

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Avaliação dos Modelos Conceituais de Contaminação de  
Uma Antiga Área de Mineração de Carvão no Sul do Estado  
de Santa Catarina**

**JOÃO GABRIEL ROSSETTO MARTINS ZWARG**

**Orientador:** Prof. Dr. Reginaldo Antonio Bertolo

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**Nº: 21/18**

**SÃO PAULO**

**2021**

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>5</b>
<b>2. METAS E OBJETIVOS .....</b>	<b>6</b>
<b>3. TRABALHOS PRÉVIOS .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1. CASOS SEMELHANTES NO MUNDO .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1.1. Estados Unidos.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1.2. Canadá.....</b>	<b>8</b>
<b>3.1.3. União Europeia .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1.4. Austrália .....</b>	<b>8</b>
<b>03.1.5. INAP .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1.6. ITRC .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2. ÁREAS COMPLEXAS .....</b>	<b>10</b>
<b>3.3. GERENCIAMENTO ADAPTATIVO .....</b>	<b>12</b>
<b>3.4. LEGISLAÇÃO E CRITÉRIOS ACORDADOS.....</b>	<b>15</b>
<b>3.4.1. Critérios técnicos atualmente em utilização.....</b>	<b>16</b>
<b>3.4.1. CONAMA 420.....</b>	<b>17</b>
<b>3.4.1. IN74-SC .....</b>	<b>18</b>
<b>3.4.1. Discussão sobre a CONAMA 420 e IN74-SC .....</b>	<b>19</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>23</b>
<b>5.1. HISTÓRICO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>26</b>
<b>5.2. GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>26</b>
<b>5.3. GEOLOGIA LOCAL .....</b>	<b>28</b>
<b>5.4. A MINA DE ESTUDO .....</b>	<b>30</b>
<b>5.5. MODELO CONCEITUAL COM DADOS EXISTENTES .....</b>	<b>32</b>
<b>5.6 ELEGIBILIDADE DO LOCAL COMO ÁREA COMPLEXA.....</b>	<b>38</b>
<b>5.7. MEDIDAS PREVISTAS PELOS PRADs .....</b>	<b>39</b>
<b>5.8. ANÁLISE CRÍTICA DO MODELO CONCEITUAL DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>42</b>
<b>6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>48</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>50</b>

## RESUMO

A Bacia Carbonífera de Santa Catarina localiza-se na região Sul do Brasil e possui uma área de aproximadamente 1.625 km<sup>2</sup>, dos quais cerca de 490 km<sup>2</sup> foram diretamente impactados pelos passivos ambientais associados a mineração de carvão. Nos recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga são encontradas elevadas concentrações de acidez e de metais como ferro e manganês. Já foram realizadas algumas iniciativas com o objetivo de recuperar alguns dos sítios impactados, porém sem muitos avanços. As medidas empregadas nessas iniciativas consistem, de maneira geral, na reconstituição topográfica e paisagística das áreas degradadas, e acabam por pouco explorar a contaminação dos recursos hídricos, solos e sedimentos, além de outros problemas. As características dos sítios afetados na região Sul de Santa Catarina apresentam dificuldades técnicas e não técnicas que configuram um problema multidisciplinar. Dessa forma, avalia-se que uma abordagem através do Gerenciamento de Áreas Contaminadas possa ser útil para tratar dos sítios impactadas pela mineração de carvão. Para isso, foram avaliados documentos existentes de um sítio degradado, com o objetivo de se identificar quais são os critérios e práticas que vem sendo implementadas na recuperação dessas áreas, além dos dispositivos legais que regem essas áreas impactadas e consultada a literatura científica acerca do problema. Na forma de um estudo de caso, avaliou-se o modelo conceitual com os dados existentes desse sítio, procurando discutir os conceitos do Gerenciamento de Áreas Contaminadas com a atual forma que são gerenciados tais sítios, identificando quais melhores práticas poderiam ser realizadas. De forma pioneira, é discutida a aplicação dos princípios do Gerenciamento Adaptativo de Áreas Complexas, segundo a definição do *Interstate Technology & Regulatory Council*, para uma antiga mina com drenagem ácida de mina (DAM). A área de estudo reúne diferentes desafios técnicos e não técnicos, permitindo classificá-la como Área Complexa. Os critérios atualmente em uso não abordam a totalidade do problema da contaminação. Nota-se a presença de incertezas e lacunas nas informações que constituem o Modelo Conceitual disponível da área de estudo. A Instrução Normativa Nº 74 possui semelhanças com os conceitos do Gerenciamento Adaptativo e pode ser utilizada na gestão dos problemas relacionados aos passivos ambientais em antigas áreas de mineração de carvão no Sul do Estado de Santa Catarina.

## ABSTRACT

The Santa Catarina's Carboniferous Basin is located in Brazil's South region and has an area of approximately 1,625 km<sup>2</sup> from which the like 490 km<sup>2</sup> where directly impacted by the environmental damaged associated with the coal mining. On the hydric resources of the hydrographic basins of the rivers Araranguá, Tubarão and Urussanga are found high concentrations of acidity and metals like iron and manganese. Some initiatives were attempted with the objective to recover some of the impacted sites, but without much success. The main measures employed with these initiatives consists, in a general way, in the topographic and scene reconstitution of the degraded areas and ends by little explore the contamination of the hydric resources, soils and sediments, and other problems. The characteristics of the affected sites in the Santa Catarina's South region show technical and non-technical difficulties which configure a multidisciplinary problem. In this way, is estimated that an approach through the Contaminated Areas Management could be handful for dealing with the sites impacted by the coal mining. For this, existing documents of a degraded area were evaluated with the objective to identify which are the criteria and practices that has been implemented in the recovery of these areas, and the legislation which rule these impacted areas and consulted the scientific literature about the problem. Looking to discuss the concepts in the Contaminated Areas Management with the actual form that these sites are managed the conceptual model of a site was evaluated in the form of a case study, identifying which better practices could be made. In a pioneer way, it is discussed the application of Adaptative Management of Complex Areas principles, accordingly with the definition of the Interstate Technology & Regulatory Council, for an old mine with Acid Mine Drainage. The area of study gathers different technical and non-technical challenges, allowing to classify her as Complex Site. The criteria in use nowadays don't take in account the totality of the contamination problem. It's visible the presence of uncertainties and gaps of information about the Conceptual Model of the study area. The Normative Instruction Nº 74 has resemblance with the concepts of the Adaptative Management and can be used in the management of the problems associated with the environmental liabilities in old mining coal areas in the South of the Santa Catarina's State.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Kumari e Prasad (2010), a Drenagem Ácida de mina (DAM) é o problema ambiental de maior relevância associado a indústria mineral. Esse fenômeno ocorre em minas ativas, abandonadas e em pilhas de rejeito que contenham pirita, cuja descarga de DAM causa impacto direto, no meio ambiente, e também, indiretamente, à saúde humana.

A Bacia Carbonífera Sul Catarinense (BCSC) localiza-se na região Sul do Brasil e possui uma área de aproximadamente 1.625 km<sup>2</sup>, dos quais cerca de 490 km<sup>2</sup> foram diretamente impactados pelos passivos ambientais associados à mineração de carvão. Como consequência da DAM, são encontradas elevadas concentrações de metais como ferro e manganês, nos recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga (Krebs, 2008).

A BCSC comporta diversas minas de carvão abandonadas ou inativas, que extraíram o carvão por anos durante o século XX, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico da região, mas também produzindo um passivo ambiental grande em decorrência da geração de DAM. Até os dias de hoje, é possível encontrar diversos depósitos de rejeitos abandonados, muitos sem a proteção necessária contra a ação de intempéries e processos erosivos.

Através de uma Ação Civil Pública (sentença nº 20.097, de 05/01/2000), o Ministério Público Federal (MPF) condenou solidariamente a União Federal e as empresas mineradoras a recuperarem as áreas degradadas por essa atividade, através da implementação de Projetos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRADs).

É notório que a maioria das medidas previstas nos PRADs, que visam a recuperação ou reabilitação dessas áreas, geralmente consistem na adoção de obras de engenharia como a recomposição paisagística e topográfica, remoção dos rejeitos e implementação de cobertura seca, no tamponamento de surgências e bocas de mina. Porém, apesar da implementação de tais medidas, em muitos locais os recursos hídricos permanecem contaminados por DAM, com elevadas concentrações de metais, sulfato e acidez.

As dificuldades dos projetos de recuperação, em obter resultados satisfatórios nas áreas impactadas, podem ser associadas a desafios diversos, de natureza técnica e não-técnica, como a geologia da área, a intensidade da contaminação, fontes de financiamento, instituições regulamentadoras, entre outros fatores.

## 2. METAS E OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho consistem em avaliar a forma com que é feito o gerenciamento dos passivos ambientais na Bacia Carbonífera Sul Catarinense e comparar as práticas e os critérios atuais com os princípios do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), isto é, com as metodologias e práticas presentes nas legislações do GAC, como por exemplo a CONAMA 420/09 (CONAMA 420) e a Instrução Normativa de N° 74, do Estado de Santa Catarina (IN74-SC), além de discutir os conceitos conhecidos como Gerenciamento Adaptativo (GA) e Área Complexa, ambos definidos pelo *Interstate Technology and Regulatory Council* (ITRC).

Sendo assim, os objetivos consistem em: 1) através da análise dos documentos, e da comparação com o GAC, indicar quais são as informações coletadas pelos projetos e estudos existentes, a qualidade dos dados disponíveis e das informações produzidas, as incertezas das informações, as lacunas, e qual é o modelo conceitual de acordo com essas informações.

2) Através do modelo conceitual com os dados disponíveis, apresentar quais outros dados poderiam ser produzidos, sob um ponto de vista do GAC, com base no que dispõe as legislações supracitadas.

3) Apresentar os conceitos de Área Complexa e GA, sendo o último um guia recomendado pelo ITRC para a resolução de problemas ambientais que envolvam áreas contaminadas onde o emprego de intervenções tradicionais não tenham alcançado resultados satisfatórios.

4) Identificar se a área de estudo pode ser considerada Área Complexa e discutir os princípios do GA, do GAC e os critérios atualmente em uso.

### **3. TRABALHOS PRÉVIOS**

Esse capítulo apresenta os resultados da pesquisa bibliográfica realizada sobre a forma com que outros países gerenciam o problema da DAM na mineração de carvão.

#### **3.1. Casos Semelhantes no Mundo**

##### **3.1.1. Estados Unidos**

Os Estados Unidos eram o terceiro maior produtor de carvão mineral do mundo em 2018 (USEIA, 2020). O Brasil era apenas o 27º produtor, com uma produção 100 vezes menor que a dos EUA e Índia.

Desde 1977, o país conta com um regulamento de controle da mineração e recuperação de áreas mineradas, conhecido por *Surface Mining Control and Reclamation Act* (SMCRA), e uma instituição federal que implementa ações de recuperação de antigas áreas de minas abandonadas (OSMRE - *Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement*). O objetivo principal da OSMRE é a recuperação ambiental de efluentes gerados por áreas mineradas. A instituição atua em conjunto com os departamentos estaduais de proteção ambiental, como por exemplo o da Pensilvânia.

A abordagem de gerenciamento de áreas mineradas como contaminadas acontece em vários casos no país. Há indicação de 10 sítios de mineração incluídos no *National Priorities List* (NPL) da *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), ou seja, os *Superfund Sites* (<https://www.epa.gov/superfund/>). Estas áreas estão sujeitas a serem remediadas/reabilitadas/recuperadas de acordo com a abordagem de avaliação de risco à saúde humana e ambiental adotadas nos procedimentos de gerenciamento de áreas contaminadas. Outra fonte de informações importantes é o ITRC, onde se encontram estudos de casos de remediação impactados por atividades de mineração.

Nordstrom, et al. (2015) publicaram um artigo de revisão da literatura sobre hidrogeoquímica de DAM, onde chamam a atenção para a necessidade de se identificar claramente as fontes e os receptores da contaminação para permitir que os riscos sejam quantificados.

Acharya e Kharel (2020) realizaram uma síntese da literatura específica sobre DAM em áreas de mineração de carvão. No texto, os autores ressaltam a importância de medidas integradas e preventivas, além de parcerias, como requisitos para um tratamento efetivo.

##### **3.1.2. Canadá**

Já o Canadá é o 13º maior produtor de carvão no mundo, com uma produção quase 10 vezes maior que a brasileira.

O *Mine Environment Neutral Drainage*, uma associação com membros da indústria mineral, governo federal e estadual e de organizações não-governamentais (<http://mendnedem.org/default/>), aponta que a DAM representa o maior problema ambiental de responsabilidade da indústria mineral canadense e mundial.

Porém, não há casos relevantes no Canadá de DAM associadas à exploração de carvão (Errington e Ferguson, 1987; Alberta Research Council, 1971), em função da baixa quantidade de minerais sulfetados no carvão explorado em território canadense.

Lima et al (2016) apresentam os conceitos de recuperação, remediação, restauração e reabilitação, e organizam as aplicações desses conceitos dentro de uma árvore de decisões baseadas em metas para recuperação das áreas mineradas.

### **3.1.3. União Europeia (UE)**

Os países da UE somam a 6ª maior produção de carvão mineral do mundo. Alemanha e Polônia juntas superam mais da metade desta produção.

Wolkersdorfer e Bowell (2005) realizaram uma publicação que reúne vários artigos sobre as condições ambientais da água impactada por atividades de mineração na UE. Nele, os autores comentam sobre iniciativas para a gestão multi-institucional dos problemas ambientais que afetam os recursos hídricos na mineração, como o INAP (*International Network for Acid Prevention*), ADTI (*Acid Drainage Technology Initiative*), IMWA (*International Mine Water Association*).

Na Bélgica, Diels (2005) descreve ferramentas existentes para a gestão de passivos ambientais de mineração no país, e indica que o responsável é obrigado a executar ações de remediação se a contaminação provocar riscos à saúde humana ou ecológica.

### **3.1.4. Austrália**

A Austrália era, em 2018, o quinto maior país produtor de carvão mineral do mundo, com cerca de 535 milhões de t.ano<sup>-1</sup> (USEIA, 2020).

Através do Departamento de Agricultura, Águas e Meio Ambiente, o governo australiano reconhece que é crítica a adoção da abordagem de Gerenciamento Adaptativo para fazer uma efetiva gestão de riscos ambientais em projetos maiores de mineração de carvão. No caso das maiores áreas de exploração no estado de Queensland, são exigidos amplos estudos de conectividade, além de intenso monitoramento, para entender a evolução das condições e detectar eventuais impactos que não haviam sido previstos.

Franks et al. (2010) avaliou os impactos cumulativos derivados da indústria do carvão em locais da Austrália e detalhou práticas de gerenciamento que foram aplicados visando aumentar os impactos positivos e mitigar os negativos.

Wright et al. (2017) monitorou os impactos causados pela drenagem de uma mina de carvão, avaliando os danos ambientais da qualidade da água e os danos na biosfera, utilizando macroinvertebrados. Foram confirmados impactos até a distância máxima monitorada de 22 km rio abaixo.

Barnes e Vermeulen (2012) descrevem um procedimento para estabelecer um programa de monitoramento da água subterrânea para a indústria do carvão. O procedimento se baseia em 7 fases que se fecham em ciclos, focadas no avanço do conhecimento do modelo conceitual do site e em avaliação de riscos.

