

**MATHEUS FELIPE STANFOCA CASAGRANDE**

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

**INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM PILHA DE ESTÉRIL AFETADA  
POR PROCESSO DE DRENAGEM ÁCIDA NA MINA OSAMU  
UTSUMI, POÇOS DE CALDAS - MG**

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro - SP

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

MATHEUS FELIPE STANFOCA CASAGRANDE

INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM PILHA DE ESTÉRIL AFETADA  
POR PROCESSO DE DRENAGEM ÁCIDA NA MINA OSAMU  
UTSUMI, POÇOS DE CALDAS-MG

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

*Rio Claro - SP*  
2019

C334i Casagrande, Matheus Felipe Stanfoca  
Investigação geofísica em pilha de estéril afetada por processo de drenagem ácida na mina Osamu Utsumi, Poços de Caldas-MG / Matheus Felipe Stanfoca Casagrande. -- Rio Claro, 2019  
109 p. : il., tabs., fotos, mapas + 1 CD-ROM

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro  
Orientadora: César Augusto Moreira

1. Eletroresistividade. 2. Potencial Induzido. 3. Drenagem Ácida. 4. Pilha de Estéril. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MATHEUS FELIPE STANFOCA CASAGRANDE

INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM PILHA DE ESTÉRIL AFETADA POR  
PROCESSO DE DRENAGEM ÁCIDA NA MINA OSAMU UTSUMI,  
POÇOS DE CALDAS-MG

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. César Augusto Moreira - Orientador  
Departamento de Geologia Aplicada / Instituto de Geociências e Ciências Exatas –  
UNESP, Campus de Rio Claro

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis  
Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências  
Atmosféricas – USP, São Paulo

Dr. Daniel Francoso de Godoy  
Departamento de Petrologia e Metalogenia/ Instituto de Geociências e Ciências  
Exatas – UNESP, Campus de Rio Claro

Resultado: Aprovado

Rio Claro, SP, 10 de abril de 2019

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais, Elaine e Domingos, pelo total apoio durante a minha jornada acadêmica e nas escolhas que venho tomando ao longo da minha vida. Sou grato por sempre acreditarem em mim e na minha capacidade, especialmente pela fé de que o futuro reservará os frutos de todo esse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. César Augusto Moreira, pela paciência, ensinamentos, cobrança e dedicação aos seus orientados, alunos e à universidade como um todo.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo financiamento do projeto intitulado “Estudo da geração de drenagem ácida em pilhas de rejeitos de mineração de Urânio” (Processo 2018/14565-3).

Um agradecimento especial às Indústrias Nucleares do Brasil - INB pela permissão e a todos os seus funcionários, especialmente à gerência, engenheiros ambientais e estagiários que, devido ao grande número, não poderia nomeá-los sem acabar me esquecendo de alguém. Sob chuva ou sol eles estiveram lá para oferecer ajuda e apoio durante as aquisições em campo.

Aos meus amigos Igor, Felipe, Cleberson e Ranieri pelos bons momentos de descontração durante todos esses anos. Certamente muitos ainda virão.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio financeiro.

*“Mesmo que já tenha feito uma longa caminhada,  
sempre haverá mais um caminho a percorrer.”*

Santo Agostinho

## RESUMO

Um problema recorrente na indústria mineradora é a drenagem ácida de mina (DAM), causada principalmente pela oxidação de minerais sulfetados, como a pirita, e geração de águas de baixo pH com o potencial de mobilização de elementos químicos tóxicos e consequente geração de sítios de contaminação. A recuperação destas áreas degradadas nem sempre é um processo simples e barato, onde a impermeabilização, remoção do material e recuperação *in situ* são algumas das opções atualmente disponíveis para se evitar a continuidade e progressão das drenagens ácidas, que podem se estender por centenas de anos caso nenhuma medida concreta seja empregada. Nas últimas décadas a geofísica tem se mostrado uma ferramenta de extrema utilidade em estudos hidrogeológico e ambientais, tanto na identificação quanto nas etapas de caracterização e monitoramento das plumas de contaminação, com destaque para os métodos geoeletricos da Eletroressistividade (ER) e Polarização Induzida (IP), aplicados sempre de maneira complementar a métodos de investigação direta e com a vantagem do baixo custo e rapidez na aquisição de dados. É neste contexto de contaminação que está inserida a pilha de estéreis denominada BF-04 da mina de urânio Osamu Utsumi. O local faz parte do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, onde atividades ígneas-policíclicas deram origem a diversas rochas do clã dos Nefelina-sienitos. A avaliação da resposta geoeletrica foi realizada através da técnica de tomografia elétrica com arranjo Schlumberger e compreendeu 11 linhas de aquisição de aproximadamente 400 metros cada. Os resultados mostraram anomalias de baixa resistividade de até  $10 \Omega.m$  e foram relacionadas à água subterrânea de alta salinidade, fruto do processo de DAM. Associadas a estas anomalias foram observadas zonas de alta cargabilidade ( $> 10,1 \text{ mV/V}$ ) contrastantes ao material estéril da BF-04 e tidas por zonas sulfetadas residuais e reativas. Com base nos modelos pseudo-3D e multiníveis, foi possível ainda a constatação de padrões e linhas de fluxos no interior da BF-04, da provável infiltração das águas do canal do Córrego da Consulta para dentro do sistema e a delimitação de regiões de reação dos sulfetos residuais e geração da DAM. Os resultados obtidos darão substancial embasamento no planejamento e escolha dos métodos de remediação *in situ* por parte da empresa operadora do complexo mineiro.

**Palavras-chave:** Eletroressistividade, Potencial Induzido, Drenagem Ácida, Pilha de Estéril.

## ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is a common issue in the mining industry and caused mainly by the oxidation process of sulfide minerals, such as pyrite, and the generation of low pH waters with potential mobilization of toxic elements and generation of contaminated sites. The remediation of those degraded areas is not an easy and inexpensive task, where the current in situ options comprise the sealing and/or removal of the material in order to avoid the continuity and progression of the acid mine drainage, which might last for several centuries without any factual measure. Over the last decades geophysics have been a very useful tool in hydrological and environmental studies, comprising the identification, characterization and monitoring of the contamination plumes, with emphasis on the DC Resistivity and Induced Polarization (IP) methods. Their application is usually complementary to direct investigation methods and also known by the low cost and celerity of the data acquisition. A waste rock pile (BF-04), affected by acid mine drainage process, is located at Osamu Utsumi uranium mine. The locality is related to the geological context of Poços de Caldas Alkaline Complex, where the polycyclic igneous activities originated many lithotypes belonging to nepheline syenite group. The analysis of the geoelectrical response was performed through the electrical resistivity tomography technique (ERT) with Schlumberger array and 400 meters long acquisition lines. The results showed conductive anomalies as low as  $10 \Omega.m$ , associated with high salinity groundwater generated by the ADM process. High values of chargeability ( $> 10,1 \text{ mV/V}$ ) were found adjacent to those conductive anomalies, creating a significant contrast in the waste rock material and correlated to the presence of reactive residual sulfide zones. The identification of the flux lines inside the BF-04 was based on the pseudo-3D and multilevel models, including the possibility of water infiltration from the Consulta creek channel in the system and also the delimitation of reactive sulfide zones where the ADM generation is likely to take place. The obtained results will give a substantial information base to the planning process and selection of the most suitable in situ remediation method by the local company.

**Key words:** Electroresistivity, Induced Polarization, Acid Mine Drainage, Waste Rock Pile.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização da área de estudo, com a delimitação da BF-04 dentro das instalações da INB em vermelho e o local da bacia de captação NBF. ....	20
<b>Figura 2</b> - Distribuição anual da taxa de precipitação, baseada nas médias mensais medidas no período de 1977 a 1988. A linha vermelha destaca o valor médio anual. ....	22
<b>Figura 3</b> - Rede hidrográfica(original) e o divisor de bacias hidrográficas do complexo industrial da INB/Caldas. Detalhes para a localização das pilhas BF-04 e BF-04, estação de tratamento de água (ETA) e bacia de captação BNF .....	24
<b>Figura 4</b> - Perfil esquemático da BF-04 e seu sistema hidrogeológico. ....	26
<b>Figura 5</b> - Mapa potenciométrico da região da pilha de estéreis BF-04. ....	27
<b>Figura 6</b> - Mapa geológico do Planalto de Poços de Caldas com a indicação da localização da Mina Osamu Utsumi. ....	28
<b>Figura 7</b> - Mapa geológico da área da cava da mina Osamu Utsumi. ....	30
<b>Figura 8</b> - Seções esquemáticas dos corpos mineralizados A, B e E, respectivamente. ....	33
<b>Figura 9</b> - ilustração do processo de geração da DAM e seu transporte através de um pilha de estéreis. ....	37
<b>Figura 10</b> - Zonas de oxidação da pirita conforme a altura do lençol freático e a capacidade de difusão do O <sub>2</sub> dentro de uma pilha de rejeitos. ....	37
<b>Figura 11</b> - Principais efeitos da DAM no meio ambiente em relação aos fatores químicos, físicos, biológicos e ecológicos. ....	38
<b>Figura 12</b> - Arranjo Físico do Complexo Mineiro-Industrial do Planalto de Poços de Caldas. ....	42
<b>Figura 13</b> - Aspecto geral e localização da pilha BF4 na CIPC. Detalhe na porção direita da imagem para o canal de desvio do córrego da Consulta. ....	45
<b>Figura 14</b> - Mapa topográfico da BF-04 antes (a) e depois (b) de sua construção .....	46
<b>Figura 15</b> - Segregação granulométrica na BF4 em virtude do método de construção da pilha. ....	47
<b>Figura 16</b> - Detalhes da BF-04: Detalhe de um corte de talude no interior da pilha com a indicação de níveis de granulometrias distintas (A); porções de maior granulometria (matações) que condicionam o fluxo subterrâneo local (B) e onde aflora a água subterrânea. ....	47

<b>Figura 17</b> - Modelo estrutura de uma pilha de estéreis. No detalhe é possível perceber a presença das estruturas geradas durante o processo de construção da BF-04, com níveis inclinados e horizontes de estéreis mais finos compactados.....	48
<b>Figura 18</b> - detalhe de blocos rochosos oxidados encontrados em várias porções da BF-04.	50
<b>Figura 19</b> - localização dos pontos de amostragem de água na BF-04 e concentrações dos com principais elementos/íons, pH e condutividade. Perfil aproximadamente SW-NE .....	52
<b>Figura 20</b> - Ponto de afloramento da drenagem ácida na base do talude principal (a). Esse efluente contaminado é conduzido através de um canal (b) até a bacia de captação BNF (c), de onde é bombeado (d) até a estação de tratamento de água. ....	53
<b>Figura 21</b> - Distribuição das chuvas ao longo dos meses de 2017 e 2018 e a relação com os dados de vazão da bacia BNF referente ao mesmo período (linha verde) e média histórica (linha azul). A data de aquisição geofísica é indicada pela linha pontilhada .....	54
<b>Figura 22</b> - Amostras de águas com valores de concentração iônica em função da resistividade.....	61
<b>Figura 23</b> - Fluxograma das etapas de trabalho. ....	62
<b>Figura 24</b> - Circuito elétrico simples com uma ddp gerada pelo resistor quando estabelecida uma corrente elétrica $i$ . No detalhe, a Lei de Ohm representada através da introdução de uma corrente elétrica $A$ em um cilindro de resistividade $R$ com comprimento $L$ e seção $S$ . ....	64
<b>Figura 25</b> - Superfície equipotencial e linhas de corrente elétrica geradas por um eletrodo único de corrente instalado na superfície do terreno.....	65
<b>Figura 26</b> - Tomada de valores da diferença de potencial (ddp) através de dois eletrodos posicionados em pontos distintos.....	66
<b>Figura 27</b> - Configuração tetraédrica, com dois eletrodos de corrente (A e B) e dois eletrodos de aquisição (M e N). Detalhe para as linhas de fluxo de corrente e equipotenciais associadas em um meio com camadas de resistividades distintas. ....	66
<b>Figura 28</b> - Distribuição de corrente em função do espaçamento dos eletrodos em contexto de duas camadas horizontais de resistividades elétricas distintas.....	68
<b>Figura 29</b> - Condutividade Metálica (a) e Condutividade Eletrolítica (b) .....	69
<b>Figura 30</b> - IP domínio tempo .....	70
<b>Figura 31</b> - Fenômeno de Polarização metálica (a) e Eletrolítica (b). ....	71
<b>Figura 32</b> - Aquisição tomográfica para pseudoseção através de arranjo Schlumberger. ....	72
<b>Figura 33</b> - Disposição dos pares eletrodos em arranjo Schlumberger.....	74

<b>Figura 34</b> - Disposição e orientação das linhas geofísicas na área da BF4 com a indicação do poço de monitoramento PM41, piezômetros Pz1, Pz2, Pz3 e Pz4 e delimitação da BF-04 (linha pontilhada). .....	75
<b>Figura 35</b> - Imagens do trabalho de aquisição em campo, com o resistivímetro Terrameter LS da ABEM disposto no centro geométrico da linha com os cabos esticados conectados aos eletrodos não polarizáveis. ....	76
<b>Figura 36</b> - Detalhe e ilustração esquemática do eletrodo de cerâmica não polarizável.....	76
<b>Figura 37</b> – Modelos de inversão para resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 1. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse e as setas o fluxo da água subterrânea.....	80
<b>Figura 38</b> - Modelos de inversão para resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 2. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse. ....	81
<b>Figura 39</b> - Modelos de inversão para resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 3 com anomalias de interesse e localização do piezômetro 03 (Pz3).....	82
<b>Figura 40</b> - Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 4. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse. ....	83
<b>Figura 41</b> - Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 5. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse. ....	83
<b>Figura 42</b> - Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 6. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse. ....	84
<b>Figura 43</b> - Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 7. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse. ....	85
<b>Figura 44</b> - Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 8. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse. ....	85
<b>Figura 45</b> - Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 9. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse. ....	86
<b>Figura 46</b> - Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 10. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse. ....	87
<b>Figura 47</b> - Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 11. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse. ....	87
<b>Figura 48</b> - Modelo pseudo-3D preliminar de resistividade gerado por krigagem. ....	89
<b>Figura 49</b> - Modelo pseudo-3D preliminar de cargabilidade gerado por krigagem.....	90

<b>Figura 50</b> - Modelos pseudo-3D com diferentes níveis de visualização em profundidade com a indicação dos piezômetros instalados no local e o fluxo hidrogeológico. ....	91
<b>Figura 51</b> - Modelos pseudo-3D com diferentes níveis de visualização em profundidade com a indicação dos piezômetros instalados no local e o fluxo hidrogeológico. ....	92
<b>Figura 52</b> - Modelos pseudo-3D de isovalores para resistividade. A cor azul valor de resistividade de $<20 \Omega.m$ . O mapa de base corresponde a ultima cota do modelo multinível.	95
<b>Figura 53</b> - Modelos pseudo-3D de isovalores para cargabilidade. A cor rosa representa cargabilidade da ordem de $>9 mV/V$ . O mapa de base corresponde a ultima cota do modelo multinível. ....	96
<b>Figura 54</b> - Modelos pseudo-3D de isovalores conjugados. A cor rosa representa cargabilidade da ordem de $>9 mV/V$ e a azul valor de resistividade de $<20 \Omega.m$ . O mapa de base correspondem à ultima cota do modelo multinível referente à resistividade e as áreas pontilhadas A, B e C as porções mais críticas de geração e mobilização da contaminação. ...	97

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Principais minerais associados à formação de DAM. ....	34
<b>Tabela 2</b> -Características das pilhas de estéreis da MOU .....	43
<b>Tabela 3</b> - Composição química do estéril de triagem do corpo B, representativa do material utilizado na construção da BF-04.....	49
<b>Tabela 4</b> - Composição mineralógica do estéril de triagem do corpo B. ....	50
<b>Tabela 5</b> - Descrição dos três grupos de associações de anomalias resistivas e de cargabilidade, conforme observado nos modelos de inversão gerados.....	88

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**AMV** – Análise de Múltiplas Variáveis

**BF-04** – bota-fora 04

**CE** – caminhamento elétrico

**CIPC** - Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas

**DAM** – drenagem ácida de mina

**ER** - eletrorresistividade

**IBAMA** - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

**INB** – Indústrias Nucleares do Brasil

**IP** – polarização induzida (*induced polarization*)

**MOU** – Mina Osamu Utsumi

**TDS** – sólidos totais dissolvidos (*total dissolved solids*)

**TE** – tomografia elétrica

**UTM** – Unidade de Tratamento de Minério

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	18
2.1. Objetivos específicos.....	18
<b>3. IMPORTÂNCIA DO PROJETO</b> .....	19
<b>4. ÁREA DE ESTUDO</b> .....	20
4.1. Localização.....	20
4.1. Clima e vegetação.....	22
4.2. Geomorfologia.....	22
4.3. Hidrografia.....	23
4.4. Hidrogeologia.....	24
4.5. Geologia.....	27
4.5.1. Geologia Regional.....	27
4.5.2. Geologia local .....	30
4.5.3. Mineralização .....	31
<b>5. DRENAGEM ÁCIDA DE MINA</b> .....	34
5.1 Técnicas de remediação .....	38
<b>6. ASPECTOS GERAIS DA MINA OSAMU UTSUMI</b> .....	42
6.1. Processos operacionais da Mina Osamu Utsumi.....	42
6.2. Características físicas da BF-4 .....	44
6.2.1. Caracterização química e mineralógica da BF-04.....	49
6.2.2. Caracterização hidroquímica da BF-04.....	50
6.3. Influência da infiltração da água pluvial na bacia de captação BNF.....	53
6.4. Estudos ambientais na Mina Osamu Utsumi.....	55
<b>7. EMBASAMENTO DO ESTUDO</b> .....	59

7.1. Estudos geofísicos em pilhas de estéreis e rejeitos.....	59
<b>8. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>62</b>
8.1. Metodologia para levantamento geoeétrico na área ambiental .....	62
8.1.1. Método da Eletrorresistividade .....	63
8.1.2. Método da Polarização Induzida (IP) .....	69
8.2. Técnica de aquisição.....	72
8.2.1. Arranjo .....	73
8.3. Aquisição dos dados .....	75
8.4. Processamento dos dados .....	77
<b>9. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>79</b>
9.1. Modelagem 2D .....	79
9.2. Modelagem 3D .....	88
<b>10. CONCLUSÕES .....</b>	<b>98</b>
<b>11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A preservação e monitoramento dos corpos hídricos são de suma importância para o abastecimento humano e garantia das atividades agrícolas e industriais, principalmente para as regiões mais populosas e de elevado grau de industrialização, onde a composição e quantidade dos resíduos e efluentes gerados têm sofrido significativo aumento nas últimas décadas. O crescimento populacional, por sua vez, é um fator determinante referente ao aumento da exploração da água superficial e subterrânea, esta última com potencial intensificação devido à ocorrência esporádica de secas severas, como as ocorrida na Região Sudeste do Brasil nos anos de 2001 e 2014-2015 (CAVALCANTI & KOUSKY, 2002; MARENGO et al., 2015).

Com a evolução e diversificação dos processos tecnológicos, as fontes de contaminação mais comuns da água subterrânea são tidas por lixões e aterros mal operados; efluentes e resíduos de atividades industriais; vazamentos em postos de combustível e oleodutos; acidentes viários e ferroviários; vazamento de redes coletoras de esgoto; uso incorreto de insumos agrícolas; atividades mineradoras; dentre outras, onde o potencial de poluição do sistema hídrico é diretamente relacionado às características, quantidade e forma de lançamento do poluente, além da vulnerabilidade intrínseca do aquífero em questão (CETESB 2016; CORSEUIL e MARINS, 1997).

No caso da indústria mineradora, é amplamente conhecido seu potencial de impacto ambiental, sobretudo quanto à disposição dos estéreis e rejeitos provenientes da exploração e processamento dos bens minerais. Em relação aos estéreis, podem ser dispostos em pilhas e são definidos por materiais escavados gerados pela atividade de exploração mineral que não possuem a qualidade de minério, ou seja, sem valor econômico, embora possam apresentar alguma concentração dos minerais de interesse e/ou associados, como é o caso da pirita ( $\text{Fe}_2\text{S}$ ) e outros minerais de ganga (SILVA et al, 2012).

Até por volta da segunda metade do século XX essa atividade era desenvolvida a baixíssimos padrões ambientais e de segurança operacional e sanitária, cuja ausência de legislações específicas proporcionava um inadequado gerenciamento dos estéreis e rejeitos transformados em passivos ambientais nos dias atuais (NASCIMENTO, 1998). Houve avanços importantes em temas como recuperação de áreas degradadas, manejo de águas em minas, monitoramento ambiental e relações com a comunidade, porém de forma desigual

dentro do setor mineral, onde centenas de empresas familiares e cooperativas de garimpeiros competem com algumas grandes companhias detentoras da maior parte do mercado mineral brasileiro que, na teoria, possuem mais recursos e tecnologias na solução dos impasses ambientais (SANCHEZ, 2015).

A mineração de urânio possui peculiaridades do ponto de vista de riscos ambientais devido à significativa gama de possibilidades de contaminação do meio físico, que abrange desde a poluição das águas subterrâneas e superficiais locais por metais pesados, radionuclídeos e efluentes ácidos. Além disso, há ainda a possibilidade de contaminação atmosférica por poeira radioativa e emissões de radônio geradas pelas atividades de operação e a instalação de pilhas de rejeitos e estéreis (ABDELOUAS, 2006).

Dada a magnitude dos impactos e presença de elementos radioativos, seu licenciamento ambiental para a atividade mineira é regulada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (art. 4º, IV, Resolução CONAMA 237/97), diante do interesse e relevância para a segurança nacional e geração e energia, toda cadeia produtiva referente ao urânio é de monopólio do Estado. É de grande importância a realização do projeto de lavra com o volume de minério a ser explorado na extensão dos potenciais impactos associados, cujos fatores na análise da interação de tais poluentes com o meio físico natural são: quantidade e composição do efluente emitido; evolução temporal do poluente; dispersão do material no meio; fatores para o cálculo da transferência dessas substâncias para espécies sensíveis; relação entre concentração de poluentes e as espécies afetadas e, por último, a relação destas últimas com o custo ambiental (FERNANDES et al., 1998)

Com a exposição de minerais sulfetados presentes nas pilhas de estéreis e barragens de rejeitos, outrora isolados do ar atmosférico em subsuperfície, e sua reação com oxigênio, são gerados efluentes de baixo pH com concentrações elevadas de metais e metalóides, processo conhecido como drenagem ácida de mina (DAM). O processo pode causar a acidificação de corpos d'água adjacentes e inibir o estabelecimento e crescimento da cobertura vegetal local, cuja solução não prevê métodos pouco dispendiosos, simples e totalmente eficazes com base no presente estado da tecnologia (PICHTEL & DICK, 1991; BLOWES, 1997).

Para áreas impactadas é usual a aplicação de estudos geofísicos, dada a alteração das propriedades físicas do meio natural pelos contaminantes. A presença de águas subterrâneas de alta salinidade em um meio de relativa maior resistividade, como é o caso dos minerais silicáticos e água subterrânea quimicamente natural, refletem um contraste importante dos

parâmetros físicos do meio e podem ser quantificados por meio de ensaios geoeletricos, em especial através do método da eletroresistividade (ER) (BLOWES, 1997; CAMPBELL et al., 2000; CAMPBELL & FITTERMAN, 2000). Por outro lado, a presença de minerais metálicos, caso dos sulfetos como a pirita, pode ser caracterizada por anomalias de alta cargabilidade em subsuperfície, uma vez que essas espécies minerais agem como capacitores no meio físico após a aplicação e corte de uma corrente elétrica a partir da superfície do terreno. Neste caso o método da polarização induzida (IP) é comumente utilizado na determinação desta cargabilidade residual (CAMPBELL & FITTERMAN, 2000; CAMPBELL & BEANLAND, 2001).

O uso em conjunto dos métodos da ER e IP em um meio como uma pilha de estéril é bastante interessante do ponto de vista aplicacional dada a união dos dois principais campos de utilização das técnicas geoeletricas: ambiental/hidrogeologia e prospecção mineral, onde o objetivo é a caracterização da contaminação da água subterrânea (método da ER) e a presença de regiões sulfetadas (método da IP). A utilização da geofísica é uma alternativa no diagnóstico de áreas contaminadas em razão da rapidez e baixo custo, auxiliando na detecção e monitoramento juntamente com métodos diretos de investigação, como poços de monitoramento e dados geoquímicos (MOREIRA et al., 2006).

É neste contexto que está inserida uma pilha de estéreis (BF-4) pertencente à mina de urânio Osamu Utsumi (MOU) do Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas – CIPC (atualmente denominado de Unidade de Tratamento de Minério – UTM) operado pelas Indústrias Nucleares do Brasil – INB. Ativa de 1982 até o ano de 1995, hoje a unidade está sob processo de recuperação ambiental e descomissionamento.

A MOU possui um histórico de gestão ambiental incompatível com os padrões e legislação atual, sobretudo na construção de pilhas de estéreis que hoje formam um grande entrave para o encerramento completo de suas atividades. Um dos principais problemas enfrentado na unidade é ocorrência da DAM em suas duas maiores pilhas de estéreis, onde a necessidade de um melhor entendimento dos padrões de fluxo da água subterrânea local caracteriza um dos maiores obstáculos na análise e escolha de métodos que garantam uma remediação *in situ*, uma vez que os custos de remoção e transporte do material para a antiga cava são extremamente elevados. O complexo mineiro é alvo dos mais diversos estudos ambientais há anos e abrange trabalhos acadêmicos e relatórios técnicos que certamente auxiliarão no desenvolvimento dos possíveis modelos geofísicos propostos.

## **2. OBJETIVOS**

Este trabalho visa avaliar a conexão entre zonas de fluxo hidrogeológico no interior de uma pilha de estéreis gerada pela exploração de minério de urânio e o reconhecimento de zonas sulfetadas, como condicionantes no processo de geração de drenagem ácida de mina.

### **2.1. Objetivos específicos**

- Analise integrada de dados de resistividade elétrica e cargabilidade obtidos a partir e linhas de tomografia elétrica, com dados hidroquímicos obtidos por análises prévias.
- Propor modelo de geração de drenagem ácida no interior da pilha de estéreis BF-04 com base nos produtos 2D e 3D gerados.

### 3. IMPORTÂNCIA DO PROJETO

Os resultados dos produtos almejados proporcionarão bases para que a INB possa planejar e executar medidas de mitigação do processo de drenagem ácida da pilha BF4. Em fase de descomissionamento desde o ano de 1995, a mina de urânio Usamu Utsumi consome anualmente milhares de reais oriundos dos cofres públicos na captação e tratamento desses efluentes ácidos e contaminados por metais pesados. Estimativas de orçamento para a realocação de todo o material estéril de volta para a cava mostram valores impraticáveis para a empresa. Mesmo executado de maneira eficaz, as atuais ações de remediação não contemplam uma solução final no impedimento da geração de drenagem ácida, haja vista a natureza quase permanente do problema. Para tal seria necessário um melhor entendimento da dinâmica da água subterrânea na BF-04 e a indicação de possíveis zonas de reações para que o problema seja atacado da forma mais direta e local possível, de maneira *in situ*.

Embora existam vários trabalhos de modelamentos hidrogeoquímicos e matemáticos para o sistema aquífero local, que conta com poucos poços de monitoramento e piezômetros, o referido projeto é pioneiro na aplicação de ensaios geofísicos e na geração de um modelo tridimensional da área contaminada. As seções geofísicas e o modelo pseudo-3D complementarão o banco de dados já existente e certamente garantirão informações inéditas e relevantes para o processo de recuperação local, uma vez que é de interesse geral a conservação dos recursos hídricos locais para o bem da população residente da região do CIPC. O conhecimento adquirido com o estudo do passivo ambiental permitirá a utilização da metodologia proposta em outras localidades afetadas pela DAM.

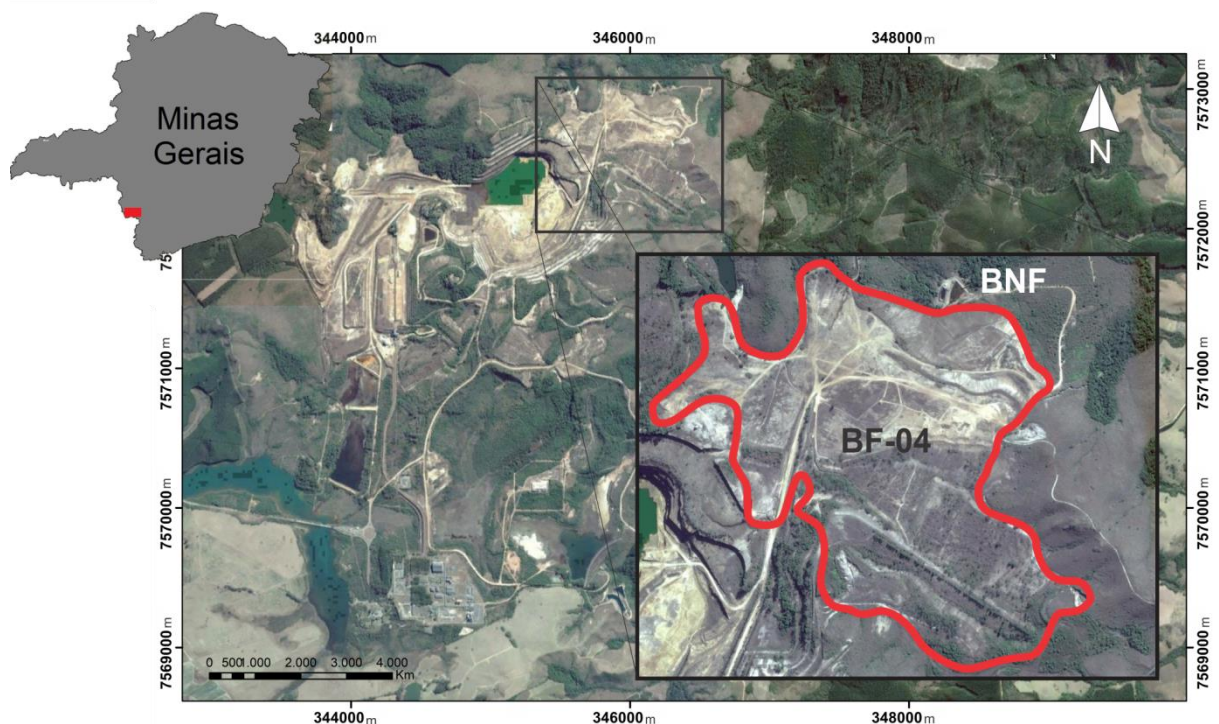
## 4. ÁREA DE ESTUDO

### 4.1. Localização

A pilha de estéreis BF-04 é situada na extremidade nordeste das instalações da INB (Fig. 1). O complexo industrial, por sua vez, está inserido porção centro-sul do Planalto de Poços de Caldas, mais precisamente na localidade conhecida como Campo do Cercado, pertencente ao município mineiro de Caldas.

Além de Caldas, o planalto abrange os municípios de Poços de Caldas, Andradas e Águas da Prata, este último dentro dos limites do Estado de São Paulo. A capital mais próxima é São Paulo (180 km) seguida por Belo Horizonte (350 km) e Rio de Janeiro (360 km). A partir de Poços de Caldas, o acesso às instalações da MOU é feita pela BR-146.

**Figura 1 - Localização da área de estudo, com a delimitação da BF-04 dentro das instalações da INB em vermelho e o local da bacia de captação NBF.**



As origens das pesquisas por minérios nucleares e desenvolvimento de atividades mineiras no Planalto de Poços de Caldas remonta a 1940, época de interesses armamentistas por parte do governo brasileiro. Alguns anos mais tarde os técnicos do Departamento

Nacional de Produção Mineral (DNPM) constataram a presença de anomalias radioativas na área associadas a certos elementos em minerais de zircônio (FAGUNDES, 2005).

No decorrer das décadas seguintes foi constatada a importância de uso dos recursos nucleares como fontes potenciais para a geração de energia elétrica e fabricação de armamentos. A energia de origem nuclear passou a ser uma opção de relativo baixo custo e de alta produção (LEITE, 2010). Durante os anos de 1960 o Brasil passa a dar importância estratégica ao urânio e financia os primeiros trabalhos de prospecção e investigação geológica em todo território nacional. Esses projetos são intensificados na década de 70 quando a crise do petróleo instigou uma reavaliação do quadro energético nacional pelo governo brasileiro. Neste período foi criada a Nuclebrás sob o Programa Nuclear Brasileiro, como parte dos objetivos de construção de duas centrais nucleares na região sudeste, conhecidas como Angra I e II (FAGUNDES, 2005).

A jazida de urânio do Campo do Cercado foi descoberta neste período de intensa prospecção mineral e em 1971 os trabalhos na área correspondente a atual mina englobaram 14000 metros de sondagens e 2500 metros de galerias de pesquisas, sendo o projeto básico realizado pela empresa francesa Uranium Pechney UGINE Kuhlman (UPUK) contratada pela estatal brasileira Nuclebrás (SOUZA, 1995; CIPRIANI, 2002). O início das obras do complexo mineiro foi em 1977, quando foram realizados os processos de decapagem e a escolha da exploração em mina aberta, realizadas obras civis e a montagem das instalações. A abertura oficial e a operação comercial da mina Osamu Utsumi ocorreu apenas em fevereiro de 1982 e esteve ativa até 1995. No final dos anos 80 a Nuclebrás é extinta e a recém-criada Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB) concentra as atividades do Ciclo Nuclear Brasileiro (FAGUNDES, 2005; OLIVEIRA, 2010).

Segundo Cipriani (2002), a instalação funcionou de maneira descontínua devido à série de dificuldades atribuídas ao pouco conhecimento das características da mineralização local. Dois meses após o encerramento da exploração da lavra, a unidade de tratamento químico do minério de urânio finalizou suas atividades em dezembro de 1995, com uma produção total de 1030 tU. Após esse período, a INB considerou alguns projetos de aproveitamento das instalações da CIPC, entretanto, os passivos ambientais se tornaram um entrave para a empresa que busca até hoje soluções para atender os requisitos ambientais das áreas da mina, pilhas de estéreis e usina de processamento do minério.

