividades minerárias, devido ao lançamento de resíduos sólidos industriais de maneira não controlada, atividades industriais e siderúrgicas.

5.5 PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO NO BRASIL

Com o objetivo de auxiliar no entendimento da proposta, são apresentadas as definições a seguir.

5.5.1 Definição dos termos “áreas contaminadas complexas” e “*megasites*” no contexto brasileiro

Os termos “áreas contaminadas complexas” (*complex sites*) e “*megasites*”, possuem grande similaridade, assim como suas metodologias associadas, apresentadas neste trabalho (ASM e IMS, respectivamente).

Observa-se que as áreas indicadas como *megasites*, e que são gerenciadas pela estratégia de gerenciamento integrado (IMS), possuem características de área contaminada que apresenta grande extensão, com múltiplas fontes de contaminantes, com considerável impacto ao meio ambiente. São áreas que necessitam de gerenciamento a longo prazo e envolvimento dos *stakeholders*. O gerenciamento leva em consideração a divisão do *megasite* em grupos de risco, a fim de organizar os grupos através de suas características comuns, desafios técnicos e não técnicos, para determinar os riscos prioritários. Assim, os esforços técnicos e financeiros são direcionados de maneira estratégica e eficiente.

Já as áreas reconhecidas como áreas contaminadas complexas, ou *complex sites*, e que possuem aplicação do gerenciamento adaptativo da área (ASM), compreendem áreas que também apresentam desafios técnicos e não técnicos, que

geram grande dificuldade de remediação ambiental em um prazo razoável. O gerenciamento dessas áreas, a partir do ASM, foca no atingimento das metas e métricas estabelecidas no projeto e na gestão de maneira estratégica e cíclica, fomentando e atualizando ferramentas, como por exemplo, o modelo conceitual da área, a seleção da estratégia adaptativa de remediação e os componentes de remediação.

Desta forma, sugere-se mesclar as definições, a fim de obter um entendimento direcionado para o contexto do gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil, definindo *megasite* como “**área contaminada que apresenta duas ou mais áreas contaminadas complexas**”. Ou seja, a área contaminada complexa faz parte de um *megasite*. Ao definir que um *megasite* apresenta duas ou mais áreas contaminadas complexas é necessário entender que o termo se expande para o conceito de um todo, enquanto o termo de áreas contaminadas complexas se reduz ao direcionamento de uma área.

Dessa forma, tem-se que:

- **Áreas contaminadas complexas:** área contaminada que apresenta características de complexidade relacionadas aos desafios técnicos de remediação, como por exemplo condições geológicas, hidrogeológicas, geoquímicas, relacionadas ao tipo de contaminante e grande escala. Além de complexidade na sua gestão a longo prazo e relacionadas aos desafios não técnicos, que podem estar relacionados aos *stakeholders*, tomadas de decisão; sobreposição de responsabilidades; controles institucionais; restrição e mudança de uso de terrenos e financiamentos.
- **Megasites:** área que apresenta diversas fontes de contaminação e duas ou mais áreas contaminadas complexas, provenientes de atividades que geram impacto ao meio ambiente (contaminação do solo, da água subterrânea, da água superficial, do sedimento, do ar e da biota), apresenta desafios técnicos e não técnicos, com necessidade de gerenciamento a longo prazo.

Tal sugestão foi pensada a partir do entendimento de que ambos os termos são complementares, e um não desqualifica o outro. Assim é possível aplicá-los a partir do entendimento da magnitude e complexidade dos cenários de contaminação.

5.5.2 Metodologia Adaptativa Integrada

A proposta de Metodologia Adaptativa Integrada baseia-se tanto na metodologia ASM (ITRC, 2017) quanto na IMS (IMS, 2021), discutidas anteriormente. Ambas as metodologias são empregadas de maneira complementar, utilizando também as definições dos termos “áreas contaminadas complexas” e “*megasites*”, apresentadas no tópico 5.5.1 deste trabalho. O fluxograma apresentado na Figura 18, ao final deste tópico (5.5.2), esquematiza a aplicação dessa metodologia. A seguir, a proposta de Metodologia Adaptativa Integrada será detalhada, subdividindo-se em alguns pontos principais.

