

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Talita Silva Florenzano

Gerenciamento de áreas contaminadas de uma companhia de logística: proposta
metodológica para hierarquização das intervenções

Juiz de Fora

2026

Talita Silva Florenzano

Gerenciamento de áreas contaminadas de uma companhia de logística: proposta metodológica para hierarquização das intervenções

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária. Área de concentração: meio ambiente

Orientador: Dr. Otávio Eurico de Aquino Branco

Coorientadora: Esp. Cirene de Andrade Prata da Silva

Juiz de Fora

2026

Talita Silva Florenzano

Gerenciamento de áreas contaminadas de uma companhia de logística: proposta metodológica para hierarquização das intervenções

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária. Área de concentração: meio ambiente

Aprovada em 14 de julho de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Otávio Eurico de Aquino Branco - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Esp. Cirene de Andrade Prata da Silva - Coorientadora
MRS Logística S.A.

Dr. Haroldo Lobo dos Santos Nascimento
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Jonathas Batista Gonçalves Silva
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho a todos que compartilharam comigo o sonho de me tornar engenheira. Esta conquista também carrega um pouco de cada um de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família que sempre me apoiou e incentivou no caminho do aprendizado. Em especial, aos meus pais, Silvania e Altair, por estarem sempre presentes e fazerem o melhor para que eu permanecesse e concluísse minha graduação. Este trabalho também representa o encerramento de um ciclo para vocês!

Agradeço aos meus amigos e entusiastas do meu sucesso por todas as conversas, almoços, cafés, risadas, choros e abraços. Vocês foram, e continuam sendo, parte fundamental desta trajetória e a razão pela qual olho para ela com orgulho e sinto saudade.

Agradeço à faculdade de Engenharia da UFJF por todos os encontros proporcionados: de pessoas, ideias e oportunidades.

Agradeço à empresa de logística que acolheu minha proposta de trabalho, disponibilizou as informações necessárias para sua realização e contribuiu para minha formação ao longo da graduação.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Haroldo Lobo, Vinícius Lopes e Jonathas Silva, pela disponibilidade e pelas contribuições para a conclusão deste trabalho tão significativo em minha trajetória acadêmica.

Por fim, agradeço aos meus orientadores, Otávio e Cirene, que não mediram esforços para me auxiliar na construção deste trabalho. Mais do que me ensinaram sobre gestão de áreas contaminadas, estiveram presentes nos momentos em que os desafios pareciam maiores, ajudando-me a retomar o foco e a seguir em frente quando fui excessivamente crítica comigo mesma. Sou grata não apenas pela orientação acadêmica, mas também pela amizade construída ao longo desse processo.

Entre os muitos desafios da gestão ambiental, talvez o maior não seja identificar os problemas, mas definir por onde começar.

RESUMO

A definição de prioridades entre passivos ambientais é fundamental para orientar intervenções, reduzir riscos e direcionar recursos em empreendimentos com diferentes níveis de complexidade. Este trabalho técnico, desenvolvido como estudo de caso, teve como objetivo desenvolver e aplicar uma matriz multicritério para hierarquizar quatro áreas contaminadas previamente consideradas críticas em uma companhia de logística e propor estratégias conceituais de reabilitação. A pesquisa baseou-se em dados secundários provenientes do inventário corporativo, de relatórios ambientais e de documentos técnicos e normativos relacionados ao gerenciamento de áreas contaminadas. A metodologia compreendeu o levantamento e a sistematização das informações, a seleção de nove critérios, a definição de escalas de classificação, a determinação dos pesos pelo Processo Analítico Hierárquico e a composição do índice final de priorização. Foram considerados critérios relacionados à abrangência do risco, às matrizes ambientais impactadas, à presença de fonte ativa e fase livre, à condutividade hidráulica, à extensão da pluma, ao volume de solo contaminado, à diversidade de contaminantes e à interferência operacional da remediação. A razão de consistência foi de 0,044, indicando coerência aceitável entre os julgamentos. Os resultados apontaram a Área B – SP como prioritária, com 27,5% da pontuação relativa, seguida pelas áreas C – RJ, D – MG e A – SP. Sua posição esteve associada principalmente à recorrência de fase livre, à fonte ativa controlada, ao impacto em diferentes matrizes ambientais e à proximidade de área ambientalmente sensível. Para as quatro áreas, foram propostos direcionamentos específicos, envolvendo, conforme cada caso, atualização do modelo conceitual, controle de fontes e fase livre, contenção da migração, tratamento das fases remanescentes e monitoramento ambiental. Conclui-se que a matriz organiza informações técnicas dispersas, explicita os fatores considerados e apoia a tomada de decisão, desde que os resultados sejam interpretados como priorização relativa e complementados por avaliações específicas de viabilidade.

Palavras-chave: passivo ambiental; reabilitação ambiental; tomada de decisão; matriz multicritério; AHP.

ABSTRACT

Prioritizing contaminated-site liabilities is essential to guide interventions, reduce risks, and allocate resources in facilities with different levels of technical, environmental, and operational complexity. This technical study, developed as a case study, aimed to develop and apply a multicriteria decision matrix to rank four contaminated sites previously considered critical within a logistics company and to propose conceptual site rehabilitation strategies. The research was based on secondary data obtained from the corporate inventory, environmental reports, and technical and regulatory documents related to contaminated-site management. The methodology comprised data collection and systematization, selection of nine decision criteria, definition of classification scales, weighting of the criteria using the Analytic Hierarchy Process, and calculation of the final prioritization index. The criteria addressed the potential reach of risk, affected environmental media, presence of active sources and free-phase product, hydraulic conductivity, plume extent, estimated volume of contaminated soil, contaminant diversity, and operational interference caused by remediation. The consistency ratio was 0.044, indicating acceptable coherence among the judgments. The results identified Site B – SP as the highest-priority site, accounting for 27.5% of the relative score, followed by Sites C – RJ, D – MG, and A – SP. Its position was mainly associated with recurring free-phase product, an active source under control, impacts on multiple environmental media, and proximity to an environmentally sensitive area. Site-specific technical recommendations were proposed for all four sites, including, as applicable, conceptual site model updates, source and free-phase product control, migration containment, treatment of remaining contaminant phases, and environmental monitoring. The proposed matrix organizes dispersed technical information, makes the decision factors explicit, and supports decision-making, provided that the results are interpreted as a relative prioritization and complemented by site-specific feasibility assessments.

Keywords: environmental liability; environmental rehabilitation; decision-making; multicriteria matrix; Analytic Hierarchy Process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do gerenciamento de áreas contaminadas pela FEAM.....	19
Figura 2 – Estimativa da distribuição das áreas contaminadas registradas no Brasil até 2020.	21
Figura 3 – Atividades de origem da contaminação de solo e águas subterrâneas no Brasil. ...	22
Figura 4 – Relação de áreas contaminadas por atividade em Minas Gerais.....	23
Figura 5 – Distribuição geográfica das áreas contaminadas e reabilitadas no estado do Rio de Janeiro.....	24
Figura 6 – Relação de áreas contaminadas por atividade no estado do Rio de Janeiro.....	25
Figura 7 – Distribuição geográfica das áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo.	26
Figura 8 – Quantificação das áreas contaminadas de São Paulo por fase de gerenciamento...26	
Figura 9 – Relação de áreas contaminadas por atividade no estado de São Paulo.....	27
Figura 10 – Etapas metodológicas do trabalho.....	39
Figura 11 – Distribuição de áreas contaminadas por unidade federativa e fase de gerenciamento.	51
Figura 12 – Distribuição das áreas contaminadas por tipo de contaminante por unidade federativa.	52
Figura 13 – Linha do tempo das áreas ainda em processo de gerenciamento pela companhia.	53
Figura 14 – Número de áreas contaminadas na companhia por tipo de atividade.	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos principais aspectos técnicos, legais e normativos do gerenciamento de áreas contaminadas em Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.....	20
Quadro 2 – Resumo comparativo das técnicas de remediação.....	34
Quadro 3 – Critérios inicialmente considerados e justificativa da seleção final.	43
Quadro 4 – Definição das escalas de classificação dos critérios para as avaliações das alternativas.....	63
Quadro 5 – Direcionamento técnico para reabilitação da Área A – SP.	68
Quadro 6 – Direcionamento técnico para reabilitação da Área B – SP.....	70
Quadro 7 – Direcionamento técnico para reabilitação da Área C – RJ.....	72
Quadro 8 – Direcionamento técnico para reabilitação da Área D – MG.	73
Quadro 9 - Resumo das informações.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vetor peso da prioridade dos critérios de decisão.	61
Tabela 2 – Valores utilizados para verificação de consistência na aplicação da matriz de decisão.	63
Tabela 3 – Resultado final da priorização das áreas contaminadas pela matriz de decisão aplicada.....	65
Tabela 4 – Matriz de comparação par a par entre os critérios de decisão.	87
Tabela 5 – Matriz normalizada para obtenção do vetor prioridade dos critérios	88
Tabela 6 – Cálculo auxiliar para verificação da consistência da matriz AHP.....	91
Tabela 7– Pontuação das alternativas atribuída a cada critério da matriz de decisão.	93
Tabela 8 – Matriz de pontuação ponderada para cálculo do índice final de priorização.	94
Tabela 9 – Soma ponderada e índice normalizado das alternativas	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Avaliação Ambiental
AAP	Avaliação Ambiental Preliminar
AC	Área Contaminada
ACC	Área Contaminada Crítica
ACI	Área Contaminada sob Intervenção; Área Contaminada sob Investigação, na classificação paulista/CETESB
ACO	Área Contaminada Órfã
ACRe	Área Contaminada em Processo de Remediação
ACRi	Área Contaminada com Risco Confirmado
ACRu	Área Contaminada em Processo de Reutilização
AESBE	Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento
AFe	Área Atingida por Fonte Externa
AFd	Área Alterada por Fonte Difusa
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> – Processo Analítico Hierárquico
AI	Área Contaminada sob Investigação
AME	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento
AMR	Área em Processo de Monitoramento para Reabilitação
AN	Área Não Contaminada
ANM	Atenuação Natural Monitorada
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AP	Área com Potencial de Contaminação
AQN	Área com Alteração de Qualidade Natural
AR	Área Reabilitada para Uso Declarado
ARSH	Avaliação de Risco à Saúde Humana
AS	Área Suspeita de Contaminação
BDNAC	Banco de Dados Nacional de Áreas Contaminadas
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos
C1 a C9	Critérios 1 a 9 da matriz de decisão
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CI	Índice de Consistência

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONEMA-RJ	Conselho Estadual de Meio Ambiente do Rio de Janeiro
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
COPAM/CERH	Conselho Estadual de Política Ambiental / Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CR	Razão de Consistência
CSAO	Caixa Separadora de Água e Óleo
DD	Decisão de Diretoria
DN	Deliberação Normativa
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
GEOINEA	Portal GeoINEA do Instituto Estadual do Ambiente
GTZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit</i>
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IA	Investigação Ambiental
IAC	Investigação Ambiental Confirmatória
IAD	Investigação Ambiental Detalhada
IAP	Investigação Ambiental Preliminar
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
LNAPL	Fase Líquida Não Aquosa Leve
MCNR	Mistura Complexa Não Resolvida
MG	Minas Gerais
MPE	Extração Multifásica
NSZD	<i>Natural Source Zone Depletion</i>
RI	Índice Aleatório
RJ	Rio de Janeiro
SEMIL	Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística
SIACR	Sistema de Áreas Contaminadas e Reabilitadas
SIGAM	Sistema Integrado de Gestão Ambiental
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SP	São Paulo
SVE	<i>Soil Vapor Extraction</i>

TPH	Hidrocarbonetos Totais do Petróleo
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
VO	Valores Orientadores

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVO	16
2.1. Objetivos específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. Legislação ambiental brasileira	16
3.2. Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Brasil	21
3.2.1. Áreas contaminadas em Minas Gerais.....	22
3.2.2. Áreas contaminadas no Rio de Janeiro	24
3.2.3. Áreas contaminadas em São Paulo	25
3.3. Técnicas de remediação	28
3.3.1. Técnicas de recuperação de fase livre.....	28
3.3.2. Técnicas físico-químicas.....	29
3.3.3. Técnicas biológicas.....	31
3.3.4. Técnicas térmicas.....	32
3.3.5. Técnicas de contenção	33
3.4. Priorização de áreas contaminadas	36
3.5. Análise multicritério de decisão e método AHP	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4.1. Delineamento do estudo e fontes de dados.....	39
4.2. Universo de análise e seleção das áreas de estudo	40
4.3. Condições de contorno e abrangência da análise	41
4.4. Levantamento e sistematização das informações técnicas	42
4.5. Definição e seleção dos critérios de decisão.....	43
4.6. Estruturação da matriz e aplicação do método AHP	45
4.6.1. Estrutura hierárquica do problema.....	46
4.6.2. Comparação par a par dos critérios.....	46
4.6.3. Obtenção dos pesos e verificação da consistência.....	47
4.7. Definição das escalas de classificação.....	47
4.8. Aplicação da matriz e cálculo do índice de priorização	48
4.9. Proposição das estratégias conceituais de reabilitação	49

5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
5.1.	Panorama do gerenciamento de áreas contaminadas da companhia.....	50
5.1.1.	Distribuição das áreas e fases de gerenciamento	50
5.1.2.	Contaminantes e duração dos processos de gerenciamento.....	52
5.1.3.	Atividades associadas às fontes e receptores potenciais.....	53
5.2.	Caracterização das áreas selecionadas	55
5.2.1.	Área A – SP	55
5.2.2.	Área B – SP.....	56
5.2.3.	Área C – RJ.....	58
5.2.4.	Área D – MG	59
5.2.5.	Síntese comparativa das condições das áreas	60
5.3.	Resultados da matriz multicritério.....	61
5.3.1.	Pesos dos critérios de decisão.....	61
5.3.2.	Verificação da consistência dos julgamentos	62
5.3.3.	Escalas de classificação e pontuações	63
5.3.4.	Ranking final das áreas.....	64
5.3.5.	Influência dos critérios e interpretação do ranking.....	65
5.4.	Direcionamento técnico para reabilitação das áreas avaliadas	67
5.4.1.	Direcionamento técnico para a Área A – SP	67
5.4.2.	Direcionamento técnico para a Área B – SP.....	69
5.4.3.	Direcionamento técnico para a Área C – RJ.....	71
5.4.4.	Direcionamento técnico para a Área D – MG	72
5.4.5.	Síntese comparativa dos direcionamentos técnicos	74
5.5.	Síntese integrada dos resultados e implicações para a tomada de decisão	75
6.	CONCLUSÃO.....	76
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE A – INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DAS ÁREAS CONTAMINADAS DE INTERESSE	83
	APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DA MATRIZ DE DECISÃO AHP	86

APRESENTAÇÃO

O presente trabalho foi elaborado e avaliado no formato de trabalho técnico, do tipo proposta metodológica para hierarquização de intervenções em áreas contaminadas, de acordo com as normas definidas na Resolução nº 17/2023 do Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da UFJF, como pré-requisito para aprovação na disciplina Trabalho Final de Curso II (ESA098).

1. INTRODUÇÃO

A consolidação da legislação ambiental brasileira, especialmente a partir da instituição da Política Nacional do Meio Ambiente, impulsionou a adoção de práticas voltadas à prevenção, ao controle e à mitigação de impactos ambientais, e à recuperação ambiental de passivos ambientais (Brasil, 1981). No contexto da recuperação ambiental, destacam-se as áreas contaminadas (AC), cujo gerenciamento compreende ações de identificação, investigação, avaliação de risco, intervenção, monitoramento e reabilitação de locais onde a presença de substâncias químicas pode representar risco à saúde humana, ao meio ambiente ou aos bens a proteger. No Brasil, as principais diretrizes para esse processo estão estabelecidas, a nível federal, na Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009).

Nas últimas décadas, o aprimoramento dos mecanismos de controle ambiental e das metodologias de investigação contribuiu para o aumento da identificação de áreas contaminadas em diferentes setores produtivos. Paralelamente, a evolução das legislações federal e estaduais promoveu maior padronização dos procedimentos de gerenciamento e de informações sobre esses passivos. Ainda assim, os registros nacionais permanecem concentrados em poucos estados, indicando diferenças na capacidade de identificação, cadastro e acompanhamento das áreas contaminadas (Brasil, 2020).

Embora o gerenciamento de áreas contaminadas siga etapas técnicas consolidadas, sua aplicação prática ainda envolve desafios relevantes. Cada área pode apresentar diferentes condições ambientais, histórico de uso, comportamento da contaminação e estágio de gerenciamento, o que impossibilita a definição de estratégias únicas ou padronizadas. Além disso, a persistência de alguns passivos ao longo do tempo evidencia a importância de investigações consistentes e de modelos conceituais capazes de orientar adequadamente as ações de intervenção.

Para uma grande empresa do setor logístico, esse cenário pode ser ainda mais desafiador em função da abrangência territorial das operações, da diversidade de atividades desenvolvidas e da existência de passivos associados tanto a ocorrências recentes quanto a processos históricos de uso e ocupação do solo. Nesses casos, uma mesma organização pode ser responsável por diferentes áreas contaminadas, em estágios distintos de gerenciamento, exigindo a definição de prioridades para direcionamento dos esforços técnicos e operacionais disponíveis.

Diante desse contexto, torna-se relevante o uso de ferramentas capazes de organizar informações técnicas, relacionadas às características físicas, biológicas e antrópicas das Áreas

Contaminadas e dos contaminantes potenciais e já identificados, apoiando a análise comparativa destas áreas em fase de gerenciamento na empresa. A priorização desses casos pode contribuir para tornar a tomada de decisão mais estruturada, especialmente quando os casos avaliados apresentam histórico prolongado de gerenciamento, necessidade recorrente de estudos complementares e diferentes níveis de complexidade ambiental e operacional.

2. OBJETIVO

Desenvolver e aplicar uma matriz multicritério de apoio à tomada de decisão para avaliar e hierarquizar áreas contaminadas de uma companhia de logística, com base em parâmetros técnicos de gerenciamento de áreas contaminadas, bem como propor estratégias conceituais de intervenção voltadas à reabilitação das áreas avaliadas.

2.1. Objetivos específicos

Levantar e sistematizar os dados técnicos das áreas contaminadas com base em informações constantes em banco de dados da empresa.

Estruturar uma matriz de decisão com parâmetros técnicos para o gerenciamento de áreas contaminadas.

Hierarquizar as áreas indicadas pela companhia de logística por nível de criticidade considerando critérios ambientais, operacionais e de gerenciamento.

Propor alternativas conceituais de reabilitação para as áreas classificadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Legislação ambiental brasileira

A legislação ambiental brasileira relacionada ao gerenciamento de áreas contaminadas foi construída ao longo de décadas, acompanhando o avanço da industrialização, a expansão urbana e os impactos ambientais associados. Esse processo buscou regulamentar o uso do solo, controlar a poluição, proteger os recursos naturais e reduzir riscos à saúde humana e aos ecossistemas.

Embora o gerenciamento de áreas contaminadas tenha se consolidado como campo específico mais recentemente, sua base jurídica está associada a marcos gerais da proteção ambiental brasileira. O Código Florestal de 1965 representou um dos primeiros instrumentos legais voltados à proteção de áreas vegetadas e recursos naturais, posteriormente atualizado pela Lei nº 12.651/2012. Em 1981, a Política Nacional do Meio Ambiente, instituída pela Lei nº 6.938, criou o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e consolidou instrumentos de controle ambiental, como o licenciamento de atividades potencialmente poluidoras (Brasil, 1981; Brasil, 2012).

A Constituição Federal de 1988 consolidou o meio ambiente ecologicamente equilibrado como direito de todos e dever do poder público e da coletividade, elevando a proteção ambiental ao status de princípio constitucional (Brasil, 1988). Posteriormente, a Lei nº 9.605/1998, conhecida como Lei de Crimes Ambientais, estabeleceu sanções penais e administrativas para condutas lesivas ao meio ambiente, reforçando a responsabilização por danos ambientais e a necessidade de adoção de medidas de controle, recuperação e reparação (Brasil, 1998).

Na década de 1990, o debate sobre áreas contaminadas ganhou relevância no Brasil, impulsionado por iniciativas técnicas e institucionais voltadas à identificação e ao gerenciamento desses passivos. Nesse contexto, destaca-se a parceria entre a CETESB e a GTZ (*Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*), agência alemã de cooperação técnica. Essa cooperação contribuiu para a introdução de metodologias modernas no país, para a capacitação de técnicos e para a elaboração do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, publicado em 1999, que se consolidou como referência nacional na área (CETESB, 2025).

Com o aumento da identificação de áreas contaminadas, tornou-se necessária uma regulamentação federal específica. Em 2009, foi publicada a Resolução CONAMA nº 420, que se consolidou como o principal marco regulatório nacional do gerenciamento de áreas contaminadas por substâncias químicas decorrentes de atividades antrópicas (Brasil, 2009). A norma estabelece critérios e valores orientadores de qualidade do solo, além de diretrizes para identificação, investigação, avaliação de risco, intervenção, monitoramento e reabilitação ambiental.

A Resolução CONAMA nº 420/2009 também contribuiu para consolidar uma base técnica comum para o gerenciamento de áreas contaminadas no país. A partir dela, os estados passaram a estruturar ou aperfeiçoar seus próprios instrumentos normativos e procedimentais,

considerando suas realidades institucionais, ambientais e econômicas. Dessa forma, embora existam diferenças entre os órgãos ambientais estaduais, observa-se um padrão metodológico comum, fundamentado na identificação da contaminação, avaliação do risco, definição de medidas de intervenção e acompanhamento da reabilitação.

Entre os estados analisados neste trabalho, São Paulo se destaca pelo histórico técnico da CETESB e pela existência de instrumentos próprios para o gerenciamento de áreas contaminadas, como a Lei Estadual nº 13.577/2009, o Decreto nº 59.263/2013, decisões de diretoria e manuais técnicos. Em Minas Gerais, o gerenciamento é conduzido pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), com apoio de deliberações normativas do COPAM e do COPAM/CERH. No Rio de Janeiro, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA) atua por meio de resoluções, normas operacionais, decretos estaduais e ferramentas de cadastro e consulta pública.

Apesar dos avanços, os dados históricos sobre áreas contaminadas ainda são restritos aos órgãos e secretarias fiscalizadoras na maior parte dos estados brasileiros. Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo apresentam maior transparência e sistematização das informações, por meio de inventários, cadastros e plataformas públicas. Esse cenário tende a se modificar com o Banco de Dados Nacional de Áreas Contaminadas (BDNAC), instituído pela Resolução CONAMA nº 420/2009 e coordenado pelo IBAMA, com o objetivo de consolidar informações por unidade federativa e ampliar o acesso público aos dados (Brasil, 2022).