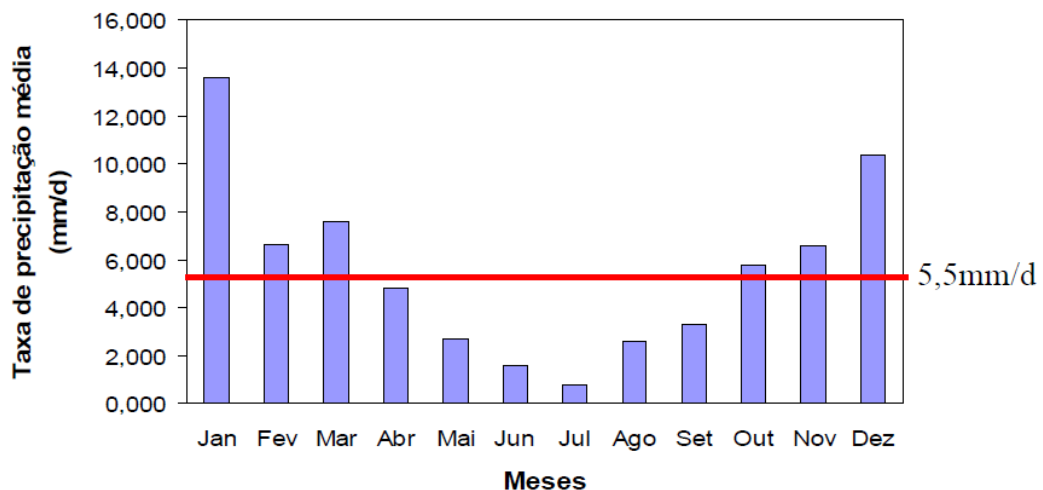
#### 4.1. Clima e vegetação

O clima do Planalto de Poços de Caldas, com duas estações bem definidas, é classificado como Tropical de Altitude (Classificação climática de Köppen-Geiger). A primeira é evidenciada por intensa pluviosidade e temperatura mais branda, entre os meses de outubro e março e a outra, entre os meses de abril a setembro, caracterizada por período de seca e temperaturas baixas, com ocasionais geadas. O índice pluviométrico médio é de 1.700 mm/ano, com 80% dessa precipitação concentrada nos meses de outubro a março (HOLMES et al., 1992; CIPRIANI, 2002).

Nas instalações da MOU, um programa de monitoramento ambiental foi conduzido pelo operador da mina (INB). A Figura 2 retrata o gráfico da taxa de precipitação média diária para cada mês do ano, com destaque para janeiro onde foi observada uma taxa de aproximadamente 13,8 mm/dia, bem acima do valor médio anual de 5,5 mm/dia:

Localmente são identificados campos de altitude constituídos de gramíneas rústicas, dentre as quais predomina o capim “barba de bode” e por vegetação arbórea e arbustiva disseminada em pequenas manchas ao longo das vertentes (CIPRIANI, 2002).

**Figura 2 - Distribuição anual da taxa de precipitação, baseada nas médias mensais medidas no período de 1977 a 1988. A linha vermelha destaca o valor médio anual.**



Fonte: Franklin (2007)

#### 4.2. Geomorfologia

O Planalto de Poços de Caldas é uma estrutura circular com diâmetro de aproximadamente 35 km e área de 800 km<sup>2</sup> que conta com altitudes comumente superiores a



1000 m, podendo chegar a 1600 m em algumas localidades. O atual platô é resultado do processo de erosão de uma antiga caldeira, cuja idade de intrusão é estimada em aproximadamente 80 Ma e o dique anelar é saliente na topografia em três quadrantes: norte, oeste e sul. (HOLMES et al., 1992; MORAES & JIMÉNEZ-RUEDA, 2008).

A variedade litológica da região é tida como um dos principais fatores da elevada variedade de formas de relevo da área. Evidências observadas por Holmes *et al.* (1992) sugerem que os padrões do fluxo hídrico não mudaram muito nos últimos 5 Ma no planalto. A taxa de erosão dos interflúvios é estimada em 12 m a cada milhão de anos e os mecanismos que a regem são tidos como similares aos que ocorrem nos últimos 10 Ma.

A região pode ser dividida em dois grandes grupos de paisagens: planálticas e aluviais. A primeira foi caracterizada pela presença de taludes delimitando porções relativamente planificadas ou homogêneas da superfície e que contém vestígios de unidades fisiográficas das planícies aluviais e dos colúvio-alúvios subatuais e recentes soerguidos. As paisagens aluviais, por sua vez, apresentam as planícies de inundação como unidades fisiográficas típicas, que são definidas por terraços fluviais, diques marginais, canais abandonados e lagoas marginais (Moraes & Jiménez-Rueda (2008)).

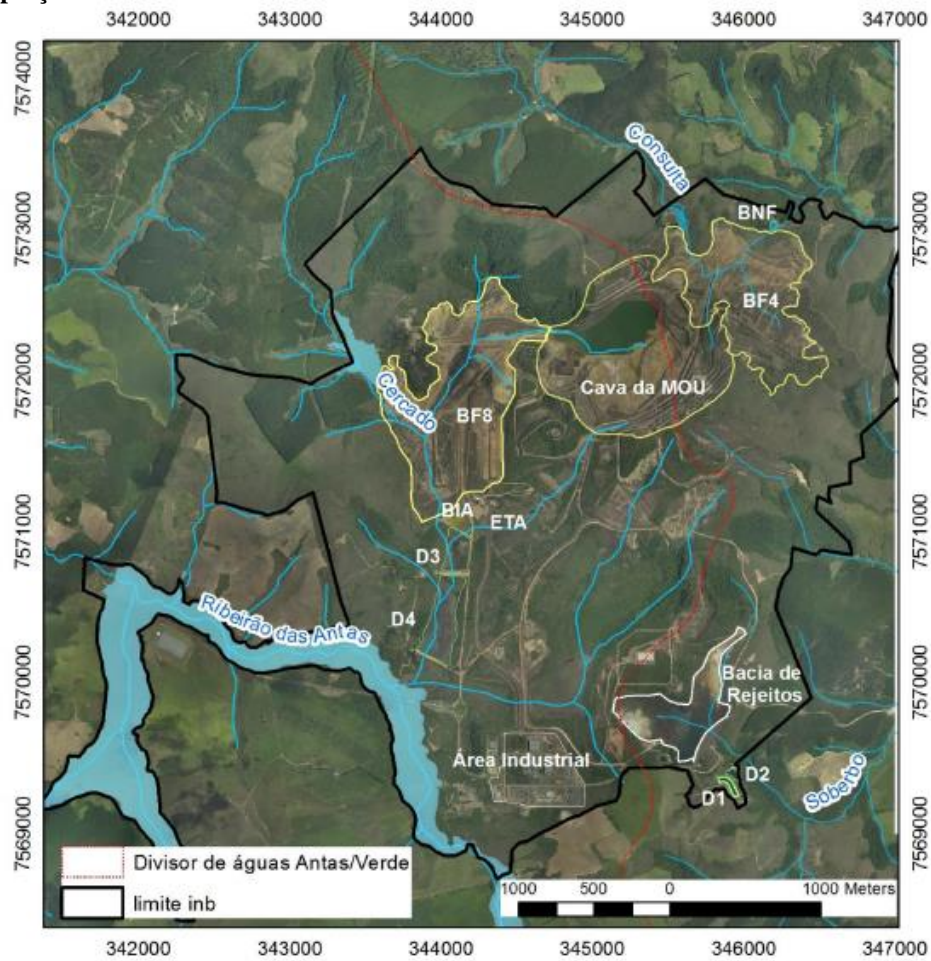
A MOU está inserida em uma área de morfologia acidentada onde os vales encaixados dos córregos possuem influência do sistema de faturamento regional do Planalto de Poços de Caldas, que podem ser comprovados pelos eixos principais dos corpos hídricos existentes no local: córrego da Consulta, córrego do Cercado e ribeirão Soberbo (MIYASAKI, 2014).

### **4.3.Hidrografia**

A MOU foi instalada sobre o divisor de águas das bacias do ribeirão das Antas e do rio Verde (Fig. 3). O primeiro flui das águas do reservatório da empresa até a área urbana de Poços de Caldas onde forma a represa Bortolan, que alimenta uma pequena usina hidrelétrica e é usada como área de lazer da população local (CIPRIANI, 2002).

Em relação à bacia do rio Verde, na área da MOU flui o ribeirão Soberbo e seu afluente, o córrego da Consulta. O ribeirão Soberbo deságua no rio Taquari, que é afluente do rio Verde e que, por sua vez, denomina o distrito de Pocinhos de Rio Verde, do município de Caldas. Suas águas são usadas principalmente para irrigação, pecuária e pesca. Não há uso doméstico dessas águas num raio de 20 km (CIPRIANI, 2002).

**Figura 3 - Rede hidrográfica(original) e o divisor de bacias hidrográficas do complexo industrial da INB/Caldas. Detalhes para a localização das pilhas BF-04 e BF-04, estação de tratamento de água (ETA) e bacia de captação BNF**



Fonte: (ALBERTI, 2017)

Na porção NE é possível observar que o córrego da Consulta é retratado em seu leito original, ou seja, no vale onde foi construída a BF-04. Nos dias atuais ele margeia o material de estéril em sua borda norte e segue seu caminho até o ribeirão Soberbo (canto SE da Fig. 4). No limite SW das instalações da MOU está o represamento do ribeirão das Antas, que recebe as águas provenientes do córrego do Cercado, adjacente à BF-08.

#### 4.4.Hidrogeologia

O local de estudo está inserido no contexto geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, o que confere um sistema aquífero do tipo fraturado para a região, cujas águas atraem turistas tanto para o município homônimo quanto para cidades vizinhas em busca de suas

famosas fontes terapêuticas e termais para consumo e banhos de imersão, além de estabelecer grande importância econômica local.

Em termos hidrogeológicos, a região faz parte da Província Escudo Oriental do Sudeste que, juntamente com a Província Escudo Oriental do Nordeste, é definida como uma subdivisão de uma unidade maior, a Província Escudo Oriental (MENTE et al., 1981). Nesta unidade, correspondente a uma grande porção do território nacional, predominam rochas cristalinas como gnaisses, xistos, migmatitos, granitos, quartzitos, etc. de diferentes contextos geológicos e potencial hidrogeológico relativamente fraco (MENTE, 2009).

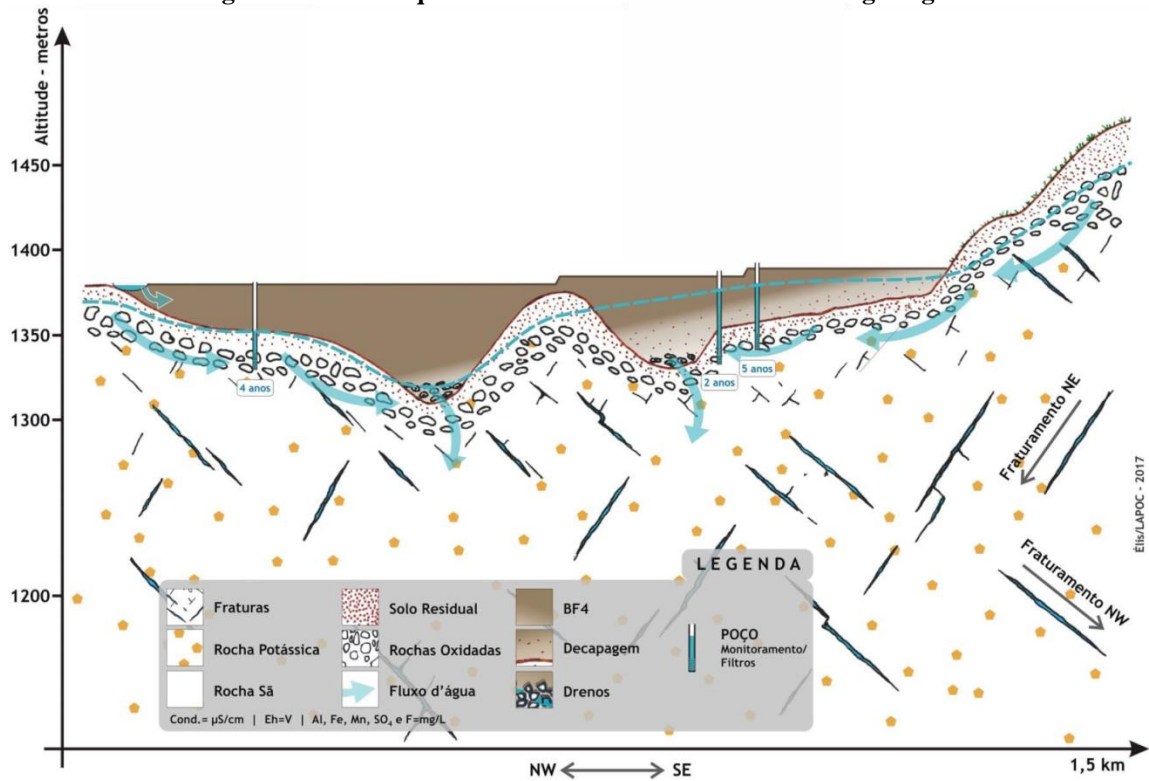
Sobreposto ao aquífero fraturado local ocorre também um aquífero livre no manto de alteração das rochas alcalinas do mencionado maciço onde ocorre a circulação da água subterrânea, juntamente com as fraturas das rochas subjacentes.

No estudo das águas termais na área do município de Poços de Caldas, Cruz e Peixoto (1991), afirmam não existir aquíferos granulares superficiais de importância na região. Os mesmos autores identificaram ainda três grupos de águas subterrâneas quanto à suas origens: zona aquífera rasa, zona aquífera intermediária e zona aquífera de circulação profunda. As duas primeiras estariam associadas a águas frias exploradas por poços tubulares (até 200 m de profundidade) enquanto que a última zona aquífera corresponderia à fontes termais associadas a três famílias de falhas abertas de direções N14 E, N50 E e E-W.

A atividade mineira na região traz um impacto significativo na dinâmica da água subterrânea local. Com o desenvolvimento da cava da mina Osamu Utsumi, houve a completa modificação da topografia através da remoção de vales e interflúvios, com consequente rebaixamento do nível do lençol freático e distúrbios nos padrões de fluxo de águas subterrâneas mais antigas (HOLMES et al., 1992). Essa alteração da paisagem natural influenciou ainda na área de captação da cava, cujo aumento em relação ao vale inicial propiciou a interceptação de águas subterrâneas que outrora possuíam sentido de fluxo voltado para outros vales.

A Figura 4 mostra o esquema do referido sistema hidrogeológico, onde é possível observar o material constituinte da BF-04 que se comporta como um aquífero poroso natural sobreposto às rochas potássicas da região. Nela existe ainda uma zona superficial de solos residuais que, aparentemente, não foram completamente removidos durante os trabalhos de construção da pilha. Logo abaixo se encontram os níveis de rochas oxidadas (saprólitos).

Figura 4 - Perfil esquemático da BF-04 e seu sistema hidrogeológico.



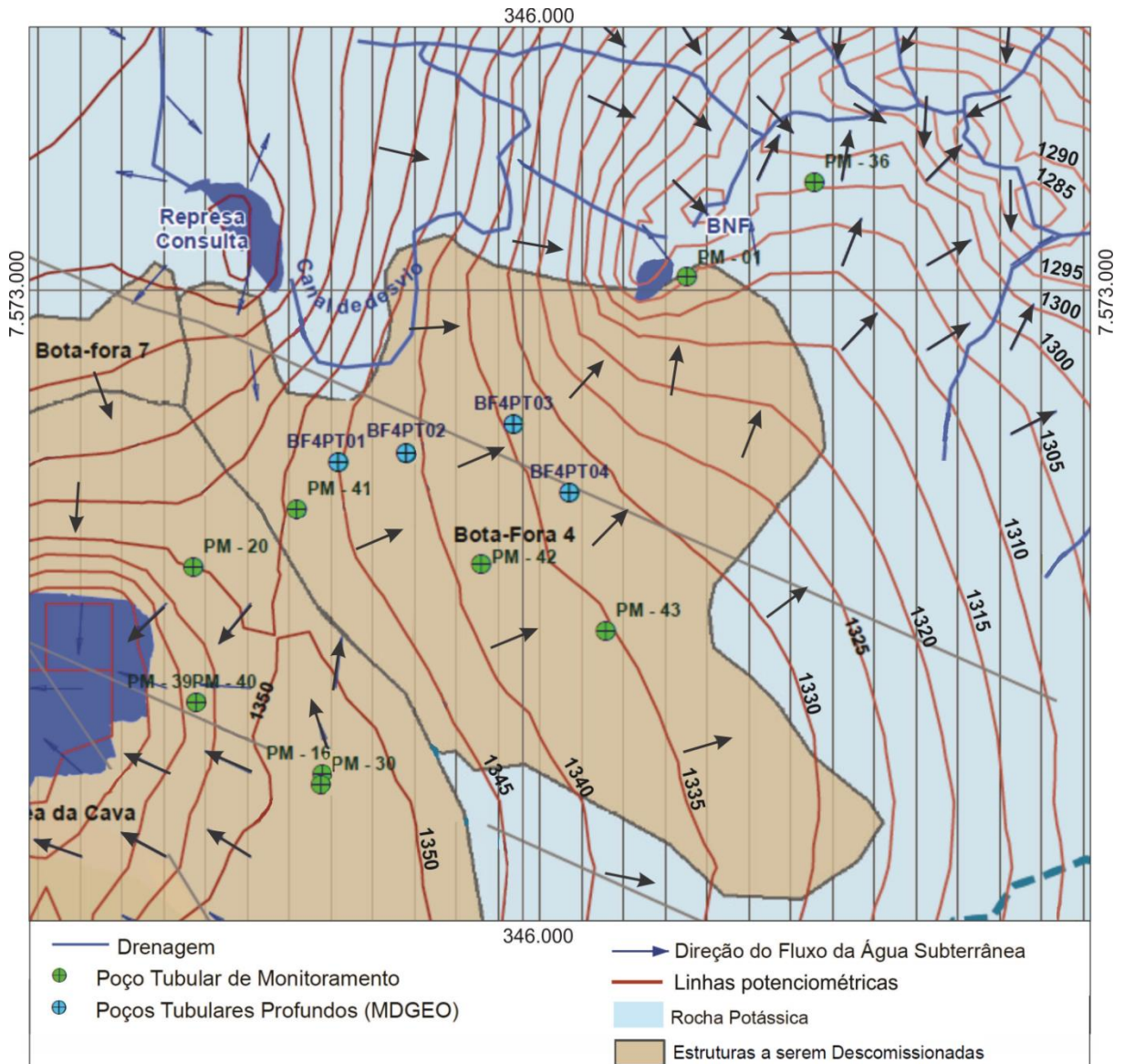
Fonte: Alberti (2017)

Com base nos poços de monitoramento da região do BF-04, a água subterrânea local é influenciada pela topografia original do terreno, segundo o modelo de Alberti (2017). Através dela e das camadas superficiais de solos residuais e rochas oxidadas a água pluvial percola e segue até a BF-04, onde o nível freático se torna relativamente raso em sua porção SE, onde a espessura do material estéril é menor. Outro detalhe importante é que o mesmo modelo atribui alguma influência ao Córrego da Consulta como fonte na infiltração e conseqüente fluxo subterrâneo em direção à pilha, sobretudo pela falta de impermeabilização adequada do canal artificial.

Através do mapa potenciométrico da área da BF-04 e adjacências (Fig. 5), é possível a análise desses padrões de fluxo da água subterrânea e como a construção da referida pilha de estéreis influencia no sistema hidrogeológico local. Conforme já mencionado, o divisor de águas local passa a poucos metros do poço de monitoramento PM-30, entre a BF-04 e a antiga cava da mina.

As águas que se infiltram no material estéril do patamar inferior da pilha seguem por sua base em fluxos no sentido NE, até atingir a base do talude principal e aflorar a poucos metros da bacia BNF, que capta esses efluentes já acidificados e contaminados pelo processo de DAM e os bombeia para a estação de tratamento localizada a centenas de metros dali.

Figura 5- mapa potenciométrico da região da pilha de estêreis BF-04.



Fonte: INB

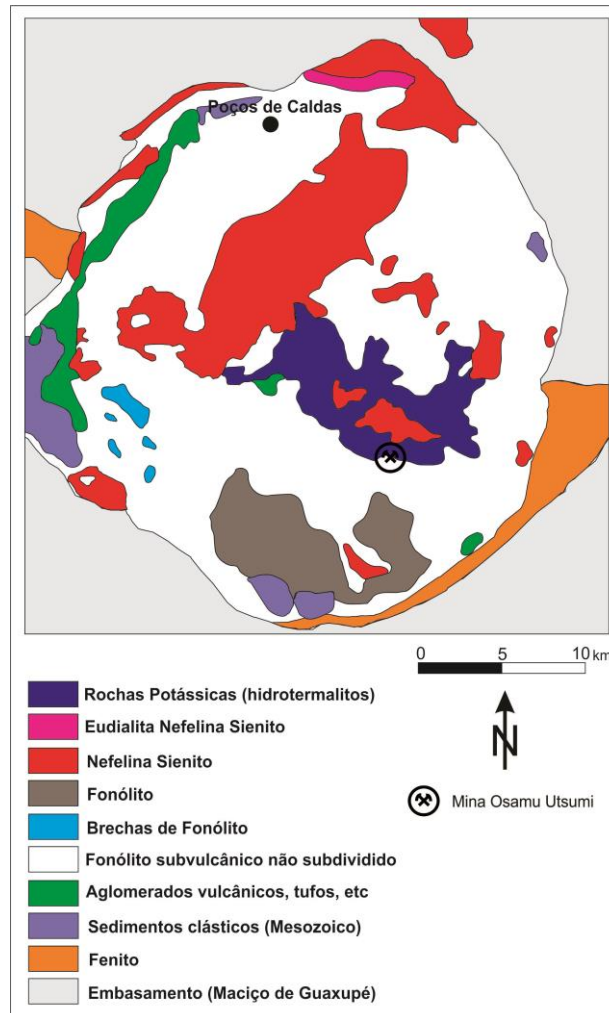
## 4.5. Geologia

### 4.5.1. Geologia Regional

O Planalto de Poços de caldas é uma estrutura de formato dômico de 30 km de diâmetro situada nos limites dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, sendo este último detentor de sua maior porção, delimitado pelos meridianos 46°24'W e 46°42'W e os paralelos 21°45'S e 22°00' S. O complexo alcalino é tido como uma das maiores manifestações do tipo, cuja intrusão é locada na porção meridional do Escudo Atlântico em terrenos pré-cambrianos constituídos basicamente por biotita gnaisses e anateixitos do Maciço Mediano de Guaxupé,

próximo á borda nordeste da Bacia do Paraná (FRANKEL, 1985; TEDESCHI et al., 2015) (Fig. 6).

**Figura 6 - Mapa geológico do Planalto de Poços de Caldas com a indicação da localização da Mina Osamu Utsumi.**



**Fonte: Capovilla (2001) modificado de Ellert (1957) e Fraenkel *et al.* (1985).**

Um dos trabalhos pioneiros desenvolvido na região é atribuído a Derby (1887, apud ELLERT, 1957) onde foi reconhecida a natureza vulcânica da região e a variação textural dos fonólitos e foiaítos do maciço alcalino. A partir de então diversos outros trabalhos abordam aspectos petrográficos e evolutivos da suíte em questão. Trabalhos mais recentes, como os de Tedeschi *et al.* (2015) descrevem a intrusão alcalina como um predomínio de tinguaiços e fonólitos isotrópicos, afaníticos a faneríticos de granulação fina com variações mineralógicas representadas por aegirina e pseudoleucita. De uma forma subordinada ocorrem nefelinas sienitos, lujauritos e rochas piroclásticas representadas por brechas, aglomerados vulcânicos e tufos, estas últimas mais comumente encontradas na porção noroeste do complexo. As

atividades ígneas policíclicas que deram origem ao clã dos nefelina-sienitos também são relacionadas a processos metassomáticos intensos com mineralização de urânio, além do forte intemperismo das rochas alcalinas.

Com base em análises geológicas e geocronológicas do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, Ulbrich (1984) destaca uma etapa inicial de domeamento e posterior formação da caldeira devido ao colapso do sistema, onde aparecem fendas radiais concêntricas e posteriormente invadidas por magma “tíguaítico”. Os ankaratritos e rochas vulcanoclásticas provavelmente são relacionadas a esta etapa. Além da geração de diques anelares, os tinguaitos ocupam uma grande porção do interior do maciço através de intrusões subvulcânicas. A etapa correspondente à colocação da maioria dos nefelina sienitos ocorreu em torno de 78 Ma, com algumas manifestações posteriores de diques de fonólitos (ULBRICH, 1984; SHEA, 1991).

De acordo com Ulbricht *et al.* (2002), existem dois eventos magmáticos principais. O primeiro teria dado origem às rochas insaturadas (fonólitos, tinguaitos, fonólitos e sienitos) e o segundo evento caracterizado pela presença, ainda que pequena, de rochas máficas a ultramáficas, acompanhadas também de ocorrências restritas de carbonatitos no Morro do Ferro (DAHLKAMP, 2010). Datação por Ar-Ar através de flogopita de um dique de lamproíto localizado na Mina Osamu Utsumi revela uma idade de 76 Ma. (ULBRICHT *et al.*, 2002), enquanto que a duração da atividade ígnea regional tenha sido por volta de 10 Ma, segundo SHEA (1992).

Por outro lado, Capovilla (2001) adota um modelo simplificado de três estágios magmáticos, em contraposição aos trabalhos de Ellert (1959) onde foi desenvolvido um modelo de evolução tectono-magmática em seis etapas. O primeiro deles seria o vulcanismo básico-ultrabásico máfico, evidenciado pelas rochas alcalinas intermediárias que cortam essas lavas tidas como as mais antigas do Complexo Alcalino. O segundo estágio seria dado pelo magmatismo alcalino intermediário nefelínico principal vulcânico e subvulcânico, com vulcanismo fonolítico inicial seguido pelas intrusões de nefelina sienitos principais e nefelina sienitos agpaíticos altamente peralcalinos de ocorrência local. Finalmente o terceiro estágio se daria pelo evento magmático subvulcânico final máfico-ultramáfico, caracterizado principalmente pelos enxames de díques de biotita lamprófiros descritos na mina de urânio.

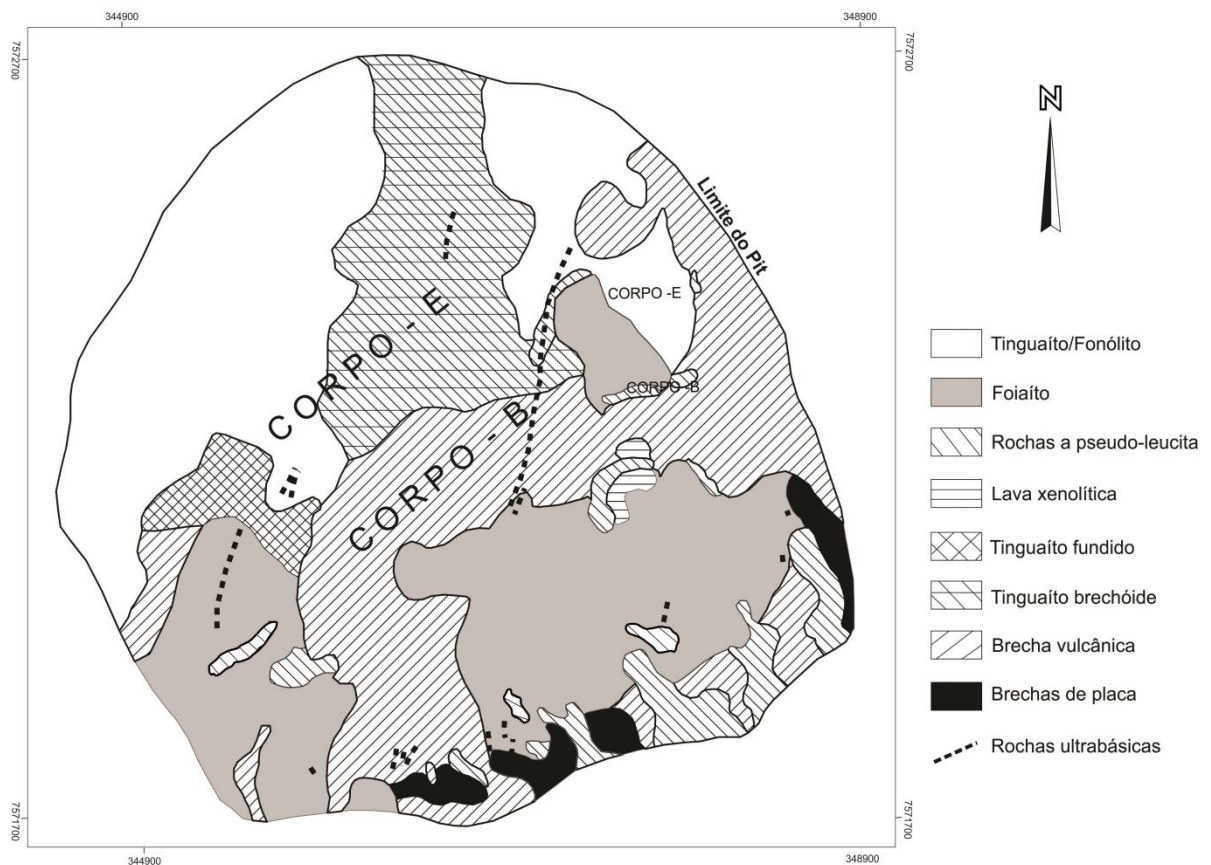
No Planalto de Poços de Caldas existem três sistemas de falhas principais. O primeiro e mais importante possui orientação N 60°W e é observado além do complexo alcalino, com origem relacionada ao processo de reativação durante o soerguimento. O segundo sistema é

orientado segundo N 40°E, cujo falhamento foi gerado durante o colapso da caldeira. Por último estão as falhas sub-circulares relacionadas à várias intrusões do complexo alcalino (HOLMES et al., 1992).

#### 4.5.2. Geologia local

A assembleia de rochas que ocorre na área da referida mina de urânio, também denominada de Jazida do Cercado, mostra baixa variedade petrográfica, segundo Magno Júnior (1985): nefelina sienitos; tinguaiços/fonólitos; foiaços; brechas; e rochas ultrabásicas (Fig. 7). São identificados processos superimpostos magmáticos, de alteração hidrotermal e supérgena (FRAENKEL et al., 1985; CAPOVILLA, 2001).

**Figura 7 - Mapa geológico da área da cava da mina Osamu Utsumi.**



**Fonte: MAGNO JÚNIOR, 1985**

Nefelina sienitos são os litotipos dominantes na localidade, embora sejam afetados por processos vulcânicos e hidrotermais que conduzem a formação de variedades estruturais, como é o caso das brechas. Suas variedades extrusiva e hipoabissal, fonólito e tinguaiço,



respectivamente, estes últimos comumente porfiríticos exibem feldspato potássico como principal fenocristal. Foiaíto, outro tipo textural do nefelina sienito, normalmente é caracterizado na área da mina como rocha leucocrática com sinais evidentes de alteração hidrotermal. (MAGNO JÚNIOR, 1985; FRAENKEL et al., 1985).

Os corpos mineralizados, segundo Magno Júnior (1985), são relacionados a uma grande chaminé de brechas instalada no planalto. Essas estruturas hidrotermais formam verdadeiros *pipes* e mostram certa variedade, especialmente no que diz respeito à matriz. Fluorita e minerais de zircônio, molibdênio e urânio são descritos como produtos do evento hidrotermal local.

As rochas básicas descritas na área da MOU ocorrem na forma de pequenos diques lamprofíricos que cortam todos os depósitos e são intensamente alteradas, mesmo em grandes profundidades, além de formarem horizontes superficiais de lateritas (MAGNO JÚNIOR, 1985; SCHORSCHER & SHEA, 1992).

De acordo com estudos realizados na cava da mina, as fraturas e descontinuidades mostram uma atitude preferencial de N25E 55NW e outras de menor projeção N83W 55NE, N25E 40SE e N81E 85NW (MIYASAKI, 2014).

#### **4.5.3. Mineralização**

Aproximadamente 100 minerais possuem o elemento urânio como constituinte essencial, sendo a Uraninita ( $UO_2$ ) e sua variedade não cristalina (pechblenda), dois dos principais minerais. Dentro do universo das rochas ígneas o urânio ocorre principalmente em minerais acessórios e possui a característica de formar soluções sólidas com elementos tetravalentes, como por exemplo, Ce, Zr e Th (BONOTTO, 2004). A ocorrência do elemento em questão é mais acentuada em rochas ácidas como pegmatitos graníticos e rochas alcalinas.

A mineralização da mina Osamu Utsumi possui ocorrência nas rochas vulcânicas, subvulcânicas e plutônicas da suíte alcalina previamente descrita, com destaque para os fonólitos e nefelina sienitos. A datação por Ar-Ar dos diques lamprofíricos, que cortam as mineralizações, colocam um limite mínimo para a idade do Evento hidrotermal de aproximadamente 76 Ma (SHEA, 1992; ULBRICH et al., 2002; FRANKLIN, 2007).

O depósito é relacionado à intrusões de foiaítos e tinguaitos em encaixates de fonólitos, com processos hidrotermais pós-magmáticos em larga escala. A colocação dos corpos foiaíticos foi seguida por eventos explosivos, com alteração das rochas encaixantes e

formação de um grande pacote de brechas, cujo complexo processo de intrusão/explosão/brechação envolve mudanças na pressão e temperatura do sistema associado a emissões gasosas e soluções termais que acabaram por gerar brechas em diversos padrões estruturais. Devido à sua alta permeabilidade, esse tipo de estrutura torna possível a ascensão de soluções hidrotermais mineralizadas e conseqüente mineralização em U-Th-Zr-ETR-F (MAGNO JÚNIOR, 1985; SCHORSCHER & SHEA, 1992; CAPOVILLA, 2001). O urânio é descrito na forma de uraninita ( $UO_2$ ) de pureza elevada, e coffinita ( $U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$ ). A uraninita apresenta impurezas como chumbo (1%), tório (2%), zinco e ferro (traços) e se encontra, normalmente, em brechas que contêm zirconita ( $ZrSiO_4$ ), baddeleíta ( $ZrO_2$ ), jordisita ( $MoS_2$ ), pirita ( $FeS_2$ ), esfalerita ( $ZnS$ ), galena ( $PbS$ ) e fluorita ( $CaF_2$ ) (TEDESCHI, 2005).

O processo de alteração hidrotermal na localidade da mina foi intenso e impossibilita distinção entre as zonas alteradas e inalteradas. A mineralogia gerada pela atividade hidrotermal é caracterizada principalmente por feldspato potássico e sericita, esta última comumente na forma microcristalina em substituição à nefelina. Pirita e fluorita também ocorrem disseminadas na rocha, embora a fluorita também seja encontrada em cavidades ou na matriz de brechas, além de significativa quantidade de caulinita. O metassomatismo potássico é descrito regionalmente, juntamente com argilização subordinada em condições oxidantes (MAGNO JÚNIOR, 1985; SCHORSCHER & SHEA, 1992).