### **3.1.5. International Network for Acid Prevention**

O INAP é uma organização de empresas de mineração internacionais, que objetiva reduzir os passivos associados com mineração de materiais com sulfetos, sobretudo a drenagem ácida.

O INAP coordenou o desenvolvimento de um guia global que trata da drenagem ácida na mineração (GARD – Global Acid Rock Drainage), disponível em <http://www.gardguide.com>). Este guia foi elaborado por diversos especialistas liderados pela Golder Associates e tem permanecido como um documento online em permanente processo de atualização. Entre outros aspectos, o INAP ressalta a importância da elaboração de um modelo conceitual, e que este deve ser atualizado ao longo do desenvolvimento das fases da mina, desde a exploração até o seu encerramento.

### **3.1.6. Interstate Technology and Regulatory Council**

O ITRC é uma coalizão onde participam profissionais das esferas estadual e federal, experts da indústria e a academia, que visa a produção de conhecimento técnico para a solução de problemas ambientais, através da adoção de soluções inovativas. A entidade produz documentos que servem como guia para o gerenciamento de diversos problemas ambientais.

Dentre os guias produzidos pelo ITRC, será explorado o *Remediation Management of Complex Sites*, pois este traz a definição de Áreas Complexas e o conceito de Gerenciamento Adaptativo, os quais possuem grande relevância para uma abordagem de GAC nas áreas degradadas pela mineração de carvão em Santa Catarina.

### 3.2. Áreas Complexas

A metodologia de Gerenciamento de Áreas Contaminadas foi desenvolvida primariamente nos EUA. No Brasil, as iniciativas partiram das entidades CETESB e CONAMA, que estabelecem guias e metodologias para os procedimentos do GAC.

Na literatura científica, diversos autores discutem a importância de se estabelecer um planejamento que permita a atualização e refinamento de suas informações e modelos. Essa ideia objetiva alcançar um nível de confiança considerável a respeito do Modelo Conceitual, dos riscos e incertezas, em uma área contaminada (Kresic & Mikszewski, 2013).

A resolução CONAMA Nº 420 e a Instrução Normativa Nº 74 de Santa Catarina (IN74-SC) apresentam metodologia para a gestão do problema em etapas que evoluem a cada passo, onde a cada passo, são adquiridas mais informações, evoluindo de maneira progressiva o conhecimento sobre a área. Somado a isso, essas legislações também discutem a necessidade de rever os objetivos e de serem realizadas avaliações periódicas das atividades implementadas.

Contudo, mesmo com os instrumentos e metodologias do GAC, não obstante ocorrem casos em que os objetivos da remediação/recuperação não são atingidos, em decorrência de desafios intrínsecos a área, os quais podem ser de natureza técnica ou não-técnica.

O National Research Council (NRC) identificou cerca de 126.000 casos inacabados de áreas contaminadas nos EUA, dentre os quais cerca de 12.000 demonstraram a necessidade de estudos aprofundados e prazos mais extensos que o comum para uma remediação efetiva. Essas áreas foram designadas como Áreas Complexas.

De forma geral, os desafios técnicos agregam dificuldades que possam ser encontradas devido à complexidade de característica intrínsecas a área, como por exemplo, o tamanho da área, o volume do material que constitui fonte de contaminação, os caminhos preferenciais de fluxo associados a geologia estrutural, condições geoquímicas do meio, características do(s) contaminante(s), entre outras. Os desafios não-técnicos englobam questões não menos importantes, como os objetivos e expectativas para a área, titularidade da área, financiamento para os projetos, legislações e regulamentações, o tempo de extensão da remediação, além de outras questões.

O ITRC elaborou um guia para auxiliar na identificação de casos que sejam passíveis de serem classificados como Área Complexa. Esse guia define os desafios técnicos e não-técnicos que podem ocorrer em uma área. As Tabelas 1 e 2 apresentam os desafios técnicos e não-técnicos, de acordo com o ITRC.

---

Tabela 1 - Desafios Técnicos de Áreas Complexas. Retirado de (ITRC, 2017).

Desafios Técnicos	Exemplos
Condições Geológicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heterogeneidade geológica / caminhos preferenciais</li> <li>• Falhas</li> <li>• Fraturas</li> <li>• Geologia cárstica</li> <li>• Meio de baixa permeabilidade</li> </ul>
Condições Hidrogeológicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades extremas ou variáveis da água subterrânea</li> <li>• Nível d'água flutuante</li> <li>• Contaminação profunda em água subterrânea</li> <li>• Interação entre água superficial e subterrânea e sedimento não impactado</li> </ul>
Condições Geoquímicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geoquímica extrema (como pH e alcalinidade baixa ou alta usuais, condições redox extremas)</li> <li>• Temperatura extrema em água subterrânea</li> </ul>
Condição dos Contaminantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presença de LNAPL ou DNAPL</li> <li>• Contaminantes de difícil manejo</li> <li>• Múltiplos Contaminantes ou em elevadas concentrações</li> <li>• Contaminantes emergentes</li> </ul>
Escala do Sítio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lugar e extensão da contaminação</li> <li>• Número, tipo e proximidade dos receptores</li> <li>• Profundidade da contaminação</li> <li>• Plumás extensas ou misturadas</li> </ul>

Apesar de não dispor de uma escala de classificação, admite-se que quanto maior o número de desafios, maior é o grau de complexidade da área (ITRC, 2017).

A classificação de Áreas Complexas ainda é pouco exigida por meio de legislações, mas conta com casos reconhecidos na América do Norte e na Europa. Por outro lado, ela vem sendo discutida cada vez mais amplamente, inclusive por órgãos responsáveis pelo gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil, como visto nos casos das recentes conferências técnicas organizadas pela associação AESAS e o Instituto Ekos.

Tabela 2 - Desafios Não-Técnicos de Áreas Complexas. Retirado de (ITRC, 2017).

Desafios Não-Técnicos	Exemplos
Objetivos do sítio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expectativas sociais e aceitabilidade social</li> <li>• Mudanças nos objetivos do sítio</li> <li>• Adoção objetivos para o sítio que diferem daqueles promulgados em referências ou critérios</li> </ul>
Gerenciar mudanças que podem ocorrer em longos períodos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remediação faseada</li> <li>• Uso futuro</li> <li>• Manejo do sítio</li> <li>• Múltiplos responsáveis</li> <li>• Perda de conhecimento institucional/Rotatividade de pessoal</li> <li>• Litígios</li> </ul>
A sobreposição de responsabilidades regulatórias	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cooperação federal e estadual</li> <li>• Mudanças em leis e regulamentos</li> <li>• Responsabilidade financeira</li> <li>• Áreas órfãs</li> <li>• Contaminantes sem critério regulamentado ou guia</li> </ul>
Controles institucionais (CIs)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rastrear e manusear os CIs</li> <li>• Fortalecimento de CIs</li> <li>• Gestão a longo prazo de CIs</li> </ul>
Mudanças no uso do terreno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mudanças no uso do solo ou água</li> <li>• Múltiplos donos</li> <li>• Acesso ao sítio</li> </ul>
Financiamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A falta de financiamento</li> <li>• Políticas que alterem as prioridades de programas e fundos</li> <li>• Não reconhecimento dos sítios prioritários com base no risco à saúde humana e demais bens a proteger</li> </ul>

### 3.3. Gerenciamento Adaptativo

Em 2003, o NRC desenvolveu o conceito de Gerenciamento Adaptativo aplicado a áreas contaminadas, recomendando-o sobretudo para locais onde era reconhecido a presença de importantes incertezas no gerenciamento, e que geralmente culminava em resultados insatisfatórios.

Em 2017, o ITRC recomendou que o Gerenciamento Adaptativo fosse utilizado em Áreas Complexas e desenvolveu um guia para a aplicação, o qual pode ser consultado em <https://rmcs-1.itrcweb.org/4-adaptive-site-management/>.

O Gerenciamento Adaptativo (GA) é um processo que pode ser adotado em Áreas Complexas para integrar e estruturar os processos de tomadas de decisão. Segundo o ITRC, o processo é flexível e iterativo, sendo apropriado para sítios onde existem incertezas significativas quanto ao sucesso da remediação. Esta forma de gerenciamento deve possibilitar maior efetividade na seleção e realização de ações de proteção prioritárias, bem como a otimização de custos e prazos.

Um dos pontos do Gerenciamento Adaptativo é o de permitir uma flexibilização quanto as técnicas empregadas para a remediação. Por exemplo, uma ou mais técnicas podem ser

implementadas, escolhidas de acordo com os objetivos desejados. O objetivo final da remediação geralmente busca atender disposições legais, definidas a nível federal ou estadual. Pela metodologia do GA, o objetivo final é então atingido pela resolução de todos os objetivos intermediários, que somados resultem no fim proposto pela remediação.

Outro ponto importante trata da avaliação periódica das etapas estabelecidas pelo GA (Figura 1). Esse princípio tem por objetivo permitir que as técnicas escolhidas sejam avaliadas e revisadas, através da coleta de dados de performance, possibilitando identificar quais são mais ou menos eficazes em função do objetivo proposto. Esse acúmulo de informação gradual permite maior conhecimento acerca do modelo conceitual do sítio, o qual é peça fundamental para uma remediação eficaz.

Para avaliação da remediação, o GA sugere que sejam feitas análises através de métricas como a taxa de remoção do poluente, o fluxo de massa, a concentração, o volume de solo contaminado, entre outras. Essas métricas devem ser observadas junto ao período e a técnica de remediação que foram empregadas, os objetivos pretendidos e os resultados obtidos.

Com isso, através de um planejamento robusto e monitoramento periódico da performance da remediação, associados ao desenvolvimento do modelo conceitual com os dados adquiridos, seria então possível tomar melhores decisões quanto aos diferentes aspectos do projeto, como a escolha das tecnologias empregadas, se os objetivos previstos são factíveis ou se necessitam ser revistos, otimizar as técnicas em uso e refinar o Modelo Conceitual.

De acordo com as instruções nos documentos do ITRC, a revisão do Modelo Conceitual é parte essencial para o processo de Gerenciamento Adaptativo. O Modelo Conceitual deve ser revisitado e refinado periodicamente durante a duração do projeto, e deve ser atualizado conforme necessário.

Dessa forma, o ITRC consiste em um guia para a caracterização integrada da área de estudo, que auxilia as entidades responsáveis na produção de um Modelo Conceitual que tenha robustez adequada para que o processo de remediação atinja resultados satisfatórios. A Figura 2 ilustra as etapas a serem empregadas para que seja alcançado um Modelo Conceitual maturo para atender as necessidades do projeto.

De forma geral, as etapas envolvem a identificação e geração dos dados, análise e interpretação dos dados e a atualização das informações, de forma iterativa até que se obtenha confiança satisfatória (Figura 2).

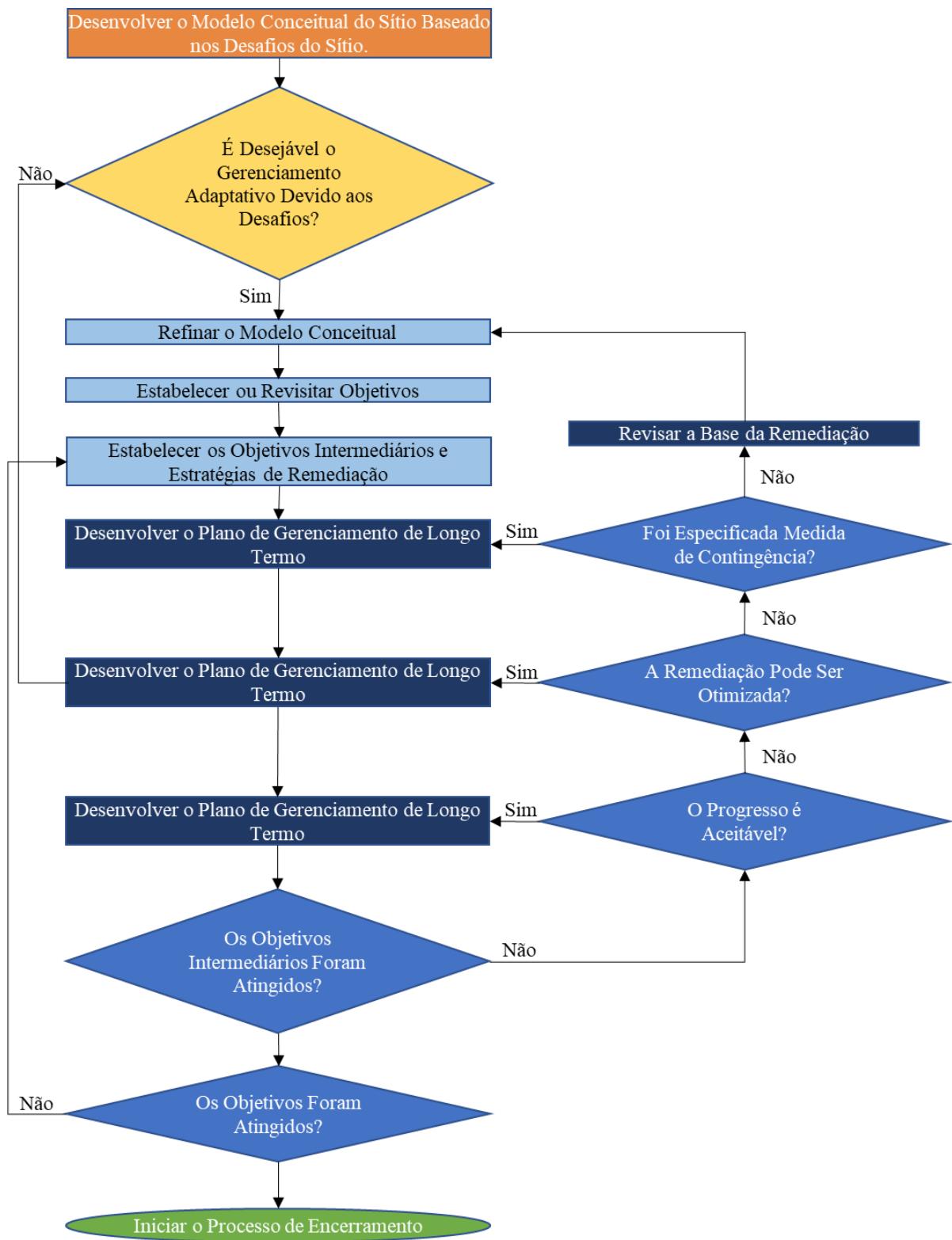


Figura 1 – Fluxograma do Gerenciamento Adaptativo. Traduzido de ITRC (2017).