5.5.2.1 Desenvolvimento e/ou atualização do Modelo Conceitual da Área (MCA)

Inicialmente, recomenda-se realizar o desenvolvimento e/ou atualização do Modelo Conceitual da Área (MCA) de maneira iterativa e conforme preconiza ABNT (2022), visando a sistematização das informações e a construção de uma boa base de dados para a gestão do projeto. Para tanto é importante considerar, conforme ferramenta de caracterização integrada de área criada por ITRC (2015): (i) analisar todos os documentos existentes a respeito da área para verificar quais dados podem ser aproveitados; (ii) indicar quais lacunas devem ser preenchidas para diminuir as incertezas inerentes a uma área contaminada (*gaps* de dados e de resolução); (iii) estabelecer os objetivos de coleta de dados; (iv) planejar a coleta de dados e suas análises; (v) selecionar ferramentas de investigação; (vi) implementar investigação; (vii) realizar avaliação e interpretação de dados; (viii) atualizar o MCA e verificar se os objetivos foram atendidos (IMS, 2021; ITRC, 2015, 2017)

Ainda, é necessário considerar a utilização da metodologia TRIAD como suporte para o planejamento sistemático do projeto de aquisição de dados. Essa metodologia apoia no planejamento e execução de trabalho de campo de maneira dinâmica, sendo indicada a aplicação de Investigação em Alta Resolução para a coleta de dados em tempo real. A sua utilização apoiará na otimização de tomada de decisões com base na redução de incertezas e na minimização de impactos ambientais durante a investigação (USEPA, 2010, 2013; ITRC, 2007). Cabe lembrar das dificuldades elencadas para a aquisição de dados do projeto de Tarnowskie Góry,

que indicaram como o projeto estava sendo gerenciado de maneira desorganizada e com falhas em sua estrutura. Essa falta de sistematização das informações pode gerar diversas lacunas no entendimento dos dados já adquiridos na área, motivando a realização de ações redundantes, encarecendo o projeto e gerando incertezas não mapeadas.

5.5.2.2 Verificação dos desafios técnicos e não técnicos do MCA

Então, deve-se questionar se a área fim possui características que a enquadrem como uma área contaminada complexa, a partir da verificação dos desafios técnicos e não técnicos no MCA para cada fonte (área com pluma em fase livre e/ou retida) elencada. Do mesmo modo, deverá ser avaliado o potencial de remediação, de acordo com a estratégia de intervenção, que deverá ser realizada com a análise e pontuação de questionamentos, conforme indicado no item 5.1.2 deste trabalho. Assim, se for evidenciada mais de uma fonte (área com pluma em fase livre e/ou retida) com características de complexidade, será dada a área como *megasite* e a gestão das áreas deverá ser acompanhada de maneira individual, porém integrada.

5.5.2.3 Refinamento dos dados

Logo, deverá ser realizado novo refinamento do MCA com aquisição de dados direcionados ao projeto de remediação. Para o planejamento, execução e avaliação do refinamento dos dados, sugere-se realizar nova rodada de caracterização integrada de área, conforme explanado anteriormente, assim como é importante prezar pela metodologia TRIAD quando da sua execução.

5.5.2.4 Avaliação de risco à saúde humana e ecológica

Ademais, recomenda-se realizar a avaliação de risco à saúde humana e ecológica, de acordo com as características da área. Modelagens de fluxo de transporte de contaminantes devem ser utilizadas, de acordo com os resultados e avaliações obtidas da área (IMS, 2021). E assim, cabe destacar a integração de todos os dados obtidos no MCA.

5.5.2.5 Definição das metas e objetivos finais e determinação das técnicas de remediação viáveis e/ou medidas de contingência necessárias

Após a validação dos dados obtidos e atualização do MCA, sugere-se a definição das metas ou objetivos finais a serem atingidos na área ou nas áreas. Assim, avalia-se a estratégia adaptativa de remediação, com a determinação das técnicas de remediação e suas respectivas métricas ou objetivos provisórios. Para determinar a medida de intervenção, recomenda-se aplicar critérios de pontuação sobre cada possível técnica a ser aplicada na área. De maneira geral, os critérios de pontuação devem ser avaliados de acordo com as características da área e os riscos associados, por exemplo, capacidade para o atingimento das metas e métricas de remediação, intervenção na operação (área industrial), custo a longo prazo, insumos, expertise da equipe para execução da técnica, mão-de-obra local, logística, medidas de saúde e segurança etc.