Na cava da MOU, as zonas mineralizadas se dispõem espacialmente como corpos sub-horizontais com espessura de no máximo 8 metros e que, devido a fatores operacionais, foram denominadas de “A”, “B” e “E”. No local são descritos três processos controladores da mineralização: químico, litológico e tectônico. Em associação à gênese do depósito mineral e facilitação do entendimento, Magno Júnior (1985) reúne todos os processos em dois tipos principais de concentração de urânio: primária e secundária. O primeiro tipo estaria associado aos processos físico-químicos de formação das brechas vulcânicas, conforme já descrito.

A concentração de urânio secundária é relacionada a zonas superficiais, com profundidade média de 50 metros, de reconcentração de urânio ocasionada pelo avanço de soluções meteóricas intempéricas oxidantes através da solubilização e reprecipitação mineral em ambientes favoráveis.

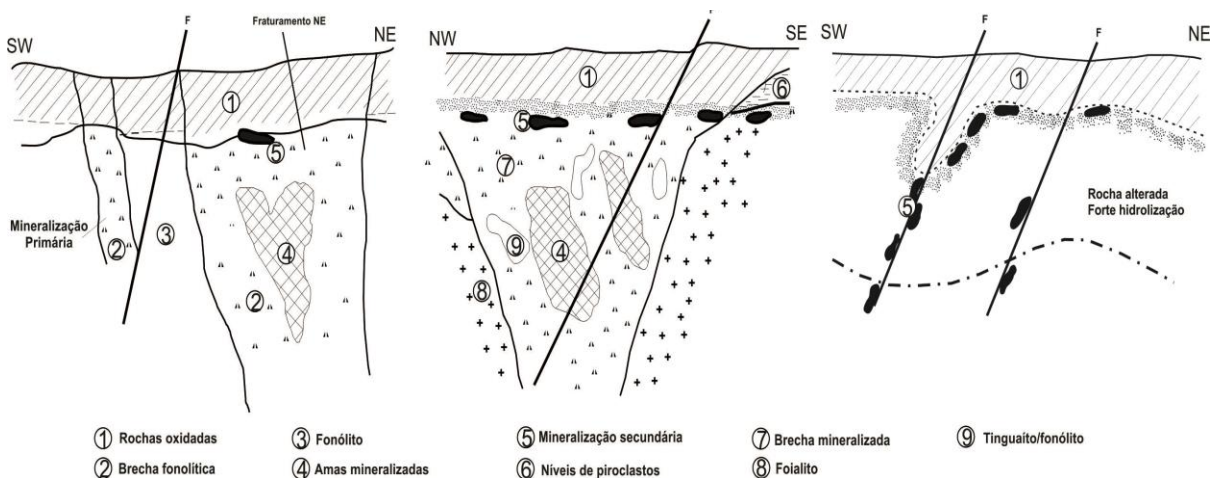
O bloco “A” corresponderia ao cone vulcânico e é situado na porção mais a oeste dos domínios da mina (Fig. 8a). Corpos tabulares mineralizados de orientação subvertical a vertical cortam o a rocha compacta microgranular do clã das lavas fonolíticas. Possui

dimensões menores do que o corpo “B”, embora a matriz das brechas monogenéticas seja similar para ambos. No que se refere à concentração de urânio, o tipo “A” é inferior ao “B”, com valores de 700 e 800 ppm, respectivamente (MAGNO JÚNIOR, 1985).

Na mina Osamu Utsumi, a zona mineralizada denominada “B” é a mais expressiva e basicamente constituída por volumosas massas brechóides do tipo *pipe*, relacionadas à intrusão foiaítica em zona de intenso faturamento (Fig. 8b). Corresponde a borda da cratera secundária. Os produtos hidrotermais mais comuns são: pirita, fluorita e minerais de urânio (pitchblenda ou óxidos de urânio reconcentrados), molibdênio e zircônio. De maneira subordinada são descritas também, galena, esfaleria e barita (MAGNO JÚNIOR, 1985).

Por último, a composição do minério supergênico do tipo “E” é descrita por tinguaitos e fonólitos extremamente fraturados e alterados pelo hidrotermalismo (Fig. 8c). Sua locação se dá no quadrante noroeste ao redor dos blocos de brechas e as concentrações de molibdênio e zircônio são bastante baixas quando comparadas aos corpos “A” e “B”, enquanto que o teor médio de urânio é da ordem de 1200 ppm (MAGNO JÚNIOR, 1985).

**Figura 8 - Seções esquemáticas dos corpos mineralizados A, B e E, respectivamente.**



**Fonte: Magno Júnior (1985)**

## 5. DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

A drenagem ácida de mina (DAM) é um fenômeno relativamente corriqueiro em atividades mineiras, além de ser significativo em escala mundial tanto em empreendimentos em operação como abandonados. O processo é ocasionado pela exposição de minerais sulfetados (Tabela 1) ao oxigênio e água, cuja reação poderá ser acentuada a depender da quantidade de minerais reativos expostos e da presença de bactérias capazes de acelerar o processo natural (GRAY, 1997). Seu produto é tido por efluentes de baixo pH (da ordem de 2 a 3) devido à formação de ácido sulfúrico e a dissolução de metais oriundos das matrizes rochosas, como arsênio, cádmio, zinco, urânio, etc, e possui capacidade de causar degradação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, solos e sedimentos (PASTORE & MIOTO, 2000; AKCIL & KOLDAS, 2006; CAMPANER & SILVA, 2009). No Brasil o fenômeno é também observado nas atividades de exploração de carvão mineral, concentrada na Região Sul do país, por conta da presença de pirita e outros sulfetos (CAMPANER & SILVA, 2009).

**Tabela 1 - principais minerais associados à formação de DAM.**

	Composição
Arsenopirita	$\text{FeS}_2 \cdot \text{FeAs}$
Bornita	$\text{CuFeS}_4$
Calcocita	$\text{Cu}_2\text{S}$
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$
Covelita	$\text{CuS}$
Galena	$\text{PbS}$
Milerita	$\text{NiS}$
Molibdenita	$\text{MoS}_2$
Pirita	$\text{FeS}_2$
Pirrotita	$\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$
Esfalerita	$\text{ZnS}$

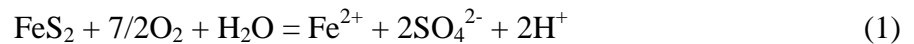
(GRAY, 1997)

Em relação à fonte da DAM, Akcil & Koldas (2006) estabelecem origens primárias e secundárias para o processo químico. As fontes primárias são exemplificadas por pilhas de estéreis e rejeitos da indústria mineradora e utilização de rochas para a construção de rodovias e represas, enquanto que as secundárias são tidas por tratamento de lodos, cortes rochosos de estradas, pilhas de estocagem, etc.

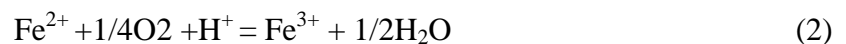
Os fatores primários determinantes da geração do fenômeno são tidos por: pH, temperatura, concentração de  $\text{O}_2$  nas fases gasosa e líquida, atividade química do  $\text{Fe}^{3+}$ , área

superficial da partícula mineral, energia de ativação química necessária para a inicialização do processo e atividade bacteriológica (AKCIL & KOLDAS, 2006).

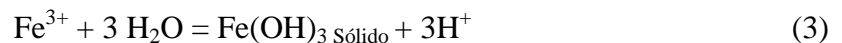
Dentre as diferentes etapas de reações, a primeira delas (Eq. 1) consiste na oxidação do mineral sulfetado (pirita por exemplo) em  $\text{Fe}^{2+}$ , íon sulfato e hidrogênio (BLOWES, 1997; AKCIL & KOLDAS, 2006):



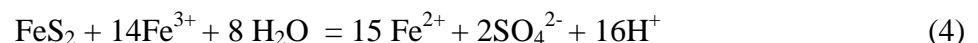
Os produtos resultantes da reação contribuem para a elevação da condutividade e acidez dos efluentes, com a geração de águas subterrâneas de baixo pH. A próxima etapa de reação química será estabelecida caso o ambiente local seja suficientemente oxidante, o que gerará a oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  para  $\text{Fe}^{3+}$  (Eq. 2):



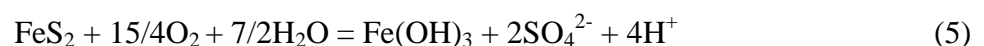
Segundo Akcil & Koldas (2006), ao atingir um pH de 2,3 a 3,5 o ferro férrico se precipita na forma de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  e jarosita (sulfato hidratado de ferro e potássio) com pouco ferro ferroso disponível no sistema aquoso com diminuição simultânea do pH:



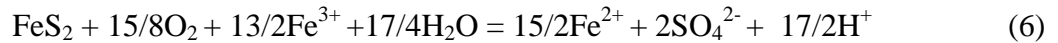
O processo continua com a oxidação de pirita residual no ambiente através de eventuais  $\text{Fe}^{3+}$  gerados da reação (2) e que não sofreram precipitação segundo a Eq. (3). O processo acaba por gerar ferro férrico, íon sulfato e incremento na acidez, evidenciado pela liberação de íons  $\text{H}^+$ :



A combinação das reações (1) – (3) representa simplificada a geração de ácido que produz ferro em solução que, por sua vez, poderá ser precipitado como hidróxido:



Outra reação simplificada também pode ser estabelecida conforme as reações (1) – (3) na qual o ferro férrico é o responsável pela oxidação da pirita residual do sistema (AKCIL & KOLDAS, 2006):



No interior de uma pilha de estéreis a oxidação dos sulfetos pode ocorrer de forma relativamente rápida e pode contar com a catalisação por bactérias quimiolitotróficas do grupo *Thiobacillus*, além da liberação de elementos como As, Cd, Co, Cu, Ni, Pb e Zn para o sistema hídrico local (BLOWES, 1997).

Em termos de risco ambiental, o grau de severidade da DAM envolve estimativas de sua duração e mobilização dos metais supracitados, embora a maioria dos sítios afetados pelo problema sejam considerados de nível moderado a severo, principalmente em dependência dos fatores pH e acidez. Na escala moderada o pH do sistema se encontra na faixa de 2 a 4 enquanto que a acidez é tida por 100.000 mg/L a 1.000 mg/L, embora o fator permeabilidade, no caso das pilhas de estéreis/rejeitos, seja de grande importância na contribuição do aumento das taxas de reação (MORIN & HUTT, 1998; AKCIL & KOLDAS, 2006).

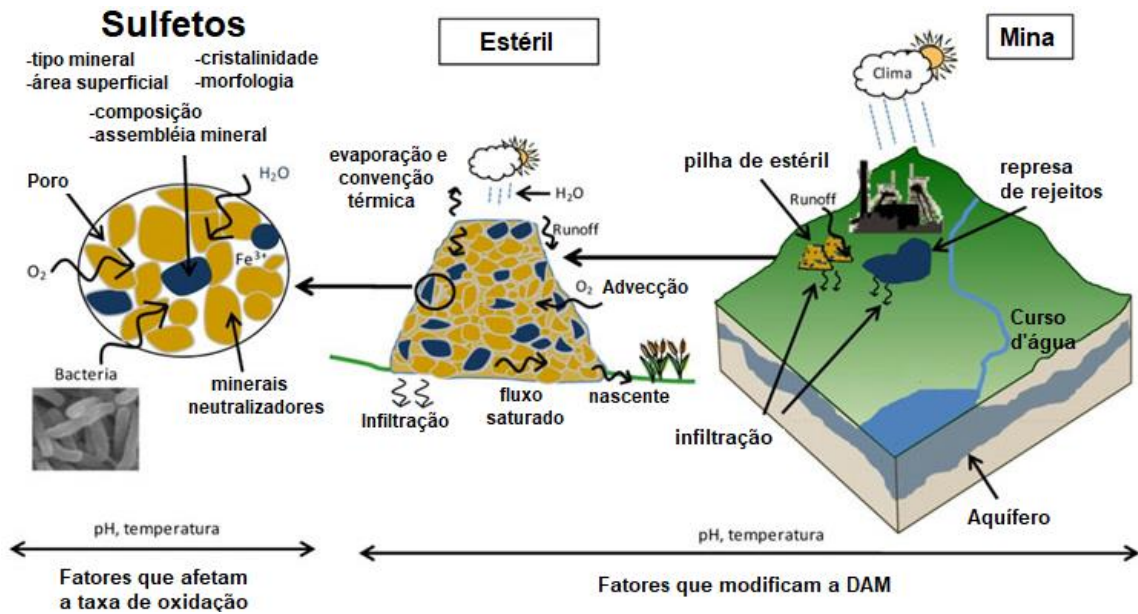
Outros fatores que controlam a DAM são aqueles relacionados à natureza do próprio mineral sob o efeito da oxidação. De acordo com INAP (2012), o tipo de sulfeto, sua área superficial, encapsulamento, cristalinidade (reatividade de fases amorfas tendem a ser mais elevadas) e morfologia são fundamentais na taxa de oxidação e conseqüentemente no controle de geração do processo de DAM, sobretudo na resistência do mineral à oxidação.

A presença de impurezas e anomalias estruturais nos minerais sulfetados reduz resistência à oxidação. Sulfetos como argentita e pirita possuem um elevado potencial de oxidação em relação a pirrotita, esfalerita e galena (INAP, 2012). A Figura 9 ilustra o processo em diferentes escalas da geração da DAM e seu transporte hidrogeológico.

Em relação aos fatores ambientais, é possível destacar a temperatura, disponibilidade de água, pH e potencial redox do sistema. O transporte de oxigênio pode ocorrer por processos de difusão, convecção, advecção devido a gradiente de vento e bombeamento barométrico. O primeiro ocorre limitado em zonas de baixas profundidades, enquanto que os outros processos são capazes de levar o oxigênio para níveis mais profundos (WUNDERLY et al., 1996; INAP, 2012). A Figura 10 apresenta um esquema simplificado para a oxidação da

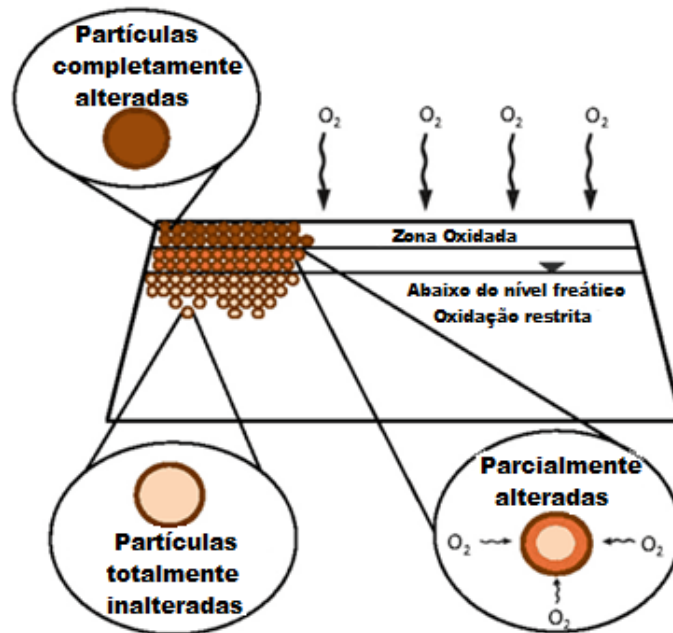
pirita em uma pilha de rejeitos, onde o nível de oxidação mineral varia conforme a zona estabelecida pela altura da zona saturada (meio não oxidante). Logo acima, os grãos de pirita são completamente ou parcialmente alterados (núcleo remanescente) de acordo com a capacidade de difusão do O<sub>2</sub> atmosférico no sistema de poros da pilha.

Figura 9 - ilustração do processo de geração da DAM e seu transporte através de um apilha de estéreis.



Fonte: INAP (2012)

Figura 10 - Zonas de oxidação da pirita conforme a altura do lençol freático e a capacidade de difusão do O<sub>2</sub> dentro de uma pilha de rejeitos.



Fonte: Wunderly *et al.* (1996)

Os efeitos da DAM vão além dos fatores químicos explicitados acima. O meio biológico do local impactado pelo processo de DAM pode ser severamente comprometido a depender da gravidade do problema estabelecido, sobretudo pela alteração dos parâmetros físicos do sistema. A Figura 11 categoriza os diferentes fatores suscetíveis a impactos, que inclui o completo desaparecimento de espécies e redução da estabilidade ecológica (GRAY, 1997):

**Figura 11 - Principais efeitos da DAM no meio ambiente em relação aos fatores químicos, físicos, biológicos e ecológicos.**



**Fonte: GRAY (1997)**

## 5.1 Técnicas de remediação

O problema da drenagem ácida de mina pode persistir por séculos, a depender do volume de estéril reativo e das condições climáticas e hidrogeológicas locais, o que pode traduzir numa grande soma de dinheiro investido em longo prazo no tratamento do efluente ácido e salino gerado quando o sistema de geração da DAM não é atacado em sua origem. No caso da remediação *in situ*, uma das alternativas é o controle do fluxo da água subterrânea e, em especial, da água que adentra o sistema. Segundo Akcil & Koldas (2006) esse controle pode ser feito de acordo com as seguintes medidas:

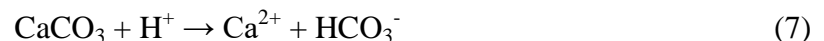
- Desvio de águas superficiais que fluem para o local de poluição;
- Prevenção da infiltração da água subterrânea no local poluído;



- Prevenção da infiltração de corpos d'água superficiais nas áreas afetadas; e
- Posicionamento controlado dos resíduos geradores da DAM.

No caso de pilhas de estéreis e bota-foras, existe a possibilidade da instalação de drenos na base desses locais e a impermeabilização e construção de calhas no topo para a prevenção de infiltração da água pluvial. A impermeabilização com a utilização de materiais como argilas dispostas em camadas é uma técnica de baixo orçamento quando comparadas a utilização de mantas impermeabilizantes, porém a sua eficiência é significativamente menor. Geralmente o próprio solo argiloso e resíduos oxidados da mineração são utilizados de acordo com características particulares como altas taxas de compactação e, é claro, a baixa permeabilidade.

O próprio sistema pode garantir a neutralização do efluente ácido gerado, desde que a composição mineralógica do estéril ou do ambiente geológico local permita as reações para o consumo dos íons  $H^+$  e conseqüente incremento do pH ao longo do fluxo subterrâneo da água, segundo Blowes (1997). As principais reações de neutralização da DAM são as de dissolução de minerais carbonáticos, hidróxido de alumínio e hidróxido de ferro (III). A primeira delas envolve a calcita e dolomita, minerais carbonáticos mais comuns (Eq. 7). Como se trata de um sistema fechado, essa reação é um dos principais tampões e pode ser um suprimento adicional de  $HCO_3^-$  para o sistema hídrico (CAMPANER & SILVA, 2003).



A utilização de calcário em drenos alcalinos para minimizar a geração de DAM são técnicas mais baratas, cujo resultado varia na cinética da reação de dissolução do  $CaCO_3$  e da oxidação do  $FeS_2$ . Componentes orgânicos como lodo ativado e bagaço de cana têm sido pontualmente utilizados em conjunto com os drenos alcalinos na recuperação das áreas degradadas, principalmente por serem de baixo custo (MELLO et al, 2014). Além dos carbonatos e  $Al(OH)_3$ , este último com dissolução em pH na faixa de 4,0 a 4,5, os aluminossilicatos presentes no material do estéril e de ganga podem contribuir com a neutralização do sistema, onde há o consumo do  $H^+$  e liberação de cátions como Ca, Mn, K e Mg,  $H_4SiO_4$  e  $Al^{3+}$ , embora pouco eficientes por conta da lenta dissolução (BLOWES, 1997).

Por outro lado, Kleinmann (1990) apresenta três classes de metodologias no controle *in situ* do processo de oxidação da pirita: de barreira, químicas e de inibição bacteriológica. A

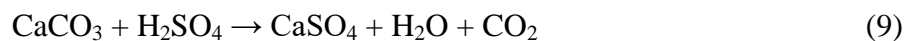
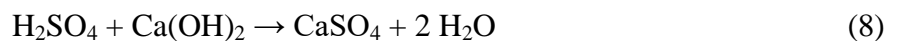
primeira delas se baseia no princípio de isolamento da pirita dos reagentes ambientais e do sistema de transporte hidrológico local. São nesta classe que se inserem as técnicas de impermeabilização da superfície, conforme já mencionado, e de isolamento dos sulfetos do oxigênio atmosférico por inundação. Quando os resíduos sulfetados se encontram estocados sob a água, tornam-se quimicamente inertes, uma vez que a concentração máxima de oxigênio dissolvido em meio aquoso pode ser 25.000 vezes menor do que a encontrada na atmosfera (MELLO et al., 2014).

Os métodos químicos, por sua vez, alteram a composição da água, limitam a atuação dos componentes reagentes e/ou atuam na limitação da oxidação através da passivação superficial da pirita. A adição de calcário ou outras substâncias alcalinas como NaOH, CaO e Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> acarreta na neutralização do efluente ácido gerado e possibilita a precipitação de minerais secundários sobre os sulfetos remanescentes. A adição de fosfato no sistema de DAM também é um método de diminuir a taxa de oxidação dos minerais sulfetados, uma vez que a formação de compostos como Fe<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> e FePO<sub>4</sub> consome o ferro férrico disponível no sistema, responsável também pela oxidação da pirita (KLEINMANN, 1990).

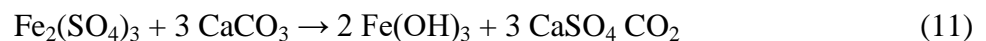
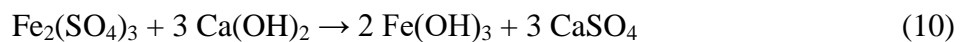
A inibição bacteriológica, efetuada por produtos específicos, atua no extermínio dos microorganismos que promovem a oxidação dos sulfetos e que acabam por potencializar a geração de DAM. Dentre os componentes pesquisados na inibição da *Thiobacillus ferrooxidans*, apenas sulfatantes aniônicos se mostraram eficazes. Embora eficaz, o método não garante uma ação contínua ao longo do tempo devido à necessidade de reaplicação por conta da solubilização e lavagem dos reagentes ao longo do tempo. Em áreas em que a concentração de oxigênio em profundidade é tal que ela pode sustentar a oxidação abiótica da pirita, a aplicação de surfactantes também se mostra ineficiente (KLEINMANN, 1990).

De modo antagônico, algumas bactérias possuem a capacidade de redução dos íons gerados pelo processo de DAM na presença de substâncias doadoras de elétrons, processo comumente conhecido como “tratamento biológico ativo” (NANCUCHEO et al., 2017). Este método de mitigação é baseado na utilização de microorganismos anaeróbicos responsáveis pela sulfidogênese, com geração de sulfeto de hidrogênio como produto metabólico da bactéria redutora de sulfato. Além da redução do íon sulfeto e outros metais tóxicos, como cobre e zinco, este tipo de tratamento garante o consumo de prótons do efluente e consequente aumento do pH, embora uma correção inicial da acidez possa ser necessária para garantir um ambiente adequado à população microbiana (NANCUCHEO et al., 2017).

Quando existe a disponibilidade de recursos, uma solução viável durante a fase de descomissionamento seria a relocação do material estéril ou rejeito para dentro da cava da mina ou, no caso de minerações subterrâneas, o preenchimento dos antigos túneis com os mesmos materiais. Entretanto, em muitas localidades a solução encontrada é a manutenção do passivo com a geração da DAM e a aceitação dos impactos ambientais acarretados. Uma alternativa menos extrema seria o tratamento do efluente ácido por várias décadas, geralmente uma escolha de alto custo em longo prazo (GRAY, 1997; MELLO et al., 2014). Em unidades de neutralização, o tratamento do efluente geralmente acontece em três fases: neutralização, oxidação e precipitação (POZO-ANTONIO et al., 2014). A primeira delas geralmente acontece com a adição de  $\text{Ca(OH)}_2$  (Eq. 8) ou  $\text{CaCO}_3$  (Eq. 9):



A oxidação de ferro ferroso em férrico acontece em tanques de aeração, segundo as Equações 10 e 11:



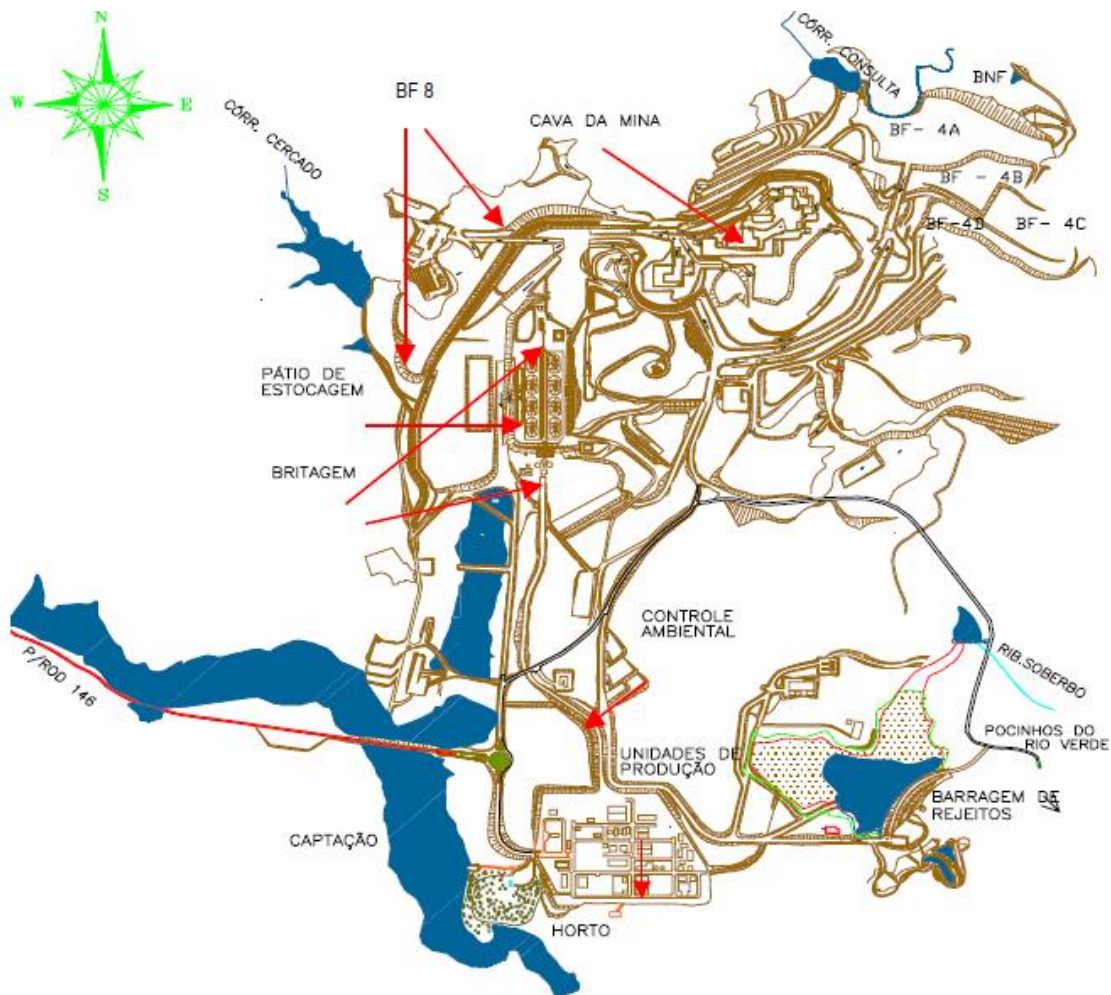
Alguns sistemas de tratamento utilizados são “sistemas em linhas”, unidades de tratamento por troca iônica, osmose reversa e até neutralização através da água do próprio rio. Este último caso é uma solução menos dispendiosa onde efluente ácido é disposto em uma série de lagoas de decantação antes da emissão controlada no rio local que, teoricamente, tem a capacidade de neutralização e incorporação dessas águas (POZO-ANTONIO et al., 2014). No caso do tratamento do efluente da MOU, a unidade utiliza cal hidratada para neutralização. Essa reação gera a água para o descarte e um resíduo alcalino denominado DUCA (diuranato de cálcio), em referência ao composto de urânio presente e hidróxidos metálicos em uma matriz de sulfato de cálcio. Esse precipitado, que é disposto na antiga cava da mina, possui uma concentração de aproximadamente 0,25% de  $\text{U}_3\text{O}_8$  e 2,5% de óxidos de elementos terras raras (LIMA, 2014).

## 6. ASPECTOS GERAIS DA MINA OSAMU UTSUMI

### 6.1. Processos operacionais da Mina Osamu Utsumi

O processo operacional da mina Osamu Utsumi era dividido nas etapas de mineração, processamento físico e processamento químico. Foi adotada céu aberto, o que resultou em uma cava de aproximadamente 1200 m de diâmetro e 200 m de profundidade máxima, hoje parcialmente alagada por conta da manutenção do nível de água por bombeamento e pelo recebimento de efluentes tratados. A Figura 12 descreve a distribuição das unidades operacionais da MOU e a localização da antiga cava de exploração, bastante próxima à pilha de estéreis BF-04. A área requerida para a unidade é de 3.193 ha, embora apenas 1.800 ha sejam de propriedade da INB. A unidade industrial possui área construída de 30 mil m<sup>2</sup> e a área da barragem de rejeitos é de 23 ha.

Figura 12 - Arranjo Físico do Complexo Mineiro-Industrial do Planalto de Poços de Caldas.



Fonte: Cipriani (2002)

Segundo Cipriani (2002), a MOU foi projetada para tratar 2500 t/dia de minério de urânio, o que corresponderia a cerca de 700 mil t/ano com teor de urânio solúvel equivalente a 680 ppm de U. Essa exploração resultaria em uma produção prevista de 650 t/ano de diuranato de amônio (DUA), equivalente a 425 tU/ano. O teor de corte foi definido em 170 ppm de  $U_3O_8$  recuperado na usina, enquanto que o material abaixo dessa concentração foi considerado estéril e enviado para as pilhas da unidade, principalmente o BF-08 e BF-04.

De 1977 a 1981 a operação da MOU movimentou cerca de 30 milhões de  $m^3$  de estéril durante os trabalhos de decapagem e pré-lavra. Os dados de volume, massa, área e origem do material disposto nas pilhas da MOU são indicados na Tabela 2. De acordo com Fraenkel *et al.* (1985), as reservas de  $U_3O_8$  lavráveis eram estimadas em 17.171 toneladas.

**Tabela 2 -Características das pilhas de estéreis da MOU**

Pilha	Volume (1000 $m^3$ )	Massa (1000 t)	Área (ha)	Origem predominante do material
BF-01	4400	8800	25,5	Decapagem
BF-03	9800	19600	20,5	Decapagem
BF-04	12400	24800	56,9	Decapagem e triagem do corpo B
BF-07	2400	4800	5,3	Decapagem
BF-08	15000	30000	64,4	Decapagem e triagem dos corpos A e E
BF-CM	560	1200		Triagem do corpo E
Total	45560	89120	172,6	

**Fonte: Cipriani (2002)**

O avanço da frente de lavra foi realizado por degraus, com uma altura de bancada de 16 m no estéril e de 2,4 a 8 m nas zonas mineralizadas. Segundo Franklin (2007) o desmonte de materiais mais facilmente desagregáveis como solos acontecia com escavação direta por “*moto-scrapers*”, enquanto que explosivos foram usados nas rochas e sua remoção realizada por carregadeiras. Caminhões de estrada e “*moto-scrapers*” foram utilizados ainda na movimentação dos estéreis para as pilhas.

Caminhões transportavam o minério até a etapa do beneficiamento físico, onde o material era submetido a britagem primária e secundária, moagem e espessamento. Após a moagem primária, o minério era disposto em pilhas no pátio de estocagem conforme seu teor de urânio, de forma que o material final apresentasse concentração uniforme na faixa de 400 ppm do elemento. Na britagem secundária o minério era reduzido a uma granulometria de 800 $\mu$ m e misturado a pirolusita e rocha fosfática. O óxido de manganês promove a oxidação

do urânio e consequente facilidade de extração na etapa de lixiviação ácida, enquanto que a solubilização da rocha fosfática durante o beneficiamento químico tem o poder de remoção do zircônio na forma de fosfato de zirconila. Finalmente na fase de adensamento, ocorria a adição de água tratada com cal com a geração de uma polpa neutra com 55% de sólidos, que era bombeada para a usina de beneficiamento químico através de mineroduto (CIPRIANI, 2002; FRANKLIN, 2007).

A popa era transformada no produto final na etapa do beneficiamento químico, o diuranato de amônio - DUA, também conhecido como *yellow cake*. Também era comum a recuperação de molibdênio na forma de molibdato de cálcio com o processo de lixivia por meio de  $H_2SO_4$  a uma temperatura de  $70^\circ C$ , que resultava na solubilização do urânio na forma de sulfato de uralina  $UO_2SO_4$ . A etapa seguinte era a filtração da ganga do chamado licor uranífero (0,4 mg/L de  $U_3O_8$ ), além a adição de reagentes para a remoção do molibdênio e eliminação de finos por intermédio de agentes flocculantes (FRANKLIN, 2007; OLIVEIRA, 2010).