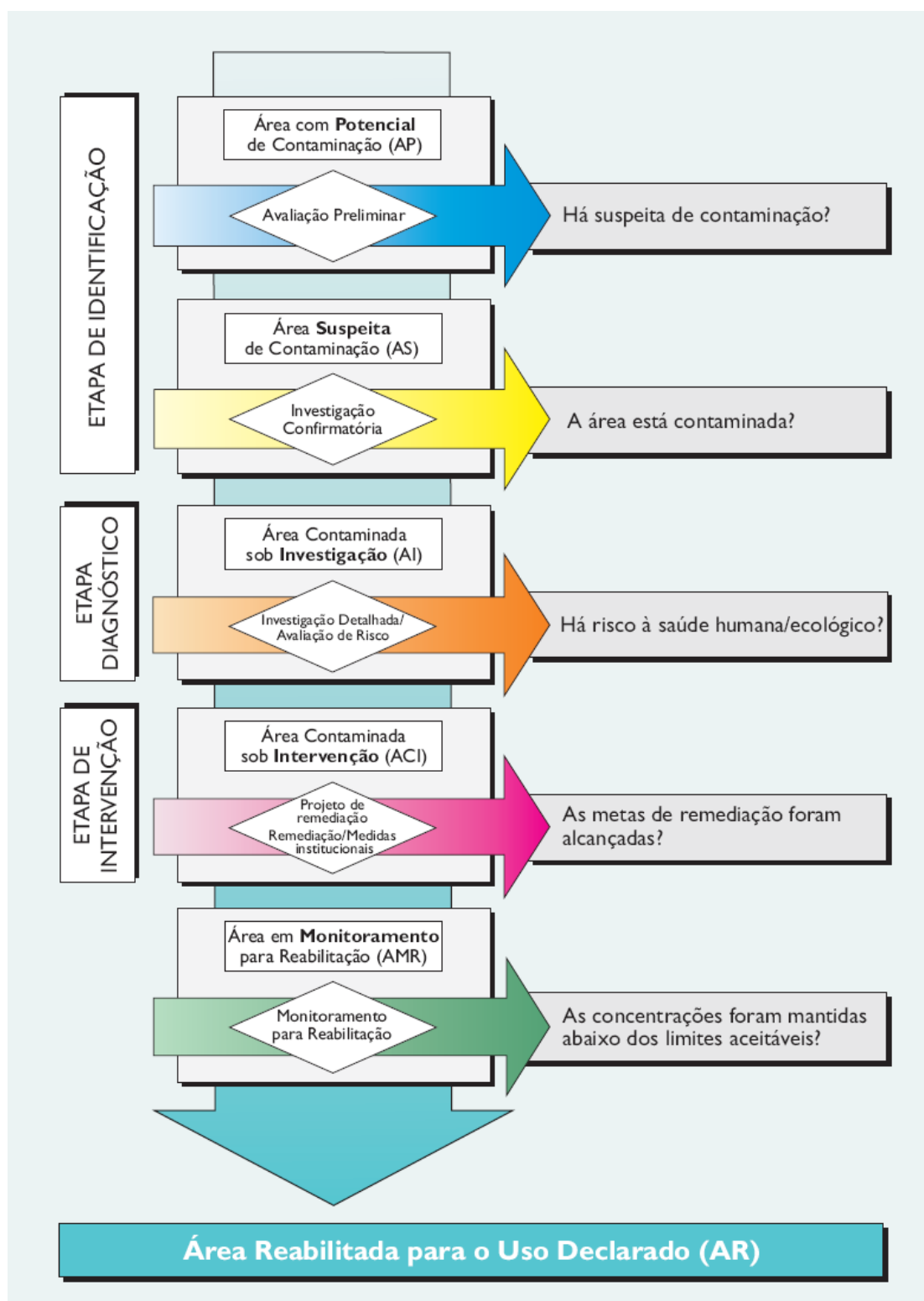
O processo de gerenciamento de áreas contaminadas segue um rito técnico composto por etapas sucessivas e complementares. Em linhas gerais, esse processo envolve a identificação da área, a realização de avaliação preliminar, investigação confirmatória, investigação detalhada, avaliação de risco, definição de medidas de intervenção, monitoramento e, quando atendidos os critérios aplicáveis, reabilitação para o uso declarado.

A classificação das áreas e o acompanhamento do gerenciamento são conduzidos pelo órgão ambiental competente, enquanto a execução dos estudos e das medidas necessárias é de responsabilidade do responsável legal pela área. Dessa forma, o gerenciamento não se limita à identificação da contaminação, mas envolve a construção de um modelo conceitual adequado, a avaliação das vias de exposição, o controle das fontes e a definição de ações compatíveis com o risco identificado.

A Figura 1 apresenta as etapas do gerenciamento de áreas contaminadas segundo o modelo da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). O fluxograma sintetiza o encadeamento entre identificação, investigação, avaliação de risco, intervenção e

monitoramento, evidenciando o caráter contínuo do gerenciamento e a necessidade de atualização das informações ao longo do processo.

Figura 1 – Etapas do gerenciamento de áreas contaminadas pela FEAM.



As adaptações do gerenciamento de áreas contaminadas nos estados brasileiros apresentam similaridades e diferenças. No Quadro 1, são comparados aspectos como legislações complementares, disponibilidade de informações públicas, referências técnicas utilizadas e critérios de classificação das áreas contaminadas adotados pelos órgãos ambientais de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

Quadro 1 – Resumo dos principais aspectos técnicos, legais e normativos do gerenciamento de áreas contaminadas em Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

Critério	Minas Gerais	Rio de Janeiro	São Paulo
Legislação estadual complementar	DN COPAM/CERH nº 02/2010; DN COPAM nº 116/2008	Resolução CONEMA-RJ nº 44/2012; Decreto Estadual nº 46.890/2019; Resolução INEA nº 306/2024	Lei Estadual nº 13.577/2009; Decreto nº 59.263/2013; DD CETESB nº 038/2017; DD CETESB nº 056/2024;
Órgão responsável	Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM)	Instituto Estadual do Ambiente (INEA)	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)
Inventário público	Publicado pela FEAM anualmente no site oficial	Publicado no portal GEOINEA para consulta dos registros	Disponibilizado por meio do SIACR e de inventários anuais
Manual técnico estadual	Não possui manual técnico próprio, segue diretrizes CONAMA	Não possui manual técnico específico, as orientações são postas por resoluções	Possui o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas disponibilizado pela CETESB
Valores orientadores	Definidos pela DN COPAM nº 166/2011	Adota valores baseados nos federais com ajustes locais.	Definidos pela DD CETESB nº 125/2021
Classificações de Áreas	Áreas com Potencial de Contaminação (AP); Áreas Suspeitas de Contaminação (AS); Áreas Contaminadas sob Investigação (AI); Áreas Contaminadas sob Intervenção (ACI); Áreas em Processo de Monitoramento para Reabilitação (AMR); Áreas Reabilitadas para Uso Declarado (AR); Área não Contaminada (AN).	Áreas com Potencial de Contaminação (AP); Áreas Suspeitas de Contaminação (AS); Área Contaminada sob Investigação (AI); Área Contaminada sob Intervenção (ACI); Áreas em Processo de Monitoramento para Reabilitação (AMR); Área Reabilitada para Uso Declarado (AR). Área não Contaminada (AN).	Área não Contaminada (AN); Área com Potencial de Contaminação (AP); Área Suspeita de Contaminação (AS); Área Contaminada sob Investigação (ACI); Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi); Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe); Área Contaminada em Processo de Reutilização (ACRu); Área Contaminada Órfã (ACO); Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME); Área Reabilitada para Uso Declarado (AR); Área Atingida por Fonte Externa (AFe); Área Alterada por Fonte Difusa (AFd); Área com Alteração de Qualidade Natural (AQN); Área Contaminada Crítica (ACC).

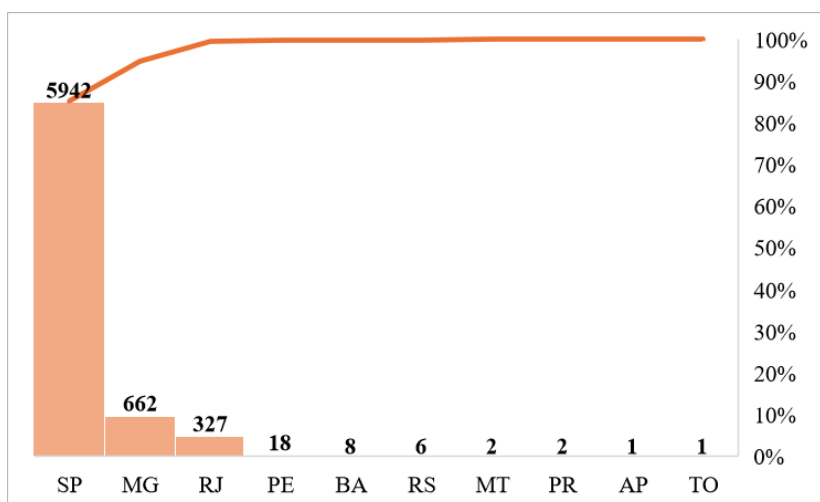
Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados oficiais disponibilizados por CONAMA, FEAM, INEA e CETESB (2025).

3.2. Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Brasil

O gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil enfrenta desafios relacionados à disponibilidade, sistematização e transparência dos dados. De acordo com o Programa Nacional de Recuperação de Áreas Contaminadas, até 2020 foram identificadas 6.969 áreas contaminadas distribuídas em dez estados brasileiros, conforme apresentado na Figura 2. Desse total, São Paulo concentrava 85% dos registros, seguido por Minas Gerais, com 9,5%, e Rio de Janeiro, com 4,7% (Brasil, 2020).

Essa distribuição desigual não indica, necessariamente, que a contaminação esteja concentrada apenas nesses estados. Ela também reflete diferenças na capacidade de identificação, registro, fiscalização e disponibilização pública das informações pelos órgãos ambientais. Assim, é plausível considerar que o número real de áreas contaminadas no país seja superior ao registrado, especialmente em unidades federativas que ainda não dispõem de sistemas consolidados de cadastro e monitoramento ambiental.

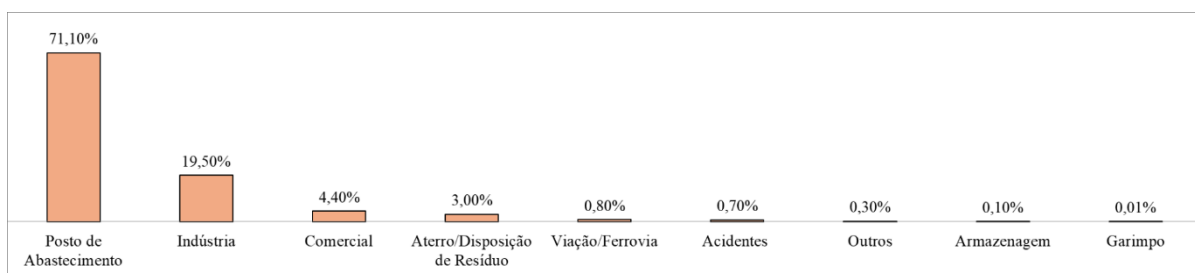
Figura 2 – Estimativa da distribuição das áreas contaminadas registradas no Brasil até 2020.



Fonte: Adaptado do Programa Nacional de Áreas Contaminadas (Brasil, 2020).

As principais fontes de contaminação registradas no país estão associadas a postos de combustíveis, que representam 71,1% dos casos, seguidos por atividades industriais, com 19,5% dos registros. Outras atividades, como disposição inadequada de resíduos, atividades logísticas e acidentes, também contribuem para o cenário nacional de contaminação do solo e das águas subterrâneas, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Atividades de origem da contaminação de solo e águas subterrâneas no Brasil.



Fonte: Adaptado do Programa Nacional de Áreas Contaminadas (Brasil, 2020).

Entre os contaminantes mais recorrentes, destacam-se compostos orgânicos voláteis, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, metais pesados e poluentes orgânicos persistentes, como bifenilas policloradas, hexaclorociclohexano e diclorodifeniltricloroetano, além do mercúrio, em razão de sua toxicidade e persistência ambiental (Brasil, 2020). Entretanto, esse panorama nacional deve ser interpretado com cautela, pois a composição das atividades-fonte e dos contaminantes pode variar conforme o recorte territorial, o setor econômico analisado e a capacidade de registro de cada órgão ambiental.

Nesse contexto, as estratégias de remediação adotadas no país variam conforme o meio impactado, o tipo de contaminante, a fase da contaminação e os objetivos definidos para cada área. Entre as técnicas frequentemente empregadas estão a remoção de solo contaminado, o bombeamento e tratamento de águas subterrâneas, a extração de vapores do solo, a extração multifásica, a oxidação química e os processos de biorremediação (AESBE, 2021; Soriano et al., 2023).

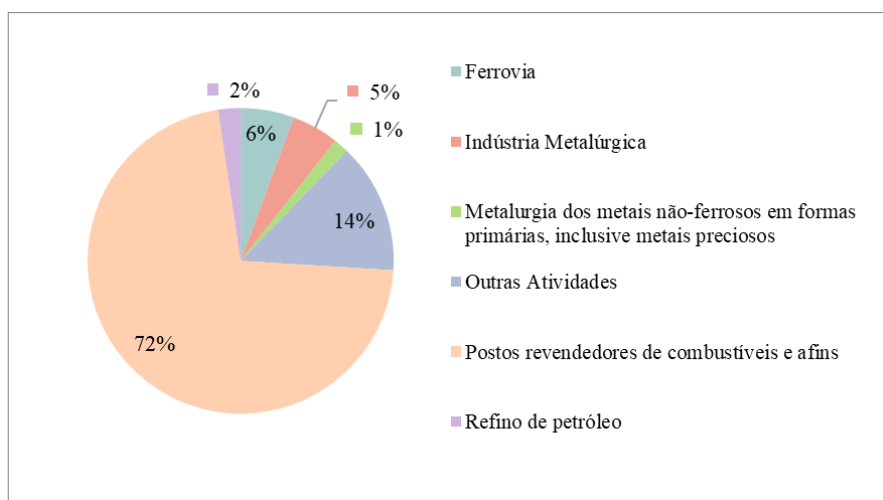
A análise dos registros nacionais e estaduais evidencia que o gerenciamento de áreas contaminadas envolve diferentes estágios de evolução, tipos de contaminantes, níveis de risco e estratégias de intervenção. Essa diversidade reforça a necessidade de ferramentas capazes de hierarquizar áreas críticas a partir de múltiplos critérios técnicos, subsidiando a alocação de recursos para investigação, monitoramento, remediação e reabilitação ambiental.

3.2.1. Áreas contaminadas em Minas Gerais

Segundo o Inventário de Áreas Contaminadas do Estado de Minas Gerais, disponibilizado pela FEAM, foram registradas 762 áreas contaminadas em 2024, representando acréscimo de 22 registros em relação ao ano anterior. Desse total, 309 áreas já haviam sido reabilitadas para uso declarado (FEAM, 2024). As áreas contaminadas estavam distribuídas em 145 dos 853 municípios mineiros e associadas a diferentes atividades econômicas.

Conforme apresentado na Figura 4, entre as atividades identificadas como fontes de contaminação em Minas Gerais, destacam-se os postos de combustíveis, com 546 registros, seguidos pelas ferrovias, com 43 registros, pela indústria metalúrgica, com 38 registros, pelo refino de petróleo, com 18 registros, e pela metalurgia de metais não ferrosos, com 12 registros. Esse cenário evidencia a relevância dos derivados de petróleo e das atividades de transporte no contexto estadual.

Figura 4 – Relação de áreas contaminadas por atividade em Minas Gerais.



Fonte: Adaptado do Inventário de Áreas Contaminadas do Estado de Minas Gerais (Brasil, 2024).

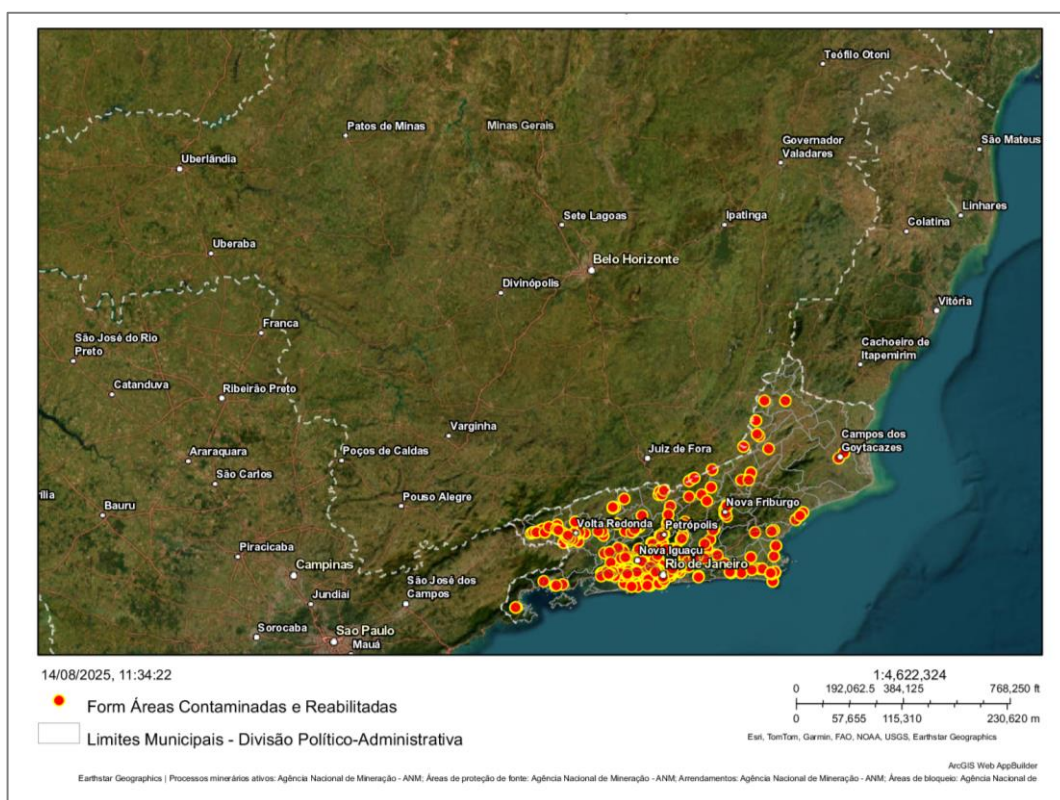
No setor logístico mineiro, representado principalmente pelas ferrovias, os registros indicam impactos associados a vazamentos acidentais e infiltração de contaminantes no solo e na água subterrânea. Foram identificados diferentes contaminantes, incluindo TPH (hidrocarbonetos totais do petróleo), BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), HPA (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos), benzeno, chumbo, manganês, níquel, benzo(b)fluoranteno e naftaleno. Esses compostos reforçam a relação entre atividades ferroviárias, derivados de petróleo e complexidade do gerenciamento ambiental.

Em situações com presença de fase livre, a adoção de medidas de controle e remoção torna-se prioritária, podendo envolver diferentes técnicas conforme as condições da área. Em Minas Gerais, o processo de reabilitação é formalizado por meio do Plano de Reabilitação de Área Contaminada, que deve ser submetido à FEAM e orienta as ações necessárias para controle, monitoramento e reabilitação ambiental.

3.2.2. Áreas contaminadas no Rio de Janeiro

No estado do Rio de Janeiro, dados disponibilizados pelo INEA por meio do Portal GEOINEA, na temática “Licenciamento e Monitoramento”, indicam 525 casos de áreas contaminadas registrados até agosto de 2025, conforme apresentado na Figura 5. Desse total, 47 áreas foram classificadas como reabilitadas para uso declarado (INEA, 2025). A plataforma permite consultar informações como fase de gerenciamento, medidas emergenciais adotadas, técnicas de remediação aplicadas, presença de fase livre e meio impactado.

Figura 5 – Distribuição geográfica das áreas contaminadas e reabilitadas no estado do Rio de Janeiro.



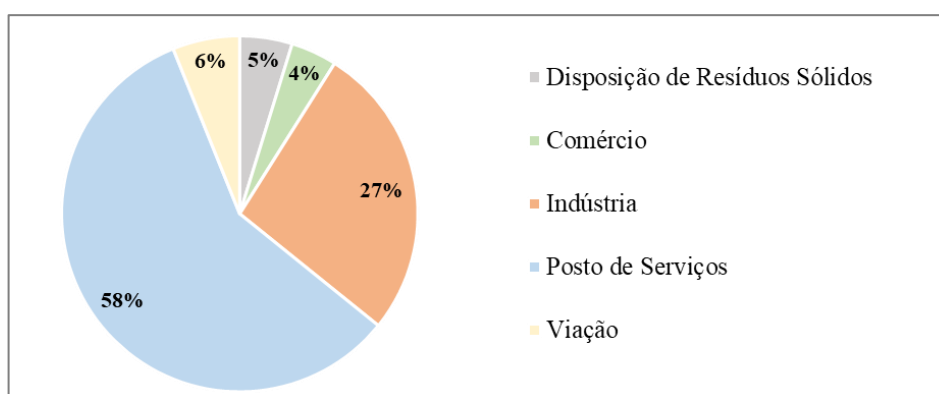
Fonte: PortalGeoINEA - ArcGIS Web Map (INEA, 2025).

Identifica-se o uso de cerca de 20 técnicas de remediação no estado, desde medidas emergenciais até ações de monitoramento para encerramento. Entre as técnicas mais recorrentes, destacam-se barreira hidráulica, restrições de uso, bombeamento e tratamento, biorremediação, extração multifásica e atenuação natural monitorada. Em muitos casos,

observa-se a aplicação combinada de métodos, em função da complexidade das áreas e da ocorrência de contaminação em diferentes meios.

Na distribuição das atividades que contribuem para a contaminação no Rio de Janeiro, os postos de serviços representam a maior parcela dos registros, com 305 casos, conforme Figura 6. A categoria “Indústria”, que inclui serviços de logística, com exceção da viação, representa 27% das causas de contaminação, correspondendo ao segundo maior grupo. Entre os contaminantes associados a essas atividades, destacam-se metais, BTEX, HPA e TPH, sendo que aproximadamente 72% dos casos correspondem a contaminações pontuais.

Figura 6 – Relação de áreas contaminadas por atividade no estado do Rio de Janeiro.

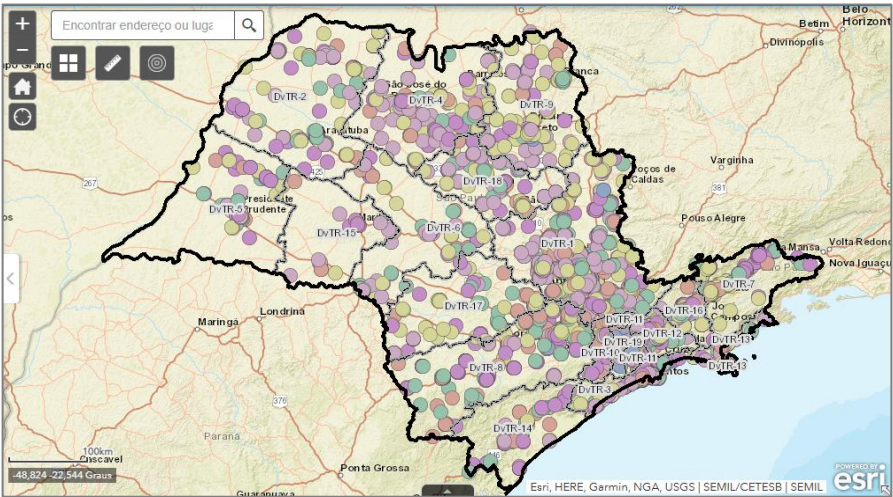


Fonte: Adaptado dos dados do GEOINEA (INEA, 2025)

3.2.3. Áreas contaminadas em São Paulo

Em São Paulo, dados consultados no Sistema Integrado de Gestão Ambiental do Estado de São Paulo indicam o registro de 6.087 áreas contaminadas em 2025, conforme apresentado na Figura 7 (SIGAM, 2025). O elevado número de registros reflete o histórico de atuação da CETESB, a consolidação dos instrumentos de gerenciamento e a maior disponibilidade pública de informações sobre áreas contaminadas no estado.