Importante lembrar que o ITRC (2017) elenca 8 considerações para avaliar as medidas de remediação em áreas complexas, conforme explanado no tópico 5.1.3.4 deste trabalho. E indo de encontro a essas considerações, deve-se avaliar a necessidade de realização de ensaios de tratabilidade ou ensaios piloto para um melhor entendimento da aplicação das possíveis técnicas de remediação. Cabe lembrar da importância da revisão e atualização do MCA antes do estabelecimento da estratégia adaptativa de remediação, pois imprecisões no MCA podem afetar a implementação da técnica de remediação e, assim, o seu monitoramento de desempenho.

Medidas de contingência devem ser exploradas e consideradas nessa etapa, também. Por fim, sugere-se organizar todas as informações compiladas em tabela para a determinação da estratégia adaptativa de remediação.

5.5.2.6 Identificar esforços técnicos e financeiros

Deve-se elencar os riscos prioritários do projeto, a fim de canalizar os esforços técnicos e financeiros de maneira estratégica e eficiente.

5.5.2.7 Plano de gestão de longo prazo

O desenvolvimento do plano de gestão de longo prazo deverá ser iniciado na etapa do projeto de intervenção da área complexa e incluirá todas as fases após implantação do sistema de remediação/intervenção, conforme ASM (ITRC, 2017). Para tanto, é recomendado seguir conforme a metodologia ASM: (i) considerar o modelo definido de desempenho e métricas de remedição; (ii) realizar avaliações periódicas para comparar o progresso com o desempenho esperado/planejado; (iii) realizar o acompanhamento estratégico iterativo, para avaliar, ajustar, otimizar, modificar ou realizar a transição para outra tecnologia ou aplicação de ações de contingência, se necessário (ITRC, 2017).

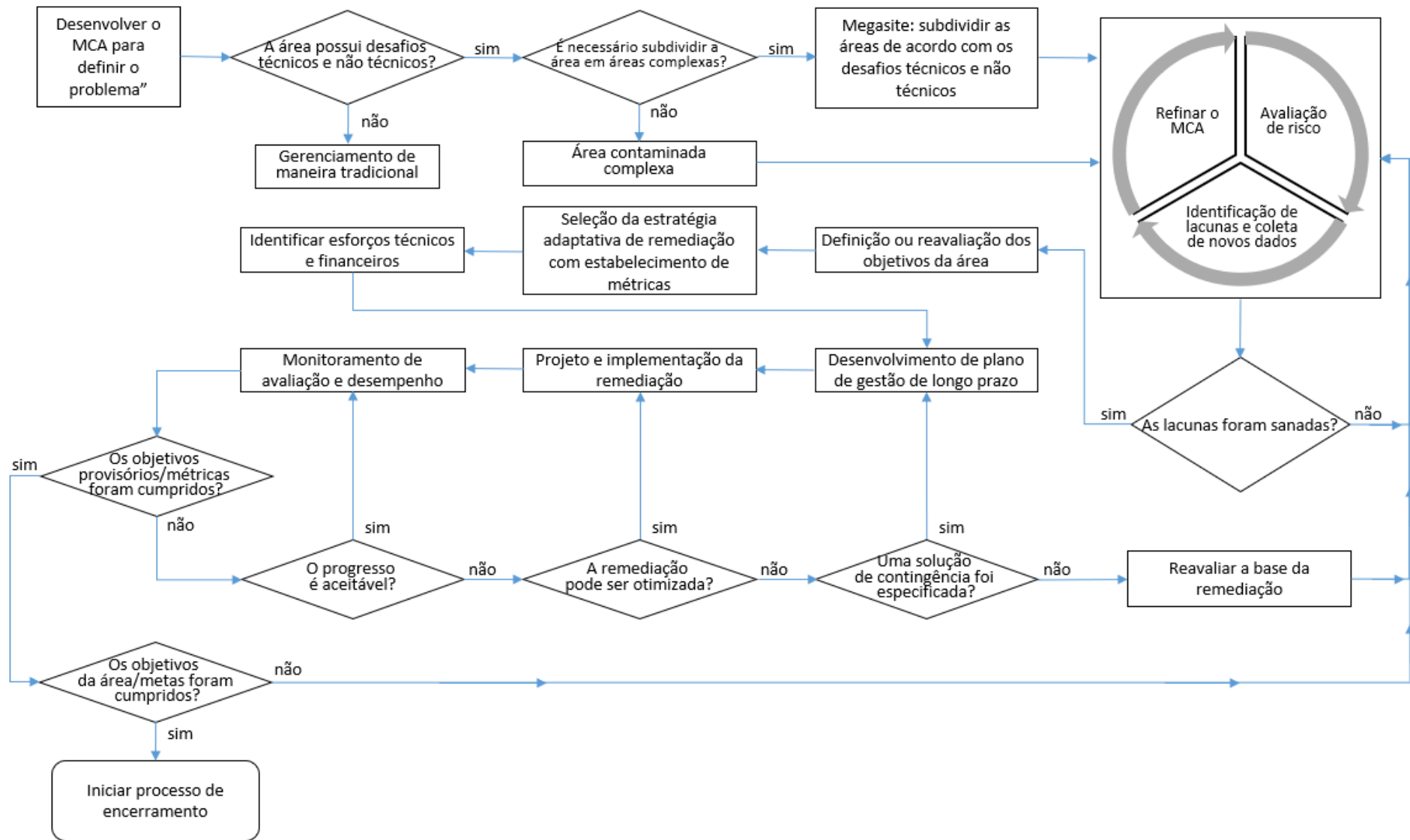
5.5.2.8 Avaliações periódicas durante o processo de remediação