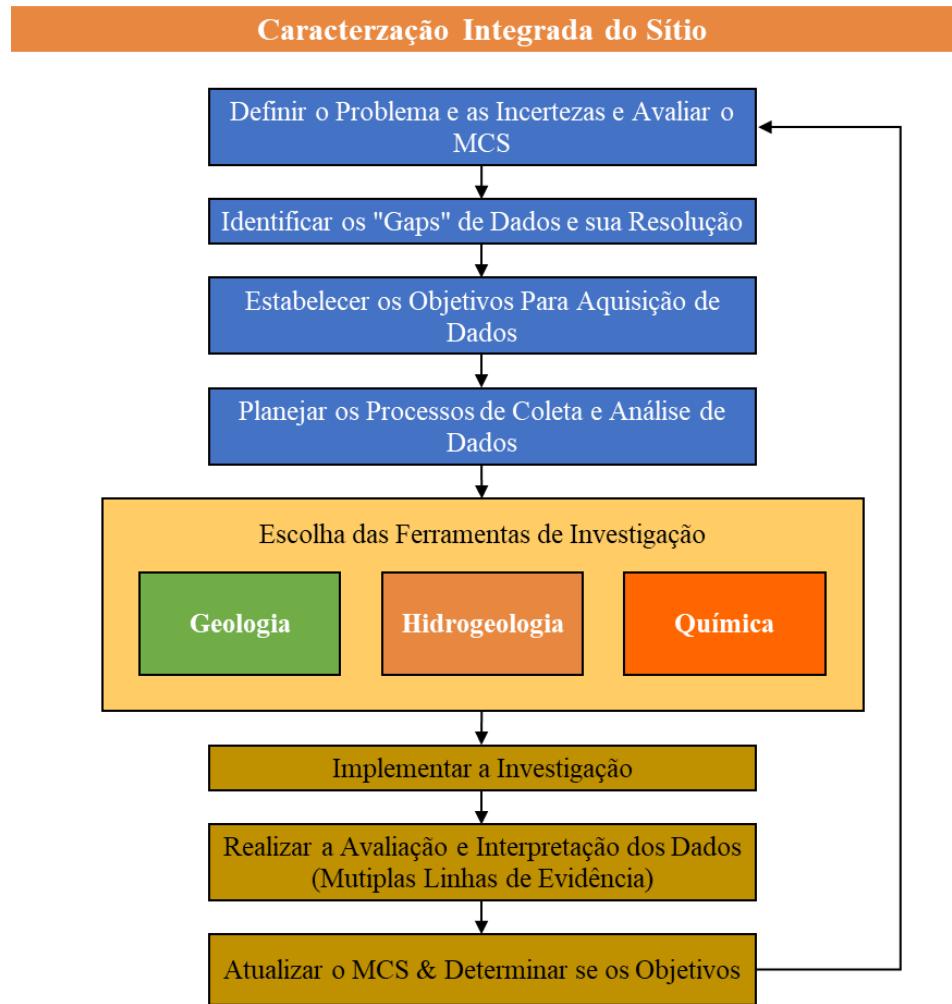


Figura 2 – Abordagem para Caracterização Integrada do Sítio. Retirado de ITRC (2015b).

No Brasil, a IN74-SC fornece ideia similar aos princípios do GA, ao dispor que as remediações devem ser revisadas em períodos de até 5 anos, e que os resultados devem ser avaliados e revistos de acordo com os objetivos propostos. Dessa forma, essa instrução normativa pode ser utilizada como referência para os projetos de reabilitação das áreas impactadas, uma vez que a remediação é caminho para a recuperação ou reabilitação de áreas contaminadas.

### 3.4. Legislação e Critérios Acordados

Neste tópico, é feita uma apresentação geral das legislações pertinentes ao GAC, e apresentados os termos acordados entre o MPF e as empresas de mineração quanto a recuperação/reabilitação das áreas degradadas.

As legislações correspondem a resolução CONAMA 420/09, a nível federal, e a IN74-SC, estadual.

### **3.4.1. Critérios técnicos atualmente em utilização**

Os critérios atualmente em uso para se avaliar as medidas quanto a reabilitação e/ou recuperação das áreas degradadas na Bacia Carbonífera foram estabelecidos pelo GTA – Grupo Técnico de Assessoramento, entidade comissionada para auxiliar o Ministério Público (MPF) na tomada de decisões, no estabelecimento de medidas, acordos e termos, com as partes réis, ou seja, as empresas de mineração que atuaram na Bacia Carbonífera Sul Catarinense.

Em ata da 30<sup>a</sup> reunião do GTA, foram discutidos os critérios que, naquela época, se tornaram vigentes em relação a recuperação das áreas degradadas, e com isso, foi elaborado um documento, mencionado como “Critérios Técnicos” (CT). Esse documento aborda diversos aspectos como condições para o solo, rejeitos/estéreis, águas superficiais e subterrâneas nas áreas impactadas pela mineração de carvão em Santa Catarina.

Em seus itens, o CT aborda e define conceitos como área degradada, recuperação, restauração, reabilitação e uso futuro. O termo institui que, para cada área degradada, deve ser executado um PRAD (plano de recuperação de área degradada) que atenda aos critérios estabelecidos pelo texto.

O documento prevê as condições para recuperação em dois tipos de áreas, as quais são: áreas degradadas em Áreas de Preservação Permanente (APP), as quais devem ter como uso futuro a preservação permanente, e “demais áreas degradadas”, cujo uso futuro deve ser previsto pelo PRAD de cada área a ser recuperada.

De forma geral, as exigências que ficaram estabelecidas para a recuperação das áreas são: a remoção total dos rejeitos e estéreis (quando possível), a recomposição da topografia natural, do solo, da cobertura vegetal, a implementação de taludes e sistemas de drenagens, o controle da erosão e, por fim, o monitoramento dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e também da vegetação.

No caso da impossibilidade de remoção completa dos rejeitos, é exigido o tratamento *in situ* do material, através da aplicação de cobertura seca, que tem como finalidade impermeabilizar o rejeito do solo reconstituído, evitando a oxidação da pirita e, portanto, cessando a geração de DAM.

Para as áreas mineradas em subsolo, são solicitadas medidas que evitem a entrada de ar e drenagens superficiais no interior das galerias, o tamponamento ou tratamento (passivo ou ativo) dos pontos que vertem DAM e a eliminação do perigo de acidentes com transientes nas áreas degradadas, além da redução da contaminação das drenagens ácidas através do desvio de drenagens superficiais e tamponamento das bocas de mina (furos de sonda, acessos às galerias subterrâneas, poços de ventilação, etc.).

O documento prevê, para quando o uso futuro for o de agropecuária, a necessidade de serem apresentados pelos PRADs laudos de testes toxicológicos e ecotoxicológicos que atestem a possibilidade de implementação dessa atividade.

Por fim, são abordadas de forma suscinta, questões relativas aos moradores como o envolvimento da comunidade com os projetos de recuperação e suas expectativas.

O documento depois é complementado por duas atas, que visam abordar critérios para avaliar a eficácia da recuperação das áreas degradadas, dentre os quais, a qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos que passam pela área a ser recuperada.

Nessas atas, ficou acordado que, para os solos, as concentrações de diferentes parâmetros, tais como metais, sulfato, acidez, pH, entre outros, seriam observados de forma a não ultrapassarem os limites preconizados pela CONAMA 420/09, em função do uso futuro pretendido, por um período de monitoramento de 4 anos.

Quanto aos recursos hídricos, para as águas superficiais ficou estabelecido que se os valores indicativos de degradação apresentassem qualidade a jusante melhor que a montante, a recuperação seria considerada eficaz. A qualidade em questão corresponde as concentrações de pH, Fe, Sulfato, Mn, Acidez e Al.

Para as águas subterrâneas, devem ser comparados pontos a jusante e a montante, fora da área degradada, sendo o critério para recuperação o mesmo que das águas superficiais, isto é, a jusante apresentar condições melhores que a montante. Entretanto, esse critério não teve consenso entre as partes, ficando indefinido para essa matriz a condição considerada como recuperada.

Como os valores limites para os parâmetros a serem observados são mais restritivos para a recuperação do que na reabilitação, foi permitido aos responsáveis reabilitar as áreas degradadas, necessitando para isso declarar o uso pretendido para a área. Nesse caso, ao invés dos valores de prevenção, poderiam ser utilizados como referência os limites preconizados pela CONAMA 420/09 para os usos residencial, industrial ou agrícola.

### **3.4.2. CONAMA 420**

No Brasil, uma das legislações que tratam de áreas contaminadas corresponde a resolução CONAMA 420 de 2009. De forma geral, essa resolução estabelece diretrizes para a execução do gerenciamento de áreas contaminadas, além de apresentar valores de referência para diversas substâncias que possam oferecer risco à saúde humana e risco ecológico.

A CONAMA, em seu artigo 6º, inciso V, define contaminação como a presença de substâncias químicas, no solo, água ou ar, decorrentes de atividades antrópicas, em

concentrações tais que restrinjam a utilização desse recurso ambiental para os usos atual ou pretendido, definidas com base em avaliação de risco à saúde humana, assim como aos bens a proteger, em cenário de exposição padronizado ou específico. Essa definição permite caracterizar as áreas impactadas pela mineração de carvão em Santa Catarina como áreas contaminadas.

Em sua redação, a resolução apresenta a definição de princípios e conceitos importantes, como os de recuperação e reabilitação, os objetivos que devem ser atendidos, tais como a eliminação de perigos, a redução de riscos à saúde humana e ao meio ambiente, entre outros, além de outras questões pertinentes a gestão dessas áreas.

Outro ponto relevante sobre essa resolução é que ela prevê uma abordagem em etapas consecutivas de gerenciamento, onde o grau de conhecimento do problema da contaminação aumenta conforme se avançam as etapas. Tais etapas contemplam desde a identificação da contaminação, até a intervenção e monitoramento, cujo objetivo final é a eliminação ou redução dos riscos a níveis toleráveis.

A última etapa consiste na realização de um monitoramento que visa avaliar a eficácia das medidas e provar que os riscos da área se encontram em níveis toleráveis, de acordo com o uso atual ou pretendido.

### **3.4.3. IN74-SC**

A Instrução Normativa Nº 74 (IN74-SC) é um documento do IMA (Instituto Meio Ambiente) do estado de Santa Catarina, que define critérios para a apresentação de planos, programas e projetos ambientais a serem executados no Gerenciamento de Áreas Contaminadas.

Assim como na resolução CONAMA 420, a IN74-SC também apresenta definições e conceitos acerca do GAC.

Segundo essa resolução, Área Contaminada é:

Área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger.

Sendo assim, a definição proposta para Área Contaminada é passível de ser aplicada nas áreas degradadas pela mineração de carvão.

O IN74 define também o termo “Reabilitação” como um processo que tem por objetivo proporcionar o uso seguro de áreas contaminadas, eliminando ou reduzindo os riscos impostos pela área aos bens a proteger.

Assim como a CONAMA 420, a IN74-SC estabelece metodologia que visa reduzir para níveis aceitáveis os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente, em decorrência de exposição às substâncias provenientes de áreas contaminadas.

Da mesma forma, também prevê, em etapas, como deve ser o processo de identificação de Áreas Contaminadas, assim como os critérios para a reabilitação dessas áreas. A figura abaixo (Figura 3) exibe o fluxograma proposto pela IN74-SC, das etapas constituintes do GAC.

Outro ponto relevante previsto pela resolução é o da definição de Modelo Conceitual e da necessidade de desenvolvimento do mesmo para as atividades de GAC. Ainda, que a tomada de decisões e o gerenciamento devem ser realizados segundo os riscos oferecidos, pelas áreas fontes de contaminação, aos receptores em potencial. Essa análise dos riscos é uma das etapas fundamentais, pois auxilia na priorização de áreas críticas a serem remediadas.

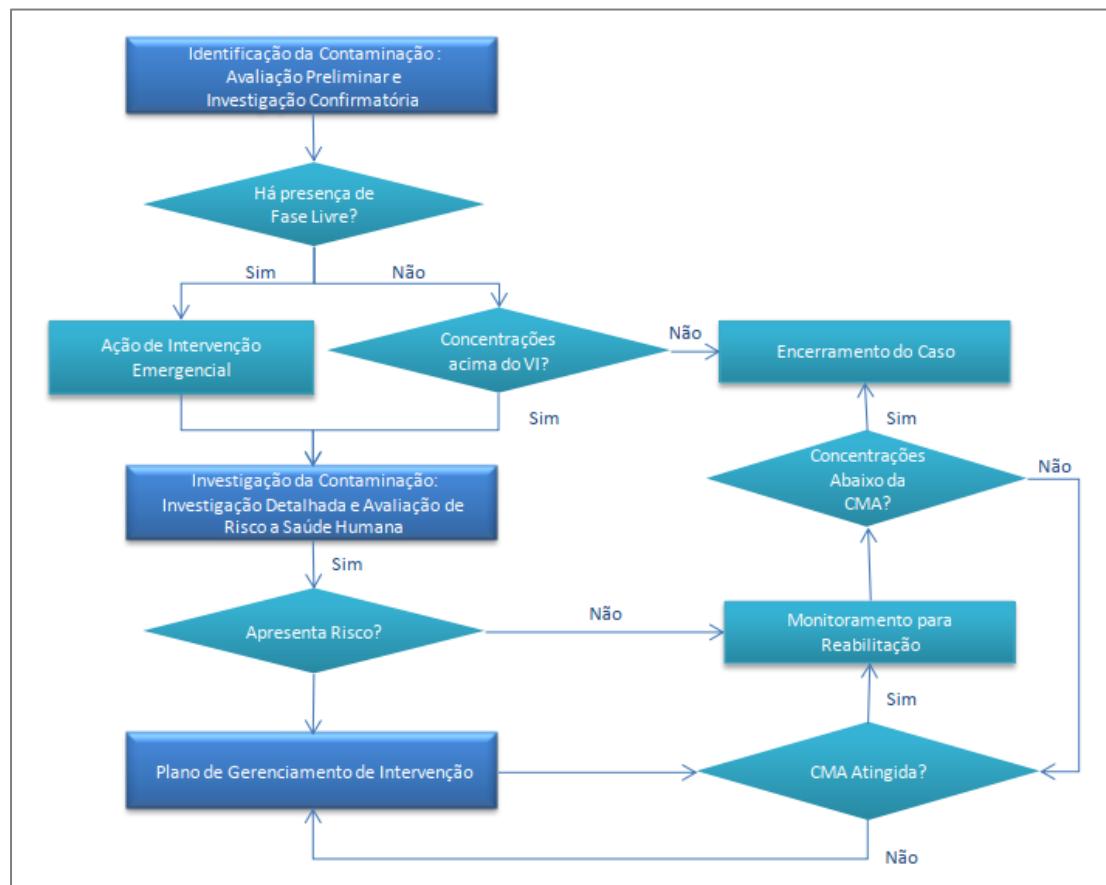


Figura 3 – Processo de gerenciamento de áreas contaminadas (GAC). Retirado de IN74-SC.

#### 3.4.4. Discussão sobre a CONAMA 420 e IN74-SC

Tanto a resolução CONAMA 420 como a IN74-SC constituem metodologias e práticas úteis de serem aplicadas no gerenciamento dos passivos gerados pela mineração de carvão em Santa Catarina.

A vantagem na adoção desses dispositivos se deve pela metodologia mais robusta e desenvolvida existente em ambos documentos, tratando de objetivos similares aqueles apresentados nos Critérios Técnicos quanto a reabilitação dos sítios degradados, porém de forma mais clara, ordenada e objetiva que os Critérios Técnicos acordados entre o MPF e as empresas de mineração.

Dessa forma, uma abordagem através dos procedimentos dessas legislações forneceria instruções mais claras e melhor estruturadas aos responsáveis, além de promover uma gestão da contaminação voltada à redução do risco à saúde humana e aos demais bens a proteger.