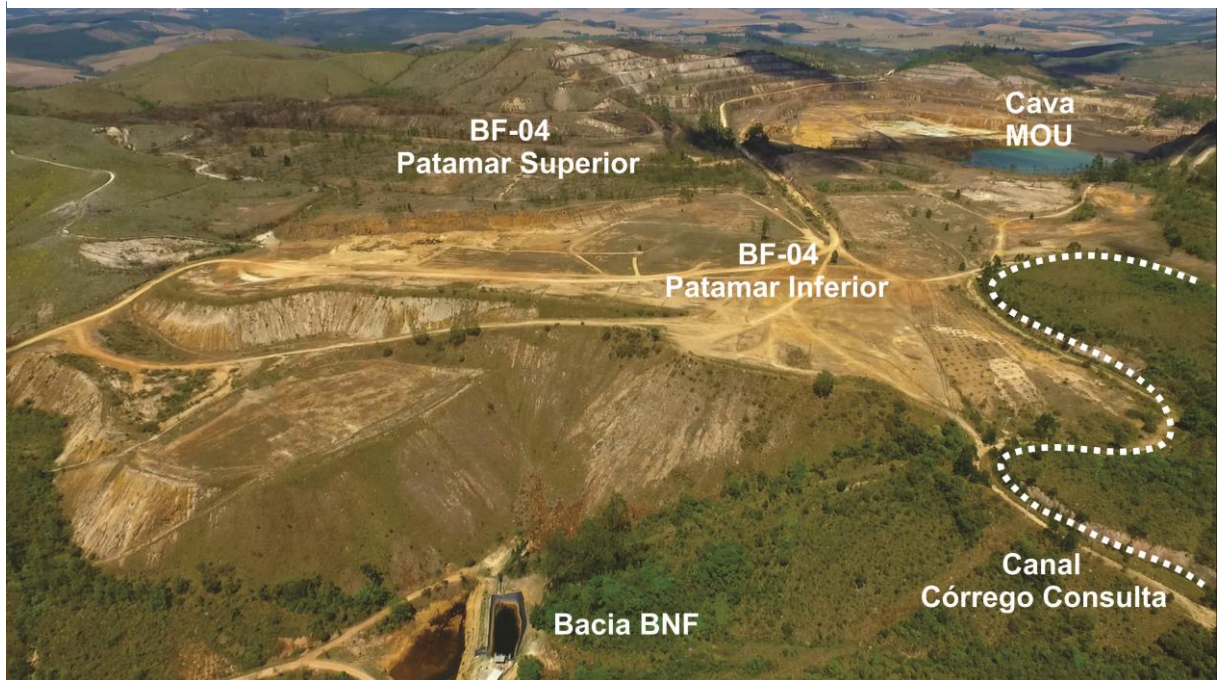
Em seguida ocorria a remoção orgânica do urânio com a utilização de amina terciária e solventes orgânicos inertes. A concentração de  $U_3O_8$  após esse processo era significativamente maior, com valores de 5,5 g/L do óxido retido na fase orgânica resultante. A unidade utilizava cloreto de sódio e carbonato de sódio na extração seletiva do urânio em solução aquosa contendo cerca de 50 g/L de  $U_3O_8$ . Por último o diuranato de amônio era obtido através de hidróxido de amônia. Em seguida o material era filtrado, secado e estocado (FRANKLIN, 2007; OLIVEIRA, 2010)

## 6.2. Características físicas da BF-4

A pilha de estéreis, ou bota-fora BF-04, está localizada na porção norte da MOU, próxima à antiga cava de exploração da referida mina (Fig. 13). Possui uma área de 56,4 ha e volume de 14,26 milhões de  $m^3$  de estéril, condicionado em uma pilha de 90 m de talude e inclinação de  $70^\circ$  e é subdividida em dois patamares: superior e inferior. De acordo com Alberti (2017), o primeiro patamar é constituído majoritariamente por material de decapagem da mina, enquanto que o patamar inferior é relacionado ao material rochoso de triagem do corpo de minério B. O processo de deposição foi por avanço de ponta de terreno (*end-dumping*) e sua construção consiste no descarregamento diretamente sobre a crista da face do depósito, sem o controle e compactação do material lançado (MIYASAKI, 2014). Uma bacia

de captação, denominada de BNF, foi instalada aos pés do talude principal para o recebimento dos efluentes ácidos gerados no interior da pilha. A distribuição granulométrica é extremamente ampla e variável dentro da pilha, com frações de argila até matacões.

**Figura 13 - Aspecto geral e localização da pilha BF4 na CIPC. Detalhe na porção direita da imagem para o canal de desvio do córrego da Consulta.**

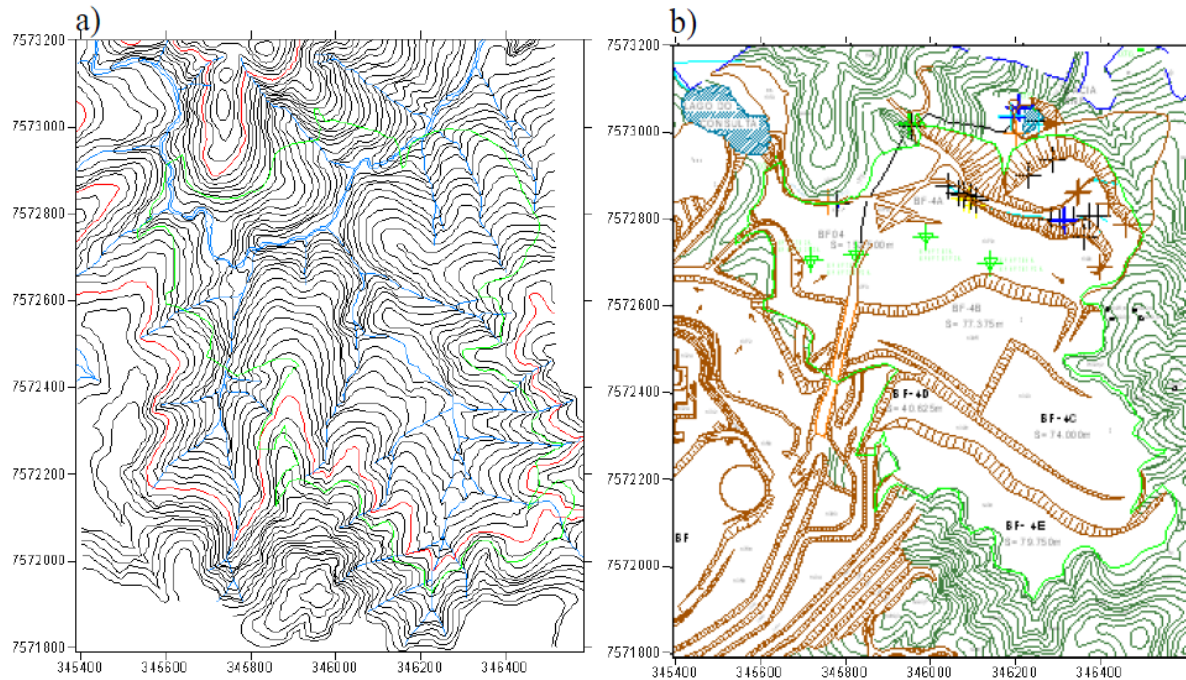


Sua construção ocorreu pelo preenchimento da vertente do córrego da Consulta, pertencente à Bacia do Rio Verde. O referido corpo d'água foi desviado para a lateral esquerda da pilha, onde foi construído um canal que faz a drenagem do sistema, cujas águas são lançadas à jusante da BF-04. Para o recebimento do estéril da mineração, o fundo do vale foi previamente preparado com a instalação de drenos profundos de matacões e rochas estéreis, sendo posteriormente recobertos por material mais fino (RODRIGUES, 2001). Uma camada de 20 a 30 cm de espessura de argila foi disposta sobre o estéril para que se evitasse – ou restringisse o máximo possível – a infiltração da água pluvial pela parte superior da BF4 (WIIKMANN, 1998).

Primeiramente foi pensado em estabelecer um local próximo à bacia de rejeitos para a instalação da BF-04, porém o projeto foi cancelado devido à presença de terrenos tufosos na localidade. Logo em seguida foi escolhida a atual área do antigo vale, bastante próxima a cava da mina. A Figura 14a descreve o terreno original, onde o córrego principal de orientação SE-NW, foi completamente soterrado pela construção da pilha (delimitado pela linha verde). A

bacia de captação foi estabelecida na base do talude principal (canto superior direito da Fig. 14b), onde toda a água do interior da BF-04 deveria ser captada e bombeada para a estação de tratamento de efluentes (FRANKLIN, 2007).

**Figura 14 - Mapa topográfico da BF-04 antes (a) e depois (b) de sua construção**



**Fonte: Franklin (2007)**

O vale utilizado para a deposição do material estéril é constituído por uma superfície contínua de saprólito bastante rígido das rochas alcalinas locais. Capeando essa superfície existe ainda uma camada quase contínua e de aproximadamente 30 cm de cascalho limonítico (3 a 10 cm de diâmetro) com argila e areia, de acordo com Fagundes (2005).

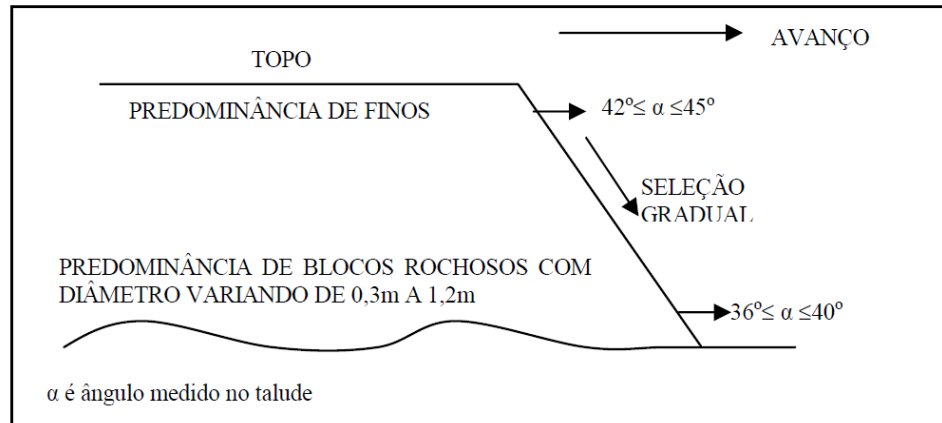
Numa pilha de estéril é esperada certa anisotropia das características físicas, sobretudo da variação granulométrica do material depositado. IPT (1984) e Franklin (2007) apontam para o processo de segregação em virtude do processo de construção da BF4, onde o topo seria mais constituído por partículas finas e a base por blocos de rochas com diâmetro variando de 0,3 a 1,3 m (Fig. 15).

Com base em informações coletadas em campo, a segregação granulométrica descrita em estudos anteriores ocorre, embora existam muitos níveis de blocos e matações nas porções mais elevadas na BF-04. Na Figura 16a é possível constatar que em um dos taludes no interior da pilha existe certa heterogeneidade na forma de camadas de granulometrias distintas, onde o topo aparenta possuir uma predominância de matações enquanto que na base do talude um material de granulometria fina é predominante. Essa concentração de níveis de granulometria



mais elevada associados a porções mais argilosas e compactas (baixa permeabilidade) poderiam contribuir para a formação de um ambiente favorável a geração de fluxos preferenciais da água subterrânea no interior da pilha.

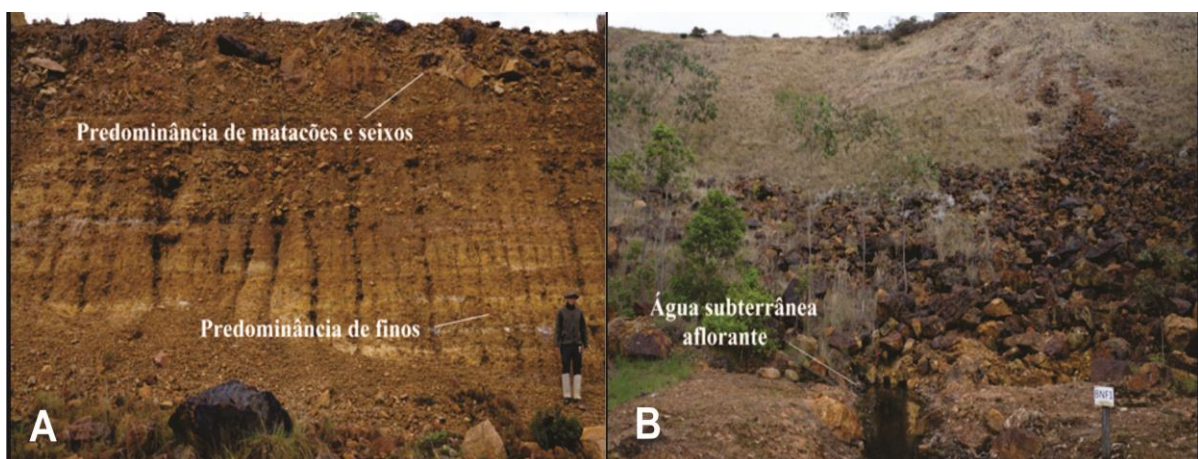
**Figura 15 - Segregação granulométrica na BF4 em virtude do método de construção da pilha.**



Fonte: IPT (1984, apud Franklin, 2007)

Um ponto na base da BF-04 corrobora o fato apresentado, na qual o afloramento da água subterrânea alterada pela DAM é localizado em meio à matacões (Fig. 16b). Esse fluxo d'água, agora superficial, segue através de um canal impermeabilizado por manta até a bacia de captação (BNF), onde é bombeado por centenas de metros até a unidade de tratamento de efluentes, conforme já mencionado. Franklin (2007), através de ensaios de condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), porosidade e gráficos das curvas características obtidas para os estéreis, também confirma a existência de tais fluxos preferenciais, onde a movimentação da água ocorreria preferencialmente através dos espaços entre os blocos de estéreis rochosos, principalmente na base da BF-04.

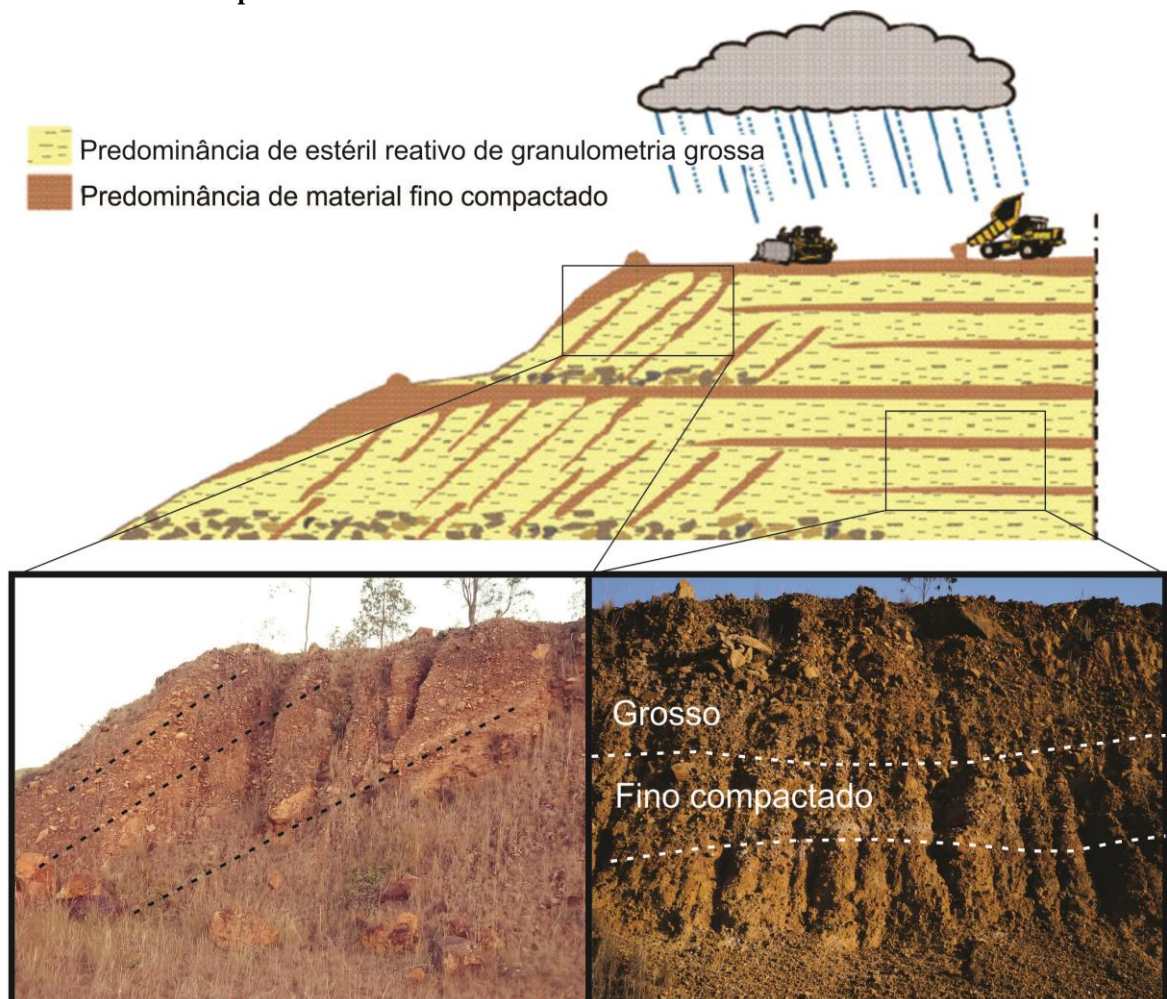
**Figura 16 - Detalhes da BF-04: Detalhe de um corte de talude no interior da pilha com a indicação de níveis de granulometrias distintas (A); porções de maior granulometria (matacões) que condicionam o fluxo subterrâneo local (B) e onde aflora a água subterrânea.**



Com base nos fatos apresentados, a estrutura da BF-04 é semelhante ao modelo proposto por Aubertin *et al.* (2005 apud BRODA et al., 2015) e Anterrieu *et al.* (2010), onde o material estéril é disposto em camadas e a frente do aterro está sujeita a ações gravitacionais que acabam por selecionar as partículas, conforme já mencionado (Fig. 17). Essas estruturas são visíveis ao longo de cortes na pilha fora e são diferenciadas das demais estruturas por apresentar inclinação acentuada.

A presença de equipamentos pesados, como escavadeiras e tratores, resultam na compactação do estéril mais fino, com a geração de camadas densas e horizontais em meio à níveis mais grosseiros. O entendimento de tais características estruturais é sem dúvida um importante fator na modelagem da água subterrânea local, sobretudo em projetos de prevenção e remediação de processos de DAM.

**Figura 17 - Modelo estrutura de uma pilha de estéreis. No detalhe é possível perceber a presença das estruturas geradas durante o processo de construção da BF-04, com níveis inclinados e horizontais de estéreis mais finos compactados.**



Fonte: Aubertin *et al.* (2005)

### 6.2.1. Caracterização química e mineralógica da BF-04

O estéril utilizado na construção do BF-04 é oriundo da triagem do corpo B e sua composição química é tida como representativa desta área (FRANKLIN, 2007). De acordo com a Tabela 3 é possível notar que o Si, Al e K compõem os elementos majoritários, espécies químicas relacionadas às rochas alcalinas locais.

Análises mineralógicas por difratometria de Raios X da BF-04 foram realizadas por Franklin (2007) e Leite (2010) e os minerais ortoclásio [ $KAlSi_3O_8$ ], caulinita [ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ], muscovita [ $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$ ] e gibbsita [ $Al(OH)_3$ ] foram identificados como componentes majoritários, com os feldspatos em processo de alteração para caulinita (Tab. 4). Por outro lado, a pirita [ $Fe_2S$ ], tida como o principal mineral causador do processo de DAM no local, está presente no material do estéril e representa cerca de 2% do mesmo. Um valor análogo é apresentado por Chula & Brito (1999) (apud FRANKLIN, 2007), onde os autores estabeleceram um valor de <3% para a pirita contida na BF-04. Segundo Franklin (2007), através das imagens obtidas em MEV, o sulfeto é de granulometria fina, onde os grãos de pirita apresentam-se quase todos liberados com tamanho médio em torno de 80 $\mu$ m, sendo que alguns grãos estão parcialmente recobertos por sulfetos de Cu/Zn e Cu/Pb.

**Tabela 3 - Composição química do estéril de triagem do corpo B, representativa do material utilizado na construção da BF-04.**

Elemento	Teor (%)	Elemento	Teor (%)
$U_3O_8$ (geol.)	0,03	$SiO_2$	54
$U_3O_8$ (sol.)*	<0,02	ZnO	0,01
ZrO <sub>2</sub>	0,25	CuO	0,01
$Al_2O_3$	22	TiO <sub>2</sub>	0,53
$Fe_2O_3$	3	$As_2O_3$	0,02
$K_2O$	12	$Nb_2O_5$	0,17
$SO_4$	2	$Ga_2O_3$	<0,017
$P_2O_5$	0,1	$Y_2O_3$	0,01
CaO	0,1	$Rb_2O$	0,09
BaO	<0,1	$ThO_2$	<0,01

Fonte: INB (1996, apud LEITE 2010)

Minerais tipicamente neutralizadores, como a calcita e dolomita, não foram identificados. Contudo, a gibbsita é o mineral presente com o maior potencial de neutralização dos efluentes acidificados gerados pelo processo de DAM, embora o curto tempo de residência da água nas pilhas não propicie as condições ideais (LEITE, 2010).

A presença de blocos de rochas com superfície oxidada é muito comum na área da BF-04. A Figura 18 apresenta em detalhes essas superfícies oxidadas, em sua maior parte provavelmente como óxidos de ferro, resultado do processo intempérico no local. Essas rochas alteradas são presentes em todos os níveis de profundidade da pilha e contribui como uma das fontes principais na geração da contaminação.

**Tabela 4 - Composição mineralógica do estéril de triagem do corpo B.**

Mineral	Concentração na BF-04 (%)	
	FRANKLIN (2007)	LEITE (2010)
BaSO <sub>4</sub> (Barita)	2	-
FeOOH (Goetita)	2	6,37
SiO <sub>2</sub> (Silica)	0,04	-
Al(OH) <sub>3</sub> (gibsita)	1,25	2,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Hematita)	1,5	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Magnetita)	0,5	-
FeS <sub>2</sub> (Pirita)	2	-
UO <sub>2</sub> (uraninita)	0,12	-
Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> (caolinita)	20	34,79
KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (Kfeldspato)	50	54,85
CaF <sub>2</sub> (Fluorita)	0,42	-
MnO <sub>2</sub> (Pirolusita)	0,17	-
KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> (Muscovita)	20	2,12

**Figura 18 - detalhe de blocos rochosos oxidados encontrados em várias porções da BF-04.**



### 6.2.2. Caracterização hidroquímica da BF-04

Estudos das águas no Planalto de Poços de Caldas mostram composições do tipo K-Fe-SO<sub>4</sub> e elevadas concentrações de flúor e sílica, relacionadas ao intenso intemperismo sobre

um complexo alcalino hidrotermalizado e mineralizado (NORDSTROM, 1992). A combinação dos resultados dos modelos hidrogeoquímicos do sistema água-rocha incluem a dissolução de fluorita, calcita feldspato potássico, albita, clorita e óxidos de manganês; oxidação e dissolução de pirita e esfalerita; solubilização da barita; precipitação de caulinita, sílica criptocristalina e ferridrita; e altas pressões parciais de CO<sub>2</sub> oriundas do nível de solo (NORDSTROM, 1992).

Da mesma forma, Alberti (2017) explica o enriquecimento em Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup> das amostras coletadas na MOU por conta da mineralização das águas subterrâneas, amplificado pelo efeito da DAM. O poço de monitoramento PM41, instalado no patamar inferior BF-04 e relacionado ao aquífero fraturado, apresentou valores significativos de Al (90 mg/L), Fe (100 mg/L), Mn (70 mg/L), Zn (10 mg/L) e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (1000 mg/L) (ALBERTI, 2017). O índice de saturação dos minerais secundários, de uma forma geral para todas as amostragens, apontaram para precipitação da muscovita, caulinita, ilita, hematita, goethita e gibbsita, alunita, enquanto que a dissolução foi reacionada aos índices relativos à esmectita, magnetita, óxidos de manganês, jarosita, fluorita e gipsita. As águas amostradas indicaram equilíbrio químico com a barita (FRANKLIN, 2007; ALBERTI, 2017).

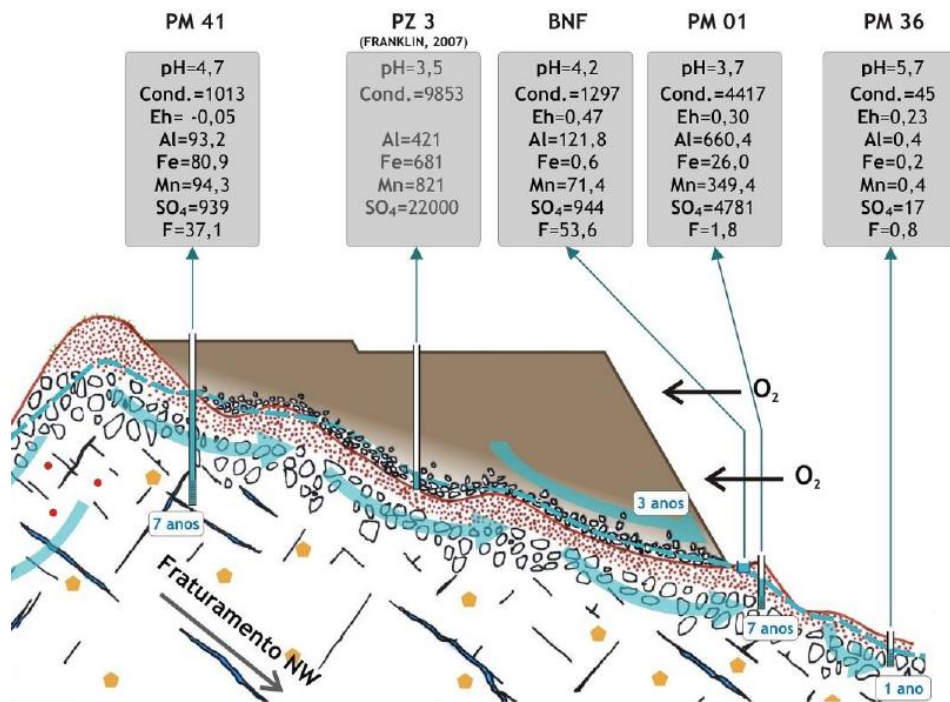
De acordo com a plotagem em diagrama Piper de amostras oriundas de várias localidades da MOU, Alberti (2017) obteve águas predominantemente classificadas como cálcicas sulfatadas, cujas elevadas concentrações de Ca<sup>2+</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> seriam, novamente, reflexo da contaminação local. Por outro lado, algumas amostras apresentaram baixos teores de íons dissolvidos e incremento no teor de sódio e magnésio, o que significaria águas menos impactadas pela DAM, o que inclui o Córrego da Consulta e suas águas do tipo sódio-bicarbonatadas.

As amostras com maior condutividade e acidez e classificadas como cálcicas sulfatadas são justamente aquelas coletadas na região da BF-04 e antiga cava da mina. Dentre os pontos de coleta mais críticos está o piezômetro PZ 3 localizado no patamar inferior da BF-04 com valores de sulfato de até 22.000 mg/L e pH 3,5 (Fig. 19), em contraste com o piezômetro PZ 4, que indicou águas próximas à neutralidade, com pH 6,4 (para localização, ver Fig. 5) (FRANKLIN, 2007). A ausência de análises químicas e físicas mais recentes dos piezômetros dificulta uma melhor concepção da poluição local atualmente, bem como associação com o modelo geofísico proposto. Entretanto, os dados hidroquímicos compilados por Franklin (2007), foram os últimos realizados nos piezômetros e fornecem uma clara ideia

das condições de DAM em 2006 mas que devem representar as condições atuais, uma vez que o processo de DAM na BF-04 perdurará por centenas de anos (ABREU, 2012).

Dentre os poços de monitoramento instalados no local, o PM41 apresentou águas um pouco mais alteradas em comparação com o PM42 e PM43, estes dois últimos localizados no patamar superior da BF-04 onde há o predomínio de material de decapagem (ver Fig. 5). Os dados de Alberti (2017) evidenciam a baixa produção de DAM no patamar superior quando comparado ao quadro de contaminação do patamar inferior. Além disso, a variação da qualidade das águas nos pontos de amostragem na região do estudo seria fruto do possível padrão irregular do fluxo hidrogeológico ocasionado pela heterogeneidade física da pilha.

**Figura 19 - localização dos pontos de amostragem de água na BF-04 e concentrações dos com principais elementos/íons, pH e condutividade. Perfil aproximadamente SW-NE .**



Fonte : Alberti (2017)

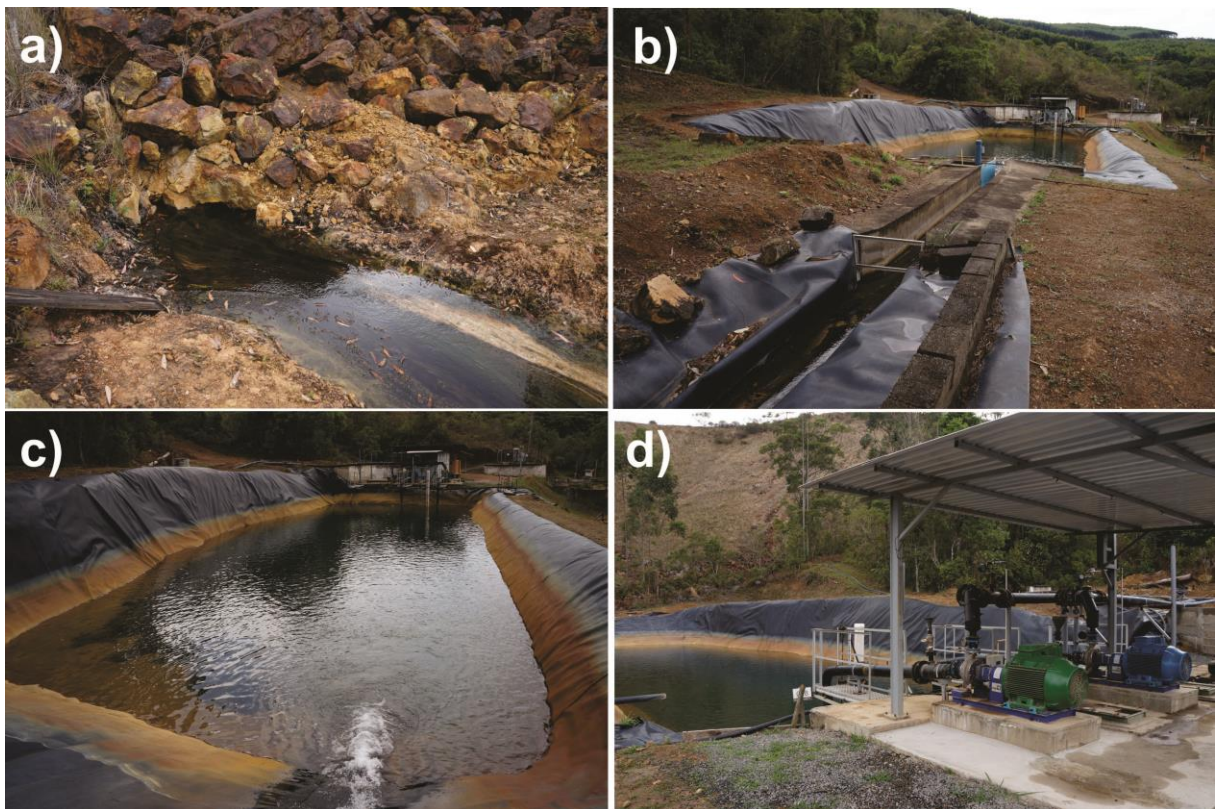
Em relação à qualidade das águas da BNF, é clara a influência da contaminação oriunda da BF-04, uma vez que a bacia capta o efluente surgente na base do talude da pilha. Suas águas de pH 4,2 apresentaram alta condutividade (1297  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e sulfato próximo a 1000 mg/L. As amostras analisadas no poço de monitoramento PM01, instalado à jusante da BNF, indicaram águas ainda mais alteradas, provavelmente em decorrência da contaminação do sistema aquífero fraturado e/ou contribuição direta do sistema granular da BF-04 por infiltração.

### 6.3. Influência da infiltração da água pluvial na bacia de captação BNF

Conforme já mencionado, a região onde está localizada a MOU recebe cerca de 1700 mm de chuva anualmente, com 80% dessa precipitação concentrada no período úmido de outubro a março.

Após atravessar todo o material estéril, a água, agora como efluente ácido, aflora em meio aos matacões oxidados da base da pilha (Fig. 20a) e segue por um canal aberto e impermeabilizado por manta por cerca de 30 metros até a bacia BNF (20b), que também conta com a mesma proteção em sua base (20c). As instalações possuem dois conjuntos moto-bombas centrífugas para o bombeamento de suas águas para a central de tratamento de efluentes através de encanamentos (20d). O sistema foi construído no ano de 1989 e quando a capacidade de bombeamento é superada suas águas ácidas vertem por um canal e são eliminadas à jusante do sistema.

**Figura 20-** Ponto de afloramento da drenagem ácida na base do talude principal (a). Esse efluente contaminado é conduzido através de um canal (b) até a bacia de captação BNF (c), de onde é bombeado (d) até a estação de tratamento de água.

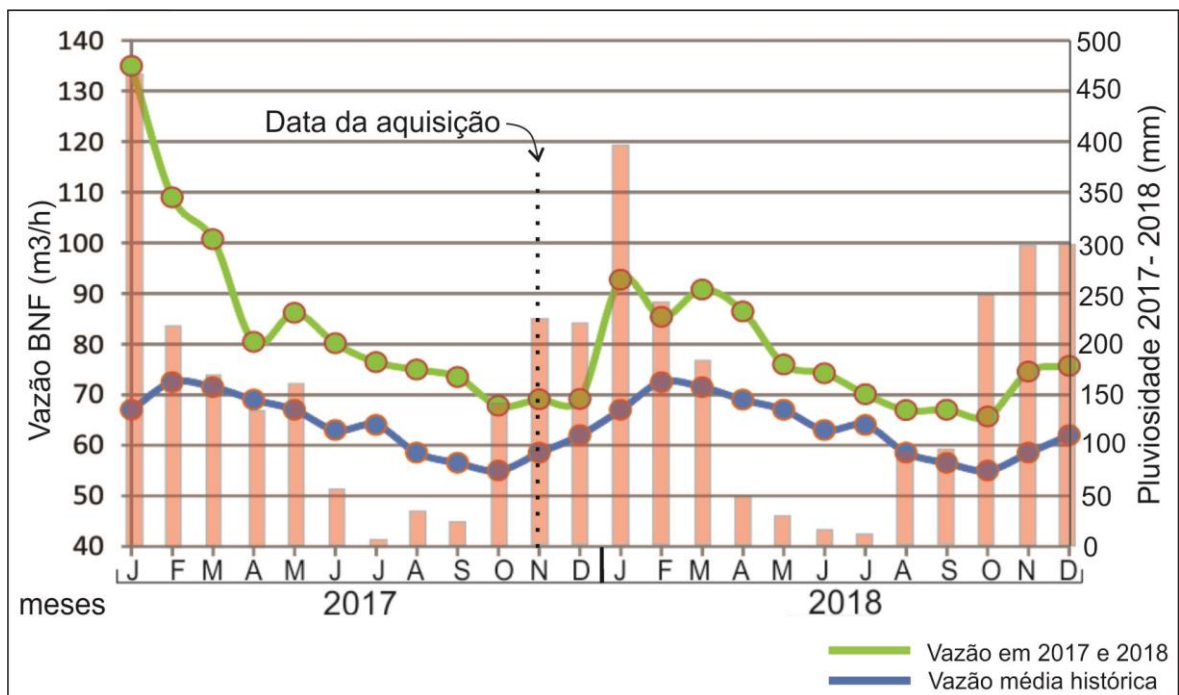


De maneira inequívoca, as águas da chuva desempenham o papel principal na infiltração e alimentação do processo de drenagem ácida na BF-04. De acordo com Fagundes

(2005), o cálculo do balanço hídrico na área da pilha de estéreis aponta para a ausência de fluxos de água provenientes do sistema aquífero fraturado ou, em outras palavras, a base da pilha de estéril poderia ser considerada impermeável. A água pluvial se infiltraria através do topo e seguiria pela base do estéril até sua coleta na bacia BNF, embora o autor afirme que outras fontes potenciais, como o córrego Consulta, não seriam consideradas como substanciais no balanço hídrico.