A realização de avaliações periódicas durante todo o processo de remediação de maneira iterativa é muito importante para a análise crítica do progresso do projeto em relação às metas e métricas de remediação estabelecidos na área. Sempre da aquisição de novos dados e informações da área, o MCA e a avaliação de risco deverão ser revisados e refinados. A avaliação destes itens auxilia na tomada de decisão para aplicação de novas ações, como por exemplo: implementação de medidas de contingência, otimização das técnicas de remediação, modificação das técnicas de remediação, entre outros. Para realizar a fase de gestão à longo prazo, sugere-se leitura do item 5.1.4 deste trabalho.

5.5.2.9 Stakeholders

Em paralelo e não menos importante, deve-se levar em consideração os *stakeholders* relacionados à área e ao projeto, com a organização de um comitê de coordenação para o processo de tomada de decisão, estabelecimento de papéis e responsabilidades, definição das interações e estratégia de gestão de conflitos de interesse.

Figura 18 – Fluxograma da Metodologia Adaptativa Integrada para a gestão de áreas contaminadas complexas e *megasites* no Brasil



6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou as principais recomendações para o gerenciamento de áreas complexas (*complex sites*) e *megasites*, pela abordagem do gerenciamento adaptativo (*Adaptive Site Management* – ASM) e pela estratégia de gerenciamento integrado (*Integrated Management Strategy* – IMS), respectivamente.

A metodologia de gerenciamento adaptativo criado pelo ITRC foca no atingimento das metas e métricas estabelecidas no projeto, e consiste em um processo abrangente, flexível, interativo e cíclico. A estratégia de gerenciamento integrado, elaborada pelo programa The WELCOME, foca na redução do risco e também se apresenta como um processo abrangente, flexível, interativo e cíclico.

Desta forma, ambas as metodologias buscam o mesmo objetivo final: realizar a gestão de área contaminada de maneira estratégica, em áreas que possuem características complexas para sua intervenção, longo prazo para administrar, com a necessidade de revisar o modelo conceitual da área e do processo de maneira integrada e sistemática e com a avaliação de riscos. Cabe destacar que ambas as metodologias indicam a necessidade de avaliação de medidas de contingência, caso a intervenção não seja bem-sucedida, além da participação sistemática dos *stakeholders*.

Os estudos de caso apresentados mostram cenários que são comuns à realidade brasileira: impactos ambientais causados por atividades minerária, devido ao lançamento de resíduos sólidos industriais de maneira não controlada, atividades industriais e siderúrgicas.

Tendo em vista as qualidades de aplicação das metodologias, ambas são importantes para o conhecimento geral de todo público que administra áreas contaminada, ainda que no Brasil seja incipiente no contexto de áreas contaminadas complexas (*complex sites*) ou *megasites*, principalmente devido à existência de refinarias, indústrias e polos petroquímicos no país. Cabe destacar a importância dada para a atualização sistemática do Modelo Conceitual da Área (MCA) durante todo o ciclo do projeto para a tomada de decisão de ações corretivas, como por exemplo no ajuste dos objetivos da área, objetivos provisórios, na estratégia de remediação e outros.

Foi analisada a similaridade dos termos “áreas contaminadas complexas” (*complex sites*) e “*megasites*” e assim, sugerida a criação de uma nova definição para

os termos de maneira direcionada para o contexto de gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil. Com o entendimento de que um *megasite* apresenta diversas áreas contaminadas complexas, apresentou-se o conceito de que *megasite* é a área como um todo, enquanto as áreas contaminadas complexas se reduzem ao direcionamento de uma única área, ou grupo de risco.