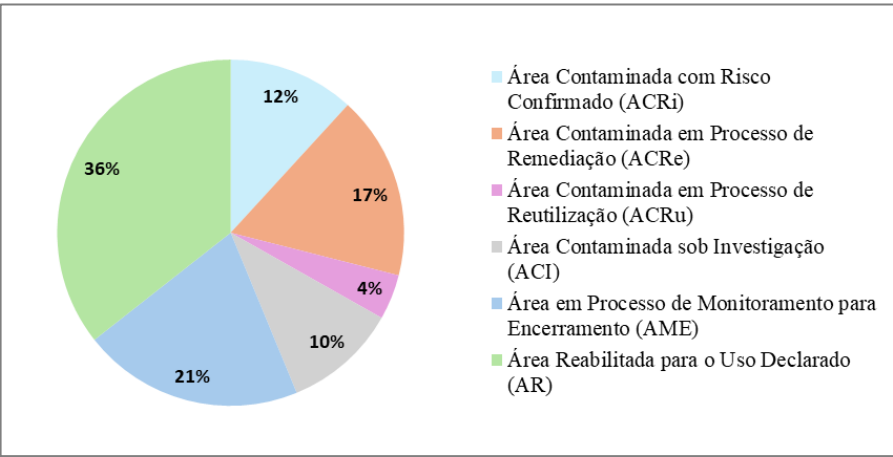
Figura 7 – Distribuição geográfica das áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo.



Fonte: Sistema Integrado de Gestão Ambiental do Estado de São Paulo, SEMIL/CETESB (SIGAM, 2025)

Essas áreas estão distribuídas entre diferentes fases do processo de gerenciamento. Foram registradas 718 áreas contaminadas com risco confirmado, 1.045 áreas em processo de remediação, 645 áreas em investigação, 1.254 áreas em monitoramento para encerramento e 257 áreas em processo de reutilização. Além disso, 2.168 áreas já foram reabilitadas para uso declarado, conforme critérios estabelecidos pelo órgão ambiental paulista, como apresentado na Figura 8.

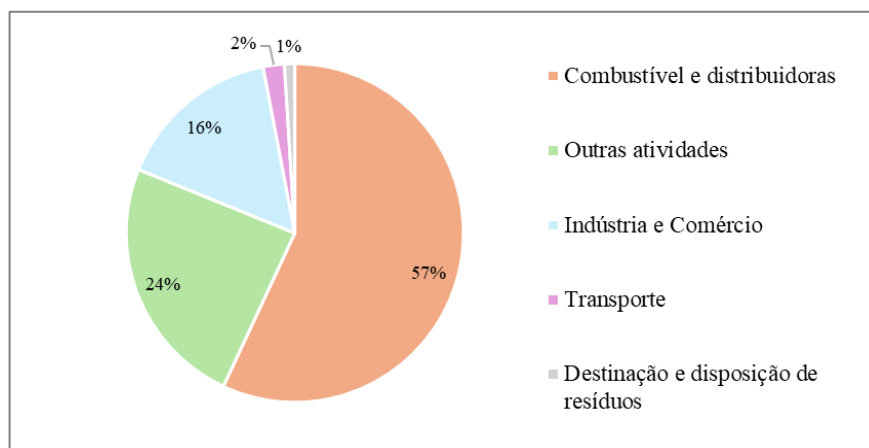
Figura 8 – Quantificação das áreas contaminadas de São Paulo por fase de gerenciamento.



Fonte: Adaptado do Sistema Integrado de Gestão Ambiental do Estado de São Paulo, SEMIL/CETESB (SIGAM, 2025)

A distribuição das áreas contaminadas por tipo de atividade evidencia que o setor de combustíveis e distribuidoras responde pela maior parcela dos registros, com 3.468 ocorrências. Em seguida, aparecem outras atividades, com 1.470 registros, indústria e comércio, com 965 registros, e o setor de transporte, com 124 registros, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Relação de áreas contaminadas por atividade no estado de São Paulo



Fonte: Adaptado do Sistema Integrado de Gestão Ambiental do Estado de São Paulo, SEMIL/CETESB (SIGAM, 2025).

Entre os contaminantes mais comuns presentes nessas áreas estão metais pesados, solventes aromáticos e halogenados, combustíveis automotivos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. A presença desses compostos, especialmente os de origem petroquímica, impõe desafios específicos para a escolha das estratégias de investigação, remediação e monitoramento ambiental.

Com relação às técnicas aplicadas, a CETESB registra o uso de diferentes métodos, que variam conforme a fase do gerenciamento, o tipo de contaminação e o meio impactado. Entre os mais recorrentes, destacam-se pavimentação ou impermeabilização, bombeamento e tratamento, extração de vapores do solo, *air sparging* e *biosparging*. Em muitos casos, a combinação de técnicas é necessária, especialmente quando a contaminação atinge solo e água subterrânea ou envolve compostos persistentes.

Embora os três estados adotem as diretrizes gerais estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 420/2009, observa-se maior volume de registros e maior detalhamento das informações públicas em São Paulo, enquanto Minas Gerais e Rio de Janeiro também apresentam sistemas relevantes de cadastro e acompanhamento. Em comum, verifica-se a predominância de contaminações associadas a derivados de petróleo e a adoção de estratégias

combinadas de remediação. Essas características são particularmente relevantes para áreas vinculadas ao setor logístico, contexto no qual se inserem as áreas avaliadas neste estudo.

3.3. Técnicas de remediação

A remediação de áreas contaminadas é uma etapa fundamental do gerenciamento ambiental, especialmente em locais impactados por atividades industriais, comerciais, logísticas ou por acidentes envolvendo substâncias perigosas. Trata-se de um conjunto de intervenções destinadas à eliminação, redução ou controle dos riscos associados à presença de contaminantes no solo e na água subterrânea.

A seleção da técnica mais adequada depende de diversos fatores, incluindo o tipo e as características físico-químicas dos contaminantes, as condições geológicas e hidrogeológicas do local, a profundidade da contaminação, os riscos à saúde humana e ao meio ambiente, os objetivos de reabilitação da área e as condições econômicas e operacionais do projeto.

A contaminação pode ocorrer em diferentes fases, sendo essencial identificá-las para orientar a escolha das estratégias de intervenção. As principais são a fase livre, caracterizada pela presença de líquidos não miscíveis com a água; a fase dissolvida, quando os contaminantes estão presentes na água subterrânea; a fase adsorvida, quando se encontram retidos na superfície das partículas do solo; a fase residual, associada à retenção em microambientes do solo; e a fase vapor, quando os contaminantes ocupam os espaços porosos na forma gasosa.

As técnicas de remediação podem ser agrupadas de acordo com seus mecanismos de atuação, abrangendo processos de recuperação física de contaminantes, tratamentos físico-químicos, processos biológicos, tecnologias térmicas e estratégias de contenção. A partir dos tópicos seguintes são apresentados os principais grupos de técnicas de remediação utilizados no gerenciamento de áreas contaminadas, bem como suas aplicações, vantagens e limitações, conforme compilado no protocolo técnico de remediação de áreas contaminadas por vazamentos de hidrocarbonetos de petróleo e biocombustíveis (Soriano, 2023).

3.3.1. Técnicas de recuperação de fase livre

Quando contaminantes líquidos não miscíveis com a água se acumulam no subsolo, formando massas de fase livre, estes podem atuar como fontes contínuas de contaminação do solo e da água subterrânea. Nesses casos, técnicas de recuperação física são frequentemente

utilizadas para promover a remoção direta da massa contaminante, reduzindo seu potencial de migração e os riscos associados.

Entre as principais técnicas empregadas destacam-se a recuperação convencional de fase livre, o *skimming* e a extração multifásica.

Recuperação de fase livre – A recuperação de fase livre consiste na remoção direta de líquidos não miscíveis com a água, como óleos e combustíveis, presentes na zona saturada. Utiliza bombas, *skimmers* ou materiais absorventes para captar exclusivamente a fase livre, sendo indicada em situações pontuais onde há presença evidente desse tipo de contaminante. Apesar de outras técnicas mais complexas também removerem a fase livre, esta abordagem se destaca pela simplicidade, baixo custo e aplicação direcionada, embora seja limitada a substâncias com densidade diferente da água e não trate outras fases da contaminação.

Skimming – O *skimming* é uma técnica específica de recuperação de fase livre voltada para contaminantes menos densos que a água, como óleos e combustíveis, que se acumulam na superfície da zona saturada. Utiliza dispositivos mecânicos capazes de captar exclusivamente essa camada flutuante, sendo indicada em situações pontuais com presença evidente de fase livre superficial. Por sua simplicidade e baixo custo, é eficaz em aplicações direcionadas, embora limitada à remoção de contaminantes flutuantes.

Extração multifásica (MPE) – A extração multifásica é uma técnica que visa remover simultaneamente diferentes fases de contaminantes presentes em áreas contaminadas, como água subterrânea, vapores e líquidos imiscíveis. Utiliza sistemas de bombeamento acoplados a poços de extração, permitindo a retirada eficiente de compostos orgânicos voláteis e não voláteis. O principal objetivo é reduzir a massa contaminante presente no subsolo, atuando diretamente na fonte da contaminação. No entanto, sua aplicação é limitada em solos de baixa permeabilidade e exige infraestrutura complexa. Entre os benefícios estão a alta eficiência e a capacidade de tratar múltiplas fases, enquanto os desafios incluem o alto custo operacional e a necessidade de manutenção constante.

3.3.2. Técnicas físico-químicas

As técnicas físico-químicas compreendem processos que promovem a remoção, mobilização ou transformação dos contaminantes por meio de mecanismos físicos e químicos. Essas abordagens estão entre as mais utilizadas no gerenciamento de áreas contaminadas devido à sua versatilidade e aplicabilidade a diferentes cenários de contaminação.

Dependendo das características da área e dos contaminantes presentes, podem ser empregadas individualmente ou de forma combinada, visando aumentar a eficiência do processo de remediação e reduzir o tempo necessário para atingir os objetivos de intervenção.

Bombeamento e tratamento (*Pump and treat*) – Essa técnica consiste na retirada da água subterrânea contaminada por meio de bombeamento, seguida de tratamento externo em sistemas físicos, químicos ou biológicos. Seu objetivo é reduzir a concentração de contaminantes dissolvidos na água subterrânea, contribuindo para a recuperação da qualidade ambiental. Apesar de ser amplamente utilizada, apresenta restrições como o tempo prolongado de operação e a limitação em tratar a fonte da contaminação. É uma técnica consolidada e eficaz, mas demanda investimentos elevados e acompanhamento contínuo.

Oxidação química – A oxidação química envolve a injeção de agentes oxidantes no solo ou na água subterrânea para promover a degradação de contaminantes orgânicos. Substâncias como peróxido de hidrogênio e permanganato são comumente utilizadas. O objetivo é transformar compostos tóxicos em substâncias menos nocivas, acelerando o processo de remediação. Contudo, essa técnica requer conhecimento detalhado da química do meio e pode gerar subprodutos indesejados. Seu principal benefício é a rapidez na ação, especialmente em aplicações *in situ*, mas o custo dos reagentes e o risco de reações secundárias são pontos de atenção.

Remoção de solo (Escavação) – A escavação é uma abordagem direta que consiste na retirada física do solo contaminado, com posterior transporte para tratamento ou descarte adequado. É indicada quando a contaminação está concentrada em áreas acessíveis e superficiais. O objetivo é eliminar completamente a fonte da contaminação. Apesar de sua eficácia, apresenta restrições como o impacto ambiental da movimentação de solo e a necessidade de destinação segura. É uma técnica de ação imediata, porém com custos elevados e implicações logísticas significativas.

Injeção de surfactantes ou cossolventes – Essa técnica utiliza substâncias que aumentam a solubilidade dos contaminantes, facilitando sua mobilização e posterior extração. O objetivo é tornar os contaminantes mais acessíveis aos sistemas de tratamento. Apesar de aumentar a eficiência da remediação, pode provocar a dispersão dos contaminantes para áreas não tratadas. É uma técnica poderosa, mas que exige planejamento cuidadoso e controle rigoroso.

Injeção de ar e extração de vapores do solo (SVE) – O SVE é utilizado para remover compostos orgânicos voláteis do solo por meio da injeção de ar e da extração dos vapores gerados. O objetivo é volatilizar os contaminantes e capturá-los para tratamento. É eficaz em

solos permeáveis e para contaminantes voláteis, mas apresenta restrições quanto à profundidade e tipo de solo. Seu principal benefício é a eficiência em áreas superficiais, enquanto os desafios incluem o controle de emissões e o tempo de operação.

3.3.3. Técnicas biológicas

As técnicas biológicas utilizam organismos vivos ou processos naturais para promover a degradação, transformação ou estabilização dos contaminantes presentes no ambiente. Em geral, apresentam menor impacto ambiental e custos reduzidos quando comparadas a métodos mais invasivos, embora frequentemente demandem períodos mais longos para obtenção dos resultados esperados.

Nesse grupo incluem-se técnicas baseadas na atividade microbiana, no estímulo aos processos naturais de degradação, em barreiras biológicas, no uso de vegetação e no monitoramento de mecanismos naturais que ocorrem no solo e na água subterrânea.

Atenuação Natural Monitorada (ANM) – A ANM baseia-se na observação e comprovação de processos naturais que atuam na redução da contaminação na pluma, como biodegradação, diluição, dispersão, adsorção e reações químicas. O objetivo é garantir que esses processos estejam ocorrendo de forma eficaz e segura ao longo do tempo, sem intervenção direta. Essa técnica é recomendada para áreas onde os riscos são baixos e os processos naturais são comprovadamente eficientes na fase dissolvida dos contaminantes. Seu principal atrativo é o baixo custo e a mínima intervenção, mas exige monitoramento contínuo e não é indicada para situações críticas ou de rápida propagação.

Depleção natural da zona da fonte (NSZD) – A NSZD consiste no monitoramento da degradação natural da zona da fonte da contaminação, ou seja, da área onde se concentra a maior massa de contaminantes, geralmente em fase livre ou residual. O objetivo é acompanhar e quantificar a redução da massa contaminante ao longo do tempo, por meio de processos como volatilização, biodegradação e difusão gasosa. Trata-se de uma técnica específica dentro do conceito de atenuação natural, voltada para a origem da contaminação. Assim como a ANM, apresenta como atrativo o baixo custo e a ausência de intervenção direta, mas exige comprovação científica da eficácia dos processos naturais e monitoramento contínuo.

Revolvimento do Solo – Essa técnica consiste na mistura e aeração do solo contaminado, com o intuito de estimular processos naturais de degradação, especialmente microbiológicos. O objetivo é acelerar a remediação por meio da ativação da microbiota local.

É mais indicada para áreas abertas e com baixa urbanização, pois pode provocar a volatilização de contaminantes. Seus principais benefícios são o estímulo aos processos naturais e o baixo custo, mas há riscos de dispersão e controle limitado.

Biorremediação aeróbia ou anaeróbia - A biorremediação estimula microrganismos para degradar contaminantes orgânicos, podendo ocorrer na presença (aeróbia) ou ausência (anaeróbia) de oxigênio. O objetivo é transformar compostos tóxicos em substâncias menos nocivas por meio de processos biológicos. É uma técnica sustentável e de baixo custo, mas depende da microbiota local e exige tempo prolongado para resultados significativos.

Biobarreiras – São barreiras instaladas no subsolo que contêm microrganismos capazes de degradar contaminantes à medida que passam por elas. O objetivo é tratar a contaminação de forma passiva, aproveitando o fluxo natural da água subterrânea. Apesar de ser uma solução inovadora e de baixo impacto, requer manutenção da atividade biológica e apresenta eficiência limitada.

Fitorremediação – Utiliza plantas para absorver, degradar ou estabilizar contaminantes presentes no solo e na água. O objetivo é promover a remediação de forma natural e paisagística. É uma técnica sustentável e de baixo custo, mas apresenta restrições quanto ao tipo de contaminante e ao tempo necessário para resultados visíveis.

3.3.4. Técnicas térmicas

As técnicas térmicas baseiam-se na aplicação de calor ao solo ou à água subterrânea com o objetivo de aumentar a volatilização, mobilização ou degradação dos contaminantes. Essas tecnologias costumam apresentar elevada eficiência para compostos orgânicos persistentes, embora exijam maior consumo energético e investimentos mais elevados quando comparadas a outras alternativas de remediação.

Sua aplicação é geralmente indicada para cenários onde métodos convencionais apresentam baixa efetividade ou demandariam períodos excessivamente longos de operação.

Injeção de Vapor – Essa técnica aquece o solo por meio da injeção de vapor, promovendo a volatilização dos contaminantes para posterior extração. O objetivo é facilitar a remoção de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis. É indicada para solos com boa permeabilidade térmica, mas exige alto consumo energético. Seu desempenho é elevado, mas o custo e a complexidade operacional são fatores limitantes.

Aquecimento por Condução Térmica ou Elétrica – Utiliza resistências elétricas ou sistemas de condução térmica para aquecer o solo, promovendo a volatilização dos contaminantes. O objetivo é facilitar a extração de compostos persistentes. É uma técnica eficaz, especialmente para contaminantes de difícil degradação, mas apresenta alto custo e risco de alteração das propriedades do solo.

3.3.5. Técnicas de contenção

Diferentemente das técnicas voltadas à remoção ou degradação dos contaminantes, as estratégias de contenção têm como principal objetivo limitar sua migração no meio físico, reduzindo a exposição de receptores sensíveis e impedindo a expansão das plumas de contaminação.

Essas técnicas podem ser empregadas como medidas temporárias ou permanentes, isoladamente ou em conjunto com outras tecnologias de remediação. Sua adoção é particularmente relevante em situações nas quais a remoção imediata dos contaminantes não é tecnicamente viável ou economicamente justificável.

Contenção Física ou Hidráulica – A contenção busca impedir a migração de contaminantes por meio de barreiras físicas (como paredes subterrâneas) ou sistemas hidráulicos (como poços de bombeamento). O objetivo é confinar a contaminação, evitando que ela se espalhe para áreas não impactadas. Embora eficaz como medida de controle, não promove a remoção dos contaminantes. É uma solução temporária que exige manutenção constante e pode apresentar custos elevados de instalação.

Barreira Hidráulica – A barreira hidráulica é uma técnica específica de contenção hidráulica que consiste na instalação de poços de bombeamento para criar gradientes hidráulicos artificiais, com o objetivo de direcionar o fluxo da água subterrânea e impedir o avanço da pluma contaminante. Essa abordagem visa proteger áreas sensíveis, como aquíferos e corpos hídricos, funcionando como uma medida eficaz de controle da dispersão. No entanto, por não promover a remediação direta dos contaminantes, exige operação contínua e monitoramento constante, além de apresentar custos elevados de implantação e manutenção.

As técnicas apresentadas possuem diferentes mecanismos de atuação, níveis de eficiência, custos operacionais e condições de aplicabilidade. Em muitos casos, a remediação de uma área contaminada demanda a combinação de múltiplas tecnologias, de forma a

contemplar diferentes fases do contaminante e objetivos de intervenção. Para facilitar a comparação entre essas abordagens, o Quadro 2 apresenta um resumo das principais características, vantagens e limitações das técnicas discutidas.

Quadro 2 – Resumo comparativo das técnicas de remediação

Técnica	Objetivo principal	Fase do contaminante removido	Vantagens	Limitações
Recuperação de Fase Livre	Remoção de líquidos não miscíveis com a água	Fase livre	Simplicidade, baixo custo, aplicação direcionada	Limitada a substâncias com densidade diferente da água
Skimming	Remoção de contaminantes menos densos que a água, como óleos e combustíveis voláteis	Fase livre superficial	Simples, eficaz em situações pontuais, baixo custo	Apenas para contaminantes flutuantes
Extração Multifásica	Remoção simultânea de água, vapores e líquidos imiscíveis, incluindo compostos voláteis	Livre, dissolvida e vapor	Alta eficiência, trata múltiplas fases	Alto custo, manutenção constante, limitada em solos de baixa permeabilidade
Bombeamento e Tratamento	Redução da concentração de contaminantes dissolvidos, incluindo compostos voláteis	Fase dissolvida	Técnica consolidada, eficaz	Operação prolongada, alto investimento
Oxidação Química	Degradação de contaminantes orgânicos, inclusive voláteis e semivoláteis	Fase dissolvida e adsorvida	Ação rápida, eficaz <i>in situ</i>	Custo elevado, risco de subprodutos indesejados
Remoção de Solo	Eliminação física do solo contaminado, incluindo contaminantes voláteis superficiais	Fase residual e adsorvida	Ação imediata, eficaz para fontes superficiais	Alto custo, impacto ambiental, logística complexa
Atenuação Natural Monitorada	Monitorar processos naturais que reduzem a contaminação, inclusive de compostos voláteis	Fase dissolvida	Baixo custo, mínima intervenção	Requer monitoramento contínuo

Técnica	Objetivo principal	Fase do contaminante removido	Vantagens	Limitações
Depleção Natural da Zona da Fonte	Monitorar degradação natural na zona da fonte, incluindo volatilização de compostos	Fase livre e residual	Baixo custo, sem intervenção direta	Exige comprovação científica, monitoramento constante
Revolvimento do Solo	Estimular degradação natural por aeração, podendo volatilizar contaminantes	Fase adsorvida e residual	Estímulo à microbiota, baixo custo	Risco de dispersão, controle limitado
Contenção Física ou Hidráulica	Impedir migração de contaminantes, inclusive voláteis dissolvidos	Todas (controle, não remoção)	Eficaz como medida de controle	Não remove contaminantes, solução temporária
Barreira Hidráulica	Direcionar o fluxo da água subterrânea para conter plumas com compostos voláteis	Fase dissolvida (controle)	Protege áreas sensíveis, eficaz no controle da dispersão	Alto custo, operação contínua
Injeção de Surfactantes ou Cossolventes	Mobilizar contaminantes adsorvidos, inclusive semivoláteis	Fase adsorvida e residual	Potencializa eficiência da remediação	Risco de dispersão, exige controle rigoroso
Injeção de Ar e Extração de Vapores	Remover compostos orgânicos voláteis do solo	Fase vapor	Eficiente em solos permeáveis e áreas superficiais	Controle de emissões, restrição quanto à profundidade
Injeção de Vapor	Volatilizar contaminantes orgânicos voláteis e semivoláteis	Fase vapor	Alto desempenho	Alto consumo energético, complexidade operacional
Aquecimento por Condução Térmica/ Elétrica	Volatilizar contaminantes persistentes, inclusive semivoláteis	Fase vapor	Eficaz para compostos de difícil degradação	Alto custo, risco de alteração do solo
Biorremediação Aeróbia ou Anaeróbia	Degradar contaminantes orgânicos, inclusive voláteis biodegradáveis	Fase dissolvida e adsorvida	Sustentável, baixo custo	Tempo prolongado, depende da microbiota local

Técnica	Objetivo principal	Fase do contaminante removido	Vantagens	Limitações
Biobarreiras	Tratar contaminantes dissolvidos, inclusive voláteis biodegradáveis	Fase dissolvida	Baixo impacto, solução inovadora	Eficiência limitada, exige manutenção biológica
Fitorremediação	Remediar contaminantes por meio de plantas, incluindo alguns voláteis e semivoláteis	Fase dissolvida e adsorvida	Sustentável, paisagística, baixo custo	Tempo prolongado, restrição quanto ao tipo de contaminante

Fonte: Elaborado pela autora adaptado de Soriano et al. (2023).