A abordagem sob o ponto de vista do GAC permite, através da análise de risco, a priorização de áreas, auxiliando na gestão das áreas impactadas, o que pode ser complexo em virtude da escala dessas áreas (centenas de hectares), intensidade da contaminação, heterogeneidade do meio, entre outros fatores.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A elaboração desse trabalho contou com uma extensa revisão bibliográfica a respeito do problema da drenagem ácida de mina na mineração de carvão, em específico quanto a forma com que outros países realizam a gestão desse problema. Para isso, foram pesquisados, em sites de busca como Scopus e o Web of Science, artigos sobre como é feita a gestão desse problema em outros países como EUA, Canadá, Australia, União Europeia, entre outros países produtores dessa *commodity*.

Junto a essa pesquisa, também foram procurados informações e documentos em sites que hospedam conhecimento acerca da DAM na mineração, como por exemplo o *Clu-in* da USEPA (<https://clu-in.org/>) e o ITRC (<https://itrcweb.org/home>).

Em seguida, buscando-se reconhecer quais são as práticas atualmente empregadas em áreas degradadas (antigas minas de carvão) na Bacia Carbonífera Sul Catarinense, foram obtidos documentos a respeito de uma antiga mina subterrânea que possui passivos ambientais em sua área. Nesses documentos, encontram-se um Estudo de Diagnóstico Ambiental (DIA, 2006), dois Projetos de Recuperação Área Degradada (PRAD, 2009a, b), um estudo Hidrogeológico (IPH, 2005), dois relatórios de monitoramento ambiental (SATC 2017, SATC 2018), além de atas e termos estabelecidos entre o Ministério Público e as entidades responsáveis pelas áreas impactadas.

Além dos documentos e fontes supracitadas, foram também consultadas legislações pertinentes ao Gerenciamento de Áreas Contaminadas, em especial a resolução CONAMA 420 de 2009, e a Instrução Normativa Nº 74 do IMA (Instituto do Meio Ambiente) de Santa Catarina (IN74-SC).

A partir do levantamento das informações contidas nos documentos citados, são apresentadas as principais medidas planejadas pelos PRADs e quais foram os critérios acordados entre o MPF e empresas de mineração, além das demais informações contidas a respeito da área de estudo. Essas informações são apresentadas de forma a caracterizar o sítio e a sua contaminação, como também demonstrar quais são as informações coletadas, quais são as medidas previstas para resolução do problema, qual a sua qualidade, incertezas, e qual seria o Modelo Conceitual correspondente às informações disponíveis nesses documentos.

Na sequência, é feita uma avaliação crítica sobre as informações disponíveis, apresentando-se as lacunas e diferenças em relação a uma abordagem de acordo com os princípios da Gestão de Áreas Contaminadas.

Por fim, são discutidos os conceitos de Áreas Complexas e Gerenciamento Adaptativo (ITRC), sendo aplicada uma classificação para a área quanto ao grau de complexidade, de

acordo com o conceito de Áreas Complexas, e a maturidade do modelo conceitual disponível em função das informações contidas no DIA, PRADs, Estudo Hidrogeológico e demais documentos.

## 5. RESULTADOS

Esse capítulo apresenta as principais informações encontradas nos documentos da mina de estudo, que incluem geologia, mapas, dados, entre outras informações importantes. São discutidas as qualidades das informações, as incertezas, as lacunas, isso em relação a um olhar sob o ponto de vista do GAC.

Também é apresentada uma classificação da maturidade do Modelo Conceitual com os dados disponíveis, e discutido se a área de estudo é elegível ou não como Área Complexa segundo a definição do ITRC.

### 5.1. Histórico e Localização da Área de Estudo

A área de estudo se encontra inserida na Bacia Carbonífera do Sul de Santa Catarina, mais especificamente na sub-bacia do rio Sangão, afluente do rio Mãe Luzia, pertencentes a Bacia Hidrográfica do rio Araranguá (Figura 4)

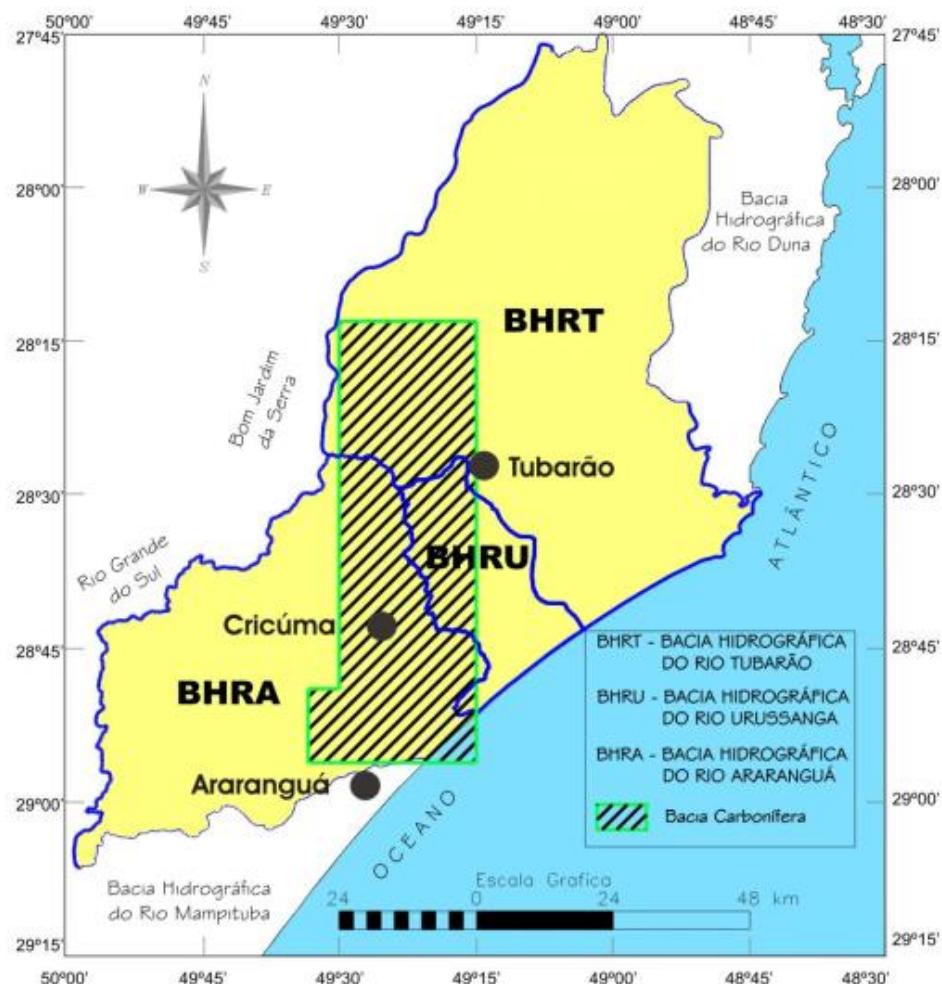


Figura 4 – Localização da Bacia Carbonífera do Sul de Santa Catarina. Retirado de DIA (2006).

Durante a década de 70, a bacia do rio Sangão comportou o maior número de atividades de beneficiamento de carvão. Ao longo de seus 70 km de extensão, esse rio recebe a contribuição

de aproximadamente 1900 ha de áreas de deposição de rejeito, além de efluentes industriais diversos, degradando a condição natural do rio (Figura 5)

A Figura 6 apresenta a vista em planta da área total da mina de estudo, que comporta uma área superficial (e que corresponde a área estudada pelo DIA e PRADs elaborados) onde o carvão era beneficiado e estocado, e uma área subterrânea, onde se concentraram as atividades de extração mineral (contemplada pelo Estudo Hidrogeológico e pelos Monitoramentos Ambientais). Por questões de sigilo, as coordenadas da área foram omitidas.

A mina operou entre os anos de 1979, até meados de 1996, época em que teve suas atividades paralisadas em decorrência de um conflito territorial entre a empresa mineradora e civis, culminando em um decreto que atribuiu as áreas da mina como Áreas de Proteção Ambiental do Município (DIA, 2006).



Figura 5 – Rio Sangão com seu leito assoreado pela deposição de rejeitos de carvão, à montante da área da mina de estudo. Retirado de Alexandre (2000).

Entre 1985 e 1996, teriam sido gerados cerca de  $9 \times 10^6$  toneladas de rejeito, oriundos do beneficiamento do carvão mineral. Segundo as informações presentes em informativos das empresas que extraíram o carvão, cerca de 30% do rejeito produzido era do tipo piritoso, característica essa associada a geração de drenagem ácida de mina.

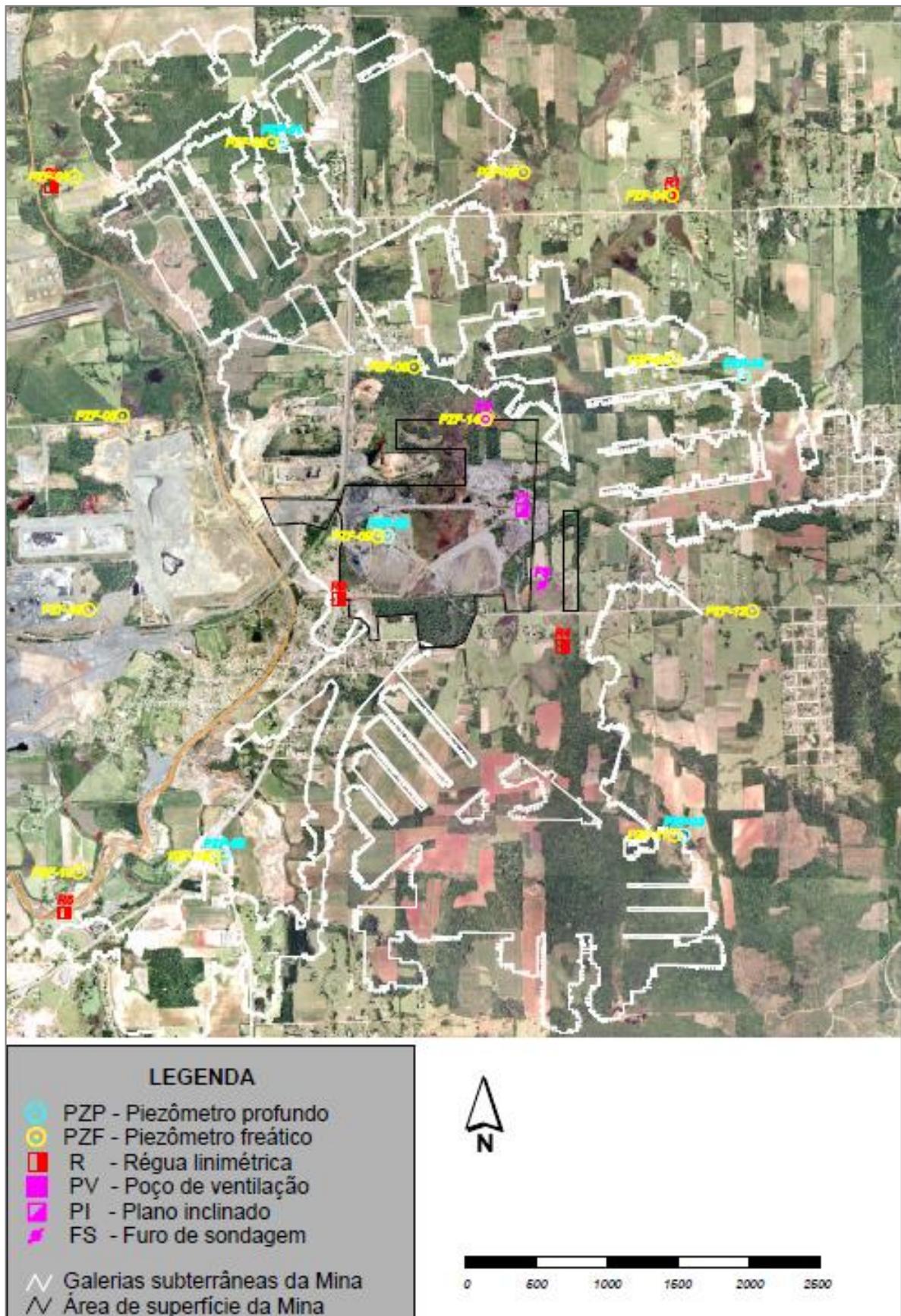


Figura 6 - Inventário de poços utilizados pelo Estudo Hidrogeológico da área da mina. Malha da superfície (em preto) e área de lavra subterrânea (em branco). Retirado de IPH (2005).

## 5.2. Geologia da Área de Estudo

### 5.2.1. Geologia Regional

A área de estudo se encontra inserida na Bacia do Paraná, cuja Formção Rio Bonito hospeda às camadas de carvão exploradas na região. A Figura 7 apresenta a coluna estratigráfica para o município de Criciúma.

A Formação Rio Bonito e a Formação Palermo são as unidades litoestratigráficas de maior expressão. Essas formações correspondem a cerca de 2/3 dos pacotes sedimentares, sendo o 1/3 restante representado pelas litologias das Formações Iriti, Estrada Nova, Rio do Rasto, Serra Geral e planícies aluvionar e costeira. De forma subordinada, ocorrem dispersos afloramentos do embasamento cristalino, representado por granitóides (Dias, 1995).

### **Suíte Intrusiva Pedras Grandes**

No limite com o município de Morro da Fumaça, ocorrem remanescentes isolados de rochas do embasamento cristalino, aflorando sob a forma de matações. São microclínio-granitóides, tardi a pós-tectônicos, de alcalinos a subalcalinos, sem orientação, leuco a mesocráticos com textura granular porfirítica de megacristais de feldspato potássico.

### **Formação Rio Bonito**

A Formação Rio Bonito é a mais importante para a área de estudo. Ela é composta pelos membros Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis. O Membro Triunfo, base da sequência, é essencialmente constituído por arenitos e conglomerados cinza-claros, finos a grosseiros, associados a pelitos cinza-escuros, carbonosos, pouco frequentes. Em seguida, recobrindo o Membro Triunfo, ocorrem as rochas de sedimentação pelítica, com intercalações de areia muito fina e, mais raramente, estratos de marga, do Membro Paraguaçu. No topo da Formação, ocorre um espesso pacote de arenitos litorâneos com delgadas intercalações de siltitos cinzas portadores de leitos e camadas de carvão, pertencentes ao Membro Siderópolis.

### **Formação Palermo**

Essencialmente, é composta por siltitos cinza-esverdeados a cinza-escuros, tornando-se cinza-amarelados quando intemperizados. Na base da seção, ocorre uma interlaminação silte-areia fina a muito fina com às feições flaser, wavy, linsen e hummocky. Em direção ao topo, a sequência se torna mais pelítica, de laminação paralela e lenticular. Também ocorrem lâminas, lentes e concreções de calcários impuros, cinza-claros, às vezes brechóides e podem ser encontrados, com frequência relativa, estruturas de carga, bioturbação e nódulos de pirita.

## Formação Irati

A Formação Irati, na área de estudo, ocorre sotoposta a rochas básicas da Formação Serra Geral, que altera sua espessura e características devido a coloração de sills. Varia de siltitos cinza-escuros e pretos a folhelhos pirobetuminosos, com laminação paralela bem desenvolvida. Leitos e lentes de calcário impuro podem ser encontrados na sua base.