De acordo com dados históricos de vazão da bacia BNF, medidos periodicamente pela INB, o período de maior valor corresponde a fevereiro e o de menor vazão se dá em meados de outubro (Fig. 21). Na comparação com os valores medidos durante o intervalo 2017-2018 (em verde), é possível observar que o gráfico segue a mesma tendência da média histórica de vazão da BNF, embora seus valores mais elevados possam estar relacionados a uma pluviosidade acima da média no período.

**Figura 21- Distribuição das chuvas ao longo dos meses de 2017 e 2018 e a relação com os dados de vazão da bacia BNF referente ao mesmo período (linha verde) e média histórica (linha azul). A data de aquisição geofísica é indicada pela linha pontilhada.**



Fonte: INB e INPE

As chuvas acumuladas mensalmente (barras) no referido biênio dão ideia do tempo de residência da água pluvial no interior da BF-04, uma vez que a correlação entre os maiores picos de vazão e pluviosidade são deslocados em cerca de dois a três meses no gráfico, ou seja, a partir do momento de infiltração da água no topo da pilha, a mesma seria captada na bacia BNF de dois a três meses depois.



Em termos práticos, aquisição geofísica se deu em meados do mês de novembro. Conforme os dados do gráfico, a vazão da BNF começava a aumentar após a queda do período de secas, embora o período de chuvas tenha se iniciado um mês antes, em outubro. Uma semana de fortes chuvas precedeu os trabalhos de aquisição em campo.

#### **6.4. Estudos ambientais na Mina Osamu Utsumi**

Ao longo das últimas décadas foram desenvolvidos vários trabalhos acadêmicos e relatórios técnicos internos envolvendo as instalações da MOU, embora os mais recentes abordem mais comumente a grande quantidade de passivos ambientais gerados pela exploração do minério do local. É visível a evolução das técnicas e métodos utilizados, uma vez que o processamento de dados e técnicas computadorizadas de modelos digitais foram possíveis e mais comuns a partir da década de 90. Por se tratar de um ambiente complexo e cheio de possibilidades, pesquisas e trabalhos acadêmicos foram e ainda são desenvolvidos por várias áreas do conhecimento, que abrangem desde trabalhos de caracterização física local (geologia, ecologia, estudos ambientais) até determinação isotópica dos passivos (física nuclear) e aspectos sociais referentes ao processo de descomissionamento da empresa (sociologia) e recuperação do meio ambiente.

No âmbito dos estudos ambientais, estes tiveram início ainda na década de 80 com, por exemplo, os trabalhos de Minardi *et al.* (1982) e a utilização de traçadores naturais e artificiais no estudo de fluxos subterrâneos na bacia de rejeito da MOU para a bacia do Rio Verde, na averiguação da possível contaminação das águas desta última. Destacam-se ainda, início dos anos 90, os trabalhos referentes à qualidade da água subterrânea local (MIEKELEY *et al.*, 1992; NORDSTROM *et al.*, 1992). O primeiro trabalho apresentou dados sobre material particulado e colóides em suspensão no aquífero local, com a utilização de ultrafiltração de fluxo cruzado para a concentração dos colóides e posterior análise de elementos majoritários e traços. Os resultados indicaram baixas concentrações dessas espécies (<500,00 µg/l) com composição predominantemente de ferro e componentes orgânicos, embora frações significantes de ETR e Th são associadas à estes colóides. Os estudos mais recentes na análise do meio hídrico da MOU são: Tedeschi (2005), Rodgher *et al.* (2012), Pereira *et al.* (2013), Souza *et al.* (2013) e Filho (2014), que incluem as águas superficiais e a capacidade de mobilização e contribuição dos metais provenientes das pilhas de rejeito na contaminação destes corpos d'água. Souza (2013), com a avaliação quantitativa de metais presentes em sedimentos no entorno da mina, reporta pelo menos uma amostra oriunda dos

sedimentos da represa de Águas Claras com toxicidade provável em relação à presença dos metais Cd, Zn, Cu, Ni, Ag e Pb.

Trabalhos relacionados ao campo da física nuclear e a análise qualitativa e quantitativa dos radionuclídeos também possuem grande importância dentre os estudos desenvolvidos no local devido à particularidade geoquímica do Planalto de Poços de Caldas e o potencial risco, não somente à qualidade das águas, mas também a toda comunidade local (NORDSTROM et al., 1990; MIEKELEY et al., 1991; MIEKELEY et al., 1992; PEREIRA et al., 2013). Na mesma linha, Gonçalves (2006) representa um dos estudos de remoção e/ou recuperação de metais. Nele o autor aponta a possibilidade de tratamento de águas ácidas (DAM) geradas na MOU através de técnicas de troca iônica/adsorção para a recuperação de urânio e a remoção do manganês do sistema. Santos *et al.* (2009) coloca esforços na pesquisa de substâncias mobilizadoras de urânio contido no lodo gerado no tratamento deste mesmo tipo de efluente. Os autores afirmam que a concentração de 0,25% deste metal corresponderia a cerca de 150 toneladas de  $U_3O_8$  depositadas junto ao lodo durante os cerca de 20 anos de operação da MOU.

Estudos microbiológicos também perfazem uma importante parcela dos trabalhos desenvolvidos na mina e região, o que inclui também a área do Morro do Ferro, onde se destacam os trabalhos de West *et al.* (1992), Almeida (2005), Ronqui (2008), Ferrari (2010), Campos et al. (2011) e Ronqui (2013). Alberti *et al.* (2015), por sua vez, utilizam técnicas de fracionamento isotópico na caracterização de processos de oxidação e redução por bactérias redutoras de enxofre. Seus resultados demonstraram que as águas amostradas nos poços de monitoramento não participaram de processos repetidos de oxirredução por bactérias, o que resultaria em valores mais baixos de  $\delta^{34}S-SO_4$  do que aqueles observados. A análise isotópica também indicou que o oxigênio contido na água é o agente majoritário para a oxidação da pirita presente nas pilhas de estéreis.

No que tange à pilha de estéreis, foco desta pesquisa, os trabalhos desenvolvidos no local referente ao processo de DAM, balanço hídrico local e modelagens numéricas na BF-04 são igualmente numerosos. Nesta área destacam-se: Fernandes et al. (1998), Fagundes (2005), Franklin (2007), Fagundes et al. (2008), Leite (2010), Oliveira (2010), Abreu (2012), Guerzoni (2013) e Alberti (2017). Fernandes et al. (1998), no estudo dos mecanismos geoquímicos envolvidos na mobilização de radionuclídeos e da DAM, afirmam que a precipitação de Ra e Pb como sulfatos são os principais mecanismos, embora os autores acreditem que os impactos ambientais mais importantes estão relacionados à drenagem ácida

e não com a mobilização de radionuclídeos. Neste caso a duração do processo de DAM é estimado em mais de mil anos.

O estudo de maior relação à esta pesquisa foi feito por Franklin (2007) com a modelagem numérica do comportamento da água subterrânea na BF-04, além do estudo hidrogeoquímico das águas. A autora também afirma a importância do conhecimento do comportamento hídrico em subsuperfície na seleção de estratégias de remediação e, para isso, discute o uso de dois tipos de modelos numéricos (FEMWATER/HYDRUS-2D e o STEADQL-v4) na simulação do escoamento hidrológico e dos processos geoquímicos relevantes aplicados a previsão da drenagem ácida na referida pilha de estéreis.

O modelo de escoamento em subsuperfície foi realizado com a utilização de funções combinadas de condutividade hidráulica e retenção e os processos geoquímicos que ocorrem na pilha foram estudados através do código computacional STEADYQL, embora este não tenha sido eficiente na representação adequada das espécies do urânio nas drenagens do sistema da BF-04. A especiação feita com o código PHREEQC mostrou que o metal ocorre preferencialmente na sua forma oxidada distribuído entre as espécies: sulfato de uranila e uranila livre (FRANKLIN, 2007).

Embora os estudos tenham sido elaborados a partir de uma linha de modelagem, com a geração de um modelo em seção (2D), os resultados referentes à movimentação da água mostraram caminhos preferenciais através dos espaços entre os blocos de estéreis rochosos (fluxo preferencial através de canais) na base da pilha, uma vez que Franklin (2007) ressalta a possível predominância de partículas de maior granulometria neste nível da BF-04 através de testes de condutividade hidráulica (camada de alta condutividade no transporte da água de infiltração). Dentre as recomendações do trabalho está a confecção de um modelo 3D para o sistema hidrogeológico em questão.

Ainda no âmbito de estudos hidrológicos na BF-04, Fagundes *et al.* (2008) é tido como uma referência de significativa importância para este presente trabalho devido ao cálculo realizado para o balanço hídrico na pilha. Seus resultados sugerem uma contribuição de aproximadamente 121.355,4 m<sup>3</sup> de águas de bacias vizinhas, o que poderia ser entendida como infiltração proveniente do Córrego da Consulta.

Os maiores contribuintes para a geração da DAM na BF-04 seriam as infiltrações da água pluvial, o que corresponderia a 437.148,5 m<sup>3</sup> do escoamento de saída (78,3% do total) (FAGUNDES *et al.*, 2008). Com base nos resultados apresentados, os autores alegam

importância no controle da infiltração por precipitação pluviométrica como forma de minimizar a geração da DAM no local.

Toda essa variedade de estudos ambientais envolvendo os passivos ambientais observados na área das instalações da INB é justificada pela magnitude e complexidade dos processos físico-químicos, biológicos e sociais que ocorrem no local, cujo entendimento oferece subsídios ao processo de descomissionamento da empresa no âmbito de técnicas de mitigação e recuperação dessas áreas degradadas. Dentre os trabalhos do tipo destacam-se: Fernandes & Franklin (2001), Murta (2006), Nóbrega *et al.* (2008) , Murta *et al.* (2008) e Barreto (2011).

Em uma análise de múltiplas variáveis (AMV), Nóbrega *et al.* (2008) estabelece três cenários distintos para o fechamento da mina que englobam a BF-04 e a DAM gerada, considerada o maior passivo ambiental da MOU. No primeiro deles a empresa simplesmente manteria a situação como está, o que inclui o bombeamento e tratamento dos efluentes ácidos. O segundo cenário trata do retaludamento e impermeabilização da pilha para que a água pluvial não se infiltre na pilha. Já o terceiro cenário lança a hipótese de transposição de todo o material estéril de volta para a antiga cava da mina. De acordo com os resultados, o terceiro cenário, embora seja o mais dispendioso, é a melhor opção em longo prazo para a INB (NÓBREGA *et al.*, 2008). A solução proposta, por outro lado, não corrobora conclusões de trabalhos anteriores, como os de Fernandes & Franklin (2001), que demonstram que a remediação deveria focar na redução da quantidade de O<sub>2</sub> que se infiltra na pilha por processo de difusão. De acordo com Murta *et al.* (2008), a infiltração seria diminuída com a aplicação de uma camada de bentonita na BF-04, juntamente com a adição de cal hidratada e dolomita para o aumento do pH do efluente ácido.

## 7. EMBASAMENTO DO ESTUDO

### 7.1. Estudos geofísicos em pilhas de estéreis e rejeitos

A aplicação da geofísica em pilhas de estéreis e rejeitos, conforme já mencionado, é apenas uma das inúmeras possibilidades de uso em estudos ambientais, e que complementa técnicas de investigação diretas na tentativa de estabelecer um quadro de contaminação ou até mesmo a investigação estrutural do meio investigado.

No Brasil os métodos geofísicos não são tão comumente empregados no estudo de passivos ambientais da indústria mineradora, em especial de pilhas e bota-foras originados pelo processo de exploração mineral. Por outro lado os trabalhos acadêmicos e artigos relacionados a esta área são relativamente mais numerosos no exterior, com KING & HYNES (1994), PATERSON & STANTON-GRAY (1994) e DEVOS *et al.* (1997) como alguns dos pioneiros na discussão da aplicabilidade da geofísica em problemas de DAM e passivos ambientais da indústria de mineração, embora poucos tenham combinado métodos geoeletricos na aquisição. Outros destaques são para as pesquisas da United States Geological Survey – USGS que envolvem estudos geofísicos e geoquímicos em oito localidades nos estados americanos do Colorado e Novo México (CAMPBELL & BEANLAND, 1998).

Nos referidos trabalhos é utilizada o método da polarização induzida espectral na identificação de porções do estéril rico em sulfetos como meio de localização do local de geração de DAM. Campbell & Fittermann (2000) reafirmam a eficiência do uso de métodos geoeletricos em pilhas de estéreis e rejeitos da mineração devido ao alto contraste do meio que, em geral, apresenta águas subterrâneas altamente condutivas. Do mesmo modo os autores ressaltam o método de polarização induzida (IP) como ferramenta eficaz na determinação de corpos sulfetados neste tipo de ambiente. Yuval & Oldenburg (1996), ao utilizarem os métodos da Eletroresistividade e Polarização Induzida em conjunto, estabelecem a correlação entre o TDS da DAM da pilha de rejeitos local, além da análise de amostras na calibração dos dados de cargabilidade na tentativa de identificar a ocorrência de sulfetos. Em locais onde a média da concentração de sulfetos era de 4%, o valor de cargabilidade medido foi de até 20 mV/V.

Em um dos estudos mais relevantes da área, Anterrieu *et al.* (2010) promovem uma análise completa de uma pilha de estéreis de uma mina polimetálica de Laronde localizada na província canadense de Québec. Nele os autores correlacionam levantamentos geoeletricos de

Eletrorresistividade com análises geotécnicas, químicas e estruturais de amostras coletadas em trincheiras escavadas nos locais de aquisição dos dados. Os resultados obtidos mostraram uma correlação entre as porções de alta resistividade ( $>500 \Omega.m$ ) com o acúmulo de blocos métricos rochosos, enquanto que as áreas mais condutivas foram justamente as porções com predominância de finos com alta capacidade de retenção de umidade. Neste caso a concentração de pirita foi significativamente maior nesta região de baixa resistividade ( $\sim 3,5\%$ ), o que acarretaria também na baixa resistividade em razão da produção de DAM ( $<10 \Omega.m$ ).

Foram observadas algumas anomalias de alta resistividade ( $100 \Omega.m$ ) na forma de camadas em um meio condutivo. Essa anisotropia foi explicada pelos autores como sendo uma compactação local do material siltoso originada pelo trânsito de equipamentos pesados na superfície do terreno durante a construção da pilha de estéril. De certa forma, corroboram os resultados obtidos por Poisson *et al.* (2009) na mesma localidade.

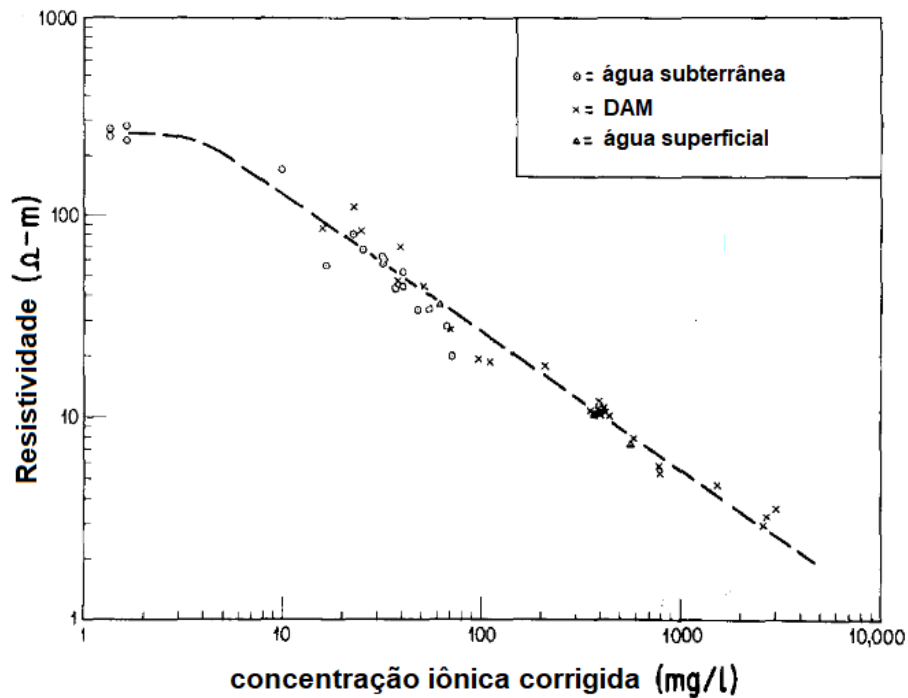
Em um dos trabalhos mais recentes na área, Power *et al.* (2018) descreve a utilização combinada dos métodos da eletrorresistividade e IP no domínio do tempo em uma pilha de estéreis gerada pela mineração de carvão em Nova Scotia, Canadá, que conta com uma concentração de sulfetos inferior a 1%. Os resultados obtidos apontaram para associações de anomalias de alta cargabilidade com regiões de baixa resistividade, interpretadas como porções de concentrações mais elevadas de minerais sulfetados. Do mesmo modo, o efluente ácido gerado pela drenagem ácida local gerou respostas de resistividade inferiores a  $30 \Omega.m$ , enquanto que os mais altos valores de cargabilidade, associados aos minerais reativos, corresponderam a valores superiores a  $13 mV/V$ .

Merkel (1972), com base em dados da literatura, associa a concentração iônica de diferentes amostras de águas com seus valores de resistividade. O resultado é dado pela Fig. 22, na qual as amostras contaminadas por DAM correspondem a resistividades inferiores a  $100 \Omega.m$ , especialmente concentradas na faixa de  $10$  a  $12 \Omega.m$ . Korneeva *et al.* (2016) obtiveram valores ainda mais baixos em uma pilha de rejeitos com até 25% de pirita primária:  $5 \Omega.m$ .

Segundo Anterrieu *et al.* (2010), o processo de construção da pilha influencia a distribuição da umidade e propriedade dos materiais, que estão ligados à produção da DAM. Por outro lado, materiais de granulação fina tipicamente mostram grande área de superfície, maior capacidade de retenção de água e baixa condutividade hidráulica saturada quando comparados a materiais mais grossos. Anterrieu *et al.* (2010) adotam o modelo de segregação

granulométrica da pilha, onde o material de estéril de maior granulometria fica retido em sua base devido à força gravitacional atuante no momento de construção da mesma, conforme já explicitado. Esse estudo é particularmente interessante devido à comparação entre o modelo geofísico proposto com amostras coletadas em profundidade, o que gera um maior crédito à técnica de utilização de métodos geoeletricos no estudo de pilha de estéréis e geração e DAM.

**Figura 22 - Amostras de águas com valores de concentração iônica em função da resistividade**



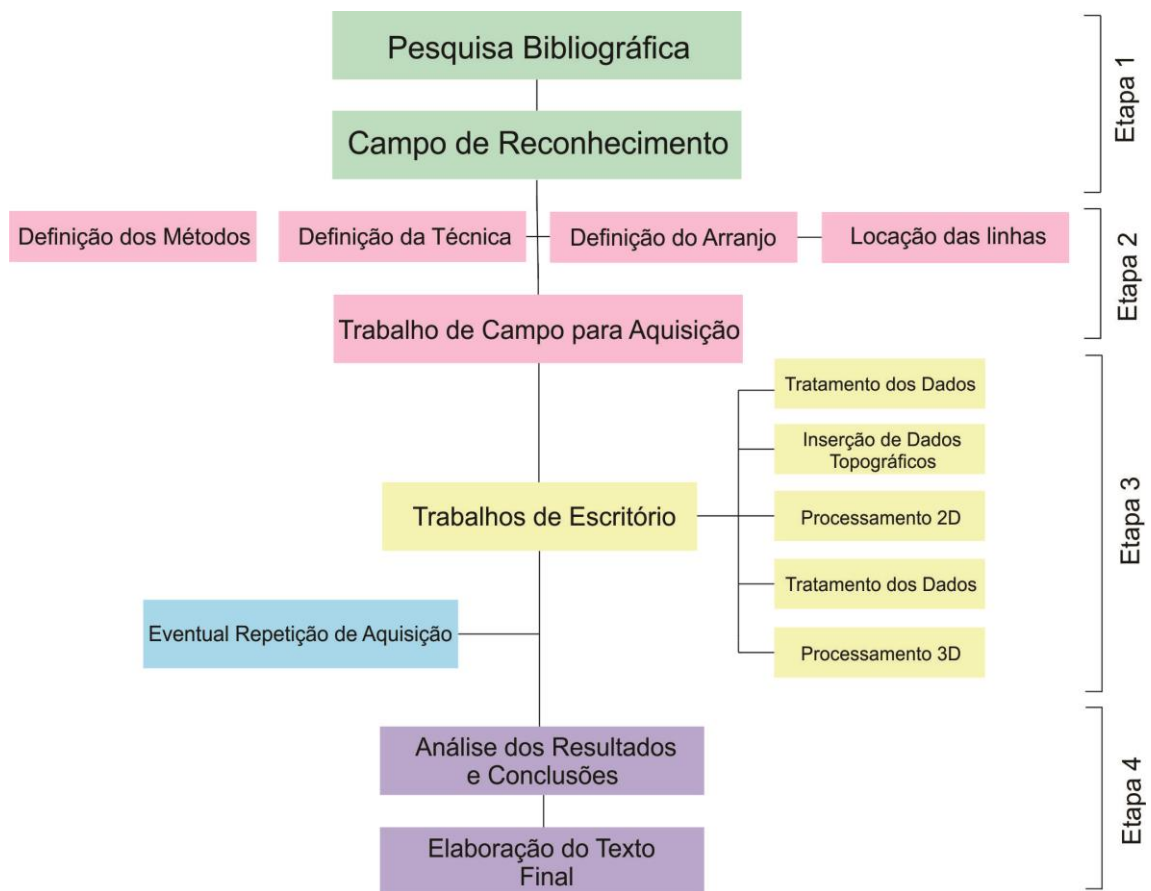
(MERKEL, 1972)

Uma tentativa de reconhecer os padrões de fluxo da água subterrânea na mesma localidade foi realizada por Campos *et al.* (2003). Nela os autores almejam a visualização dos caminhos preferenciais em perfis 2D através do método da Eletrorresistividade (ER) ocorridos pela sazonalidade do regime de chuvas na região. Outros estudos de fluxo de fluídos em subsuperfície com a aplicação da técnica de tomografia elétrica, embora não relacionados à pilhas de estéréis, são atribuídos a Buettner *et al.* (1998). Outros estudos relacionados à área são os de Gyenes & Szabó (2012) e Van Dam *et al.* (2005).

## 8. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as etapas de trabalho da pesquisa, e os materiais e procedimentos utilizados para cada uma. A Figura 23 apresenta a ordem das etapas seguidas nesta dissertação. As etapas 2 e 3, referentes ao planejamento e aquisição dos dados, respectivamente, serão tratadas com mais detalhes nos capítulos seguintes.

**Figura 23 - Fluxograma das etapas de trabalho.**



### 8.1. Metodologia para levantamento geoeletrico na área ambiental

A geofísica como ferramenta de pesquisa e prospecção mineral possui algumas décadas de uso, embora discussões acerca de vários parâmetros como arranjos e métodos ainda estejam sob debate e discussões. Sua utilização no campo dos estudos ambientais é um ramo que tem se intensificado nas últimas décadas, onde seu emprego na hidrogeologia, contaminação da água subterrânea/solo e arqueologia é cada vez mais corriqueiro e indicado por órgãos ambientais (CETESB, 2001).



### 8.1.1. Método da Eletrorresistividade

O método geométrico da eletrorresistividade (ER) se baseia na quantificação do parâmetro físico da *resistividade elétrica* ( $\rho$ ) no meio geológico, propriedade abordada pela física como a dificuldade oferecida pelas partículas constituintes do meio à passagem de corrente elétrica, cujos valores são intrínsecos aos diferentes materiais e substâncias que, neste caso, compõem o ambiente geológico. Essa determinação se dá pela medição da *diferença de potencial* ( $ddp$ ) gerada em subsuperfície através da introdução de uma corrente elétrica no solo por intermédio de aterramento galvânico (KEAREY, 2002). Com o método é possível, portanto, o reconhecimento de heterogeneidades resistivas no meio subterrâneo com base em desvios nos valores de  $ddp$ , em contraste a um modelo geológico homoganeamente ideal e análogo a um circuito elétrico simples.

Quando fios são conectados a uma fonte, são estabelecidos campos elétricos no material, produzindo uma força elétrica com potencial de atuação sobre as cargas presentes no meio. Esse fluxo ordenado de corrente é denominado de *corrente elétrica* e pode ser escrito na forma diferencial como a razão do número de cargas por unidade de tempo (C/s), cuja abordagem no SI é tida por ampère.

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (12)$$

Uma vez que a corrente elétrica que atravessa um corpo depende da natureza física do mesmo, a corrente gerada pela aplicação de uma diferença de potencial será proporcional à tensão aplicada (Eq. 13). Neste caso  $\Psi$  representa uma constante de proporcionalidade ou seja, a condutância do material (A/V). Sua unidade recíproca é a *resistência* (ohm,  $\Omega$ ).

$$i \propto V \quad (13)$$

$$i = \Psi V$$

De modo análogo, a 1ª Lei de Ohm, base do método geométrico em questão, define a intensidade da corrente elétrica que atravessa um resistor como diretamente proporcional à tensão estabelecida em seus terminais, sendo a relação entre a resistência R de um determinado corpo com a  $ddp$  V (volt, V) e corrente elétrica I (ampère, A) dada pela Eq. 14

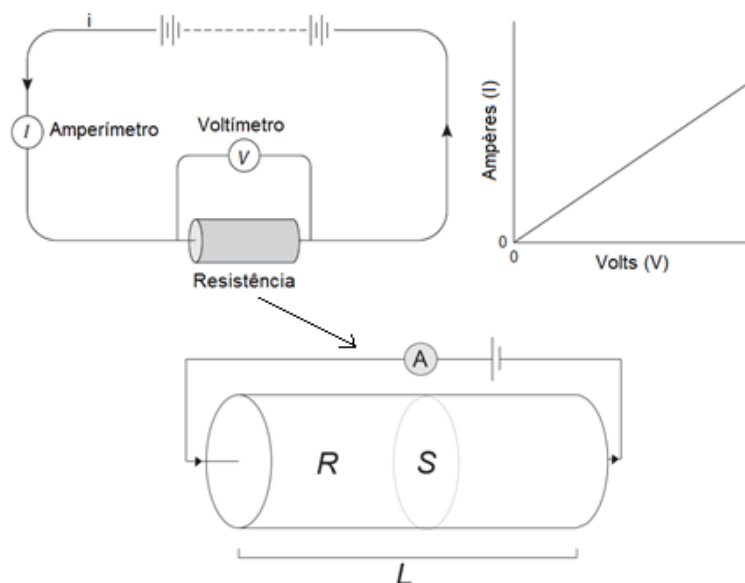
(HALLIDAY et al., 2009). Num circuito elétrico simples é estabelecida uma fonte elétrica conectada a um resistor através de fios elétricos (Figura 24). O meio geológico seria análogo ao resistor, cuja resistência à passagem da corrente elétrica  $i$  pelo sistema geraria uma dissipação da energia aplicada e passível de ser medida com o auxílio de um voltímetro conectado a cada uma das extremidades deste componente elétrico ( $ddp$ ). Os resistores denominados ôhmicos são aqueles cuja representação gráfica é dada pela Figura 24.

$$V = iR \text{ (V)} \quad \text{ou} \quad R = \frac{V}{i} \text{ (\Omega)} \quad (14)$$

Com base na análise da aplicação de uma corrente elétrica em um corpo cilíndrico homogêneo de comprimento  $L$  e área de seção transversal  $S$  (Fig. 24, detalhe), a relação entre  $R$  e  $\rho$  é dada pela Equação 15, também denominada de 2ª Lei de Ohm.

A resistividade é inversamente proporcional ao comprimento do corpo e diretamente proporcional à área de sua seção transversal, onde a resistividade elétrica, dependente da natureza e temperatura do material, desempenha um papel de constante de proporcionalidade na equação. No Sistema Internacional de Unidades, a unidade da resistividade será dada por ohm x metro ( $\Omega.m$ ) e sua propriedade física antagônica, a *condutividade*, será expressa em siemens/metro ( $S.m$ ) (MUSSET & KHAN, 2000).

**Figura 24 - Circuito elétrico simples com uma ddp gerada pelo resistor quando estabelecida uma corrente elétrica  $i$ . No detalhe, a Lei de Ohm representada através da introdução de uma corrente elétrica  $A$  em um cilindro de resistividade  $R$  com comprimento  $L$  e seção  $S$ .**

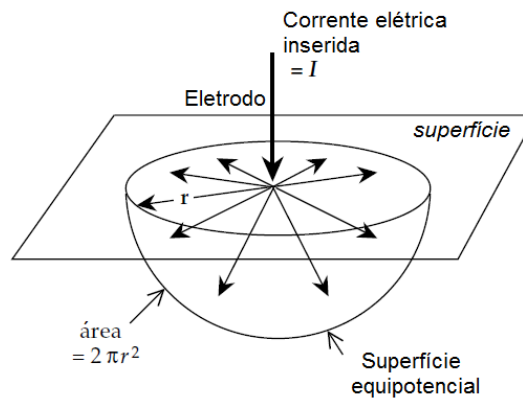


Fonte: adaptado de Musset & Khan (2000)

$$R = \rho \frac{L}{S} \text{ (\Omega)} \text{ ou } \rho = R \frac{S}{L} \text{ (\Omega m)} \quad (15)$$

Para o melhor entendimento dos mecanismos que possibilitam a medição da resistividade elétrica em subsuperfície, primeiramente é necessária a discussão acerca do comportamento e geometria da propagação de corrente elétrica nos materiais. Em um ambiente onde a resistividade é constante, a corrente elétrica aplicada em um ponto no solo se propagará de forma semiesférica com superfícies equipotenciais concêntricas (ou linhas, do ponto de vista seccional) de acordo com o local de ligação da fonte ao solo (Figura 25).

**Figura 25 - Superfície equipotencial e linhas de corrente elétrica geradas por um eletrodo único de corrente instalado na superfície do terreno**



Adaptado de Lowrie (2007)

Com a aplicação da Equação 15 no semi-espaço (BRAGA, 2016), tem-se:

$$R = \frac{\rho r}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (16)$$

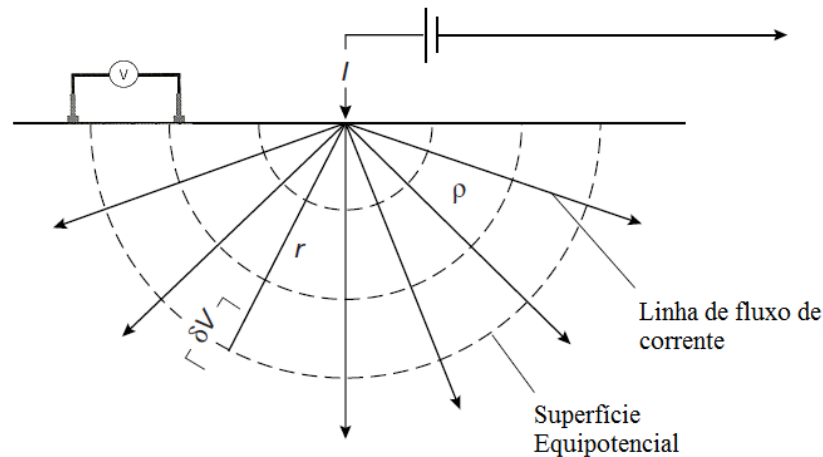
Relacionando-a com a 1ª Lei de Ohm (Eq. 14):

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \rightarrow \rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad (17)$$

Onde  $V$  é o potencial elétrico em um determinado ponto e  $r$  a distância entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial é medido. Entretanto, um único potencial elétrico medido não é uma informação muito substancial para a análise, sendo necessários, portanto,

dois eletrodos posicionados a certa distância entre si e da fonte elétrica para a tomada de valores de  $ddp$  ( $\Delta V$ ) (MILSON, 2003), conforme a Figura 26.

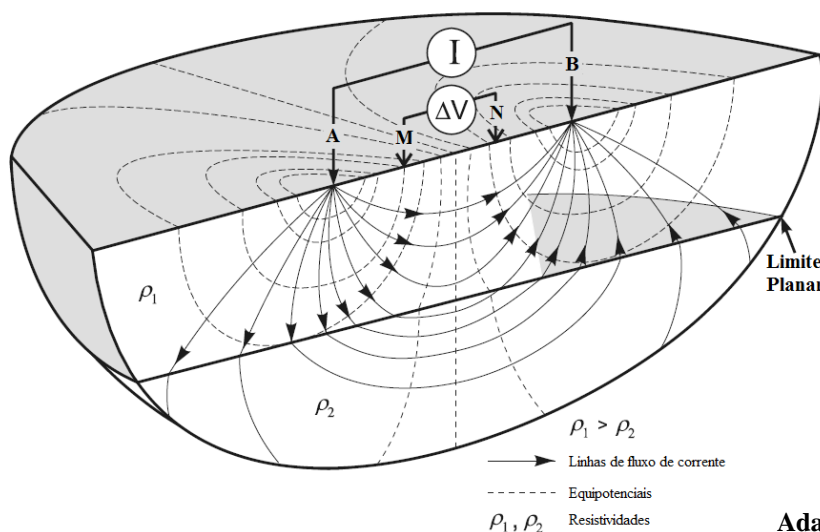
**Figura 26 - Tomada de valores da diferença de potencial ( $ddp$ ) através de dois eletrodos posicionados em pontos distintos.**



Adaptado de Kearey (2002)

Na prática é comum o uso de um sistema composto por quatro eletrodos, isto é, dois deles para a medição da  $ddp$  (eletrodos de aquisição) e o outro par para a propagação da corrente elétrica (eletrodos de corrente) com base na configuração AMNB exemplificada na Figura 27, onde a corrente elétrica é transmitida a partir do ponto A em direção à B com a geração de linhas equipotenciais associadas.