3.4. Priorização de áreas contaminadas

A existência de múltiplas áreas contaminadas sob responsabilidade de uma mesma organização pode exigir o estabelecimento de prioridades para o direcionamento das ações de investigação, intervenção e monitoramento. Essa necessidade torna-se mais relevante quando as áreas apresentam diferentes históricos de gerenciamento, estágios de intervenção, contaminantes, fontes e condições ambientais e operacionais.

No gerenciamento de áreas contaminadas, a tomada de decisão deve priorizar a proteção da saúde humana, do meio ambiente e dos demais bens a proteger. Entretanto, a criticidade de uma área pode resultar da combinação de diferentes fatores, como a persistência da contaminação, a presença de fontes ativas ou fase livre, a extensão da área impactada, a possibilidade de migração dos contaminantes e a existência de receptores potencialmente expostos.

A adoção de um único indicador pode não representar adequadamente essa complexidade. Uma área pode apresentar maior extensão da contaminação, enquanto outra pode possuir uma fonte ainda ativa, maior potencial de propagação ou condições que dificultem a execução das medidas de intervenção. Assim, a definição de prioridades requer uma análise integrada de informações ambientais, hidrogeológicas, operacionais e de gerenciamento.

A priorização sistemática permite organizar os dados disponíveis, tornar mais claros os fatores considerados na tomada de decisão e direcionar recursos para os casos que demandam maior atenção. Essa abordagem não substitui a avaliação técnica específica de cada área, mas

fornece uma estrutura para comparar situações distintas com maior transparência e rastreabilidade.

3.5. Análise multicritério de decisão e método AHP

Os métodos de Análise Multicritério de Decisão são utilizados como ferramentas de apoio em problemas nos quais diferentes critérios precisam ser avaliados simultaneamente. Esses métodos possibilitam estruturar o processo decisório, explicitar os critérios utilizados e reduzir a dependência de avaliações exclusivamente intuitivas na comparação entre alternativas (Belton e Stewart, 2002).

Entre os métodos multicritério mais difundidos, destaca-se o Processo Analítico Hierárquico (AHP), desenvolvido por Saaty (1980). O método permite decompor o problema de decisão em níveis hierárquicos e realizar comparações par a par para determinar a importância relativa dos critérios. Os julgamentos técnicos são, então, convertidos em pesos numéricos aplicáveis à avaliação das alternativas.

O AHP também possibilita verificar a coerência dos julgamentos por meio do cálculo da Razão de Consistência. Essa verificação permite identificar contradições relevantes nas comparações realizadas e avaliar se os pesos obtidos apresentam consistência aceitável para a continuidade da análise.

No gerenciamento de áreas contaminadas, a aplicação de métodos multicritério permite integrar informações quantitativas e qualitativas. Parâmetros mensuráveis, como extensão da contaminação, volume de solo impactado e propriedades hidrogeológicas, podem ser avaliados em conjunto com condições relacionadas às fontes, aos receptores, às matrizes ambientais impactadas e às restrições operacionais. Essa possibilidade é compatível com aplicações recentes do AHP e de outros métodos multicritério em estudos de contaminação e remediação ambiental (Alishirazi; Salmak; Gitipour, 2023; Chorol; Gupta, 2023).

Uma forma de operacionalizar essa avaliação consiste na construção de uma matriz de decisão. Nessa estrutura, as alternativas recebem pontuações de acordo com seu desempenho ou enquadramento em cada critério. Posteriormente, as pontuações são combinadas com os pesos dos critérios, resultando em índices que possibilitam comparar e hierarquizar as alternativas avaliadas.

Dessa forma, a análise multicritério pode contribuir para o gerenciamento de áreas contaminadas ao organizar informações técnicas de diferentes naturezas e conferir maior

rastreabilidade à definição de prioridades. A abordagem fornece, portanto, a base conceitual para o desenvolvimento da matriz de decisão aplicada neste trabalho.

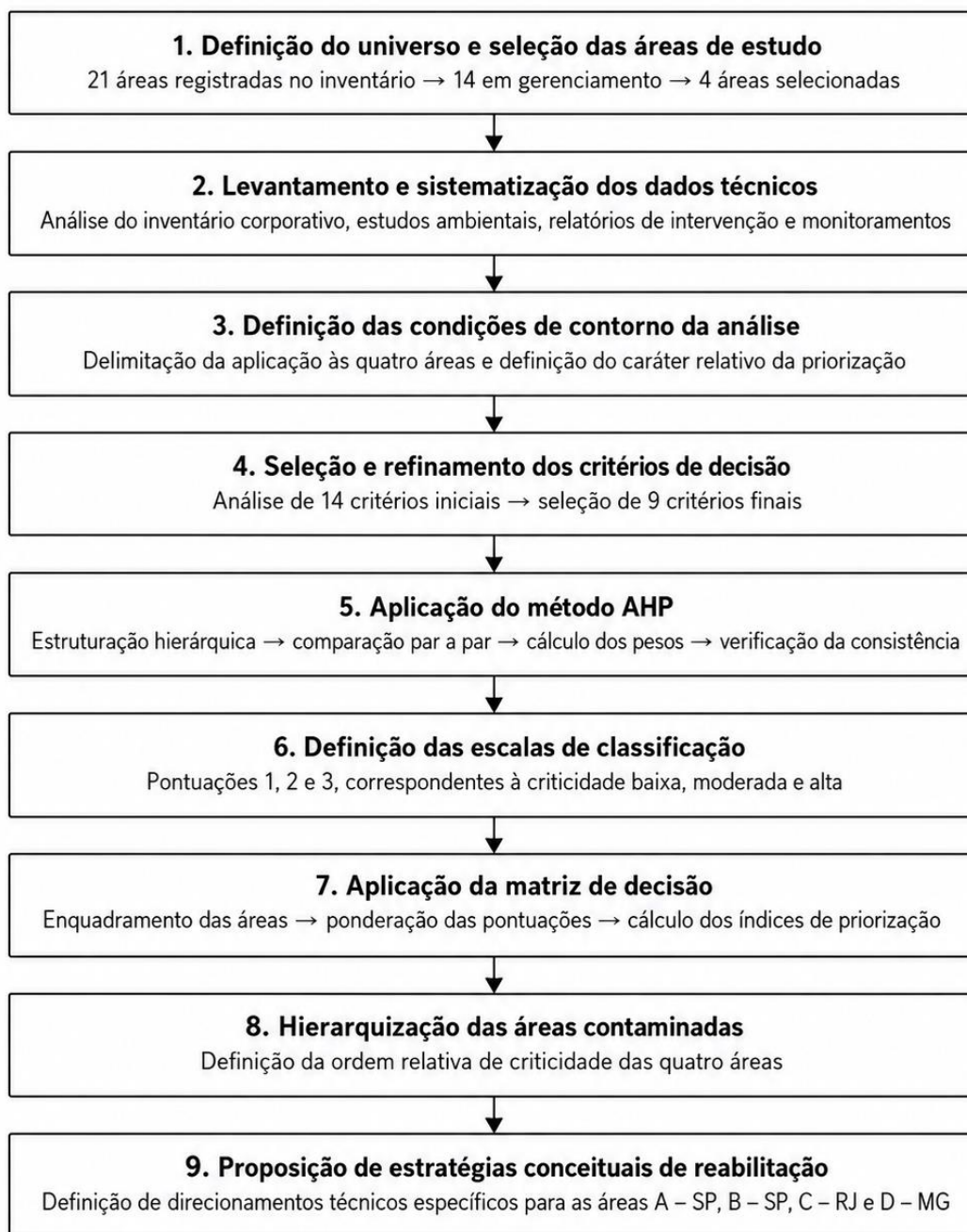
4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido como um estudo de caso aplicado ao gerenciamento de áreas contaminadas de uma companhia do setor de logística. A pesquisa baseou-se em dados secundários provenientes do inventário corporativo, de relatórios técnicos ambientais e de documentos associados aos processos de gerenciamento conduzidos junto aos órgãos ambientais competentes.

A abordagem metodológica combinou análise documental, sistematização de informações técnicas e tratamento quantitativo dos dados por meio de uma matriz multicritério. O método AHP foi utilizado para determinar a importância relativa dos critérios, enquanto as quatro áreas foram avaliadas por escalas de classificação e comparadas por meio de soma ponderada.

As etapas metodológicas compreenderam: seleção das áreas de estudo; levantamento e sistematização dos dados; definição das condições de contorno; seleção e refinamento dos critérios; aplicação do AHP; definição das escalas de classificação; atribuição das pontuações; cálculo do índice final de priorização; e proposição de estratégias conceituais de reabilitação para as quatro áreas. A sequência geral do trabalho é apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Etapas metodológicas do trabalho



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

4.1. Delineamento do estudo e fontes de dados

O estudo foi desenvolvido a partir de informações constantes no banco de dados da companhia, provenientes de estudos ambientais, relatórios técnicos e documentos institucionais. Não foram realizadas novas campanhas de campo, coletas de amostras ou

análises laboratoriais, sendo a avaliação fundamentada exclusivamente nos dados secundários disponíveis.

Inicialmente, realizou-se a análise documental das legislações ambientais, normas técnicas e diretrizes aplicáveis ao gerenciamento de áreas contaminadas. Essa etapa teve como objetivo identificar os elementos técnicos e legais relacionados à investigação, avaliação de risco, intervenção, monitoramento e reabilitação ambiental que poderiam fundamentar a definição dos critérios da matriz.

Também foram consultados documentos específicos das áreas analisadas, incluindo avaliações preliminares, investigações confirmatórias e detalhadas, investigações complementares, avaliações de risco à saúde humana, planos de intervenção, relatórios de operação de sistemas de remediação, monitoramentos do solo e da água subterrânea e documentos relacionados aos processos conduzidos perante os órgãos ambientais.

As informações levantadas foram organizadas de forma padronizada para permitir a comparação entre as áreas. A síntese dos dados técnicos utilizados, incluindo as fontes de contaminação, os estudos executados, as intervenções realizadas e a condição atual de gerenciamento, é apresentada no Apêndice A.

4.2. Universo de análise e seleção das áreas de estudo

O universo de análise foi constituído pelas áreas registradas no Inventário de Áreas Contaminadas da companhia, atualizado em 2026. O documento reúne o histórico dos processos de gerenciamento sob responsabilidade da empresa, incluindo tanto as áreas ainda em acompanhamento quanto aquelas já reabilitadas.

A companhia possui 21 áreas contaminadas registradas em seu inventário. Desse total, sete foram reabilitadas e 14 permanecem com processos ativos de gerenciamento. As áreas reabilitadas continuam registradas no documento, uma vez que o inventário preserva o histórico das ocorrências, dos estudos e das medidas adotadas ao longo do processo de gerenciamento.

As 14 áreas ainda em gerenciamento permanecem sob acompanhamento técnico e controle ambiental. Nesses locais, foram adotadas medidas de investigação, intervenção e monitoramento, além de ações emergenciais quando necessárias, como remoção de fase livre, restrição de acesso ou uso, interrupção ou eliminação de fontes e reforma ou desativação de estruturas potencialmente contaminantes.

Antes do início desta pesquisa, a Gerência de Gestão Ambiental da companhia havia selecionado quatro áreas para análise prioritária. A seleção foi realizada mediante avaliação técnica qualitativa e com base na experiência dos profissionais responsáveis pelo gerenciamento, sem aplicação de indicadores padronizados, sistema de pontuação ou procedimento formal de hierarquização.

Entre os aspectos considerados pela companhia estavam o longo período de gerenciamento, a recorrência de estudos complementares, a realização de sucessivas campanhas de remediação, a persistência ou o reaparecimento de fase livre e a dificuldade de encerramento dos casos. Dessa forma, a escolha das quatro áreas antecedeu o desenvolvimento da matriz multicritério proposta neste trabalho.

As quatro áreas selecionadas permaneciam classificadas pelos órgãos ambientais como áreas sob intervenção, ainda que algumas estivessem em períodos de monitoramento. Considerando o caráter dinâmico dos processos de gerenciamento, adotou-se como referência a condição consolidada na atualização do inventário de 2026, que manteve o cenário registrado em 2025. Alterações posteriores à conclusão do levantamento não foram incorporadas à análise.

Para preservar a identificação dos empreendimentos, foram adotadas as denominações Área A – SP, Área B – SP, Área C – RJ e Área D – MG. As áreas A e B estão localizadas no estado de São Paulo, a Área C no Rio de Janeiro e a Área D em Minas Gerais.

4.3. Condições de contorno e abrangência da análise

A análise multicritério foi delimitada às quatro áreas selecionadas para este trabalho, não tendo como objetivo constituir uma ferramenta universal de classificação de áreas contaminadas. O ranking obtido representa, portanto, uma priorização relativa dentro do conjunto avaliado e deve ser interpretado de acordo com as características e os dados disponíveis para essas alternativas.

As quatro áreas já apresentavam condição ambiental relevante no contexto do gerenciamento de áreas contaminadas. Todas estavam classificadas como áreas sob intervenção e possuíam longo histórico de gerenciamento, persistência da contaminação e necessidade de intervenções e monitoramentos sucessivos. A matriz não teve a finalidade de diferenciar áreas contaminadas de áreas não contaminadas, mas de identificar diferenças de criticidade entre casos previamente considerados prioritários pela companhia.

No presente estudo, a criticidade foi entendida como a combinação entre o alcance potencial da contaminação, a persistência das fontes, a magnitude do passivo ambiental, o potencial de transporte dos contaminantes e as condições técnicas e operacionais necessárias para a reabilitação. A avaliação não se limitou, portanto, à confirmação da contaminação, mas incorporou fatores que influenciam sua complexidade e seu gerenciamento.

Embora apresentem diferenças hidrogeológicas, as áreas possuem características suficientemente comparáveis quanto aos contaminantes predominantes e aos mecanismos gerais de transporte, permitindo sua avaliação conjunta. As diferenças internas foram representadas, entre outros parâmetros, pelo critério condutividade hidráulica.

Os contaminantes identificados são predominantemente relacionados a hidrocarbonetos, embora também tenham sido registrados outros grupos de substâncias. As faixas de classificação foram construídas para captar diferenças relativas entre as quatro alternativas, especialmente aquelas relacionadas à persistência da contaminação, ao alcance potencial, à magnitude do passivo e às restrições de implantação das medidas corretivas.

Consequentemente, os critérios, as escalas e os limites adotados não devem ser aplicados diretamente a outras áreas sem revisão prévia. Uma utilização ampliada da matriz exigiria validação dos critérios e adaptação das faixas às características ambientais, hidrogeológicas, legais e operacionais do novo conjunto analisado.

4.4. Levantamento e sistematização das informações técnicas

Após a seleção das áreas, foram levantadas as informações necessárias para a construção e o preenchimento da matriz de decisão. Os dados foram obtidos nos documentos técnicos disponíveis e organizados em planilha eletrônica, de modo a permitir a comparação entre as quatro alternativas.

A sistematização contemplou informações relacionadas às fontes de contaminação, aos contaminantes identificados, às matrizes ambientais afetadas, à presença de fase livre, às características hidrogeológicas, à delimitação da contaminação, às intervenções executadas, às restrições operacionais e à condição atual de cada processo.

Também foram analisados os registros históricos para identificar a ocorrência ou reaparecimento de fase livre, a permanência de fontes ativas, a extensão das plumas, o volume estimado de solo contaminado e a diversidade dos contaminantes. Quando havia mais de um

documento para a mesma área, priorizaram-se as informações mais recentes e tecnicamente consolidadas.

Os dados foram organizados de forma homogênea entre as alternativas. Nos casos em que os relatórios apresentavam informações em formatos ou unidades distintos, procedeu-se à compatibilização antes da atribuição das pontuações. Informações não disponíveis ou sem precisão suficiente não foram estimadas exclusivamente para preenchimento da matriz.

4.5. Definição e seleção dos critérios de decisão

A definição dos critérios foi fundamentada nas legislações e diretrizes técnicas analisadas, na literatura especializada e nos documentos das áreas estudadas. Foram considerados elementos relacionados ao risco, aos bens a proteger, às fontes de contaminação, às matrizes ambientais impactadas, à fase livre, ao comportamento da pluma e às condições de intervenção e reabilitação.

Inicialmente, foram considerados 14 critérios potencialmente aplicáveis à avaliação da criticidade. A seleção e o refinamento foram realizados conjuntamente pela autora, pelos orientadores e pela responsável técnica da companhia, considerando a relevância para o gerenciamento, a disponibilidade dos dados, a capacidade de diferenciação entre as alternativas e a ausência de sobreposição entre os parâmetros.

Após essa análise, nove critérios foram mantidos e cinco foram excluídos. O processo de seleção e as respectivas justificativas são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Critérios inicialmente considerados e justificativa da seleção final.

Critério inicialmente considerado	Situação	Justificativa da decisão
Abrangência do risco	Mantido	Representa o alcance potencial da contaminação em relação aos receptores e aos limites da área operacional, constituindo dimensão central da criticidade ambiental.
Interferência operacional da remediação	Mantido	Representa as restrições práticas para implantação das medidas corretivas em áreas em operação. Foi mantido com importância secundária em relação aos fatores ambientais.

Critério inicialmente considerado	Situação	Justificativa da decisão
Presença de fonte ativa	Mantido	Indica a possibilidade de continuidade do aporte de contaminantes ao meio e influencia a persistência da contaminação e a efetividade das intervenções.
Presença de fase livre	Mantido	Representa a ocorrência de contaminante em fase separada, associada à presença de massa disponível e à necessidade de medidas específicas de controle e remoção.
Extensão da pluma de contaminação	Mantido	Expressa a magnitude espacial da contaminação e permite diferenciar as áreas quanto ao alcance do passivo ambiental.
Volume estimado de solo contaminado	Mantido	Representa a magnitude física do passivo e o porte potencial das ações de intervenção.
Velocidade de espalhamento da contaminação	Excluído	Apresentou comportamento semelhante ao da condutividade hidráulica e resultou nas mesmas pontuações, reduzindo sua contribuição adicional à matriz. Manteve-se a condutividade por ser um parâmetro diretamente mensurável, mais estável e relevante para a seleção e o desempenho das técnicas de remediação.
Tempo de remediação	Excluído	As quatro áreas apresentam histórico prolongado de gerenciamento e intervenções ainda não concluídas. O aspecto foi tratado como condição de contorno, pois apresentava baixa capacidade de diferenciação entre as alternativas.
Matrizes ambientais impactadas	Mantido	Permite avaliar a amplitude ambiental da contaminação, considerando o número de compartimentos afetados.
Tempo de exposição à contaminação	Excluído	Os documentos não permitiam determinar de maneira homogênea o tempo efetivo de exposição dos receptores. Os períodos registrados estavam relacionados principalmente ao tempo de identificação ou gerenciamento, que variava aproximadamente entre 14 e 21 anos e foi tratado como condição comum às áreas.
Diversidade de contaminantes	Mantido	Representa a complexidade química do passivo, pois diferentes classes de contaminantes podem demandar estratégias distintas de investigação, remediação e monitoramento.
Condutividade hidráulica do meio	Mantido	Influencia o transporte dos contaminantes dissolvidos e a aplicabilidade de determinadas técnicas de remediação, constituindo parâmetro relevante para diferenciar as condições hidrogeológicas.

Critério inicialmente considerado	Situação	Justificativa da decisão
Classificação perante o órgão ambiental	Excluído	As quatro áreas apresentavam a mesma condição de área sob intervenção. Como não havia variação entre as alternativas, essa característica foi adotada como condição de contorno, e não como critério de hierarquização.
Eficiência de tratamento	Excluído	Não havia informações padronizadas e suficientemente completas para estimar a eficiência das intervenções nas quatro áreas. As diferenças nos períodos de operação, indicadores de desempenho e registros de massa removida impediam uma comparação equivalente.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A exclusão dos cinco critérios não significa que esses aspectos sejam irrelevantes para o gerenciamento de áreas contaminadas. A decisão decorreu da baixa capacidade de diferenciação, da sobreposição com outros parâmetros ou da indisponibilidade de dados comparáveis para todas as áreas.

A seleção final buscou evitar dupla contagem, reduzir a subjetividade e manter critérios capazes de representar as dimensões ambientais, hidrogeológicas e operacionais consideradas relevantes para a priorização.

Os nove critérios finais foram:

- 1) abrangência do risco;
- 2) matrizes ambientais impactadas;
- 3) presença de fonte ativa;
- 4) presença de fase livre;
- 5) condutividade hidráulica do meio;
- 6) extensão da pluma de contaminação;
- 7) volume estimado de solo contaminado;
- 8) diversidade de contaminantes;
- 9) interferência operacional da remediação.

4.6. Estruturação da matriz e aplicação do método AHP

Após a definição dos critérios de decisão, procedeu-se à estruturação da matriz multicritério e à determinação da importância relativa de cada parâmetro. Para essa finalidade,

utilizou-se o método Processo Analítico Hierárquico (AHP), aplicado à organização hierárquica do problema, à comparação par a par dos critérios, ao cálculo dos respectivos pesos e à verificação da consistência dos julgamentos. As etapas adotadas são descritas nas subseções seguintes, enquanto o detalhamento dos cálculos é apresentado no Apêndice B.

4.6.1. Estrutura hierárquica do problema

A estruturação da matriz foi fundamentada no método AHP, proposto por Saaty (1980). O método foi utilizado para estabelecer a importância relativa dos nove critérios de decisão. A estrutura hierárquica foi composta por três níveis. No primeiro nível, foi definido o objetivo de priorizar as áreas contaminadas quanto à criticidade relativa. No segundo nível, foram posicionados os nove critérios de decisão. No terceiro nível, foram inseridas as quatro alternativas correspondentes às áreas A – SP, B – SP, C – RJ e D – MG.

Neste trabalho, o AHP foi aplicado especificamente à determinação dos pesos dos critérios. As quatro áreas não foram comparadas par a par. Sua avaliação foi realizada posteriormente por meio de escalas de classificação com pontuações de 1, 2 e 3.

4.6.2. Comparação par a par dos critérios

As comparações par a par foram realizadas com base na escala fundamental de Saaty, originalmente definida entre 1 e 9. Para este estudo, adotaram-se os valores 1, 3 e 5, correspondentes, respectivamente, à igual importância, à importância moderada e à importância forte de um critério em relação a outro.

A utilização de uma escala reduzida buscou facilitar a diferenciação entre os julgamentos e reduzir o emprego de níveis intermediários de difícil distinção. Quando os critérios foram considerados igualmente importantes, atribuiu-se o valor 1. Quando o critério da linha foi considerado mais importante que o critério da coluna, foram atribuídos os valores 3 ou 5.