ERA	PERÍODO	Unidades Cronoestratigráficas		Unidades Litoestratigráficas	Litologias	
		CENOZOÍCO	QUATERNÁRIO-TERCIÁRIO			
MESOZOÍCO	JURO-CRETÁCEO	GRUPO SÃO BENTO	depósitos aluvionares continentais e marinhos costeiros		Cascalho, areia e silte inconsolidados preenchendo calhas, planícies aluvionares e planície costeira.	
			Formação Serra Geral		Diabásio sob a forma de "sill". Litótipo dominante é equigranular fino a afanítico, cinza-escuro a preto, com variações locais para tramas porfiríticas.	
	PERMIANO SUPERIOR	GRUPO PASSA DOIS	Formação Rio do Rasto		Siltitos castanho-avermelhados com intercalações de arenitos finos, bem selecionados, avermelhados.	
			Formação Estrada Nova		Siltitos cinza-escuros a pretos e folhelhos finamente micáceos com intercalações de lâminas e lentes de calcário impuro.	
			Formação Irati		Siltitos e folhelhos cinza-escuros a pretos, folhelhos pirobetuminosos e lentes de calcário impuro na base.	
	PERMIANO MÉDIO A SUPERIOR	GRUPO GUATÁ	Formação Palermo		Siltitos cinza-esverdeados a cinza-escuros intercalando lâminas e lentes de areia fina a muito fina com cimento carbonático.	
			Formação Rio Bonito	Membro Siderópolis	Areias transgressivas: arenito fino a muito fino, quartzoso, com delgadas intercalações de pelítos escuros.	
					Seqüência Barro Branco: arenito médio a grosseiro, arcosiano, conglomerático, com discretas intercalações de folhelhos pretos e camada de carvão no topo.	
			Formação Rio Bonito		Seqüência Bonito: multiciclos de areia fina a muito fina, quartzosa, e pelítos cinza-escuros apresentando, quando completos, um conjunto de três camadas de carvão no topo.	
	PROTEROZÓICO SUPERIOR	SUÍTE PEDRAS GRANDES		Microclinio-granitóides com textura porfirítica de megacristais de feldspato postássico, em matriz média à grosseira, de composição granito-granodiorítica.		

Figura 7- Coluna Estratigráfica para o município de Criciúma. Retirado de Dias (2005).

## Formação Estrada Nova

Essa formação é composta por uma sequência de siltitos cinza-escuros a pretos e folhelhos finamente micáceos. Comumente intercala lentes e lâminas de calcário impuro e nódulos de pirita. Mais raramente, há a cimentação carbonática de fraturas subverticais.

### **Formação Rio do Rasto**

A Formação Rio do Rasto pouco ocorre no município de Criciúma, resumindo-se a uma estreita faixa situada no topo do Espigão da Toca, no extremo sul do município. É caracterizada por siltitos castanho-avermelhados, finamente micáceos, com intercalações de arenitos finos, bem selecionados, avermelhados, e eventualmente, lentes ou bancos de calcário impuro. Preferencialmente, ocorre como rocha equigranular fina a afanítica, de coloração cinza-escura a preta, eventualmente com passagens para fácies porfiríticas.

### **Formação Serra Geral**

A Formação Serra Geral se constitui em uma soleira de extensão regional, inserido ao nível da Formação Irati, e em parte, truncando também a base da Formação Estrada Nova.

### **Quaternário / Terciário**

Genericamente, são aluviões continentais que, quanto mais a montante, mais refletem as composições das unidades litoestratigráficas circunjacentes. A medida em que as calhas se desenvolvem em direção a jusante, os depósitos passam a ter apreciáveis variações laterais e verticais na sua composição.

No domínio da planície costeira, região sul do município de Criciúma, há uma gama variada de subambientes e depósitos associados (leques aluviais, terraço lagunar, barreiras marinhas, campos de dunas, turfeiras, etc.), com relações laterais complexas.

### **5.3. Geologia local**

Na área da mina, são encontradas as litologias pertencentes as formações Palermo, Irati, Serra Geral, além de sedimentos recentes. A Formação Palermo ocorre de maneira contínua a partir da porção norte até o extremo sul da área de influência da mina. Ela é caracterizada por apresentar um espesso pacote de ritmitos, com interlaminação de areia-silte e argila.

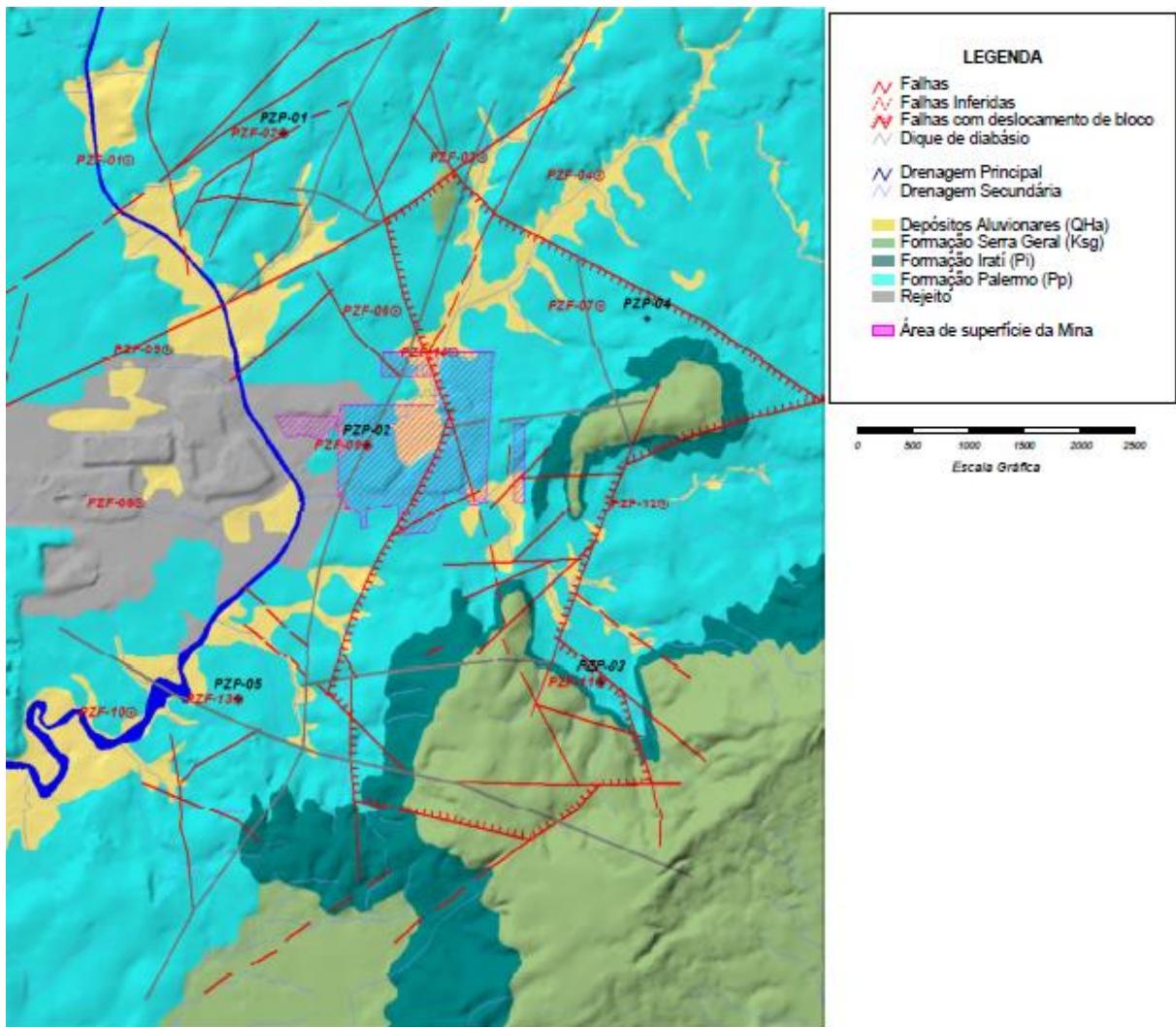
A Formação Irati aflora em dois pequenos morros na área da mina, sendo constituída por folhelhos cinza-escuros a pretos, intercalados com folhelhos pirobetuminosos.

A Formação Serra Geral ocorre sob a forma de diques, comumente encaixados em falhas de diferentes direções, e sob a forma de soleiras.

Junto a planície do rio Sangão e tributários, ocorrem pequenos depósitos aluviais, de material argilo-arenoso, rico em matéria orgânica e de cor escura.

A Figura 8 ilustra o mapa geológico da área de estudo. Segundo IPH (2005), na área da mina ocorrem várias falhas que se interceptam e conferem à área o aspecto de um mosaico

irregular, com um grande bloco afundado na porção central da área. Os principais traços estruturais são falhas de orientação N10E, que frequentemente encaixam espessos diques de diabásio. Também são encontradas falhas de outras direções, algumas com rejeito vertical expressivo, ultrapassando os 25 m em alguns locais. Na área central, verifica-se a existência de um pequeno alto estrutural, que pode ser resultado do basculamento de blocos relacionados a movimentação tectônica (IPH, 2005).



Dentro da sua área em superfície, são encontradas drenagens, córregos e áreas alagadas (banhados), além de antigas instalações como a usina de beneficiamento, equipamentos abandonados, bacias de decantação de finos, rejeito do beneficiamento de carvão e bocas de mina (poços de acesso, de ventilação e furos de sonda). Os rejeitos são encontrados em pilhas dispersas por toda a área da mina (Figura 9) e algumas bocas de mina são surgentes (Figura 10).

Ao entorno do perímetro da mina, podem ser vistas áreas de uso agrícola e áreas urbanas, como um campo de futebol e um cemitério. Dentro da área da mina, o DIA reconheceu a existência de posseiros que utilizam o terreno para a criação de animais e silvicultura, além da existência de alguns estabelecimentos comerciais como uma usina de asfalto e uma fábrica de lajotas. A Figura 11 mostra o uso e ocupação do solo na área da mina.



Figura 9 – Pilha de rejeitos ao lado do antigo lavador. Retirado de DIA (2006).

Na época de elaboração do Diagnóstico Ambiental da área, foram cubados cerca de 1,6 milhão de  $m^3$  dispostos em superfície. Entretanto, analisando imagens de satélite, é possível ver que boa parte dos rejeitos foram removidos, possivelmente para o rebeneficiamento do material que, em parte, apresentava características economicamente viáveis.



Figura 10 – Medição da vazão no poço de ventilação da mina. Retirado de DIA (2006).

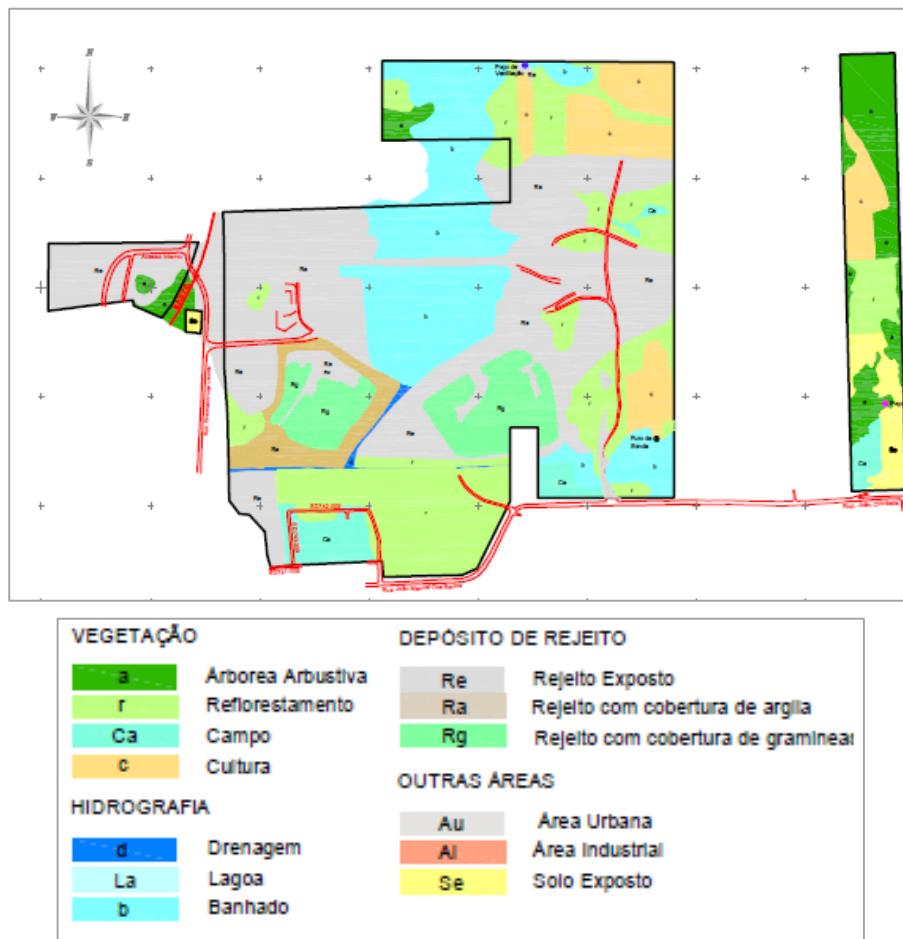


Figura 11 – Identificação do uso e ocupação do solo para a área da mina. Retirado de DIA (2006).

Outra característica da área é a ocorrência de surgências em bocas de mina não-seladas. O DIA identificou na superfície da mina ao menos dois pontos surgentes, que correspondem a um

poço de ventilação (Figura 10) e um antigo furo de sonda. Esses pontos vertem águas ácidas das galerias subterrâneas com elevados teores de ferro, sulfatos e acidez, que drenam para os banhados. A vazão calculada para o poço de ventilação foi de 45 L/s, com uma carga de 278 mg/L de Fe; 11,8 mg/L de Mn e 535 mg/L de acidez.

### **5.5. Modelo Conceitual com Dados Existentes**

Utilizando dos dados disponíveis nos documentos existentes, é possível avaliar o Modelo Conceitual composto por essas informações, as incertezas dos dados produzidos e a sua qualidade. As informações que serão apresentadas a seguir foram adquiridas através do Diagnóstico Ambiental (DIA), dois Projetos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRADs), do Estudo Hidrogeológico (IPH) e dois relatórios de monitoramento ambiental (SATCs).

A contaminação na área ocorre em função do rejeito disposto sem proteção alguma contra as intempéries. A pirita existente nos rejeitos de carvão sofre oxidação em contato com o ar, gerando acidez e promovendo a liberação de metais no ambiente. O rejeito do beneficiamento do carvão ocorre em três frações distintas: rejeito fino, xistoso e piritoso, os quais contribuem mais ou menos para a contaminação do meio em razão da quantidade de sulfetos e características geoquímicas variadas (DIA, 2006).

### **Fontes de Contaminação**

Para avaliar o potencial de poluição dos rejeitos, o DIA elaborou ensaios de solubilidade e lixiviação seguindo as normas NBR 10005 e 10006. De acordo com os ensaios de diferentes amostras de rejeito, os resultados indicaram que praticamente todos os materiais contribuem com algum tipo de metal poluente, tais como Al, Cd, Cr, Fe, Mn, Pb e Zn.