Finalmente, a partir da análise e do entendimento de que é possível definir os termos de maneira integrada, assim como as metodologias ASM e IMS, foi proposta a metodologia adaptativa integrada, para ser aplicada em casos de áreas contaminadas complexas e *megasites* no Brasil.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABANDONED MINES. **ABOUT HARDROCK MINES**. Disponível em: <https://www.abandonedmines.gov/about_hardrock_mines>. Acesso em: fev. 2022.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 16210**: Modelo conceitual no gerenciamento de áreas contaminadas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BONITA. Bonita Peak Mining District Community Advisory Group (CAG). **Official Site Animas River**, CO – San Juan & La Plata Counties. 2018. Disponível em: <<https://www.bonitapeakcag.org/>>. Acesso em: fev. 2022.

BRASIL. Programa Lixão Zero reduziu em 17% a quantidade de lixões em 2020. **Notícias Meio Ambiente**. 2021. Disponível em <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2021/02/programa-lixao-zero-reduziu-em-17-a-quantidade-de-lixoes-em-2020#:~:text=Em%202020%2C%20houve%20redu%C3%A7%C3%A3o%20de,Res%C3%ADduos%20e%20Afluentes%2C%20a%20Abtre.>>. Acesso em: fev. 2022.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Legislação: **DD 38/2017/C**. CETESB. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf>>. Acesso em: ago. 2021.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial da União**, Brasília, 28 dez. 2009

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. Deliberação Normativas COPAM nº217, de 06 de dezembro de 2017. Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locais para a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais no Estado de Minas Gerais e dá outras providências. **Diário do Executivo**, Minas Gerais, 08 dez. 2017.

EKOS BRASIL. **O que são áreas contaminadas complexas?** 2019. Disponível em: <<https://ekosbrasil.org/o-que-sao-areas-contaminadas-complexas/>>. Acesso em: ago. 2021.

GOUVÊA JR., J. C. R.; SOARES, L. C. R.; VIANNA, M. M. G. R. **Integrated Management Strategy for Usina Presidente Vargas (UPV) Megasite**. [ONLINE] Disponível em: <<http://nicolelatinamerica.com/wp-content/uploads/2021/03/IntegratedManagementStrategyforUPVMegasite.pdf>>. Acesso em: ago. 2021.

HART, S. T. et al. Temporal conceptual model of contaminated complex sites applied for the management of a former supply well area in tropically weathered bedrock.

Sustainable Water Resources Management 7. Article number: 11. 2021. DOI <https://doi.org/10.1007/s40899-021-00488-x>.

IMS – INTEGRATED MANAGEMENT STRATEGY. **Tarnowskie – Implementation**. 2021a. Disponível em: <<https://publicwiki.deltares.nl/display/IMSW/Tarnowskie+-Implementation>>. Acesso em: nov. 2021.

IMS – INTEGRATED MANAGEMENT STRATEGY. **Tarnowskie - Risk Assessment**. 2021b. Disponível em: <<https://publicwiki.deltares.nl/display/IMSW/Tarnowskie+-Risk+Assessment>>. Acesso em: nov. 2021.

IMS – INTEGRATED MANAGEMENT STRATEGY. **Tarnowskie - Starting IMS**. 2021c. Disponível em: <<https://publicwiki.deltares.nl/display/IMSW/Tarnowskie+-Starting+IMS>>. Acesso em: nov. 2021.

IMS – INTEGRATED MANAGEMENT STRATEGY. **Tarnowskie - Risk Management Scenarios**. 2021d. Disponível em: <<https://publicwiki.deltares.nl/display/IMSW/Tarnowskie+-Risk+Management+Scenarios>>. Acesso em: nov. 2021.

IMS – INTEGRATED MANAGEMENT STRATEGY. **The Welcome Project**. 2021e. Disponível em: <https://projects.itrcweb.org/DNAPL-ISC_tools-selection/>. Acesso em: out. 2021.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas**. 1. ed. São Paulo: BNDS, 2014.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Panorama GAC: mapeamento da cadeia de gerenciamento de áreas contaminadas**. 1. ed. São Paulo: IPT, 2016.

ITRC – INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL. **Exit Strategy – Seeing the Forest Beyond the Trees**. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Remediation Process Optimization Team. 2006. Disponível em: <<https://connect.itrcweb.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=c475aa1d-bc6b-45a8-aaba-d411f13a66f0>>. Acesso em: set. 2021.