As comparações inversas receberam os valores recíprocos $1/3$ ou $1/5$, mantendo a propriedade de reciprocidade da matriz. A diagonal principal recebeu valor 1, pois representa a comparação de cada critério com ele próprio.

A seleção final dos critérios e os julgamentos de importância relativa foram discutidos conjuntamente pela autora, pelos orientadores e pela responsável técnica da companhia. As

decisões foram fundamentadas nos documentos analisados, nas diretrizes técnicas e legais e na experiência dos participantes com o gerenciamento das áreas estudadas.

4.6.3. Obtenção dos pesos e verificação da consistência

Para obtenção dos pesos, foram somados inicialmente os valores de cada coluna da matriz de comparação. Em seguida, cada elemento foi dividido pelo somatório da respectiva coluna, gerando a matriz normalizada.

O vetor de prioridade foi calculado pela média dos valores normalizados de cada linha, representando o peso relativo de cada critério. Quanto maior o peso, maior sua influência na composição do índice final de priorização.

A consistência dos julgamentos foi avaliada por meio do Índice de Consistência (CI) e da Razão de Consistência (CR). Para isso, a matriz original foi multiplicada pelo vetor de pesos, e os componentes resultantes foram utilizados para obtenção do autovalor máximo da matriz.

Adotou-se como limite de aceitabilidade uma Razão de Consistência inferior a 0,10. Valores abaixo desse limite indicam que as comparações apresentam coerência lógica suficiente para aplicação dos pesos na matriz de decisão.

O desenvolvimento matemático, as equações, a matriz de comparação, a normalização, o cálculo dos pesos e a verificação da consistência são apresentados detalhadamente no Apêndice B.

4.7. Definição das escalas de classificação

Após a determinação dos pesos, foram construídas escalas de classificação para avaliar as quatro áreas em cada critério. As pontuações variaram entre 1, 2 e 3, correspondendo, respectivamente, às condições de baixa, moderada e alta criticidade relativa.

As faixas foram estabelecidas a partir dos dados técnicos disponíveis, das condições observadas no conjunto analisado e da função de cada critério no gerenciamento de áreas contaminadas. Valores mais elevados foram associados às condições consideradas mais críticas.

Para os parâmetros quantitativos, como condutividade hidráulica, extensão da pluma e volume estimado de solo contaminado, foram definidos intervalos numéricos. Para os critérios

qualitativos, como presença de fonte ativa, fase livre e interferência operacional, foram estabelecidas condições descritivas de enquadramento.

As faixas foram construídas para diferenciar as quatro alternativas e não representam limites universais aplicáveis a qualquer área contaminada. Sua interpretação deve permanecer vinculada às condições de contorno definidas para o trabalho.

Quando os documentos apresentavam informações divergentes entre diferentes períodos, considerou-se a condição mais recente tecnicamente consolidada. Registros históricos relevantes, como reaparecimento de fase livre, também foram incorporados quando representavam a condição atual ou a persistência do passivo.

4.8. Aplicação da matriz e cálculo do índice de priorização

As quatro áreas foram enquadradas nas faixas de classificação de cada critério, resultando em uma matriz de pontuações brutas. Cada pontuação foi multiplicada pelo peso correspondente, obtendo-se a contribuição ponderada de cada critério para cada alternativa.

A soma das contribuições ponderadas resultou na pontuação global de cada área. Posteriormente, os valores foram normalizados em relação ao somatório das pontuações das quatro alternativas, permitindo a apresentação dos resultados em percentual.

Os índices normalizados representam a participação relativa de cada área no conjunto analisado e não correspondem a percentuais absolutos de contaminação ou risco. A normalização não altera a ordem das alternativas, mas facilita a apresentação e a comparação dos resultados.

As áreas foram organizadas em ordem decrescente de pontuação, resultando no ranking de criticidade relativa. Esse ranking foi utilizado para indicar a ordem de prioridade para o direcionamento das ações de gerenciamento e reabilitação.

Os cálculos foram realizados em planilha eletrônica desenvolvida no Microsoft Excel. A planilha integrou a matriz de comparação, a normalização, os pesos, a verificação da consistência, as pontuações das áreas, as somas ponderadas e os índices finais. O memorial completo dos cálculos é apresentado no Apêndice B.

4.9. Proposição das estratégias conceituais de reabilitação

Após a hierarquização, foram avaliadas estratégias conceituais de reabilitação para cada uma das quatro áreas. As propostas consideraram as condições ambientais, hidrogeológicas, operacionais e de gerenciamento identificadas nos documentos técnicos.

Essa etapa teve caráter conceitual e não correspondeu ao dimensionamento de sistemas, à elaboração de projetos executivos ou à definição definitiva de planos de intervenção. As alternativas propostas deverão ser posteriormente avaliadas por estudos específicos, ensaios de aplicabilidade, projetos-piloto e análises de viabilidade técnica, ambiental e econômica.

A proposição foi orientada pela literatura especializada em remediação de áreas impactadas por hidrocarbonetos, especialmente Soriano et al. (2023), pelas diretrizes dos órgãos ambientais e pelas características particulares de cada área.

Foram considerados, conforme aplicável:

- atualização e complementação do modelo conceitual;
- confirmação ou eliminação de fontes remanescentes;
- remoção ou controle de fase livre;
- tratamento das fases dissolvida e residual;
- contenção ou controle da migração;
- adequação ou substituição de estruturas;
- compatibilização das medidas com as atividades operacionais;
- monitoramento da resposta do meio;
- definição de critérios para encerramento ou transição das intervenções.

As estratégias foram organizadas de maneira integrada e sequencial, evitando a recomendação isolada de uma única técnica. Essa abordagem considerou que a reabilitação pode depender da combinação de ações de investigação complementar, controle da fonte, remoção de massa, tratamento e monitoramento.

A posição obtida no ranking foi utilizada para indicar a ordem de prioridade entre as áreas, mas não como único fundamento para a proposição das estratégias. As recomendações técnicas foram definidas individualmente, de acordo com as limitações e necessidades de cada caso.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da sistematização do inventário corporativo, a caracterização das quatro áreas selecionadas, a aplicação da matriz multicritério e os direcionamentos técnicos propostos para sua reabilitação. Inicialmente, é apresentado o panorama das áreas contaminadas sob responsabilidade da companhia. Em seguida, são discutidas as características dos casos avaliados, os pesos obtidos pelo método AHP, a consistência dos julgamentos, o ranking de criticidade relativa e a influência dos critérios sobre a posição de cada alternativa. Por fim, são apresentadas estratégias conceituais de reabilitação específicas para as quatro áreas, considerando suas condições ambientais, hidrogeológicas, operacionais e de gerenciamento.

5.1. Panorama do gerenciamento de áreas contaminadas da companhia

Esta subseção apresenta a síntese do inventário corporativo de áreas contaminadas, considerando sua distribuição por unidade federativa, fase de gerenciamento, principais contaminantes, atividades associadas às fontes e tempo de acompanhamento. A análise permite contextualizar o universo de passivos ambientais sob responsabilidade da companhia e compreender o cenário no qual foram selecionadas as quatro áreas avaliadas neste estudo.

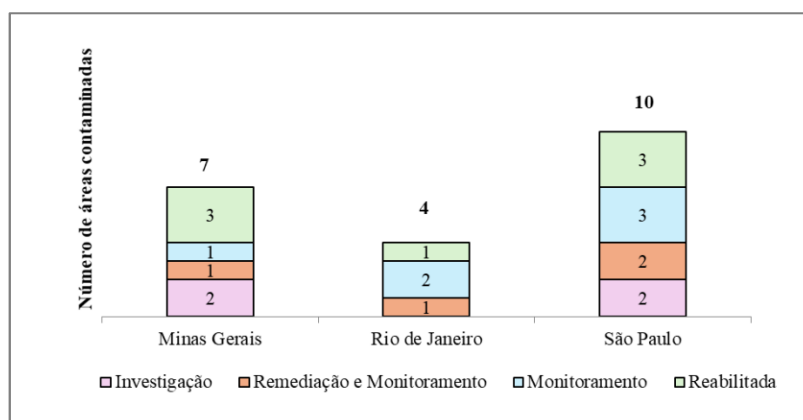
5.1.1. Distribuição das áreas e fases de gerenciamento

A sistematização do Inventário de Áreas Contaminadas da companhia identificou 21 áreas registradas em seu histórico de gerenciamento. Desse total, sete já foram reabilitadas e 14 permanecem com processos ativos de gerenciamento. As áreas reabilitadas continuam registradas no inventário, uma vez que o documento preserva o histórico das ocorrências e das ações realizadas pela empresa.

Embora ainda não tenham sido reabilitadas, as 14 áreas com processos ativos permanecem sob acompanhamento técnico e controle ambiental. Nessas áreas, já foram adotadas medidas de investigação, intervenção e monitoramento, além de ações emergenciais quando necessárias. Entre as medidas mais recorrentes estão a remoção de fase livre, o monitoramento do solo e da água subterrânea, a restrição de acesso ou de uso, a interrupção ou eliminação de fontes e a reforma ou desativação de estruturas potencialmente contaminantes.

A distribuição das áreas por unidade federativa e fase de gerenciamento é apresentada na Figura 11. São Paulo concentra dez registros, seguido por Minas Gerais, com sete, e Rio de Janeiro, com quatro. Quanto à fase de gerenciamento, sete áreas estão reabilitadas, seis encontram-se em monitoramento, quatro em remediação e monitoramento e quatro permanecem em investigação.

Figura 11 – Distribuição de áreas contaminadas por unidade federativa e fase de gerenciamento.



Fonte: Elaborado pela autora a partir do Inventário de Áreas Contaminadas da companhia (2025).

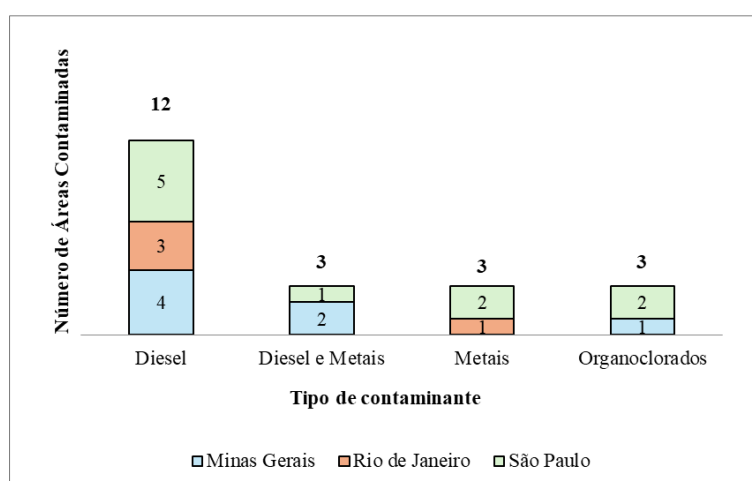
A existência de áreas em diferentes fases demonstra que o inventário corporativo reúne casos com distintos níveis de avanço. Entretanto, o número de áreas ainda submetidas à investigação, à remediação ou ao monitoramento evidencia que o gerenciamento não se encerra com a aplicação isolada de uma técnica. A progressão do processo depende da consolidação do modelo conceitual, do controle das fontes, da avaliação de risco, da comprovação do desempenho das medidas de intervenção e do acompanhamento da qualidade ambiental.

Essa interpretação está de acordo com as diretrizes nacionais e estaduais para o gerenciamento de áreas contaminadas. A Resolução CONAMA nº 420/2009 estabelece que a reabilitação deve conduzir a área a condições compatíveis com o uso declarado, enquanto os procedimentos da CETESB organizam o processo em etapas de identificação, intervenção, monitoramento para encerramento e reconhecimento da reabilitação (Brasil, 2009; CETESB, 2017).

5.1.2. Contaminantes e duração dos processos de gerenciamento

Os principais contaminantes identificados nas áreas são o óleo diesel, os metais e os compostos organoclorados. A distribuição desses contaminantes entre os estados é apresentada na Figura 12 e evidencia a predominância de substâncias relacionadas às atividades de abastecimento, armazenamento de combustíveis, manutenção e lavagem de peças e equipamentos.

Figura 12 – Distribuição das áreas contaminadas por tipo de contaminante por unidade federativa.

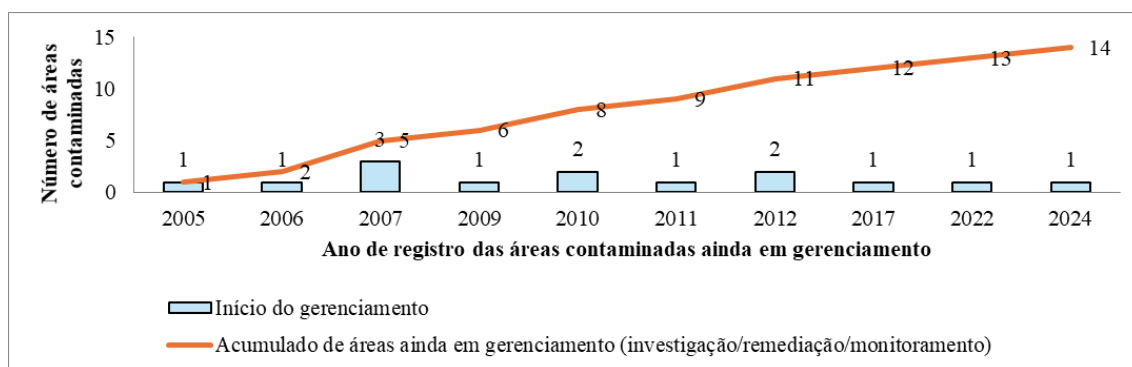


Fonte: Elaborado pela autora a partir do Inventário de Áreas Contaminadas da companhia (2025).

A predominância de hidrocarbonetos está relacionada às atividades historicamente desenvolvidas em oficinas, instalações de abastecimento, áreas de armazenamento e estruturas destinadas à manutenção de veículos e equipamentos. Esses contaminantes podem permanecer distribuídos entre o solo, a água subterrânea, a fase residual retida no meio poroso e, em determinadas condições, a fase livre.

Entre as 14 áreas que permanecem em processo de gerenciamento, algumas foram identificadas há mais de uma década, conforme demonstrado na Figura 13. O intervalo prolongado entre a identificação da contaminação e o encerramento dos casos evidencia a complexidade técnica desses processos, especialmente quando são necessárias investigações complementares, sucessivas intervenções e períodos prolongados de monitoramento.

Figura 13 – Linha do tempo das áreas ainda em processo de gerenciamento pela companhia.



Fonte: Elaborado pela autora a partir do Inventário de Áreas Contaminadas da companhia (2025).

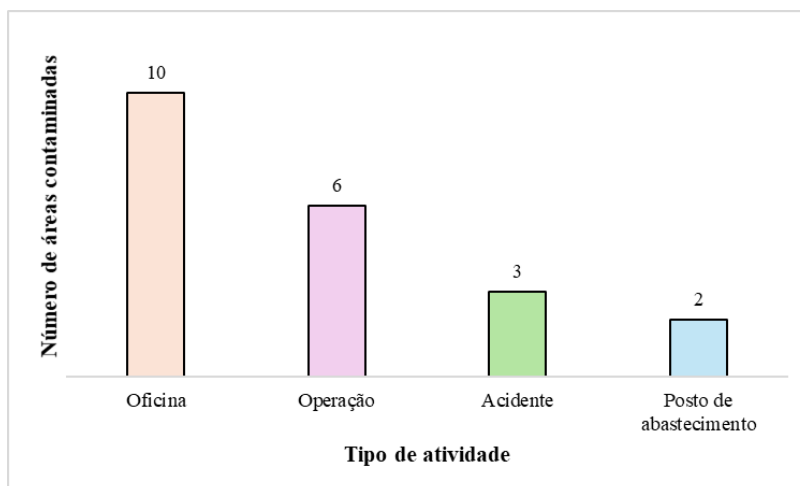
O longo período de gerenciamento não deve ser interpretado isoladamente como ausência de medidas de controle, uma vez que todas as áreas com processos ativos já foram submetidas a ações de investigação, intervenção ou monitoramento. Entretanto, a permanência de casos ativos por períodos prolongados indica que as estratégias adotadas não conduziram integralmente ao encerramento ou que novas informações demandaram atualização das medidas implementadas.

Soriano et al. (2023) destacam que a persistência de contaminantes na região da fonte constitui um dos principais fatores limitantes para o encerramento de casos envolvendo hidrocarbonetos. Os autores também demonstram que a reabilitação pode depender do encadeamento de diferentes técnicas, da atualização do modelo conceitual e da comprovação de tendências de redução das concentrações ao longo do monitoramento.

5.1.3. Atividades associadas às fontes e receptores potenciais

As principais fontes potenciais ou confirmadas de contaminação estão associadas às oficinas, aos postos de abastecimento, às atividades operacionais e aos acidentes ocorridos durante o transporte ou o manuseio de produtos, conforme apresentado na Figura 14. Essa distribuição reflete o histórico operacional da companhia e a diversidade de estruturas e atividades que podem contribuir para a introdução de contaminantes no solo e na água subterrânea.

Figura 14 – Número de áreas contaminadas na companhia por tipo de atividade.



Fonte: Elaborado pela autora a partir do Inventário de Áreas Contaminadas da companhia (2026).

Para o controle e a remediação das áreas, foram adotadas medidas como extração multifásica, remoção de solo contaminado, oxidação química, barreira hidráulica, eliminação ou adequação de fontes e monitoramento ambiental. A diversidade de fontes, contaminantes e condições do meio demonstra que os passivos precisam ser avaliados individualmente, não sendo adequada a aplicação de uma única solução a todos os casos.

A seleção das técnicas deve considerar a distribuição dos contaminantes, as fases em que se encontram, as características hidrogeológicas, a localização dos receptores e os objetivos estabelecidos para a intervenção. Segundo Soriano et al. (2023), o modelo conceitual deve orientar a escolha e o encadeamento das tecnologias, uma vez que sua aplicabilidade e seu desempenho dependem das condições específicas de cada área.

Todas as áreas contaminadas estão localizadas em terrenos operacionais fechados e com acesso restrito à companhia. Nesse contexto, os trabalhadores e terceiros autorizados constituem receptores internos potenciais. Entretanto, a contaminação não está necessariamente limitada ao ponto de origem, pois o deslocamento da água subterrânea pode promover a migração de contaminantes dissolvidos para locais externos.

A existência de receptores externos depende da direção e da extensão da pluma e das rotas de exposição identificadas nas avaliações de risco específicas. Assim, a possibilidade de migração para além dos limites da empresa não implica, por si só, a confirmação de exposição da população do entorno, devendo ser analisada individualmente em cada caso.

Entre as 14 áreas com processos ativos, quatro haviam sido previamente consideradas críticas pela Gerência de Gestão Ambiental da companhia. Essa seleção foi realizada por

avaliação técnica qualitativa e com base na experiência dos profissionais responsáveis, sem aplicação de indicadores padronizados, sistema de pontuação ou procedimento formal de hierarquização.

Foram considerados principalmente o longo período de gerenciamento, a recorrência de estudos complementares, a realização de sucessivas campanhas de remediação, a persistência ou o reaparecimento de fase livre e a dificuldade de encerramento dos casos. A ausência de uma ferramenta estruturada para comparar esses aspectos constituiu uma das motivações para o desenvolvimento da matriz multicritério.

5.2. Caracterização das áreas selecionadas

A caracterização das áreas selecionadas contempla o histórico de uso, as fontes potenciais ou confirmadas, os contaminantes identificados, os estudos realizados, as intervenções executadas e a condição de gerenciamento registrada na atualização de 2026. Essa sistematização permitiu identificar semelhanças e diferenças relevantes para o preenchimento da matriz de decisão e para a proposição das estratégias conceituais de reabilitação.

5.2.1. Área A – SP

Na Área A – SP, atualmente são desenvolvidas atividades de apoio ao transporte logístico, concentradas na manutenção de ativos. Anteriormente, o local era utilizado para o abastecimento de combustível e a manobra de veículos, dispondo de estrutura para armazenamento de óleo diesel em tanques e de uma caixa separadora de água e óleo construída em alvenaria.

Em 2012, foram identificadas áreas impactadas por óleo diesel e metais na região da antiga estrutura de armazenamento. Também foi constatada contaminação nas proximidades da caixa separadora de água e óleo enterrada, onde havia presença de óleo sobrenadante. A proximidade dessa estrutura com um córrego aumentou a relevância do caso, em função da presença de um receptor ambiental adjacente.

As antigas estruturas associadas às fontes de contaminação foram removidas, não havendo indicação atual de fonte ativa. O gerenciamento da área teve início em 2012, com avaliação preliminar, investigação confirmatória, investigação detalhada e análise de risco à saúde humana.

Nos anos seguintes, foram realizadas sucessivas investigações complementares e novas análises de risco, entre 2013 e 2024. Essa repetição de estudos demonstra a necessidade recorrente de atualização das informações técnicas e sugere que o modelo conceitual não foi consolidado integralmente nas etapas iniciais.

Como medida de intervenção, foi adotada a extração multifásica, executada em cinco campanhas ao longo de diferentes períodos entre 2012 e 2025. O último registro de fase livre ocorreu em janeiro de 2018, sendo observadas posteriormente ocorrências pontuais de iridescência e oleosidade. O sistema de remediação encontra-se paralisado desde março de 2025.

A ausência de fonte ativa e o longo período sem registro de fase livre diferenciam a Área A – SP das demais alternativas. Entretanto, as ocorrências posteriores de iridescência e oleosidade e as incertezas quanto à delimitação atual da pluma indicam a necessidade de confirmar a estabilidade ambiental após a paralisação do sistema.

A condição observada é compatível com uma possível transição entre a remediação ativa e o monitoramento para encerramento, desde que seja demonstrado que não há efeito rebote, migração em direção ao córrego ou permanência de massa recuperável em pontos localizados. A CETESB (2017) estabelece que essa transição deve ocorrer após o atendimento das metas de remediação e a comprovação do desempenho das medidas implantadas.

5.2.2. Área B – SP

Na Área B – SP, desenvolvem-se predominantemente atividades de manutenção mecânica de veículos de carga associadas às operações logísticas. No passado, a área foi utilizada para abastecimento de óleo diesel e contava com lavador de peças, configurando potenciais fontes de contaminação.

A contaminação por óleo diesel foi confirmada em 2011, associada principalmente às estruturas de abastecimento e ao lavador de peças. Desde então, a área passou por sucessivas etapas de investigação, avaliação de risco e estudos complementares, incluindo investigação confirmatória, investigação detalhada, avaliações ambientais complementares e análises de risco realizadas de forma recorrente entre 2012 e 2025.

Inicialmente, foi realizada extração multifásica emergencial entre 2012 e 2013. Posteriormente, foram desenvolvidos estudos de viabilidade para oxidação química e projeto-piloto com oxidação por eletrocinética, além de estimativas de custo para alternativas como

oxidação eletrocinética, escavação com destinação para aterro classe I e coprocessamento. Apesar dos resultados positivos observados em escala experimental, essas alternativas não foram implementadas integralmente.