Os rejeitos finos ocorrem principalmente em antigas bacias de decantação. As bacias eram utilizadas até a sua exaustão, sendo uma outra construída ao lado quando atingido o volume máximo. Os diques dessas bacias foram construídos com materiais estéreis da extração do carvão e rejeitos grossos (DIA, 2006). Na área da mina, são encontradas três bacias de finos (Figura 12) que acumulam um volume de aproximadamente 1.150.000 m<sup>3</sup> desse material.

Nas áreas de banhado que ocorrem na mina, existe um grande volume de sedimentos que também contribuem para a poluição do meio. As análises realizadas revelaram que esses sedimentos geram acidez e acumulam elevados teores de metais, contribuindo para a geração de DAM e contaminação do meio. A cubagem realizada para essa matriz apresentou volume de cerca de 152.500 m<sup>3</sup>. Em uma das amostras de sedimentos, o pH em água obtido foi de 2,7 e carga de ferro total equivalente a 440 g.k<sup>-1</sup>.

Além da contaminação pelo rejeito de carvão, em ao menos três locais operavam transformadores elétricos a base de óleo de ascarel, um produto que possui, em sua composição, bifenilas policloradas, composto organoclorado complexo de elevada toxicidade e carcinogenicidade. Somente um transformador foi encontrado, depredado e com indícios de derramamento do óleo no solo. Nas demais áreas que contavam com o equipamento, foram encontrados indícios de derramamento do óleo no solo. A medida adotada pelo PRAD (2009a, b) foi o de acumular o solo contaminado em uma pilha no local, porém sem a proteção adequada.

### **Regime Hidrogeológico**

O estudo hidrogeológico realizado pelo IPH aborda diferentes aspectos relacionados aos recursos hídricos, como a geologia, hidrogeologia, geoquímica e modelo de fluxo subterrâneo, além do monitoramento das águas superficiais, na área total da mina, ou seja, inclui a área superficial e subterrânea. Os dados obtidos pelo estudo contaram com um inventário de poços composto por 29 poços do tipo “cacimba”, 14 piezômetros do freático (PZF) e 5 piezômetros profundos (PZP). A Figura 6 mostra a espacialização dos poços PZF e PZP que foram instalados para a elaboração do estudo.

De acordo com o IPH, em decorrência das atividades de extração do carvão mineral, as galerias subterrâneas constituem verdadeiros corredores por onde a água do aquífero profundo pode correr livremente. Esse fato modificou o fluxo típico na área, fazendo com que o comportamento desse aquífero fosse similar ao de um aquífero do tipo carste (IPH, 2005).

A geologia estrutural da área conta com estruturas como fraturas e falhas de diferentes direções, que podem ter diques de diabásio encaixados. Esses elementos constituem caminhos preferenciais de fluxo para a água subterrânea e atribuem significativa heterogeneidade ao fluxo d’água subterrâneo.

Outros elementos que exercem influência no regime hidrogeológico da área são as bocas de mina, tais como furos de sonda mal selados, poços de acesso e poços de ventilação. As bocas de mina, e também as falhas e fraturas, podem propiciar a conexão hidráulica entre os aquíferos, possibilitando fluxo ascendente ou descendente, surgências na superfície, e a mistura das águas. Esse fato abre caminho para a movimentação da contaminação entre um e outro nível aquífero.

### **Hidrogeoquímica**

De forma geral, pode-se concluir que ambos os aquíferos se encontram contaminados por DAM. Os laudos das análises para água subterrânea evidenciam a contaminação por metais,

acidez e sulfato na área de estudo, em maior ou menor intensidade, a depender da localização do poço amostrado (IPH, 2005).

Os resultados dos parâmetros analisados para o aquífero freático apresentaram faixa de pH entre 1,9 e 7, evidenciando o resultado da contaminação por DAM. Os metais analisados (Al, Cr, Fe e Mn) também apresentaram valores bem acima do permitido pela legislação (CONAMA 396). Para se ter ideia da intensidade da contaminação, o poço PZF-08 apresentou, na época do estudo, concentração de 1020 mg/L de ferro solúvel, 12 mg/L de manganês solúvel e 4742 mg/L de acidez. Vale ressaltar que esse poço recebe a contaminação de uma fonte externa a área da mina, na margem direita do rio Sangão.

Para o aquífero subterrâneo, as análises hidrogeoquímicas também apontaram para contaminação por DAM. Foram obtidos valores de pH entre 5,9 e 7,2 para os poços 5 poços amostrados. As concentrações dos metais analisados também atingiram valores acima do limite da legislação, como por exemplo no poço PZP-02, locado próximo ao banhado central e ao pátio da mina, que apresentou os teores de 66 e 7,4 mg/L, respectivamente, para ferro e manganês em solução.

As águas superficiais na área da mina também estão contaminadas por DAM. Essa contaminação ocorre não somente por influência dos rejeitos da mina, mas também por fontes externas, como mostram pontos amostrados a montante da área. A Tabela 3 apresenta o resultado das análises de 5 pontos amostrados no rio Sangão, córregos e drenagens na área de estudo. A localização dos pontos pode ser vista na Figura 6. Os pontos R3 e R5 correspondem, respectivamente, à jusante e à montante do rio Sangão. A contaminação desse rio à montante se deve a presença de outras áreas degradadas pela mineração do carvão e depósitos de rejeito.

Outro caminho de exposição da contaminação aos receptores é pelo ar. A erosão e exposição dos rejeitos permite que a fração mais fina desse material fique em suspensão no ar, podendo ser inalado por transientes e moradores próximos as pilhas de rejeito e, dessa forma, oferece riscos à saúde humana e ecológica. Os rejeitos também podem sofrer combustão espontânea, liberando pequenas partículas de material poluente na atmosfera, que pode ser transportado. Essa análise não foi contemplada pelos documentos elaborados para a mina de estudo.

Uma outra consequência da DAM é a formação de lagoas ácidas. Na área da mina de estudo, foram identificadas a presença de algumas dessas lagoas (DIA, 2006; SATC, 2017; SATC, 2018).

As lagoas podem ter duas origens: ou se formam a partir do escoamento superficial sobre os rejeitos, ou se formaram em áreas onde ocorreu a subsidência de terreno, fenômeno esse decorrente da lavra com recuperação de pilares em galerias subterrâneas.

Além dos recursos hídricos e atmosfera, outro caminho de exposição da contaminação é através dos alimentos. O DIA identificou a presença de atividades agrícolas como a agricultura, a criação de animais e a silvicultura sobre ou em proximidade com as áreas da mina.

Tabela 3– Resultados das análises químicas para os pontos de R1 a R5, que monitoram drenagens na área de estudo. Retirado de IPH (2005).

	Unid.	R1	R2	R3	R4	R5	CONAMA 357/2005 Classe 4
pH	-	3,8	3	2,9	6,5	3	< 6
cond.	mS/cm	0,805	1,2	1,537	0,118	1,805	-
Redox	mV	482	572,5	536,6	300	453	-
Acidez total	mg/L	108,1	166,3	658,8	7,5	837	-
Alcalinidade Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	ND	ND	ND	45	ND	-
OD	mg/L	1,4	2,4	ND	2,2	ND	< 4
SD	mg/L	646	795	1480	106	1655	> 500
Sulfato sol.	mg/L	401	555	857	17	922	> 250
Al Tot.	mg/L	5,2	9,6	54,5	0,1	54	> 0,2*
Cr Tot.	mg/L	0,04	0,03	0,24	ND	0,32	> 0,05
Fe Tot.	mg/L	25,1	14	110	4,2	146,5	> 5*
Mn Tot.	mg/L	4,4	3,97	3,28	0,5	3,85	> 0,5

OBS – Valores em vermelho indicam Classe 4 do CONAMA 357/2005

ND – Não detectado.

\* - Limite do CONAMA 357/2005 é expresso em termos de solúvel.

Os alimentos produzidos em áreas próximas a mina podem estar sujeitos a contaminação via contato com solo ou água contaminados por DAM, e, portanto, podem trazer riscos à saúde de pessoas ou animais que venham a ingerir esses alimentos. Essa questão não foi avaliada pelos projetos e estudos elaborados para a mina, podendo ser considerada como ausente a análise de risco à saúde humana para a área

As tabelas 4, 5 e 6 reúnem as informações que constituem o modelo conceitual com os dados disponíveis e suas incertezas, com as principais características das fontes de contaminação (Tabela 4), os caminhos de espalhamento (Tabela 5) e os receptores em potencial da contaminação (Tabela 6).

Tabela 4- Modelo Conceitual com as informações disponíveis: áreas fontes de contaminação.

Desafios para as Áreas Complexas (ITRC)		
Área	Informações Disponíveis	Incertezas
Área Superficial da mina	Rejeitos depositados em praticamente toda a área principal da mina, com frações heterogêneas (finos, xistoso e piritoso) e com processos ativos de erosão.	Imagens do Google Earth revelam que houve intervenções nas pilhas de rejeito, e, portanto, o mapa da sua distribuição se encontra desatualizado.
Lagoas de decantação e áreas de banhado	Os diques das bacias de finos foram construídos com material estéril. As lagoas acumularam sedimentos finos do beneficiamento do carvão. As áreas de banhado acumulam metais por adsorção e decantação, atingindo elevadas concentrações nos sedimentos.	Volumes de material poluente e exatidão das áreas de ocorrência.
Galerias Subterrâneas	Área com cerca de 900 há que drena águas ácidas para a superfície e modifica o comportamento hidrogeológico. Também ocorrem áreas de subsidência nas porções em que houve a remoção dos pilares e lavra da camada Irapuã. As bocas de mina, furos de sondagem mal selados e as falhas promovem a conexão vertical e surgências de DAM.	Potencial de acidez dos materiais presentes na superfície das galerias, sua quantidade e localização.
Área dos Silos de Armazenamento	Presença de óleo de ascarel que foi derramado diretamente no solo devido a depredação dos transformadores. O solo contaminado foi estocado em pilhas sujeitas a processos erosivos.	Delimitação da contaminação
Área do Poço Desabado (antigo poço de serviço)	Operava com transformador a base de óleo de ascarel. O solo foi removido e estocado em pilhas de armazenamento, sujeitas a erosão.	Delimitação da contaminação
Antigos Meandros do Rio Sanguão	Sabe-se que o rio teve seu percurso alterado pelas mineradoras na área de estudo. O rio teve seus antigos meandros aterrados com rejeito do beneficiamento de carvão, para facilitar o trânsito das máquinas de operação da mina.	Potencial de geração de acidez, distribuição e quantidade.

Tabela 5- modelo conceitual com as informações disponíveis: caminhos para a contaminação.

Área	Informações Disponíveis	Incertezas
<b>Solo</b>	O Estudo Hidrogeológico contém informações para a representação da estratigrafia e das estruturas que ocorrem na área da mina. São representados falhas, fraturas, diques e furos de sonda.	Não há informação sobre o potencial do solo em ser fonte secundária de contaminação.
<b>Sedimentos</b>	Houve a coleta de 3 amostras nas áreas de banhado para caracterização dos sedimentos, em que foi identificado um acumulo de metais e a geração de acidez.	Baixo número de amostras para representação; poucos parâmetros analisados.
<b>Água Subterrânea</b>	Foram identificados dois níveis aquíferos: o nível raso (freático) e o profundo (confinado). As falhas e fraturas constituem caminhos preferenciais e podem levar mistura das águas desses níveis aquíferos, assim como a presença de furos de sonda e áreas de subsidência. Análises geoquímicas apontam para a contaminação por DAM em ambos os intervalos aquíferos. O Fluxo ocorre em sentido NE-SW para ambos aquíferos. O aquífero freático possui descarga no rio Sanguão, e o profundo, fora da área estudada pelo IPH. As galerias alteram o comportamento do fluxo subterrâneo.	Há uma baixa densidade de poços para representar uma área extensa que compõe a mina em sua totalidade (900 ha). Poucos poços rasos monitoram as áreas com pilhas de rejeito. Não há uma caracterização de boa resolução quanto aos caminhos preferências e conexões verticais entre os aquíferos. Alguns parâmetros químicos importantes não foram analisados. Presença de equipamentos nas galerias subterrâneas podem estar afetando a qualidade da água.
<b>Água Superficial</b>	Há dados de monitoramento em diferentes períodos, abordando parâmetros químicos que representam a DAM.	Alguns parâmetros de interesse ambiental não foram analisados.
<b>Ar</b>	Material de granulometria fina pode ser carreado pelo ar até o receptor, o qual pode inalar partículas oriundas do rejeito exposto às intempéries e a erosão.	Não há estudo a respeito da contaminação pelo ar.
<b>Alimentos</b>	Ocorrem atividades como silvicultura e agropecuária nas áreas e arredores da mina. Também podem ser vistas áreas agrícolas.	Não dispõe informações sobre o tipo de atividade em específico, o local e os impactos em potencial sobre os alimentos.

Tabela 6 – Modelo Conceitual com os dados disponíveis: potenciais receptores da contaminação gerada pelas áreas fontes na mina.

Matriz	Informações Disponíveis	Incertezas
<b>Moradores de áreas internas</b>	Imagens do Google Earth sugerem não haver moradores nas áreas superficiais da mina.	Se faz necessária a confirmação.
<b>Moradores de áreas externas</b>	Existência de bairro residencial locado proximo a área da mina, podendo estar a distância passível de exposição ao material particulado carreado pelo ar. Possível exposição a ingestão de alimentos contaminados.	Não há análise de risco para o cenário. Falta a atualização dos registros de poços cacimba e tubulares.
<b>Trabalhadores de áreas internas</b>	Trabalhadores que venham a exercer o ofício em obras na área degradada. Há exposição ao material particulado pelo ar, solo e água contaminados.	Não há análise de risco para o cenário.
<b>Trabalhadores de áreas externas</b>	Existem estabelecimentos comerciais próximos a área da mina, sujeitos a exposição ao material particulado carreado pelo ar.	Não há análise de risco para o cenário.
<b>Ecossistemas naturais</b>	Existem áreas de preservação ambiental próximas a mina, com a presença de coberturas florestais.	Não há análise de risco ecológico para o cenário.

## 5.6. Elegibilidade do Local como Área Complexa

Através dos dados disponíveis nos documentos avaliados e supracitados, e também tomando como referência a definição de Área Complexa do ITRC, a área de estudo pode ser considerada como Área Complexa em função de algumas características, pontuadas a seguir.

Primeiro, o tamanho do sítio. São cerca de 900 ha minerados em galerias subterrâneas, além de cerca de 117 ha em superfície, que contam com grandes quantidades de rejeitos/estéreis dispostos de maneira não organizada.

Em segundo, a intensidade da contaminação das matrizes ambientais. Nos recursos hídricos, são encontradas elevadas concentrações de metais, acidez e baixos valores de pH. Os sedimentos também se apresentam contaminados, com metais em concentrações elevadas, e ainda, a possível contaminação por óleo de asfalto nos locais onde operavam os transformadores.

Terceiro, as características hidrogeológicas da área, que conta com considerável heterogeneidade, com a presença de falhas e diques (Figura 8), subsidência de terreno, conexão vertical entre aquíferos e bocas de mina não seladas que permitem a surgência de águas ácidas do interior das galerias.