**Figura 27 - Configuração tetraédrica, com dois eletrodos de corrente (A e B) e dois eletrodos de aquisição (M e N). Detalhe para as linhas de fluxo de corrente e equipotenciais associadas em um meio com camadas de resistividades distintas.**



Adaptado de Knödel et al (2007)

Em um meio geológico homogêneo e isotrópico, o potencial elétrico para cada eletrodo de aquisição (M e N) é dado pelas Eq. 18 e 19.

$$V_M = \frac{\rho_i}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (18)$$

$$V_N = \frac{\rho_i}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (19)$$

Através da subtração das duas equações acima, tem-se a diferença de potencial entre os pontos representados pelos eletrodos M e N:

$$\Delta V_{MN} = \frac{\rho_i}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (20)$$

Rearranjando a equação é possível o cálculo da resistividade do meio geológico através da Eq. 21 (BRAGA, 2016). O coeficiente geométrico  $K$  poderá ser obtido em função da disposição dos eletrodos referente ao arranjo praticado durante os trabalhos de aquisição dos dados (Eq. 22).

$$\rho = K \frac{\Delta V}{i} \quad (21)$$

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (22)$$

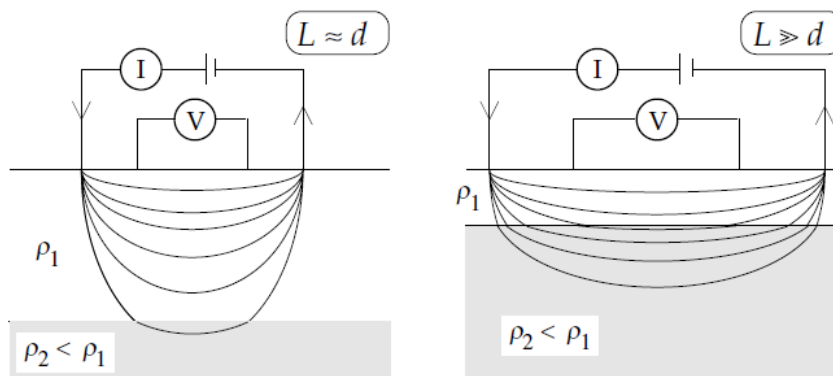
Toda a base teórica discutida é baseada, como já mencionado, a um modelo geológico homogêneo e isotrópico e as medições realizadas corresponderiam, portanto, ao valor real do meio (TELFORD, 1990; LOWRIE 2007). Na prática, esse modelo foge à realidade, uma vez que o solo e rochas apresentam características heterogêneas devido a variações composicionais, litológicas, estruturais e de saturação. Nesse caso todas as resistividades verdadeiras relacionadas ao pacote heterogêneo sob influência do ensaio geofísico vão acabar por gerar um conjunto de interferências, o que resultará em uma *resistividade aparente* ( $\rho_a$ ) e sua dimensão é, em virtude de sua definição, a mesma da *resistividade real* ( $\rho_r$ ), ou seja, ohms x metro ( $\Omega.m$ ), de acordo com a Eq. 23:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{i} \quad (23)$$

Tomando como exemplo duas unidades geológicas em acamamento horizontal de espessura  $d$  e resistividades reais  $\rho_1$  e  $\rho_2$ , com o aumento da distância  $L$  entre os eletrodos existe uma maior influência da resistividade elétrica real da camada sotoposta devido ao aumento do fluxo de corrente em maiores profundidades (Fig. 28). Por outro lado, se mantida uma distância equivalente à espessura da camada sobreposta haveria uma tendência de que o valor de resistividade aparente obtido fosse significativamente mais próximo a  $\rho_1$  (LOWRIE 2007). Vale ressaltar que um único valor de resistividade aparente não possui muito significado prático no levantamento geofísico, entretanto, um conjunto de dados, quando analisados seus padrões de variações como um todo, possui o potencial de fornecer uma noção substancial das condições geológicas em subsuperfície conforme o modelo adotado.

Uma vez que o parâmetro analisado trata da dificuldade gerada pela passagem de corrente elétrica através de uma determinada substância, é fundamental o entendimento dos mecanismos naturais que regem a propagação da corrente pelo meio geológico, isto é, a movimentação de partículas carregadas através dos materiais. A condutividade elétrica, nesse caso, pode ser classificada em duas maneiras distintas: *eletrônica* e *eletrolítica*.

**Figura 28 - Distribuição de corrente em função do espaçamento dos eletrodos em contexto de duas camadas horizontais de resistividades elétricas distintas.**

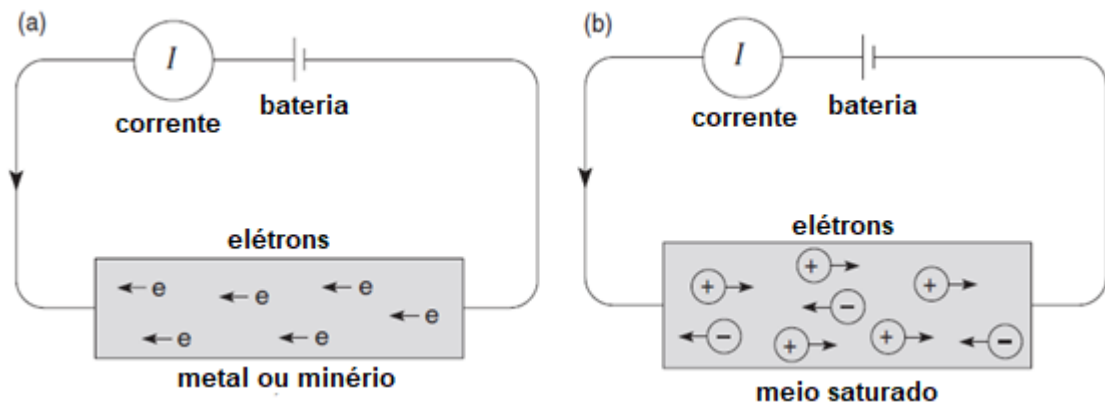


**Fonte: Lowrie (2007)**

No primeiro caso o movimento dos elétrons se dá principalmente através de minerais metálicos, onde os elétrons livres possuem uma alta velocidade média (algo em torno de  $1,6 \times 10^6 \text{ m.s}^{-1}$  no cobre) devido à fraca ligação com os átomos nas ligações metálicas (Fig. 29a). Esses elétrons saltam em direções aleatórias e colidem com os átomos ocupantes de pontos

fixos na estrutura do material, sendo que após a aplicação do campo elétrico os mesmos adquirem uma velocidade comum de deriva de magnitude menor ( $4 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$  no cobre) e superposta à de seu estado natural, na direção do campo elétrico estabelecido, ou seja, há uma combinação do movimento devido a colisões aleatórias com o movimento gerado pelo campo elétrico. A resistividade é, portanto, definida pelo tempo livre médio entre as colisões. Em outras palavras, se o arranjo atômico do material possibilitar menores chances de colisões com os elétrons em movimento têm-se uma baixa resistividade elétrica. Além do modo de agregação dos minerais, o grau de impureza tende a influenciar consideravelmente as características condutivas dos mesmos (HALLIDAY *et al.*, 2009; LOWRIE 2007).

**Figura 29 - Condutividade Metálica (a) e Condutividade Eletrolítica (b)**



**Fonte: Musset & Khan (2000)**

Minerais como quartzo, micas e olivinas são tidos como bons materiais isolantes e apresentam certo contraste em relação à água subterrânea que, ao contrário da água pura, contém uma série de espécies iônicas produtos da ação do intemperismo. No caso da condutividade eletrolítica, essa água contida nos poros e fraturas das rochas e também nos sedimentos inconsolidados atua como meio para a propagação dos íons existentes em solução, conforme o esquema da Figura 29b. (MUSSET & KHAN, 2000).

### **8.1.2. Método da Polarização Induzida (IP)**

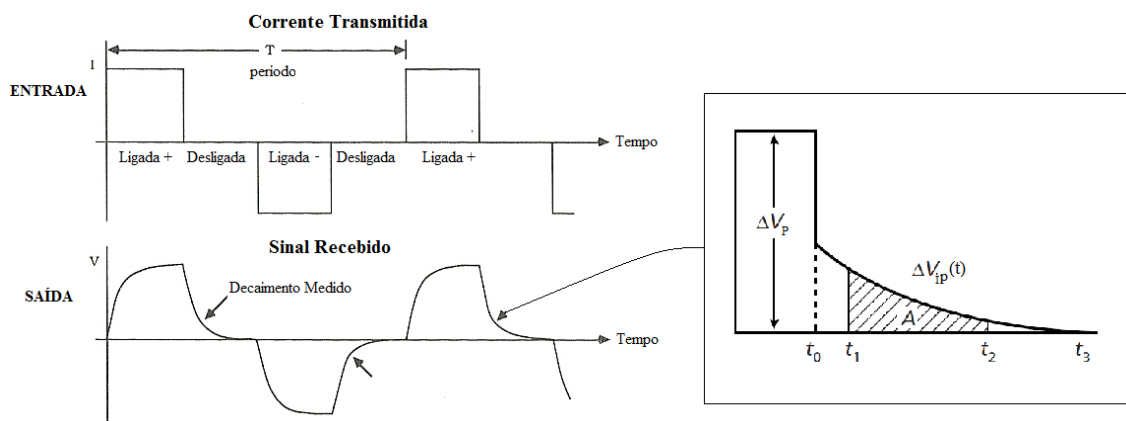
O método da polarização induzida (IP), comumente empregado na exploração geofísica de recursos minerais, hidrocarbonetos e estudo de águas subterrâneas, é baseado no fenômeno de polarização elétrica em subsuperfície. A partir da interrupção da aplicação de

uma corrente elétrica contínua, a voltagem medida pelos eletrodos de potencial não se dissipa instantaneamente, sendo possível a detecção de uma polarização residual (ou induzida) de baixa magnitude por certo intervalo de tempo.

Caso utilizada uma corrente alternada de baixa frequência, verifica-se que a resistividade aparente em subsuperfície medida diminui com o aumento da frequência. Isso é causado pela capacitância do meio que inibe a passagem de corrente direta, mas transmite corrente alternada com incremento de eficiência na medida em que a frequência é aumentada (WARD, 1990; KEAREY, 2002). Tanto o decaimento efêmero da voltagem residual quanto a variação na resistividade aparente em função da frequência são representações do mesmo fenômeno capacitivo do meio. Com base nisso pode-se dizer que existem duas maneiras distintas para o levantamento: IP *domínio tempo* e IP *domínio frequência*.

O fenômeno IP domínio tempo, utilizado no levantamento geofísico em questão, é ilustrado pela Figura 30, onde uma polarização primária ( $V_p$ ) é gerada pelos eletrodos de corrente em superfície, estabelecendo uma diferença de potencial ( $\Delta V$ ) no solo e consequente polarização do mesmo. Nota-se que a diferença de potencial não se esgota quando a corrente elétrica é cortada, gerando uma curva assintótica em zero em função do tempo:  $\Delta V_{IP} = f(t)$  (curva de descarga). Sendo assim, sua amplitude é relacionada à maior ou menor capacidade de polarização do material investigado (KEAREY et al., 2002; BRAGA, 2016).

**Figura 30 - IP domínio tempo**



**Adaptado de WARD (1990) e KEAREY et al. (2002)**

O parâmetro associado ao fenômeno da polarização é a *cargabilidade* ( $M$ ), dada em  $mV/V$ . O seu cálculo é realizado através da determinação da área  $A$  da curva de descarga definida por um certo intervalo de tempo ( $t_1 - t_2$ ) e normalizada pela diferença de potencial estacionária  $\Delta V_p$ , conforme a equação:

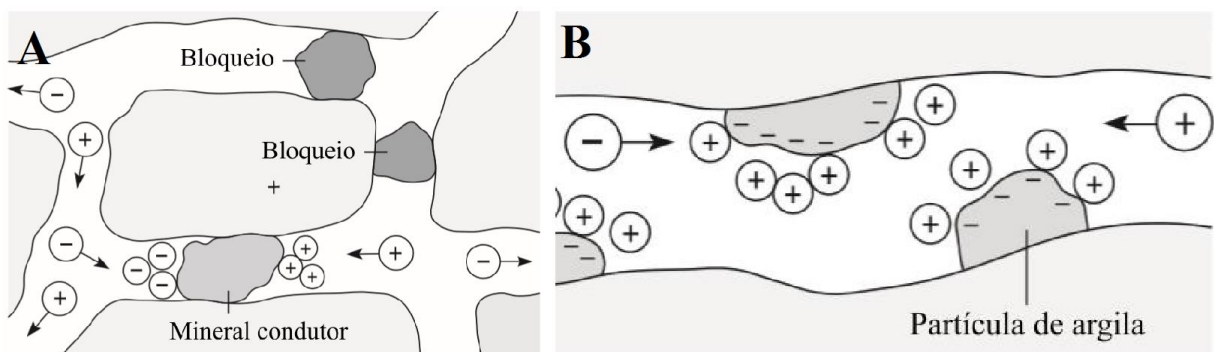


$$M = \frac{A}{\Delta V_p} = \frac{1}{\Delta V_p} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (24)$$

Os mecanismos que regem esse fenômeno são complexos e dependem basicamente da concentração de elementos condutores presentes no meio e situações que propiciem a sua ocorrência. Os dois principais mecanismos de polarização são denominados *polarização eletrolítica* e *polarização metálica*.

Na Polarização Eletrolítica, a passagem da corrente imposta através da rocha é feita principalmente por fluxo eletrolítico do fluido presente nos poros (Fig. 31b). A maioria dos minerais, em especial os argilominerais, concentram cargas negativas em sua porção externa, atraindo cargas positivas oriundas do fluido para sua superfície. Quando a corrente elétrica é estabelecida, os íons são movidos em direções opostas com uma diferença de mobilidade entre ânions e cátions, especialmente se os espaços intergrãos forem muito pequenos. Apenas íons positivos teriam facilidade de atravessar as “núvens catiônicas” estabelecidas, gerando um efeito semelhante à de uma membrana. Quando a tensão exterior é extinta, os gradientes de tensão formados levam certo tempo até desaparecem (LOWRIE, 2007; KEAREY et al., 2012). A Polarização Metálica, por sua vez, é relacionada ao meio físico contendo minerais metálicos, onde ocorre a passagem de condução iônica para a eletrônica (e vice-versa) no momento da aplicação da corrente elétrica. Íons tendem a se concentrar em superfícies opostas das partículas metálicas e levam certo tempo para retornarem a seu estado inicial com o desligamento da corrente (Fig. 31a). Quanto mais disseminados os minerais metálicos, maior o fenômeno de polarização induzida (VOGELSANG, 1995; BRAGA, 2016).

**Figura 31 - Fenômeno de Polarização metálica (a) e Eletrolítica (b).**



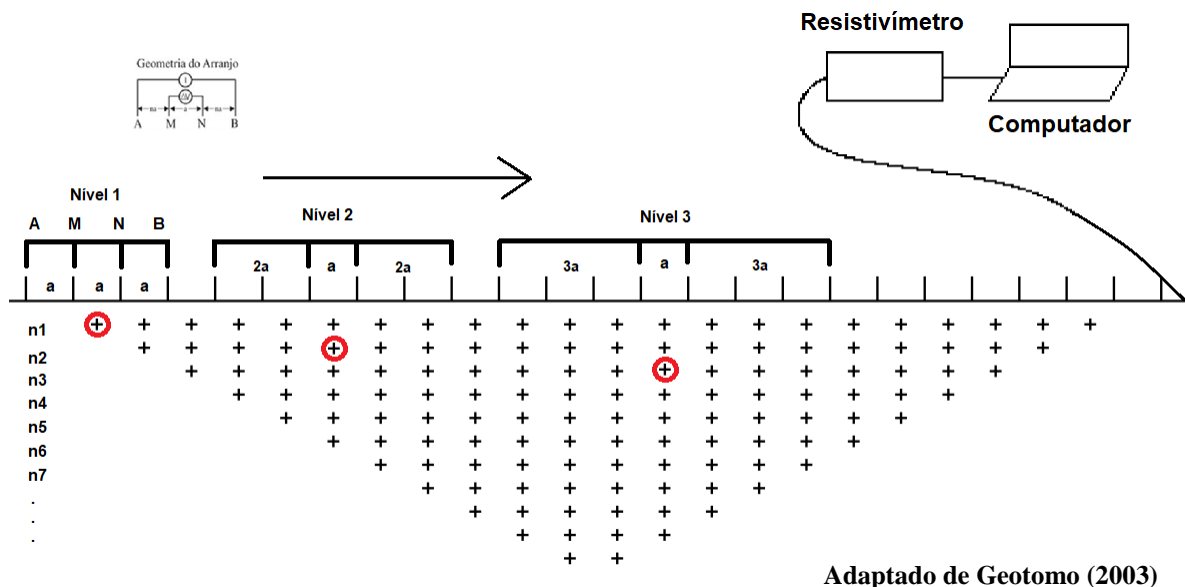
Adaptado Musset & Khan (2009)

## 8.2. Técnica de aquisição

Para a investigação de plumas de contaminação através do levantamento de dados resistividade/cargabilidade, uma das técnicas mais aplicadas é a Tomografia Elétrica (TE), que fornece uma boa perspectiva da variação lateral dos parâmetros físicos medidos, principalmente em relação às condições naturais do meio, quando o interesse do estudo é a investigação de uma estrutura 2D.

Também conhecida no Brasil como Caminhamento Elétrico (CE) ou Imageamento Elétrico, a Tomografia Elétrica realiza a investigação dessas variações laterais ao longo de perfis em múltiplas profundidades, com a possibilidade de utilização dos principais arranjos, como Schlumberger, Wenner, gradiente, dipolo-dipolo, polo-dipolo, etc., onde a direção da linha de levantamento permanece fixa e o centro do arranjo AMNB varia lateralmente conforme o seu desenvolvimento (Fig. 32) (KEAREY et al., 2002). Além da Tomografia Elétrica, outras técnicas de aquisição comumente empregadas são: a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Perfilagem Elétrica de Poços (PEP), que diferem da técnica escolhida pela análise pontual em múltiplas profundidades, ou seja, limitadas a investigações em 1D.

Figura 32 - Aquisição tomográfica para pseudoseção através de arranjo Schlumberger.



Para esse conjunto de medidas de resistividade ou cargabilidade aparente dá-se o nome de *pseudoseção* (MUSSET & KHAN, 2000). Através do processamento dos dados em um modelo de inversão obtém-se, como produto final, uma seção geoeletrica 2D com valores de

resistividades e profundidades reais. Segundo Griffiths & Barker (1993), a natureza automática do processo de interpretação condiciona o uso do termo “imageamento”.

Quando a investigação é programada para uma profundidade fixa ao longo da linha de aquisição, suas medidas resultam em um perfil geoeletrico 1D, embora seu emprego seja menos comum quando comparado ao imageamento elétrico. Mapas de uma ou mais profundidades são alguns dos produtos potenciais da mencionada técnica, além da possibilidade de geração de modelos de visualização pseudo-3D criados pela interpolação de múltiplas seções geoeletricas 2D comumente desenvolvidas paralelamente umas às outras.

### 8.2.1. Arranjo

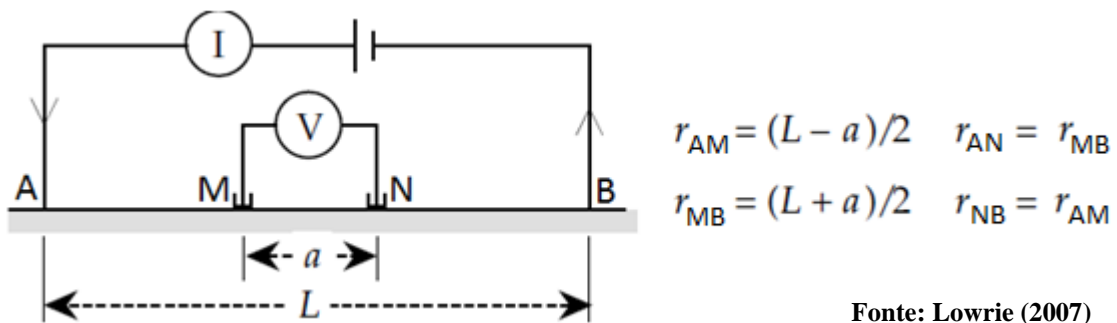
A geometria de disposição do conjunto de eletrodos na superfície do solo definirá o tipo de arranjo estabelecido para o ensaio geofísico pretendido. Nos ensaios realizados no Brasil, os principais tipos de arranjos praticados são: Schlumberger, Wenner e Dipolo-Dipolo. Nos três casos os quatro eletrodos são colineares e mantêm uma relação geométrica e espaçamentos característicos para cada tipo.

A depender da finalidade e alvo do ensaio geofísico, a escolha do arranjo é de suma importância para a obtenção do melhor resultado com base no método selecionado e alvo pretendido. Com base nisso, Ward (1990) lista fatores preponderantes para a escolha do arranjo a ser praticado, sendo que os para uma investigação geofísica direcionada a áreas contaminadas, como é o caso do presente dissertação, esses fatores são: razão sinal-ruído, profundidade de investigação, sensibilidade a heterogeneidades superficiais, sensibilidade a efeitos laterais e topografia.

O arranjo Schlumberger é estabelecido pela distância  $L$  entre os eletrodos de corrente (A e B) e  $a$  entre os eletrodos de potencial (M e N), conforme a Figura 33. O centro geométrico do arranjo, comumente definido para ambos os pares (arranjo simétrico), é também o ponto de atribuição do ensaio. Para a evolução em profundidade do arranjo amplia-se apenas a abertura  $L$  do sistema com a manutenção do espaçamento  $a$  entre os eletrodos de potencial, o que acaba por gerar uma maior comodidade e facilidade na aquisição dos dados, principalmente para ensaios de sondagem elétrica vertical (SEV), onde o arranjo é bastante empregado. Uma das principais características do arranjo Schlumberger é pequena distância entre os eletrodos MN em relação à separação aplicada aos eletrodos de corrente, onde a relação  $MN \leq AB/5$  é sempre satisfeita.

De acordo com Milson (2003), a profundidade de penetração de um dado arranjo varia conforme o contraste de resistividade dos componentes do meio geológico. Para os tipos Schlumberger e Wenner, essa profundidade é aproximadamente equivalente para os comprimentos praticados, uma vez que a separação dos eletrodos de corrente determina a profundidade alcançada por uma parte da corrente aplicada.

**Figura 33 - Disposição dos pares eletrodos em arranjo Schlumberger.**



Uma vez que  $r_{AM} = r_{NB} = (L-a)/2$  e  $r_{AN} = r_{MB} = (L+a)/2$ , o cálculo da resistividade aparente (Eq. 25), com base no fator geométrico do arranjo, se dá pela substituição nas fórmulas 21 e 22 (LOWRIE, 2007):

$$\rho_a = 2\pi \frac{\Delta V}{i} \left( \frac{2}{L-a} - \frac{2}{L+a} - \frac{2}{L+a} + \frac{2}{L-a} \right)^{-1} = \frac{\pi \Delta V}{4 i} \left( \frac{L^2 - a^2}{a} \right) \quad (25)$$

Nessa configuração os eletrodos de corrente A e B são mantidos a uma distância significativamente maior do que a separação do par MN ( $L \gg a$ ). Sob essas condições a Eq. 25 é simplificada em:

$$\rho_a = \frac{\pi \Delta V}{i} \left( \frac{L^2}{a} \right) \quad (26)$$

As vantagens do referido arranjo podem ser definidas pela movimentação de uma quantidade reduzida de eletrodos, principalmente para a técnica da SEV, leituras menos afetadas por variações laterais em virtude da fixação dos eletrodos de potencial e menos sujeitas a interferências causadas por “ruídos” indesejáveis, como interferências de aterramentos elétricos, por exemplo, além de ser menos suscetível a erros interpretativos em

terrenos não homogêneos e possuir uma densidade maior de leituras em comparação com o arranjo Wenner (MUSSET & KHAN, 2000).

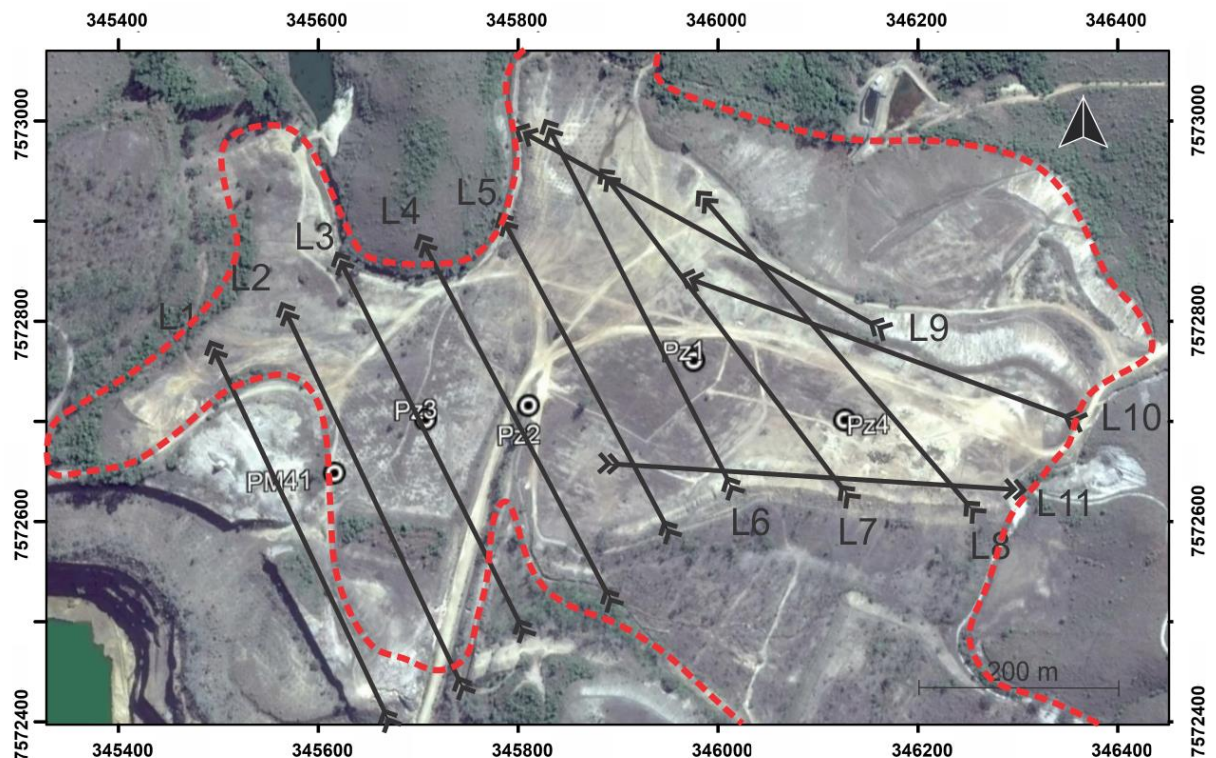
### 8.3. Aquisição dos dados

Os trabalhos de campo para a aquisição geofísica foram realizados durante o mês de novembro de 2017, pouco tempo após o início do período chuvoso na região. Foram definidas 11 linhas de aquisição dispostas de tal maneira a cobrir toda a área do patamar inferior da BF-04 (Fig. 34).

O comprimento total das mesmas foi de 400 metros, com exceção da linha 5 cuja dimensão de 350 metros foi restringida por particularidades do terreno. O comprimento escolhido foi baseado na espessura máxima da BF-04, que pode atingir até cerca de 70 metros em sua porção NE, com adoção de 10m de espaçamento entre eletrodos.

Os eletrodos utilizados foram do tipo cerâmica não-polarizável contendo solução de sulfato de cobre. Os dados de resistividade elétrica e cargabilidade referentes aos métodos da Eletrorresistividade (RE) e Polarização Induzida (IP), por meio da técnica de tomografia elétrica em arranjo Schlumberger.

**Figura 34 - Disposição e orientação das linhas geofísicas na área da BF4 com a indicação do poço de monitoramento PM41, piezômetros Pz1, Pz2, Pz3 e Pz4 e delimitação da BF-04 (linha pontilhada).**



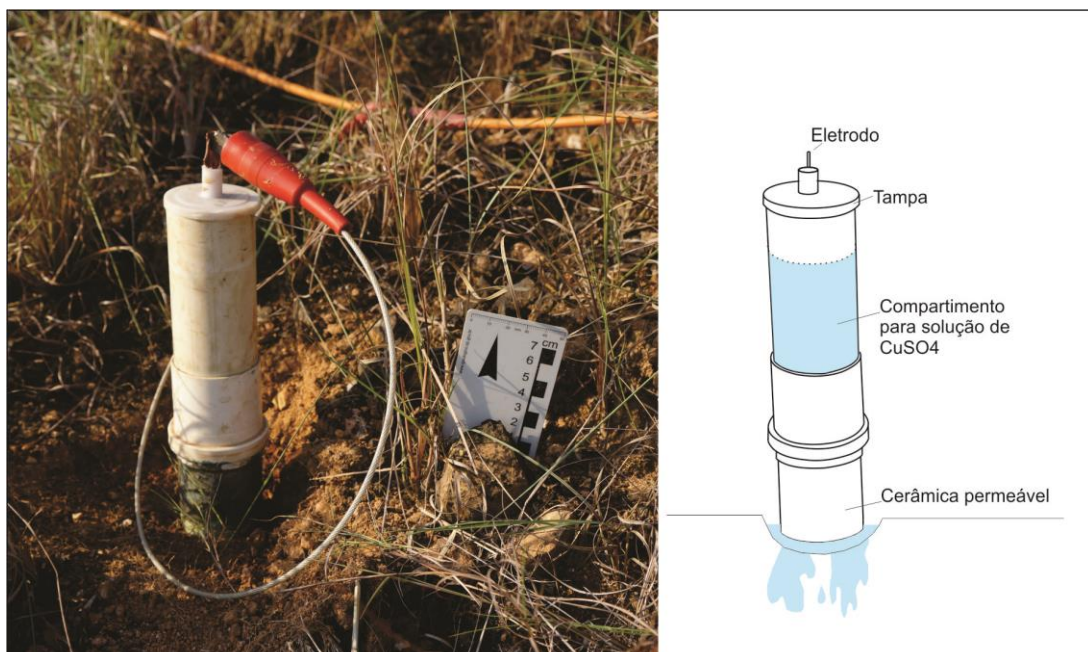
O equipamento utilizado em campo foi um resistivímetro *Terrameter LS* da ABEM de fabricação sueca (Fig. 35). Este equipamento possui 250 W de potência, corrente máxima de 2,5 A e resolução de 1  $\mu$ V e permite aquisições automáticas mediante configuração prévia (ABEM, 2012). Os parâmetros de configuração para este trabalho foram: 1 A de corrente, tempo de aquisição de 1,5 segundo, tempo de leitura após o corte de corrente de 0,3 segundo e leituras em duas janelas de tempo com 0,1 segundo cada, definidos mediante testes preliminares.

**Figura 35 -** Imagens do trabalho de aquisição em campo, com o resistivímetro *Terrameter LS* da ABEM disposto no centro geométrico da linha com os cabos esticados conectados aos eletrodos não polarizáveis.



Cada eletrodo do tipo utilizado na aquisição dos dados geofísicos é confeccionado a partir de um tubo do tipo PVC com uma base de cerâmica permeável. Em seu interior é colocada uma solução aquosa de sulfato de cobre, a qual estabelece contato direto com o eletrodo de cobre em seu interior, este último fixado na tampa (Fig. 36).

**Figura 36 -** Detalhe e ilustração esquemática do eletrodo de cerâmica não polarizável.



O emprego desse sistema garante a aquisição dos dados de IP devido à sua capacidade de não polarização e de transmissão de corrente mesmo em substratos de alta resistividade por conta da lenta e gradual liberação da solução através do solo. Por fim, as garras são acopladas na extremidade do eletrodo e então conectadas ao cabo mestre que é instalado ao longo da linha.

#### **8.4. Processamento dos dados**

Uma vez obtidas as pseudoseções a partir da técnica de imageamento elétrico, a tarefa seguinte é a conversão dos valores medidos de resistividade e cargabilidade em seções que representem um modelo mais preciso dos parâmetros em subsuperfície, pois, como já explicitado, as pseudoseções refletem de maneira aproximada as características, posições e estruturas do meio investigado. Nas últimas décadas, o desenvolvimento de *softwares* específicos possibilitou o processamento de informações em maior qualidade com distribuição precisa das medidas em subsuperfície por intermédio de técnicas matemáticas, recebendo o nome de *Modelo de Inversão*.

Os dados adquiridos durante os trabalhos de campo foram processados pelo software Res2Dinv (2D) versão 3.53 (Geotomo Software) onde foram geradas suas representações por meio de imageamento elétrico dos valores quantitativos da resistividade e cargabilidade modelada em subsuperfície. Os modelos de inversão são expressos em seções com base em suas variáveis distância e profundidade, além de apresentar seus valores convertidos em escala gráfica em razão logarítmica (MOREIRA et al., 2016). Seu aspecto teórico é baseado na utilização do algoritmo de mínimo quadrados com vínculo de suavidade (*smoothless-constrained least-square method*), caracterizado pela suavização e redução das diferenças dos valores de resistividade aparente a partir de blocos definidos na pseudoseção, cuja finalização das interações é dada no momento em que é alcançada uma compatibilidade satisfatória entre os dados teóricos e de campo, sendo a qualidade do ajuste estimada pela raiz do valor quadrático médio (RMS - Root Mean Squared) (LOKE & BARKER, 1996; LOKE, 2010; BANIA & CWIKLIK, 2013). Antes do processamento é necessária a identificação de eventuais valores negativos de resistividade e cargabilidade e a substituição destes pela média aritmética dos valores positivos vizinhos. O fator “topografia” também é inserido ao modelo para que não haja distorções da seção gerada.

Uma vantagem do referido algoritmo matemático é a possibilidade de ajuste do fator *damping* e filtros de *roughness* para atender a diferentes tipos de dados, além de requerer um

menor tempo para o processamento computacional dos dados quando comparado ao método de otimização mínimo-quadrado Gauss-Newton (Gauss-Newton *least-square optimization method*) (GEOTOMO, 2003; LOKE & BARKER, 1996).