Em 2017, foi realizada nova intervenção emergencial por extração multifásica. Em 2020, foram executadas atividades de escavação e remoção de aproximadamente 72 m³ de solo contaminado e 39 m³ de efluente. Durante a intervenção, foram identificadas tubulações anteriormente não mapeadas.

Esse achado indica que estruturas enterradas, fontes remanescentes ou caminhos preferenciais podem não ter sido completamente compreendidos nas etapas anteriores. A presença dessas incertezas reduz a segurança na seleção de uma nova tecnologia sem a atualização prévia do modelo conceitual.

O último registro de fase livre ocorreu em janeiro de 2025. Entre 2020 e 2022, não foram observadas ocorrências, o que indicava tendência de estabilização ao longo de dois ciclos hidrológicos. Entretanto, o reaparecimento posterior demonstra que essa condição não se manteve de forma definitiva.

Atualmente, a fase dissolvida apresenta concentrações superiores aos valores de referência para benzeno e TPH total, indicando persistência da contaminação. A proximidade do mangue e a possível influência das oscilações de maré tornam necessário avaliar se as variações hidráulicas locais interferem no movimento da pluma ou na redistribuição da fase livre.

A Área B – SP combina reaparecimento recente de fase livre, fase dissolvida com benzeno e TPH total e incertezas relacionadas às estruturas enterradas e aos caminhos preferenciais. A presença de edificações fechadas na região também justifica a avaliação da rota potencial de intrusão de vapores, sem que isso represente, neste momento, risco confirmado por essa via.

Esses fatores são coerentes com a observação de Soriano et al. (2023) de que a área-fonte e a presença de LNAPL (fase líquida não aquosa leve) podem limitar o encerramento dos casos. Segundo os autores, o refinamento do modelo conceitual deve anteceder a escolha das tecnologias e considerar a distribuição das fases livre, residual e dissolvida.

5.2.3. Área C – RJ

Na Área C – RJ, foi identificado histórico de contaminação por óleo diesel, com início das ações de gerenciamento em 2007. No passado, a área abrigava um lavador de peças de veículos, posteriormente desativado para a implantação de uma fossa séptica, de um refeitório e de uma área de lazer.

As antigas fontes relacionadas ao lavador e ao abastecimento foram eliminadas. Entretanto, a alteração do uso do local resultou na existência de edificações e áreas de permanência de pessoas sobre ou próximas à região contaminada, aumentando a complexidade da avaliação das rotas de exposição e da implantação de novas intervenções.

O gerenciamento da área inclui uma longa sequência de estudos ambientais iniciada em 2007 e mantida até 2024. Ao longo desse período, foram realizadas investigações ambientais, investigações detalhadas, monitoramentos da qualidade da água subterrânea e análises de risco à saúde humana.

Como intervenção, foi aplicada extração multifásica em diferentes campanhas entre 2011 e 2025. Também foi realizada reforma na área de armazenamento e abastecimento em 2011, com o objetivo de adequar estruturas operacionais e mitigar as fontes de contaminação.

Ao longo do monitoramento, observou-se tendência de redução nas concentrações de hidrocarbonetos totais de petróleo, indicando efetividade parcial das medidas implementadas. Entretanto, o boletim de operação mais recente registrou presença pontual de oleosidade em alguns pontos de amostragem.

Os resultados da fase dissolvida ainda indicaram concentrações de TPH total e benzeno superiores aos valores orientadores em poucos poços. O último registro de fase livre ocorreu em maio de 2020. As matrizes ambientais impactadas correspondem ao solo e à água subterrânea.

Embora as antigas fontes tenham sido eliminadas e não haja registro recente de fase livre, permanecem focos dissolvidos em parte da rede de monitoramento. A localização da contaminação sob refeitório, área de lazer, edificações e estruturas operacionais aumenta a complexidade da intervenção e limita a aplicação de medidas que exijam escavações extensas ou paralisação prolongada.

A população do entorno deve ser tratada como receptor potencial, uma vez que não há confirmação documental de exposição. A possibilidade de migração em direção às áreas

externas precisa ser verificada pela análise temporal das concentrações, da potenciometria e da delimitação da pluma.

A concentração das excedências em poucos poços pode favorecer a aplicação de tratamentos direcionados aos focos, em vez da implantação uniforme de medidas em toda a área. Essa abordagem é compatível com o princípio de selecionar tecnologias em função da distribuição efetiva da contaminação e das limitações operacionais do local (Soriano et al., 2023).

5.2.4. Área D – MG

Na Área D – MG, desenvolvem-se atividades relacionadas à inspeção, manutenção, substituição e lavagem de peças, além da troca e do abastecimento de óleo lubrificante e da realização de pequenos reparos em veículos. No histórico de uso da área, destacam-se atividades associadas à oficina e ao lavador de veículos.

Em 2010, foram identificados tanques e tubulações desativados, anteriormente utilizados para armazenamento de óleo diesel, óleo lubrificante e soda cáustica. Essas estruturas foram posteriormente removidas, e a fonte primária é considerada eliminada.

O histórico de gerenciamento é extenso, com registros desde 2005. Ao longo do período, foram realizados diagnósticos ambientais, avaliações preliminares, investigações ambientais, monitoramentos da qualidade da água subterrânea, análises de risco à saúde humana, levantamento geofísico e investigação complementar.

As ações de intervenção incluíram extração multifásica a partir de 2011, associada à aplicação de oxidação química por meio da injeção de peróxido de hidrogênio em diferentes concentrações. Também foi realizada reforma estrutural do lavador de veículos em 2011, visando à adequação das condições operacionais.

Os documentos analisados registraram resposta positiva à aplicação do peróxido de hidrogênio, demonstrando eficiência na redução da contaminação durante o período de aplicação. Contudo, essa redução não foi suficiente para conduzir ao encerramento do caso. Posteriormente, novas campanhas de extração multifásica foram executadas entre 2014 e 2025, encontrando-se atualmente interrompidas.

Foram observados registros recorrentes de fase livre, incluindo ocorrência na segunda campanha de monitoramento de 2024. Atualmente, a contaminação encontra-se

predominantemente na fase dissolvida, com concentrações de TPH total na água subterrânea superiores aos valores de referência.

Grande parte das concentrações é composta por Mistura Complexa Não Resolvida (MCNR). Essa composição é compatível com contaminação pretérita, ausência de liberação recente e ocorrência de processos de intemperismo e biodegradação ao longo do tempo.

A Área D – MG apresenta fonte primária eliminada, mas registros recorrentes de fase livre e permanência de TPH total na água subterrânea. A predominância de MCNR não elimina a necessidade de avaliar a mobilidade do produto residual nem sua contribuição para a fase dissolvida.

A resposta positiva anteriormente observada para a oxidação química constitui um elemento favorável à avaliação dessa técnica em focos remanescentes. Entretanto, uma nova aplicação deve ser precedida por reavaliação das características do meio, da distribuição da massa residual e da demanda de oxidante, evitando repetir intervenções sem a confirmação de sua aplicabilidade atual.

5.2.5. Síntese comparativa das condições das áreas

A comparação dos casos demonstra que as quatro áreas apresentam longo histórico de gerenciamento e necessidade de intervenções ou monitoramentos sucessivos, mas diferem quanto às condições atualmente dominantes.

Na Área A – SP, destacam-se a ausência de fonte ativa, o longo período sem fase livre e a necessidade de confirmar a estabilidade após a paralisação da remediação. Na Área B – SP, predominam o reaparecimento de fase livre, as incertezas sobre estruturas enterradas e a proximidade de receptor ambiental sensível.

Na Área C – RJ, a principal complexidade decorre da permanência da fase dissolvida sob edificações e estruturas operacionais, associada à existência de receptores potenciais. Na Área D – MG, sobressaem a recorrência de fase livre residual, a elevada dimensão do passivo e a presença de hidrocarbonetos intemperizados.

Essas diferenças justificam o emprego de uma análise multicritério, pois nenhuma área concentra isoladamente as condições mais desfavoráveis em todos os parâmetros. A posição final de cada alternativa resulta da combinação entre as pontuações atribuídas e a importância relativa dos critérios.

5.3. Resultados da matriz multicritério

A aplicação da matriz compreendeu a obtenção dos pesos dos critérios, a verificação da consistência dos julgamentos, a conversão das condições das áreas em pontuações padronizadas e o cálculo dos índices finais. Os resultados são apresentados a seguir e interpretados de acordo com as condições de contorno adotadas para o estudo.

5.3.1. Pesos dos critérios de decisão

O primeiro resultado da aplicação do AHP foi o vetor de prioridade apresentado na Tabela 1. Os maiores pesos foram atribuídos à abrangência do risco, às matrizes ambientais impactadas, à presença de fonte ativa e à presença de fase livre.

Tabela 1 – Vetor peso da prioridade dos critérios de decisão.

Ordem	Critério	Peso
1º	Abrangência do risco	21,7%
2º	Matrizes ambientais impactadas	16,5%
3º	Presença de fonte ativa	14,9%
4º	Presença de fase livre	13,4%
5º	Condutividade hidráulica do solo	11,9%
6º	Extensão da pluma de contaminação	7,4%
7º	Volume estimado de solo contaminado	6,6%
8º	Diversidade de contaminantes	4,3%
9º	Interferência operacional da remediação	3,2%

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Os pesos indicam que a matriz atribuiu maior influência aos critérios associados à criticidade ambiental direta. A abrangência do risco apresentou o maior peso, com 21,7%, pois representa o alcance potencial da contaminação em relação aos receptores e aos limites da área operacional.

As matrizes ambientais impactadas apresentaram o segundo maior peso, com 16,5%, evidenciando a importância da amplitude ambiental do impacto. Áreas em que a contaminação

afeta mais de um compartimento tendem a demandar investigação, intervenção e monitoramento mais complexos.

A presença de fonte ativa e a presença de fase livre também se destacaram, com 14,9% e 13,4%, respectivamente. Esses critérios estão associados à persistência da contaminação, pois representam continuidade do aporte de massa ou existência de produto em fase separada, capaz de alimentar as fases residual e dissolvida.

A relevância atribuída à fonte e à fase livre é coerente com a Resolução CONAMA nº 420/2009, que estabelece a necessidade de intervenção quando há fase livre, e com Soriano et al. (2023), que identificam a permanência de contaminantes na zona-fonte como um dos principais limitadores do encerramento dos casos.

A condutividade hidráulica apresentou peso intermediário, igual a 11,9%. Esse critério representa a influência do meio físico no transporte da contaminação e na aplicabilidade de técnicas baseadas em extração, bombeamento ou injeção de fluidos.

A extensão da pluma e o volume estimado de solo contaminado receberam pesos de 7,4% e 6,6%, respectivamente. Embora apresentem menor influência individual, esses critérios são importantes para representar a magnitude espacial e física do passivo ambiental.

A diversidade de contaminantes e a interferência operacional apresentaram os menores pesos, com 4,3% e 3,2%. A interferência operacional foi mantida por representar as limitações práticas para a implantação das medidas corretivas, mas recebeu menor peso para que as restrições da operação não se sobrepusessem às obrigações de controle e reabilitação.

De forma geral, a ordenação dos pesos demonstra que a matriz foi orientada prioritariamente pelos fatores relacionados à proteção dos receptores, à amplitude do impacto e à persistência da contaminação. Essa orientação é compatível com a abordagem baseada em risco adotada nas normas de gerenciamento de áreas contaminadas (Brasil, 2009; CETESB, 2017).

5.3.2. Verificação da consistência dos julgamentos

A consistência da matriz foi verificada pelos parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores utilizados para verificação de consistência na aplicação da matriz de decisão.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Ordem da matriz	n	9
Lambda max	$\lambda_{\max}$	9,51
Índice aleatório	RI	1,45
Índice de consistência	CI	0,06
Razão de consistência	CR	0,044

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A Razão de Consistência obtida foi igual a 0,044, inferior ao limite de 0,10 recomendado por Saaty (2002). Esse resultado indica coerência lógica aceitável entre os julgamentos utilizados na comparação par a par e permite a aplicação dos pesos na composição do índice final.

Embora o método envolva julgamentos técnicos, a verificação da consistência permite identificar contradições excessivas entre as comparações. Nesse caso, o valor obtido demonstra que os julgamentos apresentaram estabilidade suficiente para a continuidade da análise. O detalhamento dos cálculos é apresentado no Apêndice B.

5.3.3. Escalas de classificação e pontuações

Após a definição dos pesos, as informações técnicas foram convertidas em pontuações de 1, 2 e 3, correspondentes às condições de baixa, moderada e alta criticidade relativa. As faixas utilizadas são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Definição das escalas de classificação dos critérios para as avaliações das alternativas.

Pontuação por critério	Baixa	Moderada	Alta
	1	2	3
Abrangência do risco	Restrita à área operacional da empresa	Atinge ou pode atingir áreas adjacentes	Atinge ou pode atingir população do entorno
Matrizes ambientais impactadas	Uma matriz	Duas matrizes	Três ou mais matrizes
Presença de fonte ativa	Ausente ou eliminada	Ativa, mas controlada	Presente

Pontuação por critério	Baixa	Moderada	Alta
	1	2	3
Presença de fase livre	Ausente	Indícios ou ocorrência pontual	Presente
Condutividade hidráulica do solo	Menor que 1 cm/dia	Entre 1 e 10 cm/dia	Maior que 10 cm/dia
Extensão da pluma de contaminação	Até 1.500 m ²	Maior que 1.500 m ² e até 4.000 m ²	Acima de 4.000 m ²
Volume estimado de solo contaminado	Até 10.000 m ³	Maior que 10.000 m ³ e até 25.000 m ³	Acima de 25.000 m ³
Diversidade de contaminantes	Um tipo de contaminante	Não confirmado quantos tipos de contaminantes	Dois ou mais tipos de contaminantes
Interferência operacional da remediação	Não paralisa a operação	Paralisa a operação por meses	Paralisa a operação por anos

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

As escalas foram construídas para distinguir as condições observadas nas quatro áreas e não representam limites universais para aplicação em outros conjuntos de áreas contaminadas. A classificação moderada da diversidade foi definida como uma condição em que há uma classe confirmada e indícios de outra, evitando que a ausência de informação seja interpretada automaticamente como criticidade intermediária.

As pontuações resultantes demonstraram que nenhuma alternativa concentrou os valores máximos em todos os critérios. Esse comportamento confirma a necessidade de integração entre os parâmetros e explica a proximidade observada entre os índices finais. A matriz preenchida e o memorial de cálculo são apresentados no Apêndice B.

5.3.4. Ranking final das áreas

A combinação entre os pesos e as pontuações resultou no ranking apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado final da priorização das áreas contaminadas pela matriz de decisão aplicada.

Posição	Alternativa	Pontuação relativa
1º	Área B - SP	27,5%
2º	Área C - RJ	25,0%
3º	Área D - MG	24,3%
4º	Área A - SP	23,2%

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A Área B – SP obteve a maior pontuação relativa, com 27,5%, seguida pela Área C – RJ, com 25,0%, pela Área D – MG, com 24,3%, e pela Área A – SP, com 23,2%.

A diferença entre a primeira e a última alternativa foi de aproximadamente 4,3 pontos percentuais. Essa proximidade demonstra que nenhuma área pode ser considerada de baixa relevância. O ranking representa uma ordem relativa dentro de um conjunto previamente reconhecido como crítico, e não uma classificação absoluta de risco, contaminação ou urgência ambiental.

A normalização dos resultados apenas converteu as pontuações para uma escala percentual, sem modificar a ordem das alternativas. Portanto, o índice de 27,5% atribuído à Área B – SP não significa que a área apresente 27,5% de risco ou de contaminação, mas que sua pontuação corresponde a essa parcela do somatório obtido pelas quatro alternativas.

5.3.5. Influência dos critérios e interpretação do ranking

A primeira posição da Área B – SP foi determinada principalmente pelas pontuações elevadas nos critérios matrizes ambientais impactadas, presença de fase livre e presença de fonte ativa controlada. Embora a área não apresente os maiores valores de extensão da pluma ou de volume de solo contaminado, sua pontuação nos critérios de maior peso elevou o índice final.

O resultado demonstra que a criticidade relativa não depende exclusivamente da dimensão física do passivo. A presença de massa em fase livre, a continuidade ou o controle incompleto de fontes e o impacto em diferentes compartimentos ambientais podem influenciar mais intensamente a prioridade.

A Área C – RJ ocupou a segunda posição, principalmente em razão da abrangência potencial do risco, critério de maior peso na matriz. A possibilidade de migração em direção à

população do entorno elevou sua criticidade relativa, mesmo sem fonte ativa ou registro recente de fase livre.

Essa condição deve ser interpretada como potencial, e não como exposição confirmada. O resultado evidencia que a posição da Área C – RJ depende da necessidade de confirmar a tendência da pluma e as rotas de exposição, especialmente em razão da existência de edificações e áreas de permanência de pessoas.

A Área D – MG apresentou resultado próximo ao da Área C – RJ. Sua pontuação foi influenciada pela presença recorrente de fase livre e pelos maiores valores de extensão da pluma e volume estimado de solo contaminado entre as alternativas.

Entretanto, a menor abrangência do risco e a ausência de fonte ativa reduziram sua pontuação nos critérios de maior peso. Assim, a terceira posição reflete a combinação entre elevada magnitude do passivo e menor potencial relativo de exposição externa.

A Área A – SP apresentou a menor prioridade relativa. Essa posição está associada à eliminação das fontes, à ausência prolongada de fase livre e aos menores valores de volume contaminado e interferência operacional.

Contudo, a área apresentou a maior condutividade hidráulica e maior diversidade de contaminantes. Sua posição não representa ausência de necessidade de acompanhamento, mas indica que, comparativamente, as condições atuais são menos críticas do que aquelas observadas nas demais alternativas.

De forma geral, os resultados mostram que a priorização foi mais sensível aos critérios relacionados à exposição e à persistência da contaminação. A presença de fonte ativa, a ocorrência de fase livre e o número de matrizes impactadas tiveram papel relevante na diferenciação das áreas.

Esse comportamento é coerente com a finalidade da análise multicritério, que consiste em integrar critérios de diferentes naturezas e explicitar as compensações entre as alternativas. Estudos que utilizam métodos multicritério em problemas ambientais também destacam sua capacidade de combinar variáveis quantitativas e qualitativas e de tornar mais transparente o processo de decisão (Belton; Stewart, 2002; Alishirazi; Salmak; Gitipour, 2023; Chorol; Gupta, 2023).

5.4. Direcionamento técnico para reabilitação das áreas avaliadas

A hierarquização indicou uma ordem relativa de prioridade, mas não eliminou a necessidade de intervenção ou acompanhamento das demais áreas. Por essa razão, foram elaborados direcionamentos técnicos específicos para as quatro alternativas.

As propostas apresentam caráter conceitual e não substituem a atualização dos modelos conceituais, a elaboração ou revisão dos planos de intervenção, os estudos de viabilidade, os ensaios de tratabilidade, os projetos-piloto e os projetos executivos exigidos para a implantação das técnicas.

A seleção das medidas foi organizada em uma sequência de frentes de atuação: atualização do modelo conceitual; controle das fontes e da fase livre; controle da migração; tratamento das fases remanescentes; e monitoramento, avaliação de desempenho e encerramento.

Segundo Soriano et al. (2023), a definição das tecnologias deve ser orientada pelas preocupações identificadas no modelo conceitual, pelas propriedades do contaminante, pelas condições hidrogeológicas e pelos objetivos da remediação. Assim, a estratégia não deve se limitar à escolha isolada de uma técnica, mas considerar o encadeamento de medidas complementares.

5.4.1. Direcionamento técnico para a Área A – SP

A Área A – SP apresenta condição distinta das demais alternativas. As antigas estruturas associadas às fontes foram removidas, não havendo indicação de fonte ativa. O último registro de fase livre ocorreu em janeiro de 2018, embora tenham sido posteriormente observadas ocorrências pontuais de iridescência e oleosidade.

O sistema de extração multifásica foi paralisado em março de 2025. Essa condição sugere que a área pode estar em fase de transição entre a remediação ativa e o monitoramento para encerramento. Entretanto, a ausência de fase livre nos poços não demonstra, isoladamente, a eliminação de toda a massa residual.

A primeira medida recomendada consiste na atualização do modelo conceitual, com atenção à delimitação da pluma, à direção do fluxo subterrâneo e à possível conexão hidráulica com o córrego adjacente. Como não há confirmação de monitoramento direto do curso d'água,

deve-se avaliar inicialmente a suficiência da rede de poços localizada entre a antiga região-fonte e o receptor ambiental.

Também deve ser realizado acompanhamento posterior à paralisação do sistema, abrangendo diferentes condições sazonais. Esse monitoramento deve verificar a ocorrência de produto nos poços, a evolução das concentrações e eventual efeito rebote.

Caso as ocorrências de oleosidade estejam restritas a poucos pontos, podem ser adotadas medidas localizadas de recuperação passiva, *skimming* ou campanhas pontuais de extração multifásica. A retomada contínua do sistema somente se justifica caso seja demonstrada a existência de massa recuperável e benefício ambiental mensurável.

A atenuação natural monitorada pode ser considerada como etapa de polimento caso seja confirmada a eliminação da fonte, a estabilidade ou retração da pluma e a ausência de migração em direção ao córrego. Essa alternativa deve ser fundamentada em tendências temporais e evidências de degradação, e não apenas em resultados isolados.

Soriano et al. (2023) demonstram que o encerramento de casos requer comprovação da redução das concentrações e acompanhamento posterior às intervenções. De forma semelhante, a CETESB (2017) condiciona a transição para o monitoramento de encerramento ao atendimento das metas e à manutenção das medidas de controle aplicáveis.

Quadro 5 – Direcionamento técnico para reabilitação da Área A – SP.

Frete de atuação		Estratégias conceituais	Finalidade na Área A – SP
1º	Atualização do modelo conceitual	Revisão da delimitação da pluma, da direção do fluxo subterrâneo e da conexão hidráulica com o córrego	Confirmar a distribuição atual da contaminação e a proteção do receptor ambiental
2º	Verificação pós-remediação	Monitoramento após a paralisação do sistema, abrangendo diferentes condições sazonais	Verificar estabilidade e possível efeito rebote
3º	Tratamento localizado	Recuperação passiva, <i>skimming</i> ou campanhas pontuais de extração multifásica, caso haja massa recuperável	Tratar ocorrências residuais sem retomar desnecessariamente um sistema contínuo
4º	Polimento	Atenuação natural monitorada, condicionada à estabilidade da pluma	Favorecer e acompanhar a redução das concentrações remanescentes
5º	Encerramento	Monitoramento para encerramento e revisão das metas de reabilitação	Demonstrar a manutenção das condições ambientais após a interrupção da remediação

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A estratégia proposta para a Área A – SP é menos orientada à implantação imediata de uma nova tecnologia e mais direcionada à confirmação do desempenho já obtido. Sua menor posição no ranking é coerente com a ausência de fonte ativa e de fase livre persistente, mas não elimina a necessidade de confirmar a estabilidade após a paralisação do sistema.

5.4.2. Direcionamento técnico para a Área B – SP

A Área B – SP apresenta o cenário de maior prioridade relativa. Sua condição é marcada pelo reaparecimento de fase livre em janeiro de 2025, pela permanência de benzeno e TPH total na fase dissolvida e pela identificação de tubulações anteriormente não mapeadas.