Quarto, a existência de outras áreas contaminadas em proximidade, possibilitando que haja contaminação de origem externa à área da mina.

Quinto e último, a proximidade das áreas fontes e afetadas pela contaminação com os receptores em potencial.

Dentre os desafios de natureza Não-Técnicas, podem ser destacados: (1) a existência de outras áreas degradadas não tão distantes que também geram poluição, o que dificulta na resolução quanto a determinação responsáveis legais; (2) a ocupação e uso do solo nas áreas situadas sobre o perímetro da mina, que conta com residências, agropecuária e silvicultura; (3) as fontes de financiamento que, em função da escala da remediação necessária (extensão da contaminação e incertezas), irão demandar grandes volumes de recursos ao longo de anos, o que traz insegurança às partes.

Não há um grau de classificação estabelecido na literatura do ITRC, porém, admite-se que quanto maior o número de desafios, maior a dificuldade de recuperar a área. Dessa forma, considerando os desafios encontrados no sítio de estudo, é possível lhe atribuir **nota 5** em uma escala 1 a 5, onde 1 seria uma área com poucos ou nenhum desafio, e 5, uma área com múltiplos desafios técnicos e não técnicos. A Tabela 7 resume os Desafios Técnicos e Não-Técnicos existentes no sítio de estudo.

Tabela 7 - Desafios de Áreas Complexas identificados no sítio de estudo para o gerenciamento e remediação.

Desafios para as Áreas Complexas (ITRC)	
Técnicos	Não-Técnicos
Geologia complexa (falhas, fraturas, galerias subterrâneas, heterogeneidade); Hidrogeológicas (conexão de níveis aquíferos, sedimentos); Geoquímica complexa (pH fortemente ácido); Contaminantes (elevadas concentrações de metais, acidez, etc., PCB Larga Escala da Contaminação (água superficiais e subterrâneas, volume de rejeitos, proximidade com receptores).	Objetivos (possibilidade de adotar valores diferentes dos legislados); Mudanças em Longo Prazo (avanço urbano, diferentes áreas e responsáveis legais, uso-futuro pretendido); Áreas órfãs e responsabilidade financeira; Múltiplos donos, uso dos recursos hídricos (silvicultura e agropecuária, doméstico); Fontes de financiamento.

## 5.7. Medidas Previstas pelos PRADs

Visando a reabilitação das áreas degradadas da mina, os PRADs estabeleceram medidas que tinham por objetivo principal conter a exposição dos rejeitos à atmosfera, e eliminar os perigos do espaço físico da mina, como por exemplo um antigo poço de serviço que desmoronou.

As medidas previstas podem ser resumidas nos seguintes itens:

(1) remoção dos rejeitos para uma célula de rejeitos, a ser localizada sobre as bacias de finos;

- (2) impermeabilização dos rejeitos através de cobertura seca e reconstituição do solo e da topografia;
- (3) recomposição da vegetação;
- (4) controle da erosão e do escoamento superficial;
- (5) tamponamento das surgências ou tratamento (ativo ou passivo);
- (6) eliminação dos riscos à pessoas e animais como poços de serviço desabados e áreas de acesso às galerias subterrâneas;
- (7) monitoramento após a execução das obras, para atestar a eficácia das medidas implementadas.

A Figura 12 apresenta a compartimentação da área de superfície da mina de acordo com as medidas de intervenção previstas pelos PRADs.

Essas medidas possuem histórico de utilização em casos de drenagem ácida da mina, com respaldo na literatura científica, e contribuem para a mitigação do problema. Elas procuraram também atender ao solicitado pelo MPF através dos Critérios Técnicos estabelecidos pelo grupo de assessoramento do órgão. Entretanto, por ocasião de exemplos de PRADs que foram executados em outras minas impactadas da região, sabe-se que tais medidas não têm surtido os resultados esperados, principalmente quanto a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, impedindo o descomissionamento e a reabilitação das áreas degradadas.

De acordo com os relatórios de monitoramento ambiental, das medidas previstas pelos PRADs, somente algumas foram executadas. Foram executados: o aterro do poço desmoronado, a remoção parcial dos rejeitos de carvão e o tamponamento de algumas bocas de mina, que não contemplou todas que existem na área. O poço de ventilação, por exemplo, não foi tamponado.

A análise crítica das informações e do modelo conceitual disponíveis é discutida no capítulo **6.1 – Modelo Conceitual da Área de Estudo**.

Dentre os documentos analisados, estão dois relatórios de monitoramento ambiental. Esses monitoramentos foram realizados a fim de se avaliar a eficácia das medidas que foram implementadas pelos PRADs (remoção de rejeitos, tamponamento de surgências).

Segundo o monitoramento, as áreas em que os rejeitos foram removidos até uma cota inferior a 25 metros levaram ao aparecimento de novas surgências. As bocas tamponadas a que

se refere o relatório correspondem ao poço desmoronado, o qual foi aterrado, e um furo de sonda, que após ser tamponado, levou ao aparecimento de uma surgência a 2 metros de seu local (Figura 13).

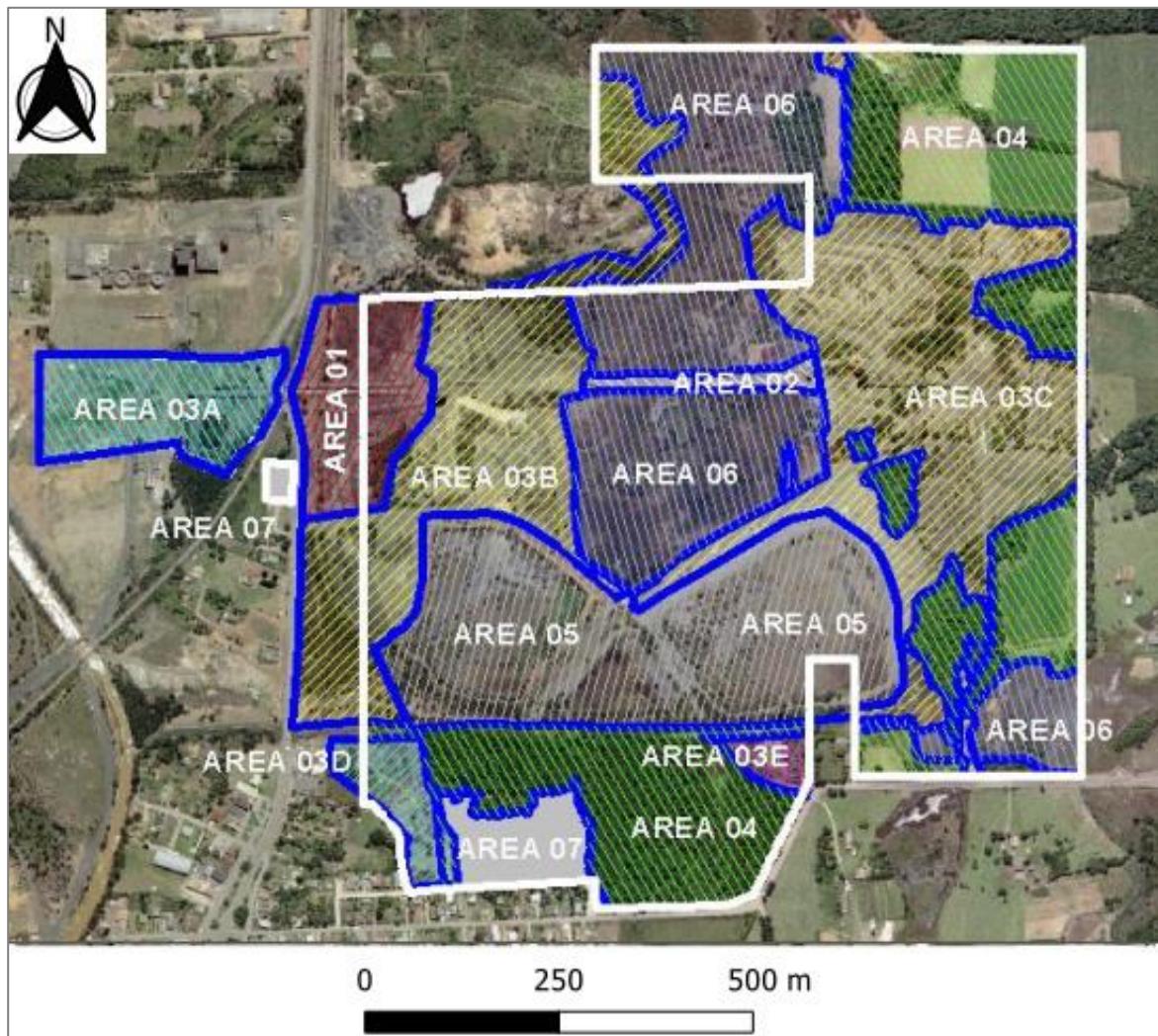


Figura 12 - Área de superfície da mina de estudo. Áreas 01, 03A, 03B, 03C, 03E: áreas de remoção do rejeito; Área 02: material estéril; Área 03D: rejeito não removido; Área 04: Áreas que foram preservadas; Área 05: células de rejeito (antigas bacias de finos); Área 06: área do banhado central e banhado do furo de sonda (FS); Área 07: Área sem intervenção (cemitério, campo de futebol e poço desmoronado). Retirado e modificado de PRAD (2006).

A Figura 14 apresenta uma dessas surgências, que forma uma espécie de lagoa ácida. O contexto associado foi a remoção de rejeitos abaixo da cota de segurança e da presença de uma falha sob a área. A cota de 25 m citada foi estipulada pelo estudo hidrogeológico como sendo uma cota possível de ocorrer surgências.



Figura 13 – furo de sonda que vertia DAM, após o tamponamento. É possível notar o alagamento do local, em função da nova surgência a 2 metros de distância. Retirado de SATC (2018).



Figura 14 – Nova surgência localizada ao lado da área do banhado, após obras de remoção de rejeitos e tamponamento de bocas de mina. Retirado de SATC (2017).

### **5.8. Análise Crítica do Modelo Conceitual da Área de Estudo**

De forma a complementar o modelo conceitual elaborado anteriormente com os dados disponíveis (Capítulo 5.5), obtidos através dos documentos analisados, serão apresentadas aqui quais informações poderiam ser produzidas para tornar o modelo conceitual da área mais robusto, que, como já citado, permite diminuir os riscos e incertezas em relação às áreas,

garantindo melhor performance na execução de projetos de remediação e reabilitação da área. Também é atribuída uma nota geral ao modelo conceitual disponível.

Em suma, a situação dos dados disponíveis por esses documentos corresponde a um grau de conhecimento onde a maioria das informações ambientais confirmatórias para a área de estudo foram coletada, o equivalente a uma nota 3 em uma escala de 1 (quase nenhum conhecimento) a 5 (conhecimento aprofundado da área). De forma geral, é possível reconhecer que existem algumas lacunas de informações sobre questões importantes como: a espacialização das unidades geológicas, das fontes de contaminação e galerias subterrâneas, da delimitação dos impactos em subsuperfície e em profundidades variadas, a ausência de alguns parâmetros químicos nas análises realizadas, na caracterização da contaminação pelo ar e também pelos alimentos que podem ser contaminados. Ainda, os estudos não contam com uma avaliação de risco à saúde humana ou de risco ecológico, fator esse essencial para uma abordagem através do GAC. Os pontos principais são discutidos em detalhes nos próximos parágrafos.

Através da análise da qualidade de águas surgentes em duas bocas de mina que se encontram na área principal (poço de ventilação e furo de sonda - Figura 6), é notável a elevada concentração de sulfato e ferro ferroso nessas águas, o que sugere que as galerias subterrâneas contribuem para geração de DAM, possivelmente através da oxidação da pirita contida nas paredes da área subterrânea da mina. Dessa forma, é necessário considerar, para o modelo conceitual, a área subterrânea da mina como uma das fontes de contaminação.

Outra possível fonte que requer investigação é o solo. O solo pode servir de fonte secundária de contaminação, uma vez que o conteúdo poluidor dos rejeitos (fonte primária) pode vir a ser lixiviado pelo escoamento superficial, atingindo diretamente os solos, como também sedimentos e corpos d'água. Dessa forma, se faz necessário conhecer a distribuição da contaminação nessa matriz, com resolução espacial e em profundidade adequadas para que possam ser empregadas técnicas de remediação da contaminação nessa matriz. A análise deve contemplar os metais listados nos parâmetros da resolução CONAMA 420, preferencialmente, e não somente aqueles indicativos de DAM.

Os sedimentos analisados pelo DIA foram identificados como material gerador de acidez e, portanto, contribuem para a geração de DAM. Os sedimentos também acumulam metais que são drenados pelas áreas de banhado e bocas de mina surgentes. O DIA analisou os sedimentos somente do banhado central, e em número pequeno de amostras (3 amostras). Os sedimentos

podem ser carreados para os córregos e drenagens, até atingirem o rio Sangão, onde podem permanecer liberando os metais adsorvidos. Sendo assim, é necessário investigar os sedimentos na área de influência da mina, para que possam ser reconhecidas as áreas impactadas, permitindo assim a adoção de medidas de contenção ou remediação dessa matriz. As análises podem ser feitas seguindo os parâmetros da resolução CONAMA 454.

Além das fontes internas, há de se considerar quais áreas externas podem estar contribuindo para a manutenção da contaminação, no caso, gerando DAM. Conhecer e mapear as áreas externas é medida importante pois permite uma análise com maior precisão das medidas empregadas. Somente dessa forma seria possível analisar os dados das intervenções de remediação com segurança em relação aos dados obtidos, uma vez que as métricas são realizadas através dos dados produzidos.

Outro fator que oferece risco aos receptores ocorre em função da exposição que se encontram os rejeitos de beneficiamento de carvão e sua interação com a atmosfera. Como dito anteriormente, as frações mais finas, e também os eventos de combustão espontânea, facilitam a movimentação de pequenas partículas pelo ar, passíveis de serem inaladas por moradores que residam em áreas próximas da mina. Esse material quando inalado, oferece riscos à saúde humana e, portanto, faz-se necessário elaborar uma análise de riscos quanto a esse caminho de exposição. A contaminação pelo ar não foi contemplada pelos estudos elaborados, mas consta na definição apresentada pela CONAMA 420 e IN74-SC.

O cultivo de alimentos através da agricultura, e também a agropecuária, em áreas com solos ou águas contaminadas pela DAM pode levar a contaminação dos animais e das culturas. Nas áreas da mina e nos seus arredores, são encontradas atividades agrícolas e de agropecuária, porém sem detalhes quanto a essas atividades. Por serem uma via indireta aos consumidores, é importante caracterizar os riscos associados aos alimentos produzidos em áreas suscetíveis de contaminação por DAM.

A identificação dos receptores, parte integrante de um modelo conceitual, requer uma análise sob a avaliação de riscos preconizada nas legislações pertinentes ao GAC (IN74-SC e CONAMA 420). A avaliação de riscos permite identificar quais receptores humanos e ecológicos estão mais suscetíveis a sofrerem impactos pela contaminação oriunda das áreas fontes. Essa análise se faz crucial para permitir o reconhecimento de áreas críticas e possibilitar a priorização de áreas a serem remediadas. Outro fator importante que pode vir a ser discutido, com auxílio da análise de risco apropriada, seria a respeito dos valores de referência

preconizados para os parâmetros que se encontram acima do limite permitido. Considerando a intensidade da contaminação e complexidade da área, é possível que tais metas para a remediação sejam infactíveis, prejudicando a expectativa e trazendo insegurança aos responsáveis legais. Também é importante a realização de um estudo de *background* geoquímico, para identificar quais valores são naturais para as matrizes da área de estudo, que podem naturalmente ultrapassar os limites legais estabelecidos.