ITRC – INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL. **Integrated DNAPL Site Characterization and Tools Selection (ISC-1)**. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, DNAPL Site Characterization Team. 2015. Disponível em: <https://projects.itrcweb.org/DNAPL-ISC_tools-selection/>. Acesso em: out. 2021.

ITRC – INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL. **Remediation Management of Complex Sites**. RMCS-1. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Remediation Management of Complex Sites Team. 2017. Disponível em: <<https://rmcs-1.itrcweb.org>>. Acesso em: ago. 2021.

MALINA, G. et al. Integrated Management Strategy for Complex Groundwater Contamination at A Megasite Scale. Springer, Dordrecht. **NATO Science Series, Soil and Water Pollution Monitoring, Protection and Remediation**, v. 69, p 567-577, 2006. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4728-2_37.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos Brasília, DF. 2012.** Disponível em https://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos_diversos_do_portal/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf. Acesso em: fev. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa nacional de recuperação de áreas contaminadas [livro eletrônico]: agenda nacional de qualidade ambiental urbana: eixo: áreas contaminadas.** Brasília, DF. 2020. Disponível em <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/recuperacao-de-areas-contaminadas>. Acesso em: nov. 2021.

NICOLE – NETWORK FOR CONTAMINATED LAND IN EUROPE. Sharing experiences in the management of megasites: towards a sustainable approach in land management of industrially contaminated areas. **Report of the NICOLE Workshop.** Lille, France. 29-21 October 2003. p. 55.

NRC – NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES. **Alternatives for Managing the Nation's Complex Contaminated Groundwater Sites.** National Research Council, National Academies Press, Washington, D.C. 2013.

PRICE, J. et al. Remediation management of complex sites using an adaptive site management approach. **Journal of Environmental Management.** v. 204, Part. 2, p. 738-747. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.009>.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **5-Year Strategic Plan for The Bonita Peak Mining District Superfund Site San Juan County, Colorado.** Draft Final. 2021a. Disponível em: <https://www.bonitapeakcag.org/wp-content/uploads/2021/05/BPMD-5-Year-Plan-2021.pdf>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Adaptive Management Site Management Plan for The Bonita Peak Mining District San Juan County, Colorado.** Final. 2020. Disponível em: <https://semspub.epa.gov/work/08/100009168.pdf>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Bonita Peak Mining District Superfund Site.** [s.d]. Disponível em: <https://epa.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=9ec10c38c47b435fb8f4bbe02b02b65d>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Bonita Peak Mining District Unincorporated, CO. Cleanup Activities.** 2022a. Disponível em: <https://cumulis.epa.gov/supercpad/SiteProfiles/index.cfm?fuseaction=second.Cleanu p&id=0802497#bkground>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Bonita Peak Mining District Unincorporated, CO. Contaminant List.** 2022b. Disponível em: <<https://cumulis.epa.gov/supercpad/SiteProfiles/index.cfm?fuseaction=second.contacts&id=0802497>>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Bonita Peak Mining District Unincorporated, CO. Health & Environment.** 2022c. Disponível em: <<https://cumulis.epa.gov/supercpad/SiteProfiles/index.cfm?fuseaction=second.Healthenv&id=0802497>>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Bonita Peak Mining District Unincorporated, CO. Operable Units.** 2022d. Disponível em: <<https://cumulis.epa.gov/supercpad/SiteProfiles/index.cfm?fuseaction=second.Stayup&id=0802497#Stayup>>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Bonita Peak Mining District Unincorporated, CO. Stay Updated, Get Involved.** 2022e. Disponível em: <<https://cumulis.epa.gov/supercpad/SiteProfiles/index.cfm?fuseaction=second.Stayup&id=0802497#Stayup>>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Superfund: CERCLA Overview.** 2022f. Disponível em: <<https://www.epa.gov/superfund/superfund-cercla-overview>>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Superfund Task Force Final Report.** EPA PUBLICATION NUMBER: 540R19008. 2019. Disponível em: <<https://www.ecos.org/wp-content/uploads/2019/09/SuperfundTaskForceFinalReport.pdf>>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. Superfund Task Force Recommendation #3: Broaden the Use of Adaptive Management. **Memorandum.** 2018. Disponível em: <<https://semspub.epa.gov/work/HQ/100001630.pdf>>. Acesso em: jan. 2022.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. **What is Superfund?** 2021b. Disponível em: <<https://www.epa.gov/superfund/what-superfund>>. Acesso em: jan. 2022.