Esses elementos indicam que o modelo conceitual pode não representar integralmente as estruturas enterradas, os caminhos preferenciais e a distribuição da massa residual. A primeira etapa deve, portanto, consistir em investigação direcionada à antiga área de abastecimento, ao lavador de peças, às tubulações e aos locais em que ocorreu o reaparecimento da fase livre.

A influência hidráulica do mangue e das oscilações de maré também deve ser verificada. Para isso, recomenda-se realizar monitoramento simultâneo dos níveis d'água, da ocorrência de fase livre e das concentrações nos poços posicionados entre a área contaminada e o mangue.

A caracterização da fase livre deve avaliar sua mobilidade, distribuição e recuperabilidade. Essa análise permitirá decidir se a retomada de *skimming* ou extração multifásica apresenta potencial de remoção relevante ou se a maior parte da massa se encontra retida no meio poroso.

Caso seja confirmada migração em direção ao mangue, poderão ser avaliadas medidas de contenção hidráulica ou implantação de barreira em posição tecnicamente adequada. A aplicação dessas medidas deve ser condicionada à confirmação da direção do fluxo e da tendência da pluma.

Para a fase dissolvida, podem ser avaliadas biorremediação estimulada e extração com tratamento, isoladamente ou em combinação. A escolha deve considerar as concentrações, a distribuição dos focos, a condutividade hidráulica e a capacidade de distribuição dos insumos no meio.

A presença de benzeno e de edificações fechadas na região também justifica a avaliação da rota potencial de intrusão de vapores. Essa recomendação não significa que exista risco

confirmado, mas que a possibilidade deve ser verificada e incorporada à atualização da avaliação de risco.

A necessidade de atualização do modelo conceitual e de controle da área-fonte está de acordo com Soriano et al. (2023), que destacam que as características hidrogeológicas, a fase do contaminante e as preocupações associadas ao LNAPL devem orientar a seleção das técnicas.

Quadro 6 – Direcionamento técnico para reabilitação da Área B – SP.

Frente de atuação		Estratégias preliminares	Finalidade na Área B - SP
1º	Atualização do modelo conceitual	Investigação da antiga zona-fonte, das tubulações, dos caminhos preferenciais e da influência hidráulica da maré	Reduzir incertezas sobre as fases livre, retida e dissolvida
2º	Caracterização da fase livre	Avaliação da mobilidade, distribuição e recuperabilidade do produto	Definir se a fase livre permanece tecnicamente recuperável
3º	Controle da fase livre	<i>Skimming</i> e/ou extração multifásica direcionada aos focos recuperáveis	Reduzir a massa móvel e prevenir redistribuição
4º	Controle da migração	Contenção hidráulica ou barreira, caso seja confirmado avanço em direção ao mangue	Proteger o receptor ambiental adjacente
5º	Tratamento da fase dissolvida	Biorremediação estimulada e/ou bombeamento e tratamento	Reduzir benzeno e TPH total na água subterrânea
6º	Avaliação de vapores	Investigação da rota potencial em ambientes fechados	Confirmar ou descartar a existência de via completa de exposição
7º	Monitoramento	Acompanhamento sazonal da fase livre, da pluma e da região próxima ao mangue	Verificar a efetividade das medidas e subsidiar ajustes

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A estratégia mantém a Área B – SP como o caso que demanda maior intensidade de investigação e intervenção. Contudo, evita indicar previamente uma única tecnologia, pois a seleção definitiva depende da confirmação da mobilidade do produto, da influência hidráulica do mangue e da distribuição dos focos residuais.

5.4.3. Direcionamento técnico para a Área C – RJ

Na Área C – RJ, as antigas fontes foram eliminadas. A contaminação afeta o solo e a água subterrânea e está localizada sob ou próxima ao refeitório, à área de lazer, às edificações e às estruturas operacionais.

O último registro de fase livre ocorreu em maio de 2020, mas permanecem ocorrências pontuais de oleosidade e concentrações de TPH total e benzeno em parte dos poços. A concentração das excedências em poucos pontos sugere a possibilidade de tratamento direcionado aos focos.

Antes da seleção da tecnologia, deve-se confirmar se esses pontos correspondem a massa residual localizada, flutuações sazonais, caminhos preferenciais ou porções não completamente delimitadas da pluma. A análise temporal das concentrações e dos níveis potenciométricos deve ser utilizada para verificar a possibilidade de expansão em direção ao entorno.

A população externa deve ser considerada receptor potencial, e não receptor com exposição confirmada. Recomenda-se revisar a rede de monitoramento e avaliar a necessidade de poços sentinela entre os focos identificados e os limites da área operacional.

A presença de edificações e áreas de permanência de pessoas também justifica a avaliação da rota de intrusão de vapores. Caso seja identificada via completa, podem ser necessárias medidas de engenharia compatíveis com a manutenção do uso das estruturas.

Em razão da elevada interferência operacional e da localização da contaminação sob instalações essenciais, tecnologias *in situ* tendem a ser mais compatíveis do que escavações extensas. A biorremediação estimulada pode ser avaliada nos focos dissolvidos, desde que estudos de tratabilidade indiquem condições geoquímicas e distribuição adequadas.

O bombeamento e tratamento pode ser empregado pontualmente para controle de focos ou da migração, mas sua operação prolongada deve ser avaliada em relação à massa efetivamente removida. Caso seja confirmada expansão da pluma, também poderão ser avaliadas barreiras hidráulicas ou reativas em posição a jusante.

A atenuação natural monitorada deve ser considerada apenas após a comprovação da estabilidade ou retração da pluma. Soriano et al. (2023) demonstram que técnicas biológicas e monitoramento de tendências podem contribuir para o encerramento, desde que as fontes estejam controladas e as condições do meio favoreçam a degradação.

Quadro 7 – Direcionamento técnico para reabilitação da Área C – RJ.

Frente de atuação		Estratégias conceituais	Finalidade na Área C – RJ
1º	Atualização do modelo conceitual	Delimitação dos focos, análise temporal da pluma e revisão ou instalação de poços sentinela	Confirmar a tendência de migração e a condição dos receptores externos
2º	Avaliação de vapores	Investigação sob o refeitório, áreas de permanência e edificações	Confirmar ou descartar a rota de intrusão de vapores
3º	Tratamento direcionado	Biorremediação estimulada nos focos, após estudo de tratabilidade	Reduzir benzeno e TPH dissolvidos com menor interferência operacional
4º	Controle localizado	Bombeamento e tratamento pontual ou barreira a jusante, caso haja expansão confirmada	Controlar focos persistentes e impedir avanço da pluma
5º	Medidas de engenharia	Mitigação de vapores, caso seja confirmada exposição em ambientes internos	Manter o uso seguro das edificações durante o gerenciamento
6º	Monitoramento e polimento	Atenuação natural monitorada, condicionada à estabilidade da pluma	Acompanhar o decaimento após o tratamento ativo

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A Área C – RJ exige uma estratégia que concilie a proteção dos receptores potenciais, o tratamento dos focos e a continuidade operacional. Sua segunda posição no ranking está relacionada principalmente à abrangência potencial do risco, mas a intervenção deve ser direcionada por evidências que confirmem a tendência da pluma e as rotas completas de exposição.

5.4.4. Direcionamento técnico para a Área D – MG

Na Área D – MG, os antigos tanques e tubulações foram removidos e a fonte primária é considerada eliminada. Contudo, houve registros recorrentes de fase livre, incluindo ocorrência em 2024, após diferentes campanhas de extração multifásica.

A contaminação permanece no solo e na água subterrânea, com TPH total acima dos valores de referência e predominância de MCNR. Essa composição é compatível com contaminação antiga e submetida a processos de intemperismo e biodegradação.

A primeira etapa deve avaliar por que a fase livre reapareceu após a interrupção do sistema. Deve-se distinguir entre produto móvel, produto residual redistribuído por oscilações do nível d'água e acúmulo localizado nos poços.

A análise das taxas históricas de recuperação e da resposta das campanhas anteriores pode indicar se a retomada da extração multifásica ou do *skimming* ainda apresenta benefício ambiental. Caso a recuperação de produto seja reduzida, a operação contínua de um sistema de extração pode não ser a estratégia mais eficiente.

A oxidação com peróxido de hidrogênio apresentou eficiência documentada em intervenções anteriores. Assim, uma nova aplicação pode ser considerada para focos remanescentes, desde que precedida por estudo de tratabilidade, avaliação da demanda de oxidante e análise da distribuição dos reagentes no meio.

Como a contaminação apresenta indícios de intemperismo e biodegradação, a biorremediação estimulada também pode ser avaliada como etapa complementar. Essa alternativa pode ser direcionada à massa dissolvida e residual após a remoção da fração móvel.

A atenuação natural monitorada poderá ser utilizada no polimento somente se forem confirmadas a estabilidade da pluma, a ausência de migração para receptores externos e a presença de condições geoquímicas favoráveis à degradação.

A possibilidade de combinar oxidação, tratamento biológico e monitoramento encontra respaldo nos estudos de Soriano et al. (2023), que demonstraram que diferentes contaminantes e fases de um mesmo caso podem demandar técnicas sucessivas e complementares.

Quadro 8 – Direcionamento técnico para reabilitação da Área D – MG.

Frente de atuação	Estratégias conceituais	Finalidade na Área D – MG
Atualização do modelo conceitual	Avaliação da distribuição da fase livre, da variação do nível d'água e dos focos residuais	Explicar a recorrência de produto após a interrupção do sistema
Avaliação da recuperabilidade	Análise das taxas históricas de recuperação e da mobilidade do produto	Verificar se a extração ativa ainda apresenta benefício
Recuperação localizada	<i>Skimming</i> ou extração multifásica direcionada, caso exista produto móvel	Remover a fração ainda recuperável
Tratamento da massa residual	Oxidação química localizada, condicionada a estudo de tratabilidade	Aproveitar a resposta anteriormente observada e tratar focos remanescentes
Tratamento biológico	Biorremediação estimulada	Favorecer a degradação das frações dissolvidas e residuais intemperizadas
Monitoramento e polimento	Atenuação natural monitorada e análise de tendência	Confirmar estabilidade, biodegradação e proteção dos receptores

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A estratégia para a Área D – MG deve evitar tanto a retomada automática da extração multifásica quanto a adoção imediata da atenuação natural. A decisão depende da diferenciação entre fase móvel, massa residual e fase dissolvida e da demonstração de que o tratamento ativo ainda proporciona benefício ambiental mensurável.

5.4.5. Síntese comparativa dos direcionamentos técnicos

As estratégias propostas refletem diferentes condições de gerenciamento. A Área A – SP apresenta maior proximidade de uma possível transição para o monitoramento de encerramento. A Área B – SP requer maior intensidade de investigação e intervenção sobre a fase livre, as incertezas da fonte e a migração potencial.

A Área C – RJ exige compatibilização entre o tratamento dos focos, a proteção dos receptores e a manutenção das estruturas operacionais. Na Área D – MG, o principal desafio consiste em avaliar a recuperabilidade da fase livre residual e definir a transição entre extração, tratamento complementar e atenuação monitorada.

Quadro 9 – Síntese comparativa dos direcionamentos técnicos propostos para as áreas avaliadas.

Área	Condição dominante	Primeira ação recomendada	Intervenções potencialmente aplicáveis	Condição para transição ao monitoramento
A – SP	Ausência prolongada de fase livre, com sinais residuais pontuais	Verificação pós-paralisação e atualização da delimitação	Recuperação localizada, caso necessária	Ausência de rebote e pluma estável ou em retração
B – SP	Fase livre recorrente, incertezas do modelo conceitual e receptor sensível	Atualização do modelo conceitual e caracterização da fase livre	<i>Skimming</i> , extração multifásica, contenção, biorremediação e tratamento da água	Controle da fase livre, da migração e das rotas de exposição
C – RJ	Fase dissolvida sob estruturas e presença de receptores potenciais	Delimitação dos focos e avaliação de vapores	Biorremediação, controle hidráulico localizado e medidas de engenharia	Pluma estável, focos controlados e rotas de exposição interrompidas
D – MG	Fase livre residual recorrente e TPH intemperizado	Avaliação da recuperabilidade e dos focos residuais	Recuperação localizada, oxidação e biorremediação	Ausência de produto móvel e demonstração de biodegradação e estabilidade

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

O Quadro 9 demonstra que o ranking não conduziu à indicação de uma tecnologia única para todas as áreas. A posição obtida na hierarquização indicou a ordem relativa de prioridade, enquanto as estratégias foram definidas individualmente de acordo com as condições dominantes de cada caso.

5.5. Síntese integrada dos resultados e implicações para a tomada de decisão

A aplicação da matriz multicritério permitiu organizar de forma integrada informações ambientais, hidrogeológicas, operacionais e de gerenciamento que anteriormente estavam distribuídas em diferentes documentos técnicos. A Área B – SP apresentou a maior prioridade relativa, seguida pelas áreas C – RJ, D – MG e A – SP.

Entretanto, a proximidade dos índices demonstra que as quatro áreas permanecem relevantes para a tomada de decisão. A diferença de aproximadamente 4,3 pontos percentuais entre a primeira e a última colocada reforça que o resultado representa uma ordem interna de prioridade, e não a separação entre casos críticos e não críticos.

O ranking não substitui a avaliação específica de cada caso nem define isoladamente a tecnologia de remediação. Sua principal contribuição consiste em tornar explícitos os critérios utilizados, os respectivos pesos e os fatores que influenciaram a posição de cada alternativa.

A Área B – SP foi priorizada pela combinação entre fase livre recente, fonte ativa controlada, impacto em diferentes matrizes e incertezas relacionadas às estruturas enterradas. A Área C – RJ destacou-se principalmente pela abrangência potencial do risco e pela presença da contaminação sob edificações e estruturas essenciais.

A Área D – MG apresentou elevada magnitude física do passivo e recorrência de fase livre, mas menor abrangência relativa do risco e fonte primária eliminada. A Área A – SP apresentou a menor prioridade relativa, em razão da eliminação da fonte e da ausência prolongada de fase livre, embora ainda demande confirmação da estabilidade pós-remediação.

A proposição de estratégias para as quatro áreas também demonstrou que a ordem de prioridade não corresponde necessariamente à intensidade de uma única técnica. Cada caso requer uma sequência própria de investigação, intervenção e monitoramento.

Enquanto a Área B – SP demanda maior atenção à fase livre e à migração potencial para o mangue, a Área A – SP requer verificação da estabilidade após a paralisação da remediação. A Área C – RJ exige medidas compatíveis com a presença de estruturas essenciais e receptores

potenciais, e a Área D – MG demanda avaliação da recuperabilidade do produto residual e da aplicabilidade de tratamentos complementares.

Os resultados corroboram a recomendação de Soriano et al. (2023) de que a reabilitação de áreas impactadas por hidrocarbonetos deve ser baseada no modelo conceitual, nos objetivos definidos para o caso e no encadeamento de tecnologias compatíveis com as fases e a distribuição da contaminação.

A matriz também contribui para o direcionamento de recursos, estudos e intervenções, desde que seus resultados sejam interpretados em conjunto com os modelos conceituais, as avaliações de risco e as exigências dos órgãos ambientais. Sua utilização isolada não substitui os procedimentos técnicos e legais aplicáveis ao gerenciamento das áreas.

Por fim, os resultados estão vinculados às informações disponíveis na atualização de 2026 e às condições de contorno adotadas. Alterações no comportamento das plumas, nas fontes, nas intervenções ou nas condições operacionais podem modificar as pontuações e o ranking. Dessa forma, recomenda-se a atualização periódica da matriz à medida que novos dados forem incorporados ao gerenciamento.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar uma matriz multicritério de apoio à tomada de decisão para avaliar e hierarquizar áreas contaminadas de uma companhia de logística, com base em parâmetros técnicos de gerenciamento de áreas contaminadas. A proposta permitiu organizar informações ambientais, hidrogeológicas, operacionais e de gerenciamento e utilizá-las na comparação das áreas, bem como na definição de direcionamentos conceituais para sua reabilitação.

O resultado obtido indicou a Área B – SP como a alternativa de maior criticidade relativa, seguida pelas áreas C – RJ, D – MG e A – SP. Entretanto, esse resultado não deve ser interpretado como indicação de baixa relevância das demais áreas, mas como uma ordem de prioridade dentro de um conjunto previamente considerado crítico pela companhia. A proximidade entre os índices obtidos reforça que as quatro áreas permanecem relevantes para a tomada de decisão e requerem continuidade das ações de gerenciamento.

Essa interpretação é necessária porque as quatro áreas avaliadas se encontram sob intervenção e apresentam longo histórico de gerenciamento, persistência da contaminação e necessidade de intervenções e monitoramentos sucessivos. Assim, a matriz buscou diferenciar

níveis de criticidade entre áreas já prioritárias, e não separar áreas contaminadas de áreas não contaminadas. Os resultados devem, portanto, ser compreendidos de forma relativa e de acordo com as condições de contorno, os dados disponíveis e as características específicas do conjunto analisado.

A priorização da Área B – SP esteve associada principalmente à presença de fase livre, à existência de fonte ativa controlada, ao impacto em três matrizes ambientais, à proximidade com o mangue adjacente e à interferência operacional relevante. Esses fatores evidenciam que sua criticidade decorre da combinação entre persistência da contaminação, sensibilidade do entorno e complexidade do gerenciamento, e não apenas da magnitude física do passivo ambiental.

Além da hierarquização, foram propostos direcionamentos conceituais de reabilitação para as quatro áreas avaliadas. As propostas foram estruturadas de forma integrada e sequencial, contemplando, conforme as condições de cada caso, a atualização do modelo conceitual, o controle ou a eliminação de fontes remanescentes, a recuperação de fase livre, o controle da migração, o tratamento das fases dissolvida e residual e o monitoramento ambiental.

Para a Área A – SP, o direcionamento concentrou-se na verificação da estabilidade após a paralisação da remediação e na avaliação da necessidade de medidas localizadas. Na Área B – SP, foram priorizadas a atualização do modelo conceitual, a caracterização da fase livre e o controle da migração em direção ao mangue. Para a Área C – RJ, destacaram-se o tratamento direcionado dos focos, a avaliação das rotas potenciais de exposição e a compatibilização das medidas com as estruturas operacionais. Na Área D – MG, a proposta enfatizou a avaliação da recuperabilidade da fase livre residual e a possível combinação entre recuperação localizada, oxidação química, biorremediação e monitoramento.

Dessa forma, a reabilitação foi tratada como um processo técnico integrado, e não como a simples escolha de uma única tecnologia de remediação. A posição das áreas no ranking indicou a ordem relativa de prioridade, enquanto as estratégias foram definidas individualmente, considerando as limitações e necessidades específicas de cada caso.

A pesquisa apresenta caráter aplicado e contribuição de inovação técnico-científica ao propor uma forma estruturada de transformar informações dispersas em uma ferramenta rastreável de apoio à decisão. A matriz desenvolvida explicita os critérios adotados, seus pesos, as escalas de classificação e a influência de cada parâmetro sobre o resultado final, reduzindo a dependência exclusiva de avaliações qualitativas e da experiência individual dos responsáveis

pelo gerenciamento. Entretanto, sua aplicação permanece restrita às quatro áreas estudadas e não deve ser generalizada sem revisão e validação prévias.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de uma matriz de decisão de aplicação ampliada, capaz de ser utilizada em diferentes estágios de gerenciamento e contextos ambientais. Para isso, será necessário revisar as faixas de classificação, estabelecer critérios objetivos e indicadores para a seleção inicial de áreas críticas, validar a proposta com especialistas por meio do método *Delphi* ou de consultas *ad hoc* e aplicá-la a um número maior de casos. Recomenda-se, ainda, incorporar variáveis que representem diferentes contaminantes, usos do solo, receptores, legislações estaduais e condições hidrogeológicas, bem como realizar análises de sensibilidade para verificar a estabilidade dos resultados diante de alterações nos pesos e nas pontuações.

Também se recomenda a elaboração de um roteiro técnico corporativo para o gerenciamento de áreas contaminadas. Esse instrumento poderia orientar a contratação, o acompanhamento e a avaliação de estudos ambientais, estabelecendo requisitos mínimos para investigações, modelos conceituais, avaliações de risco, planos de intervenção e monitoramentos. Dessa forma, seria possível reduzir lacunas técnicas, melhorar a comparabilidade dos dados e favorecer processos de reabilitação mais eficientes, rastreáveis e tecnicamente fundamentados.

REFERÊNCIAS

AESBE – Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento. **Gerenciamento de áreas contaminadas e tecnologias de remediação**. Brasília, DF: Portal Saneamento Básico, 2021. Disponível em: <https://aesbe.org.br/gerenciamento-de-areas-contaminadas-e-tecnologias-de-remediacao/>. Acesso em: 13 ago. 2025.

ALISHIRAZI, Melika; SALMAK, Saba; GITIPOUR, Saeid. A comprehensive assessment to offer optimized remediation method for mercury contamination in Musa Bay by using hybrid Fuzzy AHP-VIKOR approach. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 45, p. 8685–8707, 2023. DOI: 10.1007/s10653-023-01745-y. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01745-y>. Acesso em: 4 jul. 2026.

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres. **A ANTT e a atuação no transporte terrestre do Brasil**. Brasília, DF: Ministério dos Transportes, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/a-antt>. Acesso em: 12 abr. 2026.

BRASIL. **Banco de Dados Nacional sobre Áreas Contaminadas (BDNAC)**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/banco-de-dados-nacional-sobre-areas-contaminadas-bdnac>. Acesso em: 13 ago. 2025.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 13 ago. 2025.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm. Acesso em: 13 ago. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre o levantamento e a investigação de áreas contaminadas por substâncias químicas perigosas, estabelece parâmetros e critérios de risco. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 29 dez. 2009. Seção 1, p. 81 - 84. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/LivroConama.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 13 ago. 2025.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 13 ago. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Programa Nacional De Recuperação De Áreas Contaminadas**: agenda nacional de qualidade ambiental urbana: eixo: áreas contaminadas. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 13 ago. 2025.

BELTON, Valerie; STEWART, Theodor J. **Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

CETESB. **Decisão de Diretoria nº 038/2017/C, de 07 de fevereiro de 2017**. Dispõe sobre procedimentos para gerenciamento de áreas contaminadas e diretrizes para o relatório de avaliação preliminar. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 6 out. 2025.

CETESB. **Decisão de Diretoria nº 056/2024/C, de 19 de março de 2024**. Estabelece procedimentos e critérios para o gerenciamento de áreas contaminadas e atualiza diretrizes técnicas. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 6 out. 2025.

CETESB. **Decisão de Diretoria nº 125/2021/C, de 18 de novembro de 2021**. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para encerramento de áreas contaminadas. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 6 out. 2025.

CETESB - Diretoria de Avaliação de Impacto Ambiental e Diretoria de Controle e Licenciamento Ambiental. **Áreas em processo de remediação no Estado de São Paulo**. São Paulo, SP: CETESB, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2021/03/Areas-Processo-de-Remediacao.pdf>. Acesso em: 05 out. 2025.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. 3.ed. rev., ampl. — São Paulo (SP): CETESB, 2025. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/informacoes-gerais/apresentacao-2/>. Acesso em: 05 out. 2025.