Quanto às informações de natureza geológica, é possível destacar a baixa densidade de poços utilizados nas investigações dos intervalos aquíferos. A representatividade é um fator importante na modelagem e investigação dos aquíferos, sendo necessária uma quantidade adequada para a área a ser investigada. O estudo hidrogeológico elaborado apresenta informações importantes, mas que de certa forma não resolvem a maior parte das incertezas. Como constam nos documentos, dos 14 poços, somente 6 contaram com testes de condutividade hidráulica, parâmetro indispensável para a modelagem de fluxo. Outros parâmetros importantes também foram obtidos diretamente da literatura. Além disso, elementos estruturais como falhas e fraturas não foram considerados pelo modelo. Tais abordagens contribuem para um aumento na incerteza das informações produzidas.

A análise de elementos estruturais requer uma investigação de maior detalhe e em campo, podendo ser utilizadas técnicas geofísicas que ressaltem falhas e fraturas, poços multiníveis, traçadores de fluxo, entre outras tecnologias disponíveis. Isso tudo permitiria uma maior resolução e precisão nos dados coletados, garantindo assim uma diminuição nas incertezas e um aprimoramento do modelo conceitual da área.

A Figura 15 apresenta, de forma esquemática, o modelo conceitual para a área de estudo, incluindo fontes externas e as incertezas identificadas pela análise presente, além dos diversos elementos que compõe uma gestão sob o ponto de vista do GAC. São destacadas as áreas fontes, os caminhos de espalhamento e os receptores em potencial da contaminação presente na área.

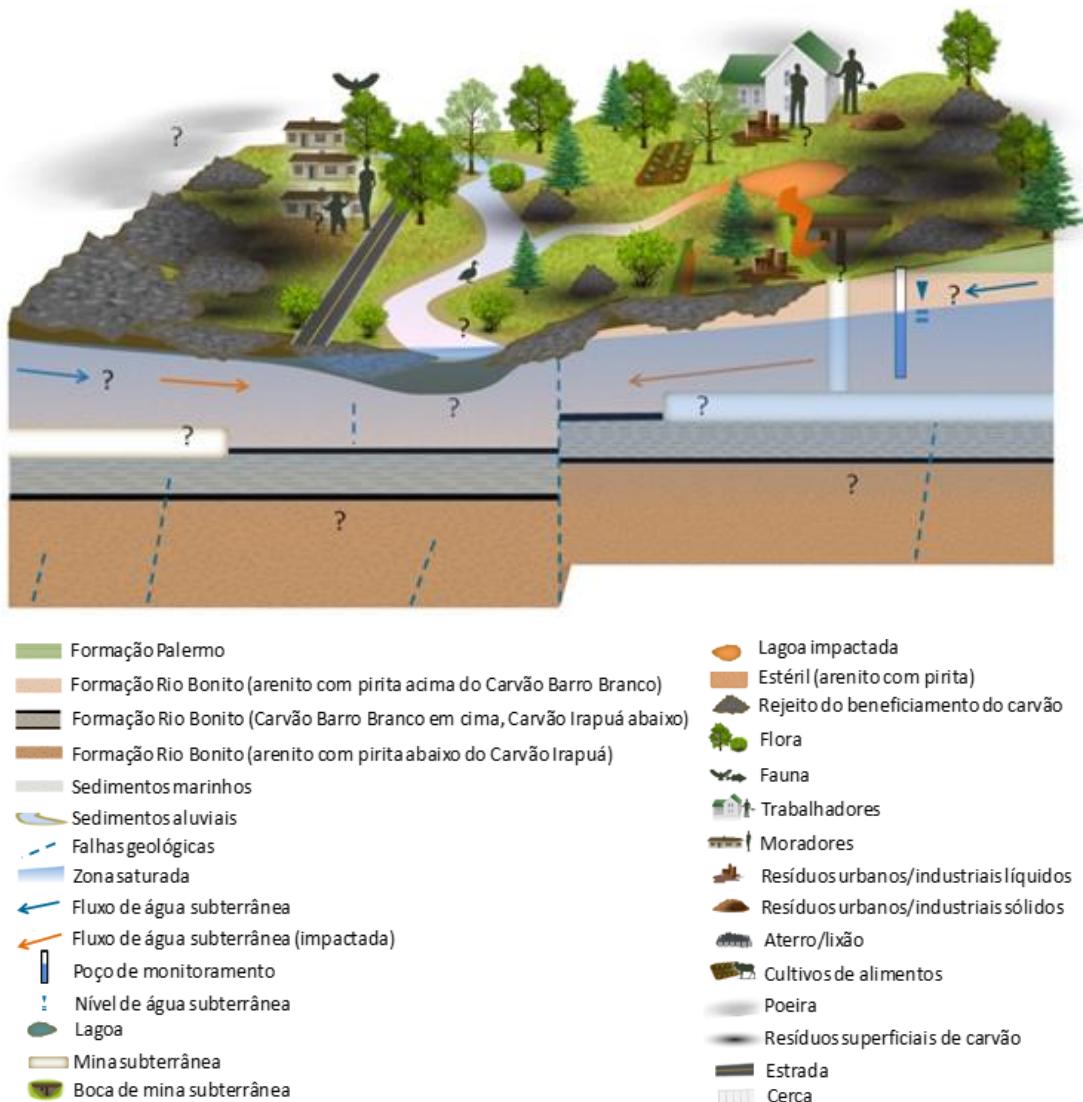


Figura 15 – Modelo Conceitual da Área da mina de estudo e fontes externas de contaminação.

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através das informações disponíveis e que foram avaliadas, é possível identificar que a abordagem do problema requer medidas adicionais àquelas previstas pelos critérios técnicos que foram estabelecidos entre o MPF e as empresas de mineração.

Como é possível notar, os projetos de recuperação (PRADs) dessas áreas impactadas não abordam o problema em sua totalidade, como também simplificam o modelo conceitual de contaminação, carecendo de dados específicos e detalhados. Em parte, tais informações não são consideradas pois não constam nos critérios técnicos adotados.

Essa lacuna de informações poderia ser corrigida pela implementação de uma abordagem sob o olhar do Gerenciamento de Áreas Contaminadas.

A elaboração de um modelo conceitual robusto irá demandar investigações com maior resolução quanto a identificação de áreas fonte, caminhos de exposição e receptores em potencial.

A mina de estudo apresenta elevada complexidade em decorrência de suas características hidrogeológicas, geológicas, geoquímicas e de escala, como é possível ver pelas informações contidas nos PRADs, DIA, estudos do IPH e relatórios de monitoramento ambientais. O processo de reabilitação dessas áreas exigirá maior tempo de execução, onde os parâmetros de referência da contaminação podem ser revistos e discutidos entre os órgãos competentes.

Essa medida pode se fazer necessária, uma vez que expectativas fora da realidade podem desmotivar os responsáveis a executarem as obras e a financiarem os projetos de remediação. Ainda, o critério de comissionamento poderia ser embasado em análises de risco, o que já seria suficiente para reabilitação das áreas.

## 7. CONCLUSÕES

As áreas impactadas pela mineração de carvão na Bacia Carbonífera Sul Catarinense compreendem um grande desafio quanto a gestão do legado ambiental deixado pela extração dessa commodity.

Historicamente, nota-se uma persistência nas condições de degradação ambiental nas áreas impactadas, em virtude da drenagem ácida de mina. Os critérios técnicos atualmente em uso para descomissionamento e reabilitação das áreas abordam diversos temas, porém se baseiam principalmente em medidas que visam a reconstituição paisagística e topográfica, e a impermeabilização dos rejeitos de carvão.

Tais medidas não tem surtido o efeito esperado quanto a reabilitação das áreas, principalmente em relação a qualidade dos recursos hídricos que se encontram com elevadas cargas de acidez e metais em solução, comprometendo o seu uso.

Pelos documentos analisados, é possível reconhecer que há espaço para o aprofundamento do conhecimento acerca do modelo conceitual de contaminação das áreas degradadas. O modelo conceitual é parte essencial para uma gestão efetiva e completa do problema, necessitando sua atualização periódica sempre que necessário.

O Gerenciamento de Áreas Contaminadas é uma abordagem que pode ser aplicada em áreas de mineração de carvão, com passivo ambiental de difícil remediação. No Brasil, existem legislações que fornecem metodologias e instruções estruturadas de forma lógica, em etapas consecutivas para a gestão de áreas contaminadas.

O ITRC, em decorrência do reconhecimento de diversas áreas cuja remediação é de difícil progresso, definiu tais áreas como Áreas Complexas. A elaboração desse conceito auxilia na identificação de áreas que possam ser caracterizadas como Áreas Complexas, em virtude de desafios técnicos e não -técnicos existentes. A mina de estudo é elegível como Área Complexa, pois apresenta um número considerável de desafios técnicos e não-técnicos, como a geologia, hidrogeologia, hidrogeoquímica, a escala da área, a necessidade de recursos e fontes de financiamento, o número de áreas impactadas e de diferentes donos, entre outros elementos.

O conceito de Gerenciamento Adaptativo foi desenvolvido para o gerenciamento de áreas contaminadas pelo ITRC. Esse conceito é indicado para a gestão de Áreas Complexas, e se estabelece na forma de um guia holístico, flexível e iterativo, cujo objetivo é o de desenvolver o conhecimento sobre o modelo conceitual de uma área, diminuir suas incertezas, aumentar a performance e orientar autoridades e demais interessados na tomada de decisões.

A Instrução Normativa de Nº 74 de Santa Catarina (IN74-SC) apresenta metodologia desenvolvida para a gestão de áreas contaminadas, possuindo em sua redação princípios consonantes com o conceito de gestão adaptativa do ITRC, em especial por conta de demandar a execução de atualizações de planos de intervenção a cada 5 anos. A aplicação dessa legislação, complementada pelas informações e guias presentes no Gerenciamento Adaptativo, pode servir como ferramenta adequada para a gestão das áreas degradadas pela mineração de carvão no Sul de Santa Catarina.

Dessa forma, a gestão desses sítios degradados através de uma abordagem com o GAC pode auxiliar as autoridades e responsáveis na resolução dos problemas e conflitos entre as partes, estabelecendo metas intermediárias e atualizando os resultados, até que sejam atingidos níveis toleráveis para o risco à saúde humana e risco ecológico, e com isso, a reabilitação e recuperação das áreas degradadas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acharya, B. S., & Kharel, G., 2020, Acid mine drainage from coal mining in the United States—An overview. *Journal of Hydrology*, v. 588, p. 125061.

Alberta Research Council, 1971, The environmental impact of surface mining in Alberta. Open File Report 1971-3. Geology Division, Research Council of Alberta. 20p.

Alexandre, N.Z. 2000. Análise integrada da qualidade das águas da Bacia do Rio Araranguá (SC). Dissertação de Mestrado em Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 300p.

Barnes, M. R.; Vermeulen, P. D., 2012, Guide to groundwater monitoring for the coal industry. *Water SA*, v. 38, n. 5, p. 831-836.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente, Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente, Resolução CONAMA nº 454, de 1º de novembro de 2012.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente, Resolução CONAMA nº 357, de 15 de junho de 2005.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008.

Dias, A. A., 1995, Programa de Informações Básicas para a Gestão Territorial de Santa Catarina - PROGES. Geologia do Município de Criciúma-SC, CPRM, <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/8645>.

DIA, 2006, Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas / Universidade do Extremo Sul Catarinense Sul Catarinense - Diagnóstico Ambiental de Áreas Degradas pela Mineração de Carvão. Criciúma-SC (Circulação restrita).

Diels, L., 2005, Belgium – Mining and Non-Ferrous Metal Processing Activities: Environmental Impact and Remediation Measures. *Mine Water and the Environment* 24: Supplementary Material. Springer Verlag. p.26-28.

Franks, D.M.; Brereton, D.; Moran, C.J., 2010, Managing the cumulative impacts of coal mining on regional communities and environments in Australia. *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 28, n. 4, p. 299-312.

IN74-SC, Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina. Instrução Normativa Nº 74, de 29 de agosto de 2018. CONAMA 420

INAP International Network for Acid Prevention, 2020, Global Acid Rock Drainage Guide. <http://www.gardguide.com>. Acesso em janeiro/2021.

IPH. Instituto de Pesquisa Hidráulicas do Rio Grande do Sul, 2005, Estudo Hidrogeológico da área da mina, UFRGS, Porto Alegre (Circulação restrita).

ITRC, 2015b, Adaptative Site Management: <https://rmcs-1.itrcweb.org/4-adaptive-site-management/> (Acessado Agosto 2021).

ITRC, 2017, Remediation Management of Complex Sites Online: <https://rmcs-1.itrcweb.org/> (Acessado Agosto 2021).

Krebs, A. S. J., & Possa, M. V., 2008, O papel da hidrogeologia como instrumento de gestão ambiental na mineração de carvão, Soares OS, Santos MDC, Possa MV, p. 109-127.

Kresic, N., Mikszewski, A., 2013. *Hydrogeological Conceptual Site Models: Data Analysis and Visualization*: Boca Raton: New York, CRC Press, pp. 585.

Kumari, Sangita; Udayabhanu, G.; Prasad, Bably, 2010, Studies on environmental impact of acid mine drainage generation and its treatment: an appraisal. Indian Journal of Environmental Protection, v. 30, n. 11, p. 953-967.

Lima, A.T. et al, 2016, The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. Environmental Science & Policy, v. 66, p. 227-233.

Nordstrom, D. Kirk; Blowes, David W.; Ptacek, Carol J., 2015, Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. Applied Geochemistry, v. 57, p. 3-16.

PRAD, 2009a, Projeto de Reabilitação Ambiental da Área Degradada da mina. PRAD CONCEITUAL, vol. 4. Criciúma-SC (Circulação restrita).

PRAD, 2009b, Projeto de Reabilitação Ambiental da Área Degradada da mina. PRAD Executivo, vol. 5, Criciúma-SC (Circulação restrita).

SATC, 2017, Relatório Síntese Do Monitoramento Hidrogeológico de Surgências Ácidas – mina (Circulação restrita).

SATC, 2018, Relatório Síntese Do Monitoramento Hidrogeológico de Surgências Ácidas – mina (Circulação restrita).

USEIA, United States Energy Information Administration, 2020, Coal production. <https://www.eia.gov/international/data/world/coal-and-coke/> (Accessado Janeiro 2021).

Wolkersdorfer, C., Bowell, R (editors), 2005, Contemporary reviews of mine water studies in Europe. Mine Water and the Environment (24). Springer Verlag. 76p.

Wright, Ian A.; Belmer, Nakia; Davies, Peter J., 2017, Coal mine water pollution and ecological impairment of one of Australia's most 'protected'high conservation-value rivers. Water, Air, & Soil Pollution, v. 228, n. 3, p. 90, doi: 10.1007/s11270-017-3278-8.