Um modelo 2D com o menor valor possível de erro RMS pode representar, em certas ocasiões, variações não realísticas e de grande escala nos valores de modelo de resistividade, o que pode não ser o modelo mais adequado a partir de uma perspectiva geológica (LOKE, 2010). Com base nisso, o manual do *software* estabelece que a ação mais prudente é a escolha de uma interação depois da qual o erro RMS não mude de maneira significativa, o que geralmente acontece entre a terceira e sexta interações.

Finalizada a inversão, os dados são dispostos como produtos numéricos de inversão em duas dimensões de cada uma das seções e reunidos em um único *spreadsheet*. Esse arquivo representa a posição das leituras ao longo das linhas (variável “X”), espaçamento entre linhas (variável “Y”), profundidade modelada pela inversão (variável “Z”) e, por último, os valores da propriedade física de interesse (como variável “R”) (MOREIRA et al., 2016).

As etapas para a obtenção dos modelos 3D da pluma de contaminação seguiram os mesmos princípios utilizados na área da prospecção mineral, com a utilização da plataforma *Oasis Montaj (Geosoft)*, na qual os arquivos de planilhas foram carregados e os dados referentes às seções foram interpolados com base no método da krigagem, seguido pela mínima curvatura para que fosse possível a suavização dos valores centrais em detrimento às extremidades. Através disso, a malha amostral utilizada, juntamente com critérios estatísticos, estabelece diferentes blocos para cada ponto do modelo 3D final, possibilitando a geração de mapas de profundidade a partir da secção do modelo em diferentes níveis.

Landim (1998) define krigagem como um processo de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, segundo valores adjascentes enquanto considerados como interdependentes pelo variograma ou, em outras palavras, um método de estimação por médias móveis. O sistema de krigagem leva em consideração a distância entre as amostras e seu agrupamento. Pode ser utilizada na previsão pontual de uma variável regionalizada em um determinado local do campo geométrico; no cálculo de um valor médio de uma variável regionalizada para um volume maior que o suporte geométrico, como por exemplo no cálculo de teor médio de um bloco na cubagem de uma jazida com base em informações obtidas através de furos de sondagem ou ainda na estimação do *drift*, similar à análise de superfície de tendência (LANDIM, 1998; YAMAMOTO & LANDIM, 2013).



## 9. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 9.1. Modelagem 2D

De acordo com os dados geofísicos processados e os modelos de inversão para resistividade e cargabilidade gerados, foi possível a identificação de anomalias em subsuperfície, algumas com alto contraste em relação ao meio. A profundidade máxima real obtida pela pesquisa foi em torno de 70 metros, o suficiente na abrangência de toda a espessura do estéril e topo do embasamento composto por rochas alcalinas. Dentre as anomalias observadas, as mais relevantes foram aquelas de baixa resistividade ( $10 \Omega.m$ ) provavelmente em decorrência da elevada salinidade ocasionada pela presença de drenagem ácida existente no local. Em vários locais os valores de resistividade foram tão baixos quanto os observados por Anterrieu *et al.* (2010) e Power *et al.* (2018), que verificaram anomalias em pilhas de estéreis da ordem de  $10 \Omega.m$  e  $<30 \Omega.m$ , respectivamente.

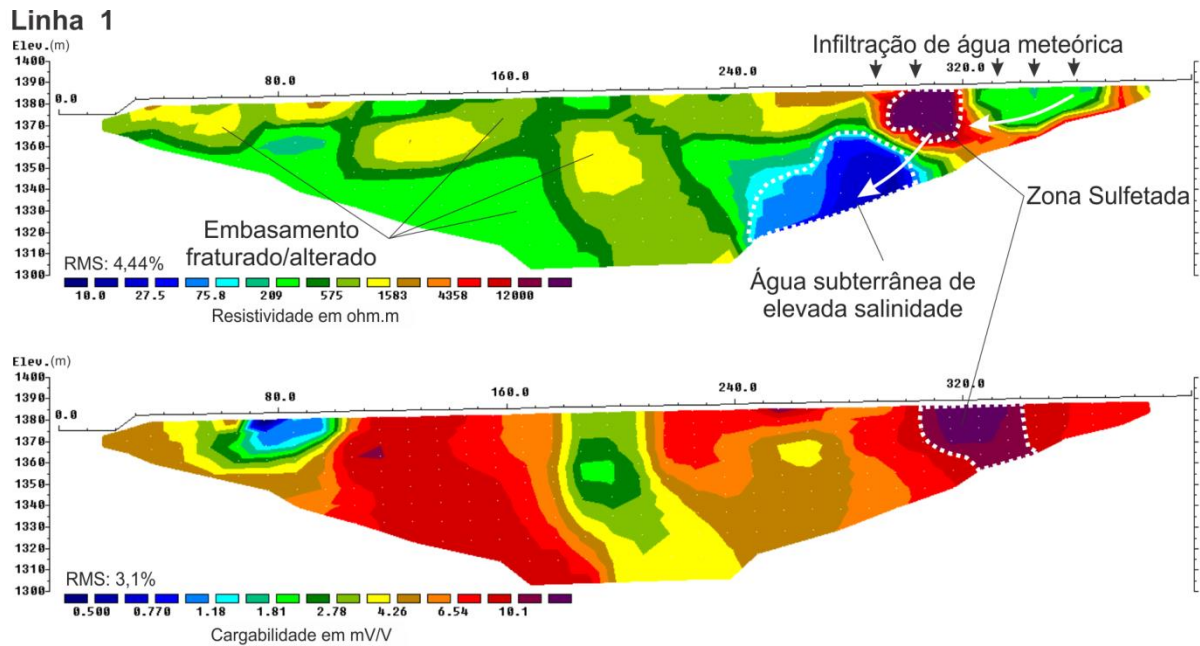
No que se refere à cargabilidade, os valores máximos obtidos foram da ordem de  $10,1 \text{ mV/V}$ . Para efeitos comparativos, em estudos de prospecção mineral em áreas mineralizadas, os valores de cargabilidade para regiões sulfetadas possui valor mínimo de  $21 \text{ mV/V}$ , de acordo com estimativas do trabalho de Oliveira *et al.* (2017). Santos (2017), por outro lado, atribui valores que variam de  $\leq 12,8 \text{ mV/V}$  a  $\leq 3,3 \text{ mV/V}$  segundo a concentração relativa de sulfetos em área de ocorrência de cobre. No mesmo contexto da aplicação do método de IP em material estéril afetado por DAM, o intervalo dos valores de cargabilidade obtido são bastante similares ao de Power *et al.* (2018).

Com base em interpretações conjuntas entre os modelos de inversão para resistividade e cargabilidade, foi possível a identificação de potenciais processos-chave geradores da drenagem ácida de mina. Abaixo foram descritas as seções de eletrorresistividade e cargabilidade para a explanação e discussão desses processos químicos em detrimento do modelo geofísico proposto.

No caso da Seção 1 (Fig. 37), a uma distância aproximada de 310 m a partir da origem, foi identificada uma anomalia caracterizada por elevada resistividade ( $> 12.000 \Omega.m$ ) e cargabilidade ( $> 10,1 \text{ mV/V}$ ), o que poderia ser entendida como resquícios de sulfetos associados a brechas ou veios. Adjacente a esta anomalia está uma porção de baixa resistividade ( $< 70 \Omega.m$ ), tida como água de elevada salinidade resultado da interação água-minério e com seu provável fluxo gravitacional. Valores de resistividade de até  $1583 \Omega.m$ ,

que abrangem uma grande porção da seção, corresponderiam ao embasamento rochoso significativamente alterado/fraturado. A camada de material estéril neste ponto é mínima ou praticamente inexistente e a espessura da BF-04 tende a aumentar em direção à bacia BNF segundo informações de construção da pilha e o modelo geofísico proposto (modelos pseudo 3D).

**Figura 37 – Modelos de inversão para resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 1. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse e as setas o fluxo da água subterrânea.**

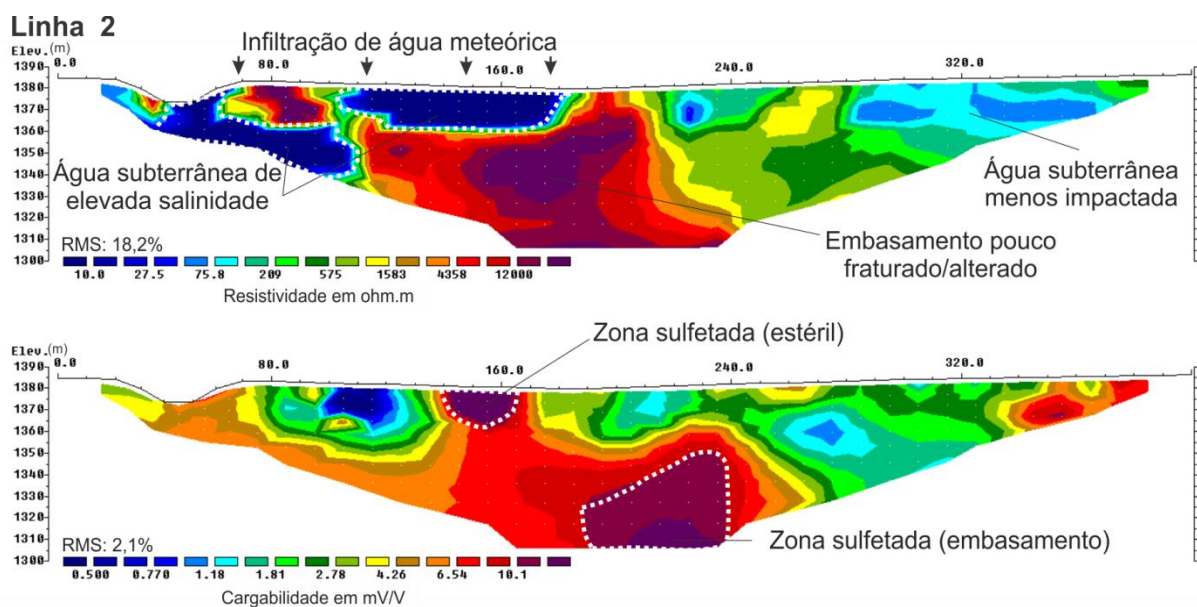


Na seção referente à Linha 2 é nítida a existência de zonas de baixa resistividade associadas a regiões de alta cargabilidade, sobretudo na porção superficial na distância de 150 metros, realçadas na seção (Fig. 38). Nesse caso há a possibilidade de ocorrência de resquícios de rochas com presença de sulfeto disseminado associadas à anomalia de baixa resistividade gerada pela água subterrânea de elevada salinidade. Por outro lado, a zona de baixa resistividade próxima à origem da linha (início da linha) possui continuidade em níveis mais profundos, o que poderia ser entendido como uma propagação desta água por locais de maior permeabilidade. É provável que essa porção saturada rasa tenha sido fruto de chuvas recentes na região, uma vez que a aquisição geofísica tenha sido feita início do período chuvoso.

Outra característica do referido modelo de inversão é a porção de alta resistividade e cargabilidade em seu centro com propagação em profundidade. Essa resistividade observada ( $> 4000 \Omega.m$ ) foi associada ao embasamento rochoso maciço da pilha de estéreis e condicionante da suspensão da água do aquífero granular gerado pela BF-04, este último evidenciado pela anomalia superficial de baixa resistividade, conforme já descrito. Esse alto

do embasamento poderia ser também uma zona de reação química caso haja contribuição das águas desse sistema fraturado para o granular. Assim como a Seção 1, há uma porção do embasamento com resistividade inferior ( $<1500 \Omega.m$ ), ocasionada por um maior faturamento/alteração das rochas naquele local, além da presença de água contida em fraturas (final da linha,  $<140 \Omega.m$ ). Entretanto, o contato entre o estéril e o embasamento é de difícil delimitação em virtude da presença de solos naturais sobre este último e grande heterogeneidade dos materiais lançados (composição e granulometria), devido a ausência de contraste dos parâmetros físicos.

**Figura 38 – Modelos de inversão para resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 2. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse.**



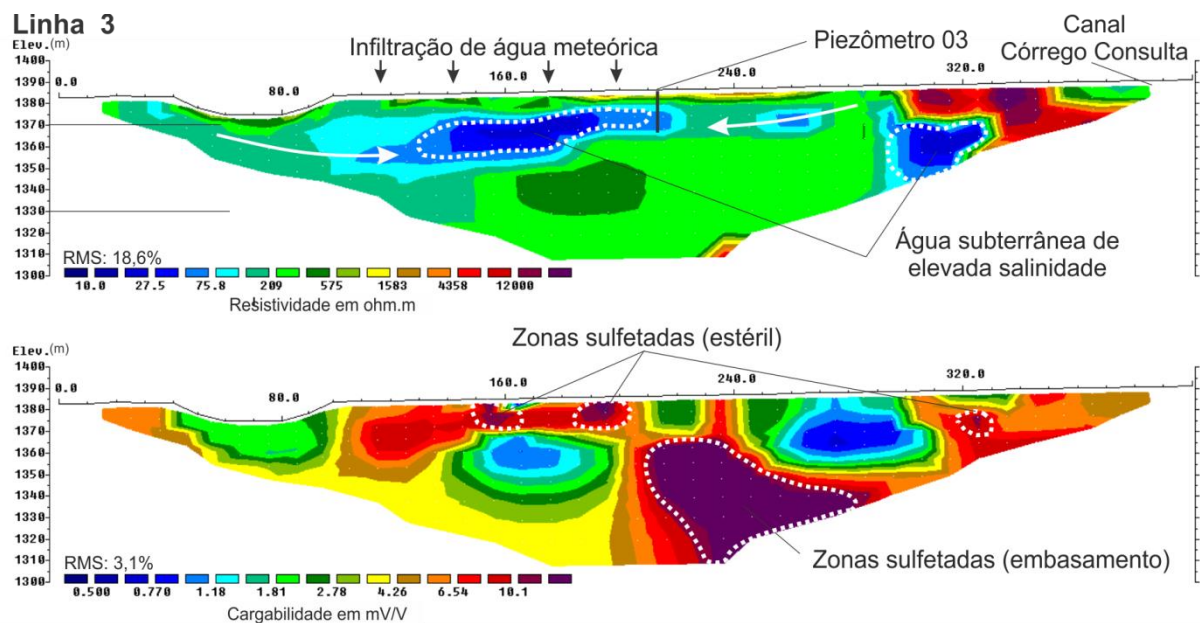
A linha de aquisição geradora da Seção 3 cruzou o piezômetro 3 (Figura 39). A análise dos dados referentes ao poço possibilitou uma tentativa de correlação entre os dados obtidos de modo direto (poços de monitoramento) e indireto (aquisição geofísica), caracterizado por pH médio de 3,5, condutividade elétrica da ordem  $9853 \mu S/cm$  e  $22.003 mg/L$  de sulfato em medições realizadas pela INB (FRANKLIN, 2007). Nesta seção é possível constatar que o piezômetro em questão está instalado sobre uma zona de baixa resistividade da Seção 3, o que corrobora a acidez e alta salinidade das águas coletadas nesse ponto. Entretanto, existe a possibilidade de retração sazonal dessa anomalia, uma vez que o valor de resistividade no local do piezômetro foi de aproximadamente  $78 \Omega.m$ .

É interessante observar a concentração das anomalias de baixa resistividade, provavelmente no interior da BF-04 e a uma distância aproximada de 160 metros, onde existe

um indicativo de acúmulo devido à concavidade da suposta interface. As anomalias de elevada cargabilidade, neste caso, estão mais associadas ao embasamento, onde foram obtidos valores superiores a 10.1 mV/V. No estéril da BF-04 (níveis mais rasos) também são identificadas pequenas zonas com cargabilidade entre 6,5 mV/V a > 10.1 mV/V, provavelmente estéreis mais ricos em sulfetos e, novamente, potenciais sítios de oxidação.

Uma vez que a extremidade NW da linha de aquisição é localizada nas proximidades do canal não impermeabilizado do Córrego da Consulta, é possível a existência de alguma contribuição desse corpo hídrico superficial na geração da referida anomalia de baixa resistividade, sobretudo através da infiltração dessas águas no sistema com interação química com os sulfetos representados pela zona de alta cargabilidade, conforme o fluxo indicado pelas setas. As demais linhas de aquisição com extremidade próxima ao canal também apresentaram anomalias crescentes de baixa resistividade na mesma região da seção, o que corroborariam a tese da infiltração das águas do canal para o interior da BF-04.

**Figura 39 – Modelos de inversão para resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 3 com anomalias de interesse e localização do piezômetro 03 (Pz3).**

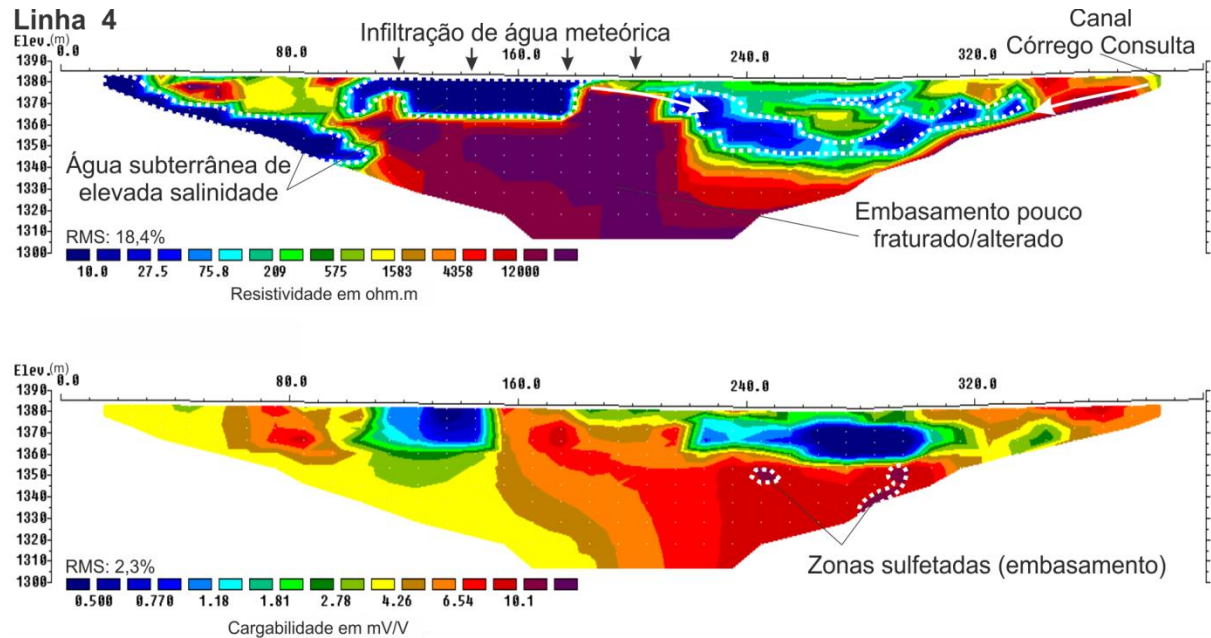


A Seção 4 possui alguma similaridade com o observado nas seções correspondentes ao modelo da Linha 2. É visível a presença do embasamento que condiciona a suspensão da água subterrânea salina na distância 160 m, aproximadamente (Fig. 40). No início da seção a anomalia de baixa resistividade possui continuidade em níveis mais profundos, provavelmente uma infiltração a partir do sistema aquífero granular. Nesta seção a profundidade do estéril é significativamente maior, sobretudo na distância 280 m onde a

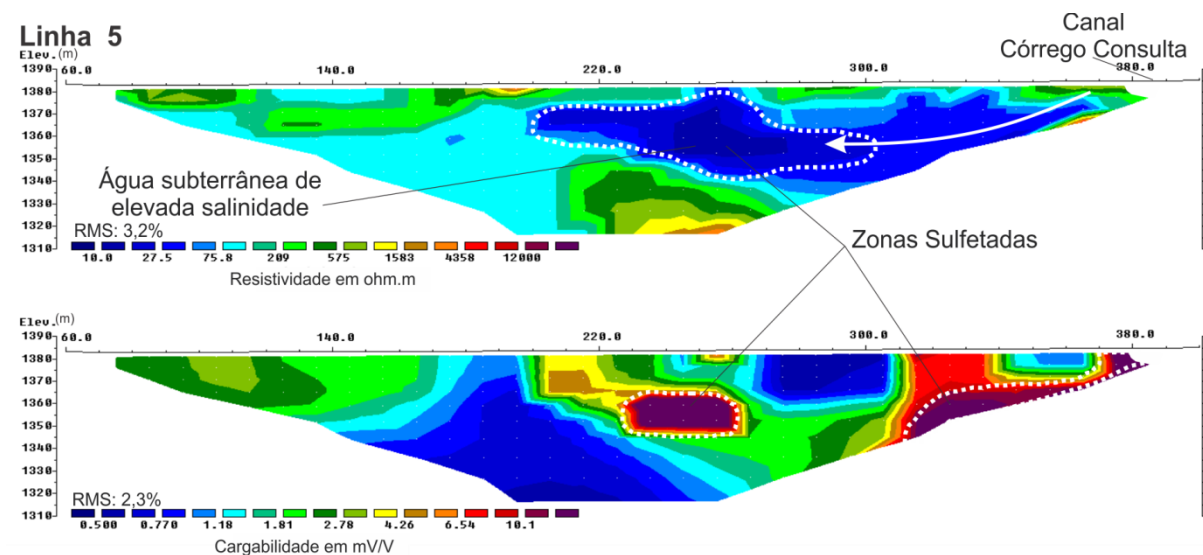
topografia do antigo vale atinge sua profundidade máxima com a geração de uma superfície côncava. As setas representam o provável fluxo da água subterrânea com origem, em especial, no canal do Córrego da Consulta.

A Seção referente à linha de aquisição 5 (Fig. 41) também revela uma significativa zona de alta cargabilidade em seu centro ( $>10,1$  mV/V, 220 metros a partir da origem e na cota 1360 metros e na extremidade final), o que poderia ser estabelecida, novamente, como rejeito ricos em sulfeto disseminado (pirita), além da grande área de baixa resistividade ( $<75$   $\Omega$ .m) associada a ela, conforme já observado nas seções anteriores.

**Figura 40– Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 4. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse.**

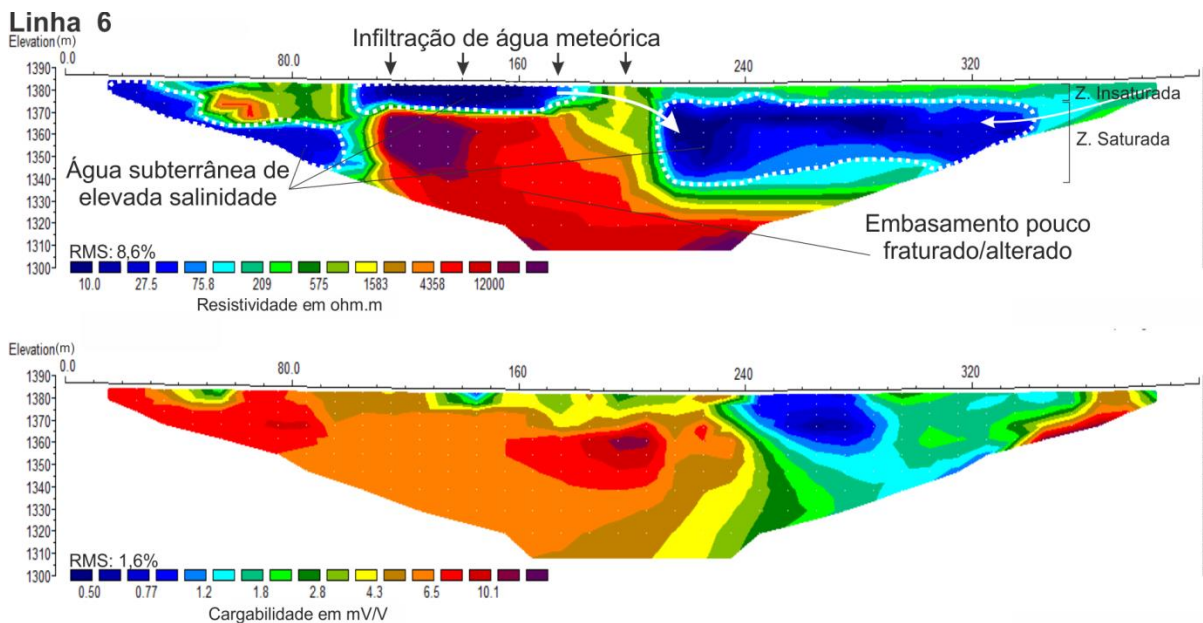


**Figura 41– Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 5. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse.**



As Seções 6, 7 e 8 retomam as mesmas características observadas nos modelos 2D 2 e 4 (Figs. 42, 43 e 44), com embasamento menos fraturado, traduzido pela alta resistividade ( $>1583 \Omega.m$ ) e valores relativamente baixos de cargabilidade, principalmente nas seções 7 e 8, o que demonstraria a baixa concentração de sulfetos. No interior do material estéril ocorrem núcleos relativamente mais sulfetados ( $>10.1 \text{ mV/V}$ ) na porção final das seções 7 e 8, com destaque para a grande anomalia desta última.

**Figura 42– Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 6. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse.**

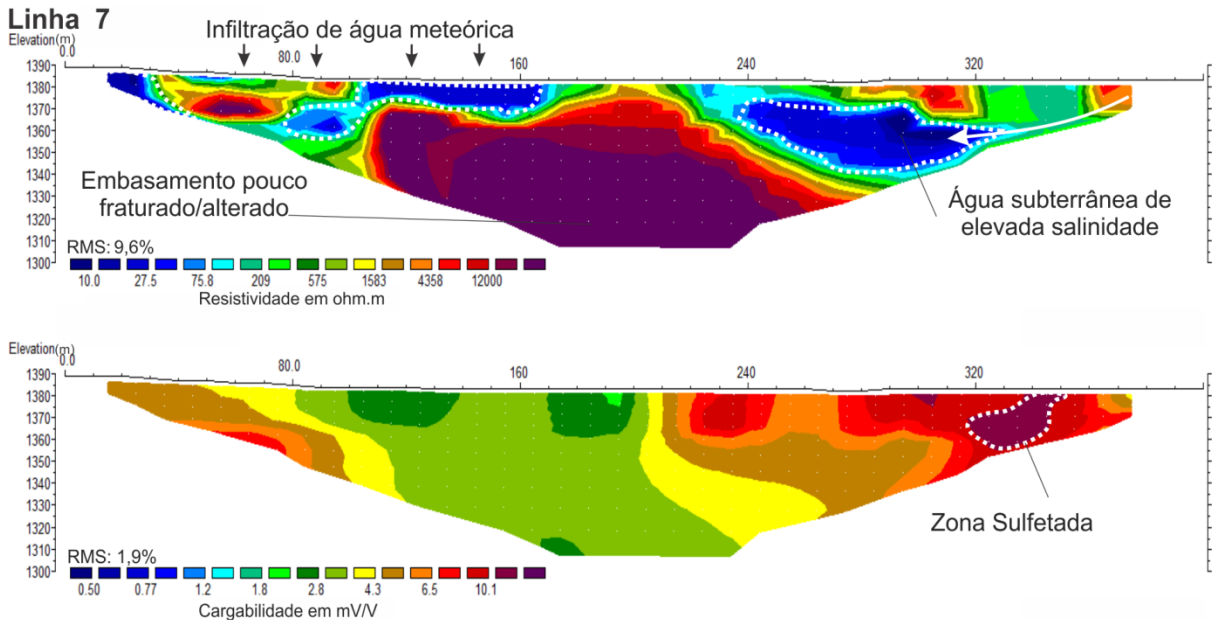


A água subterrânea de elevada salinidade também é visível pelas porções rasas de alta condutividade a uma distância de aproximadamente 160 metros a partir da origem, aparentemente condicionadas pelo embasamento. Por outro lado, as porções de baixa resistividade em 280 m são significativamente maiores e continuam associadas ao ponto de maior profundidade do antigo vale, como observado em linhas anteriores.

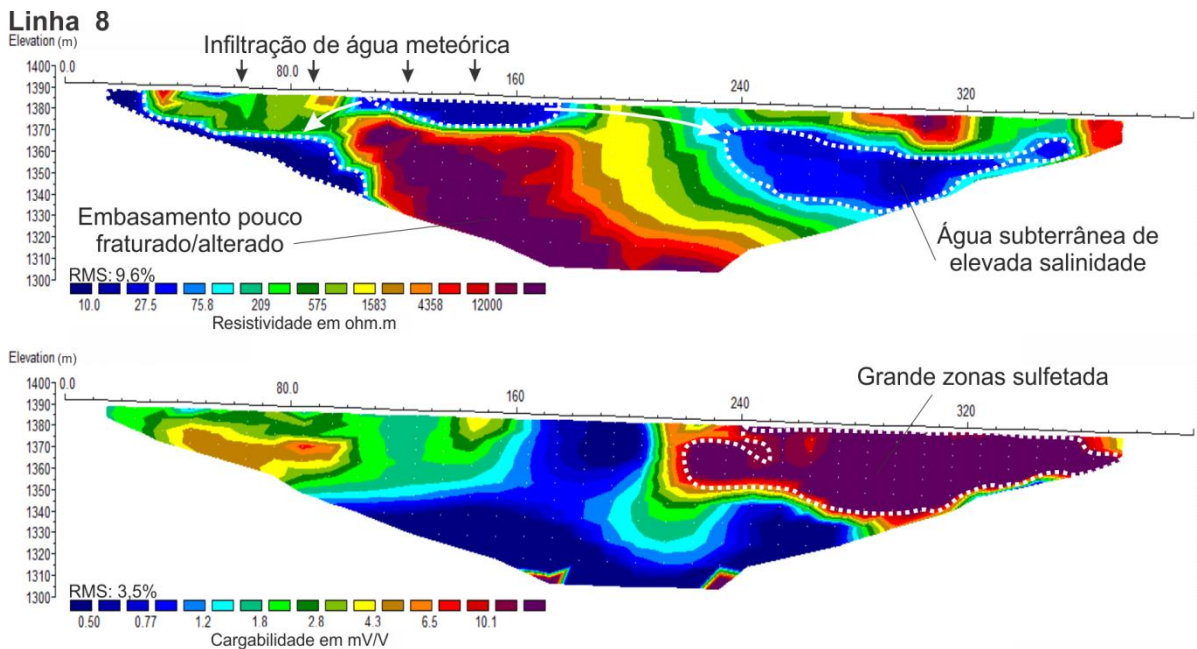
Essa anomalia gerada pela água salina e observada na Seção 8 (Fig. 44), possui correspondência no modelo de inversão da linha 9 (Fig. 45). Por ser a linha de aquisição mais próxima da extremidade da BF-04 e da região de afloramento da água subterrânea para captação na bacia BNF, seria esperado um acúmulo maior do efluente salino em questão. Mais uma vez a localização do canal do Córrego da Consulta parece influenciar a geração da anomalia condutiva com a infiltração de suas águas para dentro da pilha. Em seu centro o valor de resistividade chega a atingir valores inferiores a  $10 \Omega.m$  com correspondência na região sulfetada de alta cargabilidade ( $>10.1 \text{ mV/V}$ ). Apesar da provável facilitação da

difusão de oxigênio através do talude da BF-04, essas porções sulfetadas aparentaram resistir aos processos oxidantes, cujos resquícios ainda contribuem na geração da DAM.

**Figura 43– Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 7. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse.**



**Figura 44– Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 8. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse.**



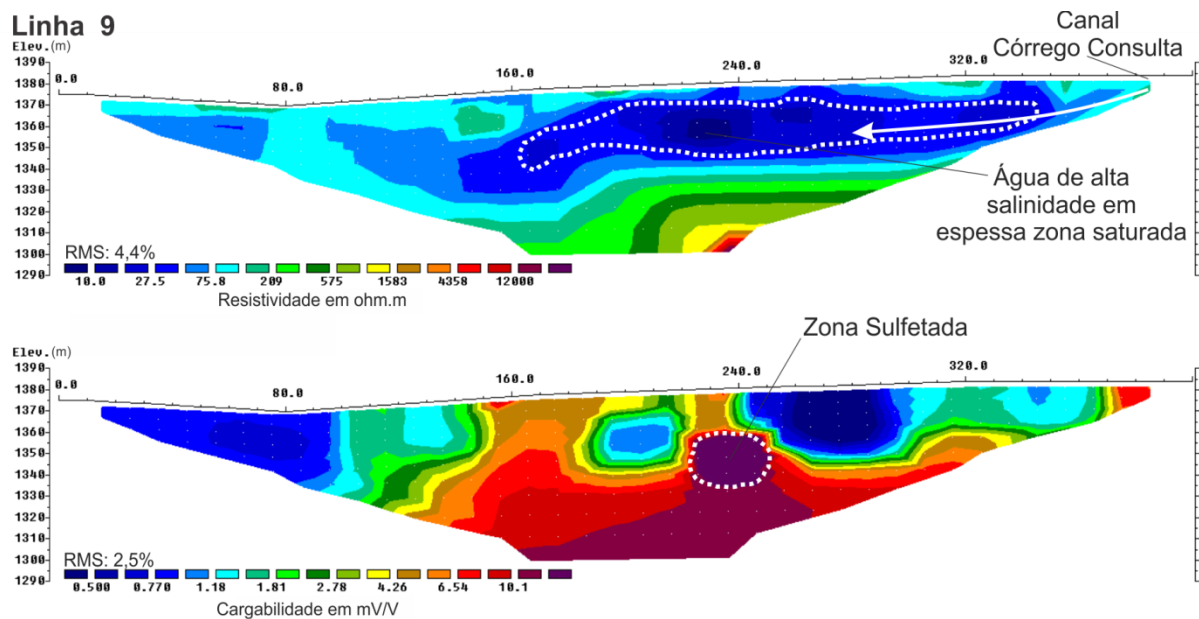
A Seção 10 é mais um exemplo claro da correlação entre as anomalias de alta cargabilidade com a presença de porções de baixa resistividade associadas, visível na distância 270 m e com zonas sulfetadas em profundidades de até 70 m (Fig. 46). Essa região

de geração da drenagem ácida coincide com um dos níveis mais profundos da BF-04 e mostra que as reações de oxidação acontecem mesmo em áreas próximas à base da pilha. O embasamento mais uma vez foi visível pela sua alta resistividade ( $>1583 \Omega.m$ ) logo abaixo de uma região de água subterrânea de alta salinidade, localizado a uma distância de 140 m a partir da origem em sua porção mais rasa.

Por último, a Seção 11 possui orientação perpendicular em relação às demais aquisições. As anomalias de baixa resistividade são basicamente aquelas observadas próximas às origens das linhas 6, 7 e 8 com continuidade lateral confirmada pela seção 11. Em relação à DAM, foi identificada uma significativa porção sulfetada em 230 m e na cota de 1355 m, novamente com valores de cargabilidade superiores a 10.1 mV/V (Fig. 47).