CHOROL, Lobzang; GUPTA, Sunil Kumar. Evaluation of groundwater heavy metal pollution index through analytical hierarchy process and its health risk assessment via Monte Carlo simulation. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 170, p. 855–864, 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2022.12.063. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.063>. Acesso em: 4 jul. 2026.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Inventário de áreas contaminadas no Estado de Minas Gerais**: 2024. Belo Horizonte: FEAM, 2024. 36 p.

INEA - Instituto Estadual do Meio Ambiente. **Áreas contaminadas**. Rio de Janeiro: Secretaria do Ambiente e Sustentabilidade, 2025. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/areas-contaminadas/>. Acesso em: 13 ago. 2025.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 02, de 08 de setembro de 2010**. Dispõe sobre o gerenciamento de áreas contaminadas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM, 2010. Disponível em: <https://www.meioambiente.mg.gov.br>. Acesso em: 6 out. 2025.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 116, de 26 de junho de 2008.** Dispõe sobre critérios e procedimentos para o gerenciamento de áreas contaminadas. Belo Horizonte: Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM, 2008. Disponível em: <https://www.meioambiente.mg.gov.br>. Acesso em: 6 out. 2025.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011.** Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a reabilitação de áreas contaminadas. Belo Horizonte: Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM, 2011. Disponível em: <https://www.meioambiente.mg.gov.br>. Acesso em: 6 out. 2025.

RIO DE JANEIRO. **Resolução CONEMA nº 44, de 14 de dezembro de 2012.** Dispõe sobre o gerenciamento de áreas contaminadas no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Conselho Estadual de Meio Ambiente – CONEMA, 2012. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br>. Acesso em: 6 out. 2025.

RIO DE JANEIRO. **Decreto Estadual nº 46.890, de 23 de dezembro de 2019.** Dispõe sobre o gerenciamento de áreas contaminadas no Estado do Rio de Janeiro e dá outras providências. Rio de Janeiro: Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br>. Acesso em: 6 out. 2025.

RIO DE JANEIRO. **Resolução INEA nº 306, de 28 de maio de 2024.** Estabelece procedimentos e diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Instituto Estadual do Ambiente – INEA, 2024. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br>. Acesso em: 6 out. 2025.

SAATY, Thomas L. **The Analytic Hierarchy Process:** planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, Thomas L. **Decision Making for Leaders:** The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. 3. ed. Pittsburgh: RWS Publications, 2002.

SÃO PAULO. **Lei nº 13.577, de 8 de julho de 2009.** Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e o gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas. São Paulo: Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 2009. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2009/07/08/lei-no-13-577-de-8-de-julho-de-2009/>. Acesso em: 6 out. 2025.

SILVA, Cirene de Andrade Prata da. **Estudo de eficiência das tecnologias de remediação de organoclorados sob o aspecto socioeconômico do empreendedor** – Estudo de caso. 2022. 66 f. Monografia (Especialização em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

SIGAM - Sistema Integrado de Gestão Ambiental. **Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo.** São Paulo, SP: Secretaria de Meio Ambiente e Logística (SEMIL), 2025. Disponível em: <https://mapas.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=77da778c122c4ccda8a8d6babce61b6b>. Acesso em: 13 ago. 2025.

SORIANO, Adriana Ururahy; SCHNEIDER, Marcio Roberto; BORTOLASSI, Ana Claudia Canalli; BAESSA, Marcus Paulus Martins; GIACHINI, Admir José. **Remediação de Áreas Contaminadas por Vazamentos de Hidrocarbonetos de Petróleo e Biocombustíveis: Protocolo Técnico**. Florianópolis: Synergia Editora, 2023.

APÊNDICE A – INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DAS ÁREAS CONTAMINADAS DE INTERESSE

As informações a seguir referem-se às quatro áreas contaminadas críticas utilizadas na hierarquização desenvolvida neste trabalho técnico. Os dados foram estimados com base nas informações disponíveis em 2026, devendo ser observada a necessidade de atualização antes de sua utilização em análises futuras (Quadro 9).

Quadro 9 - Resumo das informações

Tipo da informação	Área A - SP	Área B - SP	Área C - RJ	Área D - MG
Abrangência do risco	Corpo hídrico adjacente ao local impactado.	Mangue adjacente ao local impactado.	População ao redor.	Funcionários internos.
Atividades e fontes potenciais	Antes: Tancagem de diesel; Abastecimento; Caixa separadora de água e óleo (CSAO). Hoje: Manutenção mecânica;	Antes: Lavador de peças; Abastecimento. Hoje: Manutenção mecânica.	Antes: lavador de peças. Hoje: Oficina; Fossa séptica, refeitório e área de lazer.	Antes: Tanques e tubulações de diesel. Hoje: Manutenção mecânica e lavador;
Classificação pela Resolução CONAMA nº 420/2009	Sob intervenção	Sob intervenção	Sob intervenção	Sob intervenção
Condutividade hidráulica do solo	14,17 cm/dia	3,80 cm/dia	2,64 cm/dia	2,25 cm/dia
Estudo complementar	IAC (2012); IAD (2012); IA Complementar (2013-2019-2020); Diversas ARSH; Monitoramento.	IAC (2011); IAD (2012); IA Complementar (2013-2016-2023); Diversas ARSH; Monitoramento.	IA (2010); IAD (2011-2016); IA qualidade água (2017); Diversas ARSH; Monitoramento.	IA (2017); Mapeamento de pluma (2020); IA Complementar (2023); Diversas ARSH; Monitoramento.

Tipo da informação	Área A - SP	Área B - SP	Área C - RJ	Área D - MG
Extensão da pluma de contaminação	3.512 m ²	1.187,6 m ²	3.698 m ²	5.209 m ²
Identificação da contaminação	AAP (2012)	AAP (2010)	IA (2007)	AA e Diagnóstico e Confirmatório (2007-2008); IAP (2010-2015); Derrame operacional de efluente (2012);
Interferência operacional para remediação	Não	Interrompe o fluxo da manutenção realizada na oficina por cerca de 5 meses	Paralisa o abastecimento. Resolução em anos: dificuldade de fazer o serviço com uma consultoria.	Paralisa a atividade de manutenção. Esse cenário pode mudar uma vez que as manutenções aos poucos estão sendo retiradas de lá. Resolução em meses.
Matrizes ambientais impactadas	Solo e água subterrânea	Solo, água subterrânea e ar	Solo, água subterrânea	Solo e água subterrânea
Plano de intervenção	MPE em 5 etapas (2012–2025)	MPE (2012 e 2017); Remoção de solo (2020); Testes de oxidação eletrocinética (2014–2015).	MPE em 5 etapas (2011–2025); Reforma na área de abastecimento (2011).	MPE (2011–2025); Reformas estruturais do lavador (2011); Injeção de peróxido de hidrogênio (2011-2013).
Presença de fase livre	Não	Sim	Não	Sim
Presença de fonte ativa	Não	Sim, mas controlada.	Não	Não
Situação atual	Sem fase livre desde 2018; Depois, iridescência e oleosidade; Concentração dos contaminantes abaixo dos Valores Orientadores (VO).	Com fase livre (2025) depois de 2 anos sem; Concentração de TPH e benzeno acima dos VO.	Sem fase livre desde 2020; Depois, oleosidade; Concentração de TPH e benzeno acima dos VO.	Com fase livre (2024); Concentração de TPH (MCNR) acima dos VO - contaminação pretérita;
Tempo de exposição à contaminação	14 anos	15 anos	19 anos	21 anos

Tipo da informação	Área A - SP	Área B - SP	Área C - RJ	Área D - MG
Tempo de remediação	14 anos	13 anos	15 anos	15 anos
Tipo de contaminante	Óleo diesel e metais	Óleo diesel	Óleo diesel	Óleo diesel
Unidade federativa pertencente	São Paulo	São Paulo	Rio de Janeiro	Minas Gerais
Velocidade de espalhamento da contaminação	5,92 m/ano	3,53 m/ano	7,31 m/ano	2 m/ano
Volume estimado de solo contaminado	9.482,4 m ³	5.344,2 m ³	23.297,4 m ³	34.535,67 m ³

Fonte: Elaborado pela autora a partir do Inventário de Áreas Contaminadas da companhia (2026).

APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DA MATRIZ DE DECISÃO AHP

Este apêndice apresenta as etapas de cálculo utilizadas na planilha eletrônica desenvolvida para aplicação do método Processo Analítico Hierárquico (AHP). O método foi empregado para determinar a importância relativa dos critérios e verificar a consistência dos julgamentos realizados. Posteriormente, as áreas foram avaliadas por meio de uma escala de classificação com pontuações de 1, 2 e 3, e os resultados foram agregados por soma ponderada, permitindo a obtenção do índice final de priorização.

O procedimento foi dividido nas seguintes etapas: elaboração da matriz de comparação par a par; normalização da matriz; obtenção do vetor de prioridade dos critérios; verificação da consistência dos julgamentos; atribuição das pontuações às alternativas; cálculo das pontuações ponderadas; e normalização dos resultados finais.

B.1 Elaboração da matriz de comparação par a par

A matriz de comparação par a par foi elaborada a partir dos julgamentos de importância relativa entre os nove critérios de decisão. Cada elemento a_{ij} representa a importância do critério disposto na linha i em relação ao critério disposto na coluna j .

Nas comparações, o valor 1 representa igual importância entre os critérios, enquanto os valores 3 e 5 representam, respectivamente, importância moderada e forte de um critério em relação ao outro. Para as comparações inversas, foram utilizados os valores recíprocos correspondentes. Por se tratar de uma matriz recíproca, os elementos localizados em posições opostas em relação à diagonal principal obedecem à relação apresentada na Equação 1.

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (1)$$

Os elementos da diagonal principal receberam valor igual a 1, uma vez que representam a comparação de cada critério com ele próprio, conforme a Equação 2.

$$a_{ii} = 1 \quad (2)$$

Os julgamentos realizados e seus respectivos valores recíprocos resultaram na matriz de comparação par a par apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Matriz de comparação par a par entre os critérios de decisão.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C1	1	1	1	3	3	3	3	5	5
C2	1,00	1	1	1	1	3	3	5	5
C3	1,00	1,00	1	1	1	3	3	3	3
C4	0,33	1,00	1,00	1	1	3	3	3	3
C5	0,33	1,00	1,00	1,00	1	1	3	3	3
C6	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1	1	3	3
C7	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1	3	3
C8	0,20	0,20	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1	3
C9	0,20	0,20	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Legenda:

C1	Abrangência do risco	C6	Extensão da pluma de contaminação
C2	Matrizes ambientais impactadas	C7	Volume estimado de solo contaminado
C3	Presença de fonte ativa	C8	Diversidade de contaminantes
C4	Presença de fase livre	C9	Interferência operacional da remediação
C5	Condutividade hidráulica do solo		

Na planilha eletrônica, os valores recíprocos foram mantidos com todas as casas decimais disponíveis. Na Tabela 4, esses valores foram arredondados para facilitar sua apresentação, de modo que 1/3 foi apresentado como 0,33 e 1/5 como 0,20.

B.2 Normalização da matriz de comparação

A partir da matriz apresentada na Tabela 4, foi calculado inicialmente o somatório dos elementos de cada coluna. O somatório da coluna j , denominado s_j , foi obtido conforme a Equação 3.

$$s_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (3)$$

Em que s_j representa o somatório da coluna j , a_{ij} ao elemento da matriz de comparação e n representa o número de critérios avaliados, igual a 9.

A normalização foi realizada dividindo-se cada elemento da matriz de comparação pelo somatório da coluna correspondente, conforme a Equação 4.

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{r=1}^n a_{rj}} \quad (4)$$

Em que n_{ij} corresponde ao elemento normalizado localizado na linha i e na coluna j , a_{ij} representa o valor original da comparação e $\sum a_{rj}$ corresponde ao somatório dos elementos da coluna analisada.

Como exemplo, o elemento normalizado correspondente à linha C1 e à coluna C1 foi obtido pela divisão entre o valor original, igual a 1, e o somatório da primeira coluna:

$$n_{11} = \frac{1}{4,7333} = 0,2113$$

Para o elemento correspondente à linha C4 e à coluna C1, o cálculo foi:

$$n_{41} = \frac{1/3}{4,7333} = 0,0704$$

O procedimento foi repetido para todos os elementos, resultando na matriz normalizada apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Matriz normalizada para obtenção do vetor prioridade dos critérios

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C1	0,211	0,165	0,158	0,360	0,333	0,191	0,170	0,190	0,172
C2	0,211	0,165	0,158	0,120	0,111	0,191	0,170	0,190	0,172
C3	0,211	0,165	0,158	0,120	0,111	0,191	0,170	0,114	0,103
C4	0,070	0,165	0,158	0,120	0,111	0,191	0,170	0,114	0,103
C5	0,070	0,165	0,158	0,120	0,111	0,064	0,170	0,114	0,103
C6	0,070	0,055	0,053	0,040	0,111	0,064	0,057	0,114	0,103
C7	0,070	0,055	0,053	0,040	0,037	0,064	0,057	0,114	0,103
C8	0,042	0,033	0,053	0,040	0,037	0,021	0,019	0,038	0,103
C9	0,042	0,033	0,053	0,040	0,037	0,021	0,019	0,013	0,034

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme observado na Tabela 5, a soma dos elementos de cada coluna da matriz normalizada é igual a 1, admitindo-se pequenas diferenças decorrentes do arredondamento dos valores apresentados.

B.3 Obtenção dos pesos dos critérios

O vetor de prioridade, que representa os pesos relativos dos critérios, foi obtido pela média aritmética dos valores normalizados de cada linha da Tabela 5, conforme a Equação 5.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n n_{ij}}{n} \quad (5)$$

Em que w_i representa o peso do critério i , n_{ij} representa os valores normalizados da linha i e n corresponde ao número total de critérios.

Para o critério C1, por exemplo, o peso foi obtido pela média dos nove valores normalizados da primeira linha:

$$w_i = \frac{0,211 + 0,165 + 0,158 + 0,360 + 0,333 + 0,191 + 0,170 + 0,190 + 0,172}{9} \\ = w_1 \sim 0,217$$

O mesmo procedimento foi aplicado aos demais critérios. A soma dos pesos obtidos deve ser igual a 1, conforme indicado na Equação 6.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (6)$$

Os pesos calculados foram utilizados tanto na verificação da consistência dos julgamentos quanto na composição da pontuação ponderada das alternativas. Seus valores são apresentados na primeira coluna numérica da Tabela 6.

B.4 Verificação de consistência dos julgamentos

A consistência da matriz foi verificada para avaliar se os julgamentos empregados nas comparações par a par apresentavam coerência lógica aceitável.

Inicialmente, a matriz original de comparação A , apresentada na Tabela 4, foi multiplicada pelo vetor de prioridade w , resultando no vetor ponderado v , conforme a Equação 7.

$$v_i = A * w \quad (7)$$

Cada componente do vetor ponderado foi calculado conforme a Equação 8.

$$v_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}w_j \quad (8)$$

Em que v_i representa o componente i do vetor ponderado, a_{ij} corresponde ao elemento da matriz original e w_j representa o peso do critério associado à coluna j .

Para o critério C1, por exemplo, o componente do vetor ponderado foi obtido por:

$$v_1 = 1w_1 + 1w_2 + 1w_3 + 3w_4 + 3w_5 + 3w_6 + 3w_7 + 5w_8 + 5w_9$$

A substituição dos pesos resultou em:

$$v_1 \sim 2,088$$

Em seguida, cada componente do vetor ponderado foi dividido pelo peso correspondente, obtendo-se o valor de lambda individual de cada critério, conforme a Equação 9.

$$\lambda_i = \frac{v_i}{w_i} \quad (9)$$

Para o critério C1:

$$\lambda_i = \frac{2,088}{0,217} \sim 9,632$$

Os pesos, os componentes do vetor ponderado e os valores de lambda individual são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Cálculo auxiliar para verificação da consistência da matriz AHP

Critério	Peso	Vetor ponderado	λ individual
C1	0,217	2,088	9,632
C2	0,165	1,582	9,561
C3	0,149	1,431	9,582
C4	0,134	1,286	9,623
C5	0,119	1,138	9,525
C6	0,074	0,707	9,546
C7	0,066	0,628	9,530
C8	0,043	0,398	9,259
C9	0,032	0,304	9,365

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

O autovalor máximo da matriz, denominado λ_{max} , foi obtido pela média dos valores de lambda individual apresentados na Tabela 6, conforme a Equação 10.

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_i}{n} \quad (10)$$

A aplicação da Equação 10 resultou em:

$$\lambda_{max} = 9,5137$$

O Índice de Consistência (CI) foi calculado conforme a Equação 11.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

Considerando n=9:

$$CI = \frac{9,5137 - 9}{9 - 1} = 0,0642$$

A Razão de Consistência (CR) foi calculada pela relação entre o CI e o Índice Randômico (RI), conforme a Equação 12.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (12)$$

Para uma matriz composta por nove critérios, adotou-se RI =1,45. Portanto:

$$CR = \frac{0,0642}{1,45} = 0,0443$$

A CR obtida foi equivalente a 4,43%. Como o resultado foi inferior ao limite de 10%, os julgamentos da matriz foram considerados consistentes, não sendo necessária a revisão das comparações realizadas.

B.5 Atribuição das pontuações às alternativas

Após a obtenção dos pesos e a confirmação da consistência da matriz de comparação, foi realizada a avaliação das quatro áreas em relação a cada critério.

As condições observadas em cada área foram enquadradas nas faixas de classificação previamente definidas, utilizando-se uma escala de três níveis: pontuação 1 para condições de menor criticidade, pontuação 2 para condições de criticidade moderada e pontuação 3 para condições de maior criticidade.

A atribuição das pontuações não correspondeu a uma nova comparação de importância entre as áreas, mas ao enquadramento das características de cada alternativa nas respectivas faixas de classificação. A aplicação da escala resultou na matriz de decisão apresentada na Tabela 7.

Tabela 7– Pontuação das alternativas atribuída a cada critério da matriz de decisão.

Critério	Alternativas			
	Área A - SP	Área B - SP	Área C - RJ	Área D - MG
Abrangência do risco	2	2	3	1
Matrizes ambientais impactadas	2	3	2	2
Presença de fonte ativa	1	2	1	1
Presença de fase livre	1	3	1	3
Condutividade hidráulica do solo	3	2	2	2
Extensão da pluma de contaminação	2	1	2	3
Volume estimado de solo contaminado	1	1	2	3
Diversidade de contaminantes	3	1	1	1
Interferência operacional da remediação	1	2	3	2

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme apresentado na Tabela 7, cada área recebeu uma pontuação para cada um dos 9 critérios. Nessa etapa, os valores ainda não consideram a importância relativa dos critérios, representada pelos pesos obtidos por meio da aplicação do AHP.

B.6 Cálculo das pontuações ponderadas

Após a atribuição das pontuações, cada valor da matriz de decisão foi multiplicado pelo peso do respectivo critério. A pontuação ponderada da alternativa k no critério i foi calculada conforme a Equação 13.

$$P_{ik} = p_{ik} * w_i \quad (13)$$

Em que P_{ik} representa a pontuação ponderada da alternativa k no critério i , p_{ik} corresponde à pontuação atribuída à alternativa e w_i o peso do critério.

Como exemplo, a Área A – SP recebeu pontuação 2 no critério C1. Considerando o peso aproximado de 0,217, sua pontuação ponderada foi:

$$P_{1,A} = 2 * 0,217 \sim 0,43$$

A Área C – RJ recebeu pontuação 3 no mesmo critério, resultando em:

$$P_{1,C} = 3 * 0,217 \sim 0,65$$

A aplicação da Equação 13 a todas as combinações entre critérios e alternativas resultou na matriz de pontuações ponderadas apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Matriz de pontuação ponderada para cálculo do índice final de priorização.

Critério	Alternativas			
	Área A - SP	Área B - SP	Área C - RJ	Área D - MG
C1	0,43	0,43	0,65	0,22
C2	0,33	0,50	0,33	0,33
C3	0,15	0,30	0,15	0,15
C4	0,13	0,40	0,13	0,40
C5	0,36	0,24	0,24	0,24
C6	0,15	0,07	0,15	0,22
C7	0,07	0,07	0,13	0,20
C8	0,13	0,04	0,04	0,04
C9	0,03	0,06	0,10	0,06

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Os valores apresentados na Tabela 8 foram arredondados para duas casas decimais. Entretanto, os cálculos realizados na planilha eletrônica consideraram todas as casas decimais dos pesos, evitando que o arredondamento interferisse no resultado final.

B.7 Obtenção da soma ponderada

A pontuação global de cada alternativa foi obtida pela soma das pontuações ponderadas dos nove critérios, conforme a Equação 14.

$$S_k = \sum_{i=1}^n P_{ik} \quad (14)$$

Em que S_k representa a soma ponderada da alternativa k , P_{ik} corresponde à pontuação ponderada e n representa o número de critérios avaliados.

Como $P_{ik}=p_{ik}w_i$, a soma ponderada também pode ser expressa conforme a Equação 15.

$$S_k = \sum_{i=1}^n P_{ik}w_i \quad (15)$$

Para a Área A – SP, a soma ponderada foi obtida pela adição das contribuições dos 9 critérios:

$$S_A = 0,4335 + 0,3308 + 0,1493 + 0,1337 + 0,3584 + 0,1482 + 0,0659 + 0,1288 + 0,0325 = 1,7811$$

O mesmo procedimento foi aplicado às demais áreas.

B.8 Normalização e obtenção do índice final de priorização

Para facilitar a comparação entre as alternativas, as somas ponderadas foram normalizadas em relação ao somatório dos resultados obtidos para as quatro áreas. O índice final normalizado foi calculado conforme a Equação 16.

$$I_k = \frac{S_k}{\sum_{l=1}^m S_l} * 100 \quad (16)$$

Em que I_k representa o índice normalizado da alternativa k , S_k corresponde à soma ponderada da alternativa e m representa o número total de alternativas avaliadas.

O somatório das pontuações das quatro áreas foi:

$$\sum_{l=1}^4 S_l = 1,7811 + 2,1162 + 1,9233 + 1,8646 = 7,6852$$

Para a Área A – SP, o índice normalizado foi calculado por:

$$I_A = \frac{1,7811}{7,6852} * 100 = 23,18\%$$

Os valores das somas ponderadas e dos índices normalizados das quatro alternativas são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Soma ponderada e índice normalizado das alternativas

Alternativa	Soma ponderada	Índice normalizado
Área A - SP	1,7811	23,2%
Área B - SP	2,1162	27,5%
Área C - RJ	1,9233	25,0%
Área D - MG	1,8646	24,3%

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme apresentado na Tabela 9, a maior pontuação foi obtida pela Área B – SP, seguida pelas áreas C – RJ, D – MG e A – SP. Assim, a aplicação da matriz resultou na seguinte ordem de priorização:

$$\text{Área B – SP} > \text{Área C – RJ} > \text{Área D – MG} > \text{Área A – SP}$$

Os índices normalizados representam a participação relativa de cada área no somatório das pontuações obtidas pelas quatro alternativas. Portanto, esses valores não correspondem a percentuais absolutos de criticidade. A normalização apenas converte os resultados para uma escala percentual, sem alterar a ordem de priorização.