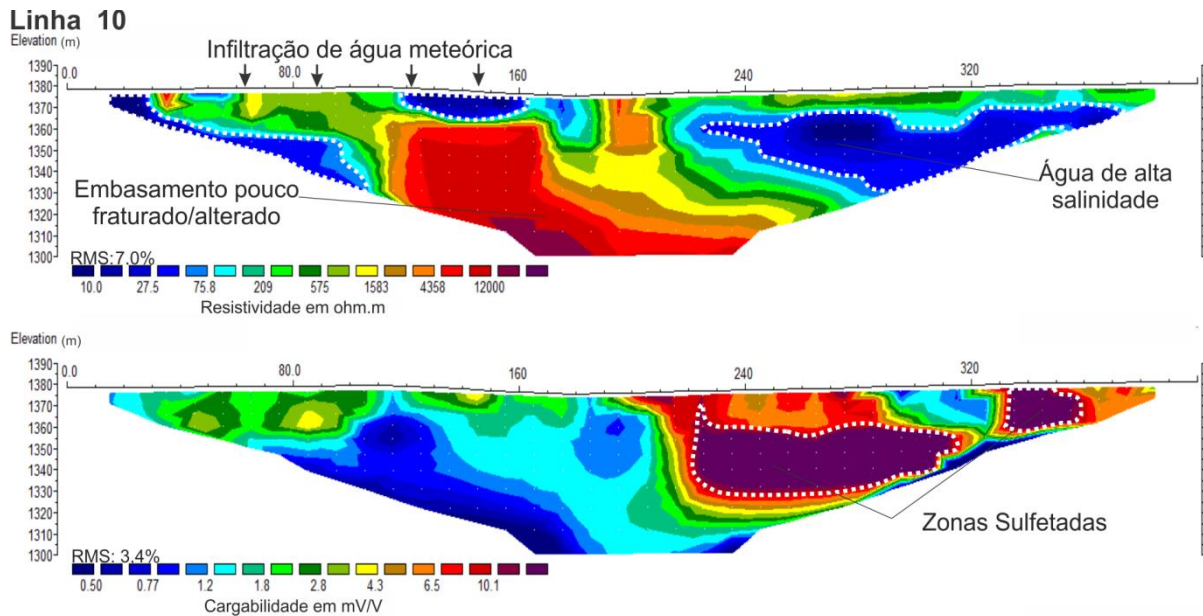
A variabilidade física e mineralógica demonstra o caráter heterogêneo da pilha de estéril e conseqüentemente a criação de zonas de fluxos preferenciais, propriamente identificados através da geração dos modelos geofísicos 3D, para a circulação da água subterrânea e a ocorrência de zonas com acúmulo de sulfetos, haja vista que não há registros da dinâmica de preenchimento do antigo vale. A topografia irregular do antigo vale é outro fator que garante a complexidade e também condiciona o comportamento do fluxo subterrâneo local.

**Figura 45– Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 9. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse.**

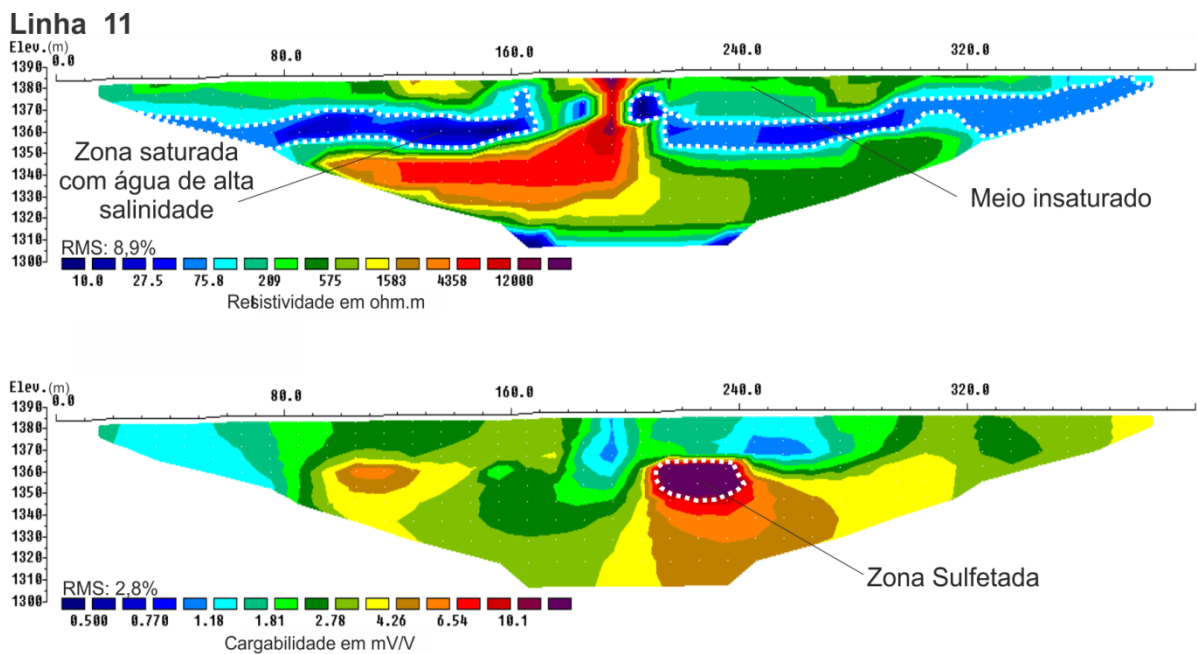




**Figura 46– Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 10. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse.**



**Figura 47– Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 11. As linhas tracejadas delimitam as anomalias de interesse.**



De modo geral, através da análise dos 11 modelos de inversão, foi possível resumir as associações entre as anomalias resistivas e de cargabilidade em 3 grupos principais com base no modelo geofísico proposto. Esses grupos foram sintetizados na Tabela 5, conforme a análise dos modelos de inversão gerados:

**Tabela 5- Descrição dos três grupos de associações de anomalias resistivas e de cargabilidade, conforme observado nos modelos de inversão gerados.**

<b>Grupos</b>	<b>Intervalos</b>	<b>Descrição</b>	<b>Modelos de inversão exemplificadores</b>
<b>Grupo 1</b>	Alta Resistividade (> 1583 $\Omega$ .m)	Porções sulfetadas associadas à presença de minerais resistivos, o que confere o caráter resistivo ao meio. Na maioria dos casos o grupo 1 foi relacionado às rochas do embasamento da BF-04.	1 e 2
	Alta Cargabilidade (> 10,1 mV/V)		
<b>Grupo 2</b>	Baixa Resistividade (< 50 $\Omega$ .m)	Porções sulfetadas de caráter disseminado em meio à zona saturada do sistema aquífero granular e afetada pelo processo de DAM. Esse grupo em específico é o de maior interesse na pesquisa, pois configura as principais regiões de oxidação e geração da drenagem ácida. Embora a concentração de pirita no estéril seja de 2%, a presença dessas anomalias sugerem núcleos muito mais ricos no mineral sulfetado. As anomalias relacionadas ao Grupo 2 estão inseridas exclusivamente no material estéril da BF-04.	2, 5, 7, 8, 9, 10 e 11
	Alta Cargabilidade (> 10,1 mV/V)		
<b>Grupo 3</b>	Variável Resistividade (10 $\Omega$ .m > x > 1583 $\Omega$ .m)	Zonas com concentrações de pirita significativamente menores em função do decréscimo da cargabilidade. Em níveis mais rasos da pilha essas anomalias poderiam ser entendidas como regiões já oxidadas e, portanto, relativamente inertes na geração do efluente ácido. as anomalias de baixa cargabilidade estão inseridas tanto no embasamento quanto no interior da BF-04	5, 8 e 10
	Baixa Cargabilidade (< 10,1 mV/V)		

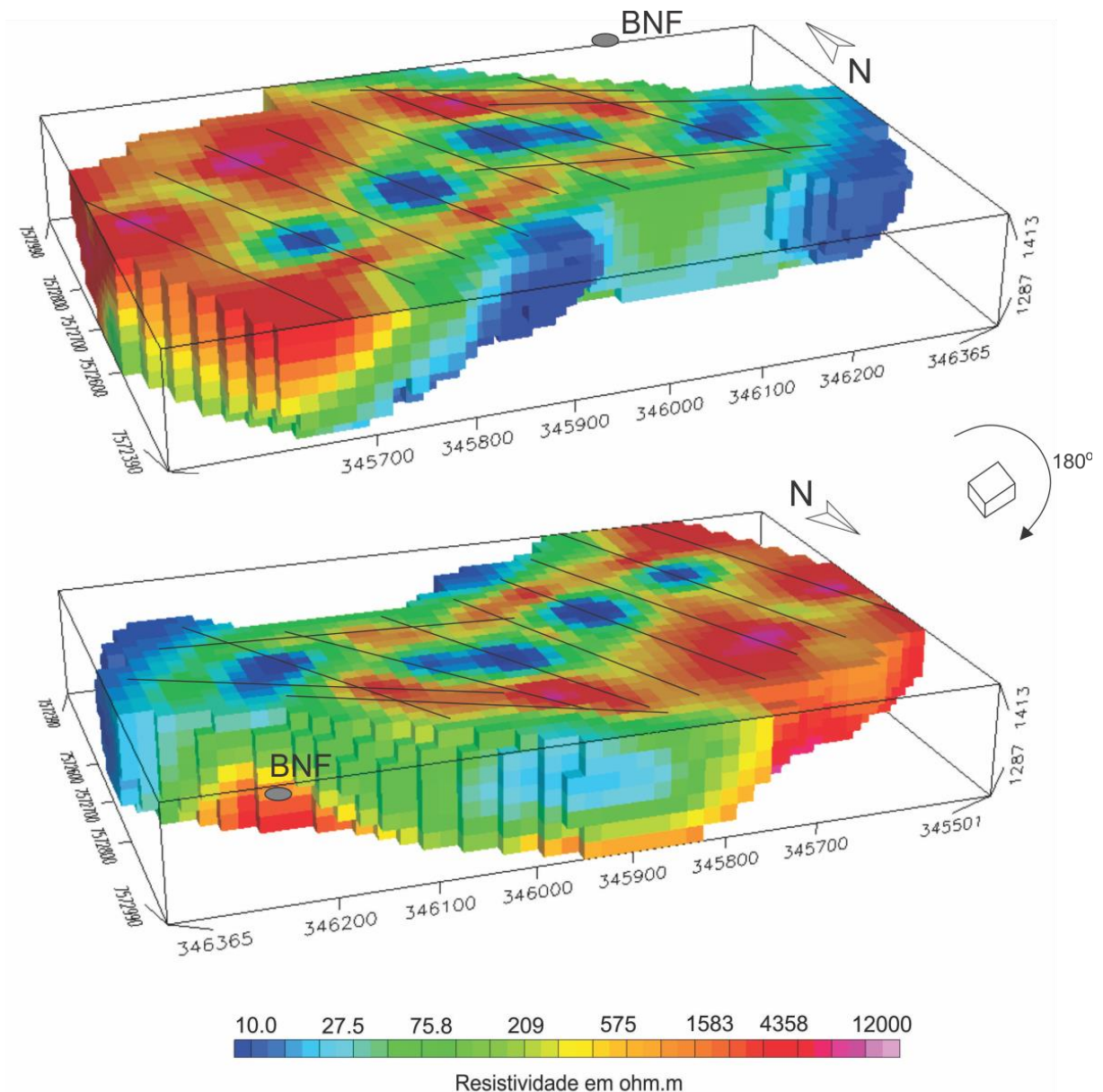
## 9.2. Modelagem 3D

A interpolação das 11 seções geofísicas levantadas geraram dois modelos pseudo-3D, um para cada parâmetro físico adquirido (Figs. 48 e 49). Posteriormente as imagens foram suavizadas e definidos 9 níveis de visualização em profundidade (Fig. 50 e 51).

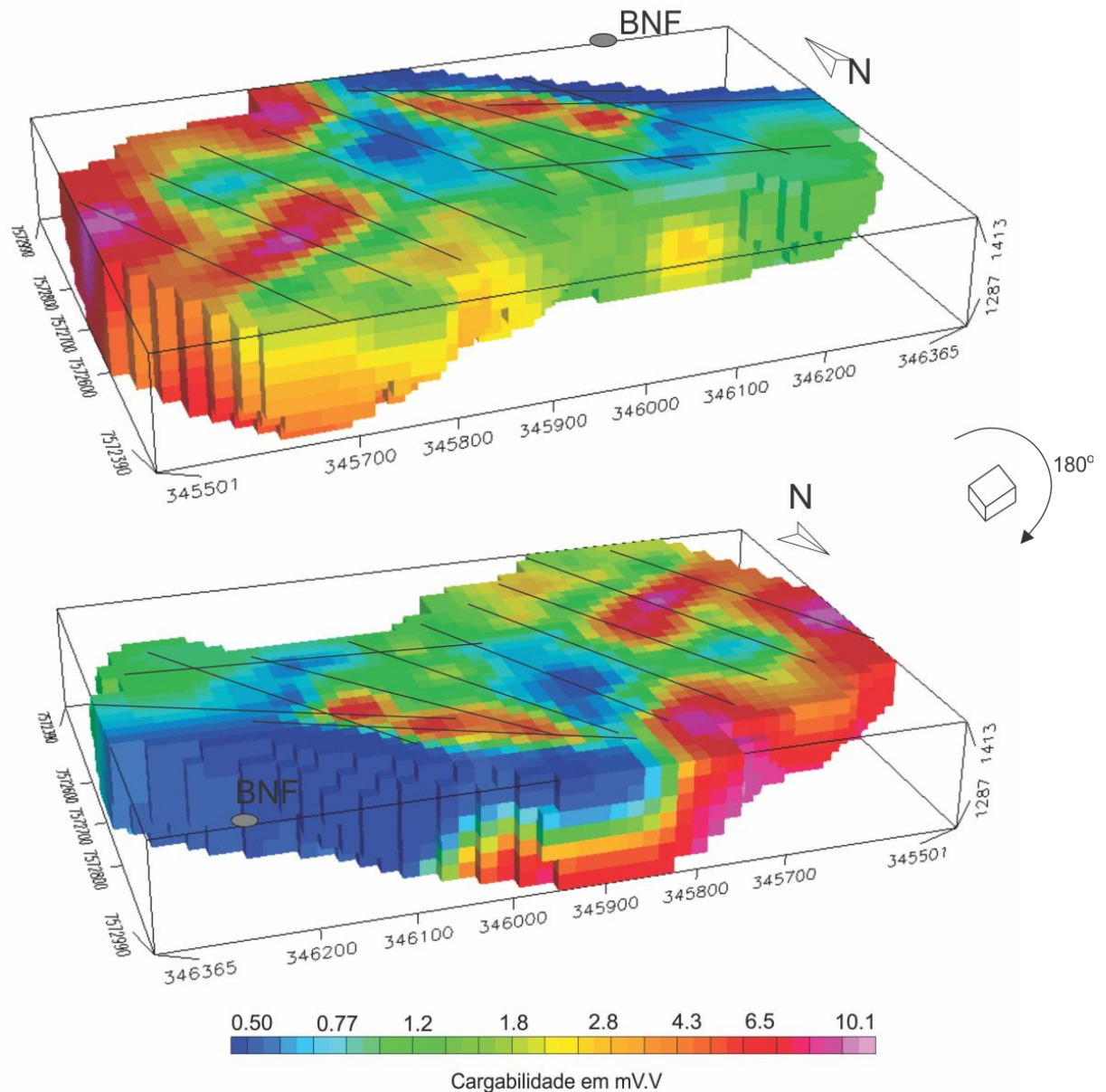
Os níveis correspondem às cotas 1380 (superficial), 1370, 1360, 1350, 1340, 1330, 1320, 1310 e 1300 metros. Essa profundidade teórica de aquisição abrange as porções mais espessas da pilha de estéreis, conforme mencionado, cuja espessura máxima observada foi torno de 70 metros nas porções mais próximas ao talude e diminui em direção a antiga cava da mina.

É esperado que esse declive da base da pilha condicione o fluxo subterrâneo em direção à bacia de captação BNF, com a geração de fluxos indicados por anomalias de alongamento próximo a SE-NW. As linhas pontilhadas destacam as zonas de maior interesse e serão discutidas a seguir.

**Figura 48 – Modelo pseudo-3D preliminar de resistividade gerado por krigagem.**

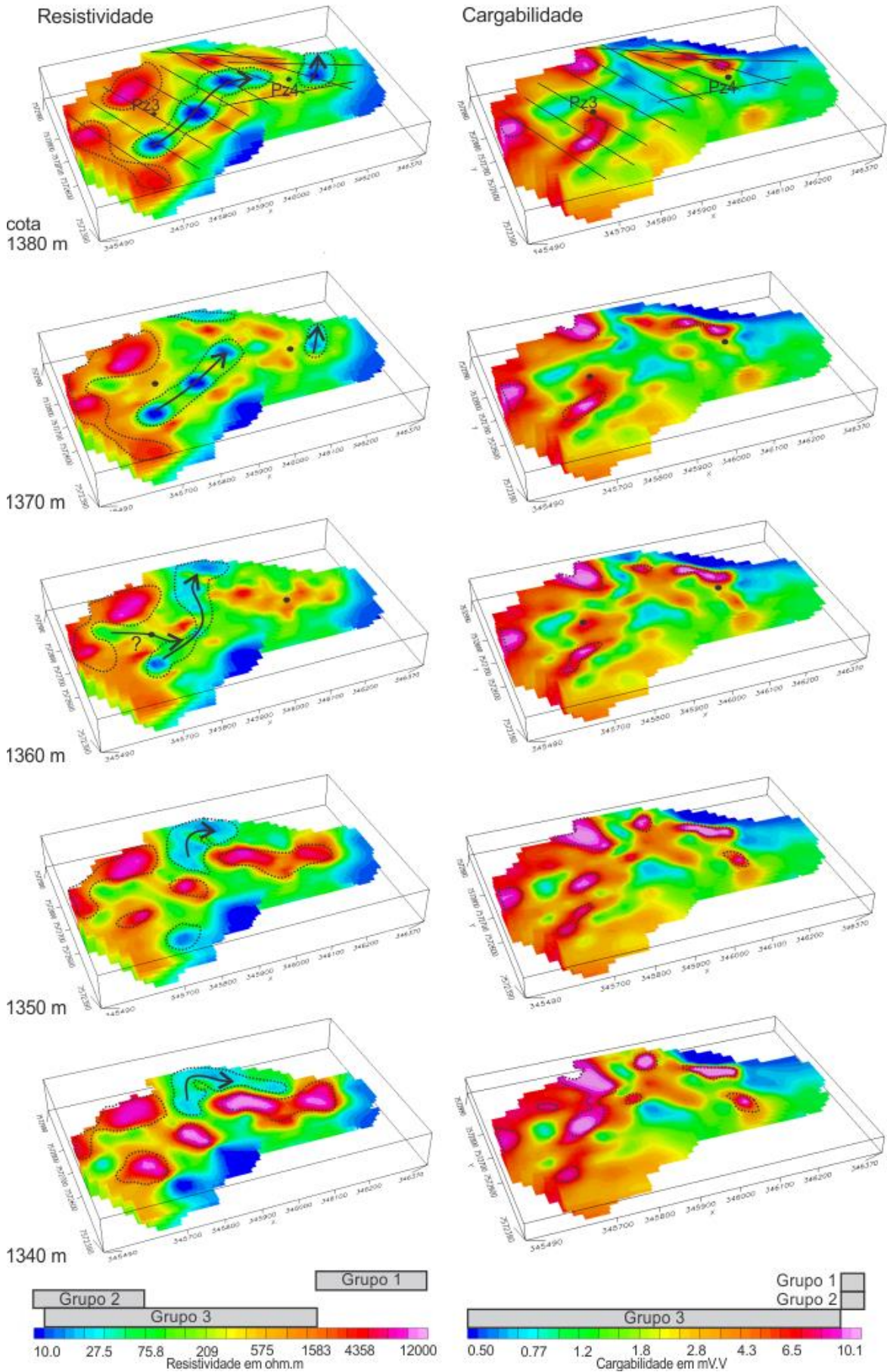


**Figura 49 - Modelo pseudo-3D preliminar de cargabilidade gerado por krigagem.**

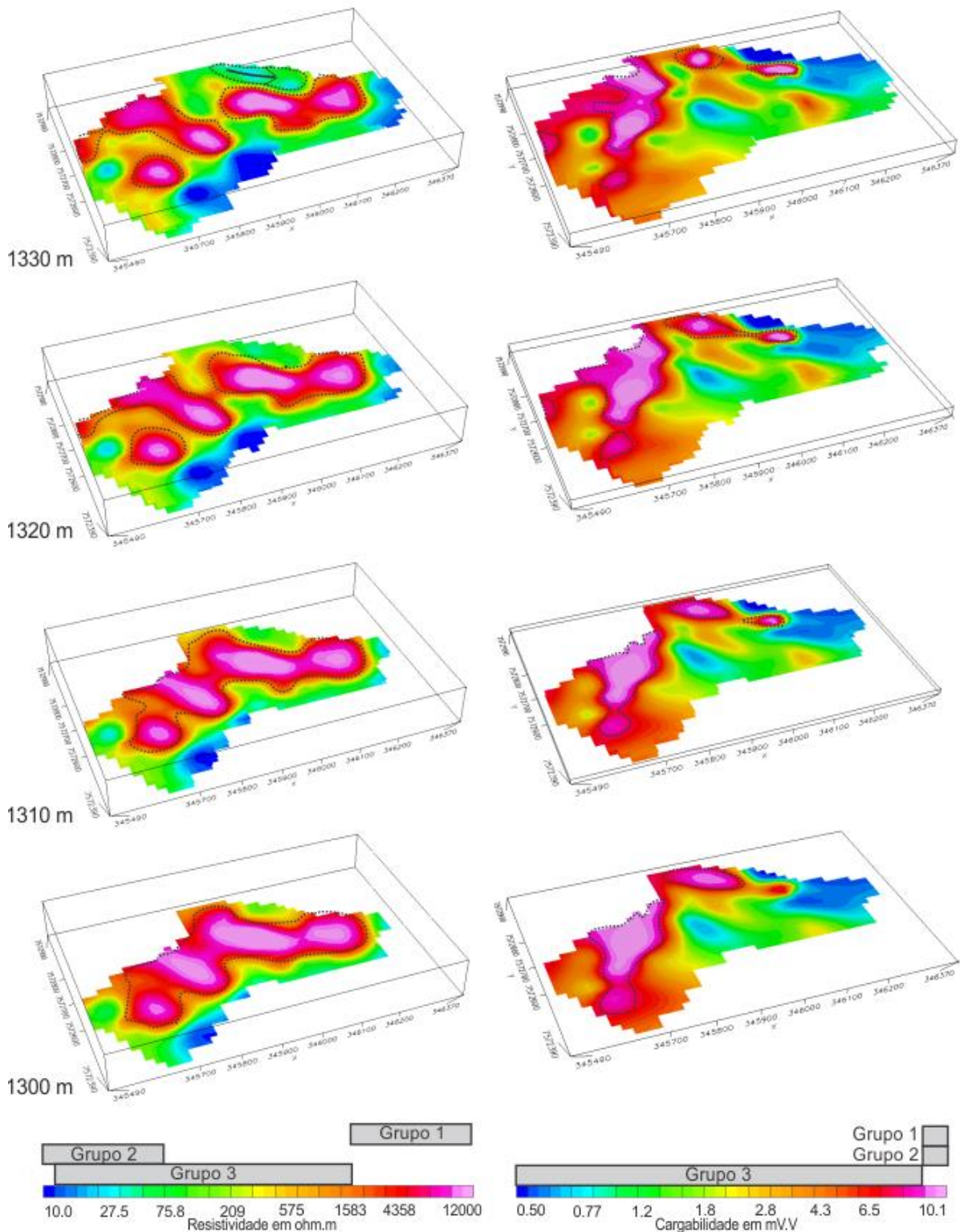


Com as seções interpoladas em modelos pseudo-3D, foi possível a visualização das referidas anomalias tanto na extensão na área da BF-04 quanto no embasamento rochoso. Os dados revelam que as anomalias de alta resistividade ( $>1583 \Omega.m$ ) e cargabilidade ( $<10,1 \text{ mV/V}$ ) aumentam significativamente em função da profundidade, uma vez que os níveis inferiores retratam o embasamento cristalino de rochas menos alteradas (Figuras 50 e 51). Em várias porções do embasamento a ocorrência de sulfetos é definida pelos valores mais altos de cargabilidade, com destaque para o canto NW do modelo. Nessa área, a pouca espessura do estéril possibilita o aparecimento das referidas anomalias resistivas já nos primeiros níveis de visualização.

Figura 50 - Modelos pseudo-3D com diferentes níveis de visualização em profundidade com a indicação dos piezômetros instalados no local e o fluxo hidrogeológico.



**Figura 51 - Modelos pseudo-3D com diferentes níveis de visualização em profundidade com a indicação dos piezômetros instalados no local e o fluxo hidrogeológico.**



As anomalias de baixa resistividade, por outro lado, formaram um prolongamento na área do BF-04 que pode ser visto principalmente nos primeiros 5 níveis de visualização, com destaque para o fluxo hidrogeológico raso indicado nas cotas 1380 e 1360 metros. Essa

característica poderia ser entendida como um aquífero raso salino, com sentido de fluxo para NE na direção da BNF.

Com o aumento da profundidade, as anomalias de baixa resistividade ficaram significativamente maiores próximas ao talude principal (extremidade NE do modelo). O destaque nesse caso são as anomalias observadas nas cotas 1360, 1350 e 1340 metros, justamente na proximidade do canal do Córrego da Consulta, fato este que corrobora a teoria de infiltração das águas desse corpo hídrico no sistema aquífero da BF-04. Abaixo da cota 1330 m a anomalia de baixa resistividade da água subterrânea salina é substituída por uma zona de alta resistividade do embasamento até seu quase desaparecimento, com exceção das zonas de baixa resistividade das bordas sul e leste dos modelos que não estão delimitadas pelas linhas pontilhadas. Essas zonas dignas de menção foram interpoladas com base em anomalias pontuais nas extremidades de alguns dos modelos de inversão e assumidas como efeitos de borda. Uma análise mais profunda acerca de sua morfologia, continuidade lateral e demais características necessitaria de aquisições complementares.

No que tange às regiões de reação química e geração de DAM, é fundamental a delimitação de zonas de alta cargabilidade no interior da BF-04 associadas aos fluxos da água subterrânea, conforme as características definidas para o grupo 2. Foram destacadas várias porções de elevada cargabilidade ( $>10,1$  mV/V), a começar pelos níveis mais rasos da BF-04 e que certamente desempenham um papel mais relevante na oxidação da pirita e o desencadeamento do ciclo de geração da contaminação local. A comparação entre os dois modelos na cota superficial, por exemplo, possibilita a identificação dessas regiões em que é presente a associação de corpos de baixa resistividade com porções de alta cargabilidade.

Outras associações relevantes foram observadas nas cotas 1350 e 1340 m com regiões sulfetadas próximas ao talude do BF-04 e relacionadas às águas geradas na provável infiltração originada no canal. Na comparação com os dados químicos dos dois piezômetros indicados na Figura 34, as amostras mais ácidas e salinas foram relacionadas ao Pz3, enquanto que no Pz4 o pH se aproximou da neutralidade (6,59) com concentração de sulfato e condutividade elétrica significativamente menores, 16,4 mg/L e 158  $\mu$ S/cm, respectivamente. Em ambos os casos os poços não estavam relacionados diretamente à anomalias mais intensas que denotem níveis mais altos de contaminação. Entretanto, é possível que exista algum fluxo subordinado de água ácida e não contemplado pela resolução de aquisição. O mais provável é que o suposto caminho preferencial possua origem na anomalia de baixa resistividade

observada na Seção 1 com cruzamento no piezômetro 3 e continuidade até a sua interceptação com o fluxo hidrogeológico principal, segundo o nível 1360 m.

Outra ferramenta de visualização 3D com aplicabilidade na identificação dessas zonas reativas é baseada na geração de modelos de isosuperfície. Nesse caso foram representadas superfícies de valores específicos,  $\leq 20 \Omega.m$  e  $\geq 9 mV/V$  para resistividade e cargabilidade, respectivamente (Figs. 52 e 53). As anomalias de baixa resistividade descritas foram identificadas pelos semi-esferoides alinhados no centro do modelo em baixas profundidades e também pelas zonas alongadas próximas ao canal do Córrego Consulta. As grandes zonas de alta cargabilidade relacionadas ao embasamento perfizeram o corpo de maior volume do modelo, enquanto que outras zonas do mesmo tipo foram identificadas próximas ao talude principal da BF-04. Estas últimas são de maior importância, uma vez que denotam a existência de núcleos sulfetados no interior da pilha, conforme já mencionado.

A combinação das duas isosuperfícies das Figuras 52 e 53 geraram um modelo onde foi possível a indicação das zonas mais críticas ao desenvolvimento da DAM na BF-04, objetivo principal deste modelo computacional (Fig. 54). Esses núcleos de reação foram destacados pelas linhas tracejadas e denominados de A, B e C.

A localização da Zona A é um fator de agravamento da contaminação, posicionada no início do principal fluxo raso da água subterrânea. Com a geração do efluente ácido e salino ocorre propagação sentido NE com a interceptação desse fluxo com outros núcleos sulfetados. Com base em suas características, a Zona A foi reconhecida como o mais claro e significativo exemplo do Grupo 2 (ver tabela 5), além de ser um dos pontos mais críticos na oxidação dos minerais sulfetados presentes no estéril e consequente geração dos efluentes de baixo pH e altas concentrações de sais e metais.

Do mesmo modo, a Zona B é localizada numa região de grande interesse, pois está relacionada à área próxima ao canal do Córrego Consulta, onde também existe a conjuntura de fatores na geração da DAM: infiltração de água do canal e presença de zonas sulfetadas. A isosuperfície (resistividade), neste caso, mostra uma estrutura com origem próxima ao referido canal e alongamento na direção da base da BF-04, próximo à bacia BNF.

A Zona C indica um significativo núcleo de reação próximo ao talude principal e à região de afloramento da água subterrânea. A importância dada à referida zona é baseada na proximidade dessa anomalia de alta cargabilidade com o talude principal da BF-04. Essa posição pode garantir uma maior exposição desses sulfetos à circulação do ar na extremidade da BF-04.



Figura 52 - Modelos pseudo-3D de isovalores para resistividade. A cor azul valor de resistividade de  $<20 \Omega.m$ . O mapa de base corresponde a última cota do modelo multinível.

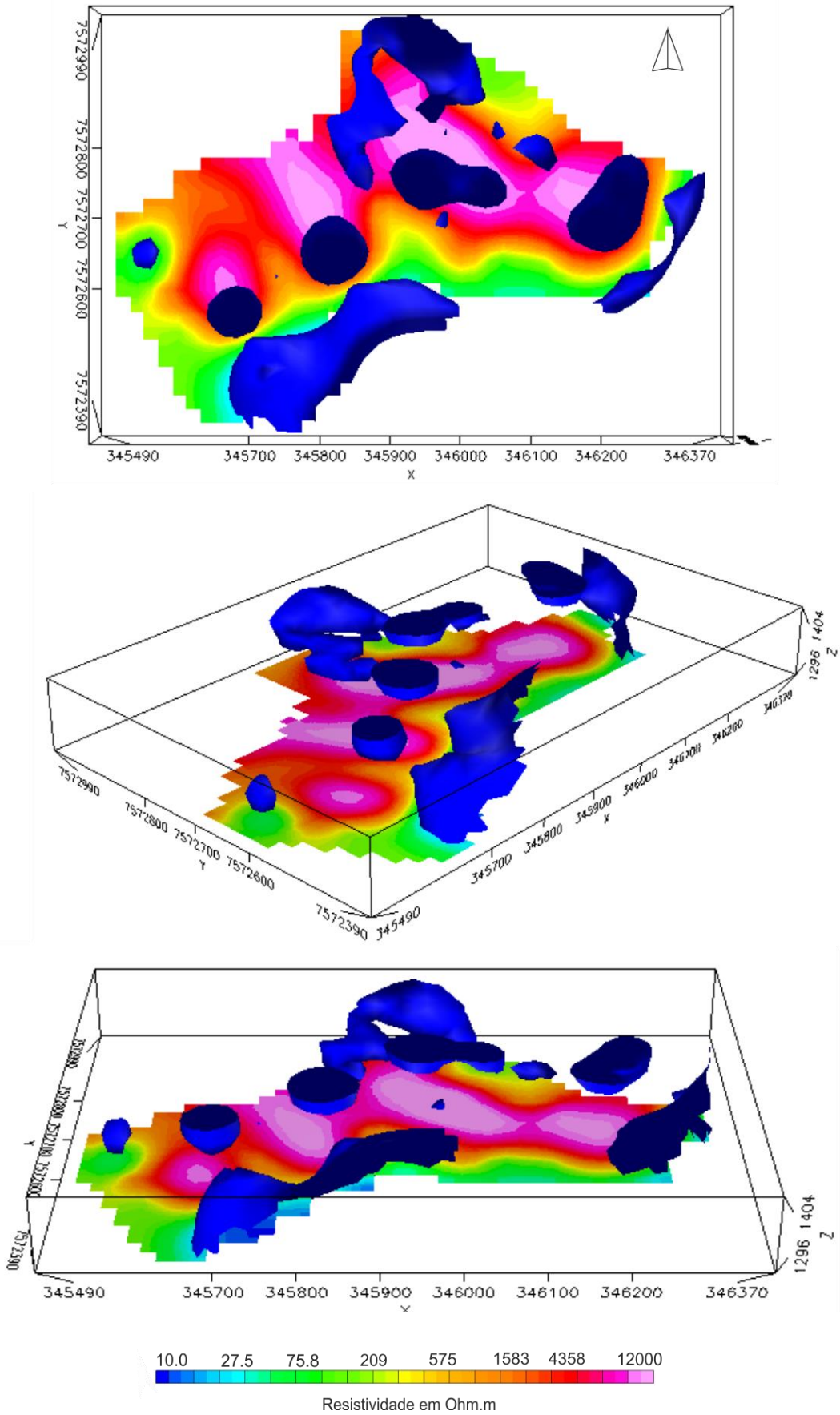


Figura 53 - Modelos pseudo-3D de isovalores para cargabilidade. A cor rosa representa cargabilidade da ordem de  $>9$  mV/. O mapa de base corresponde a ultima cota do modelo multinível.

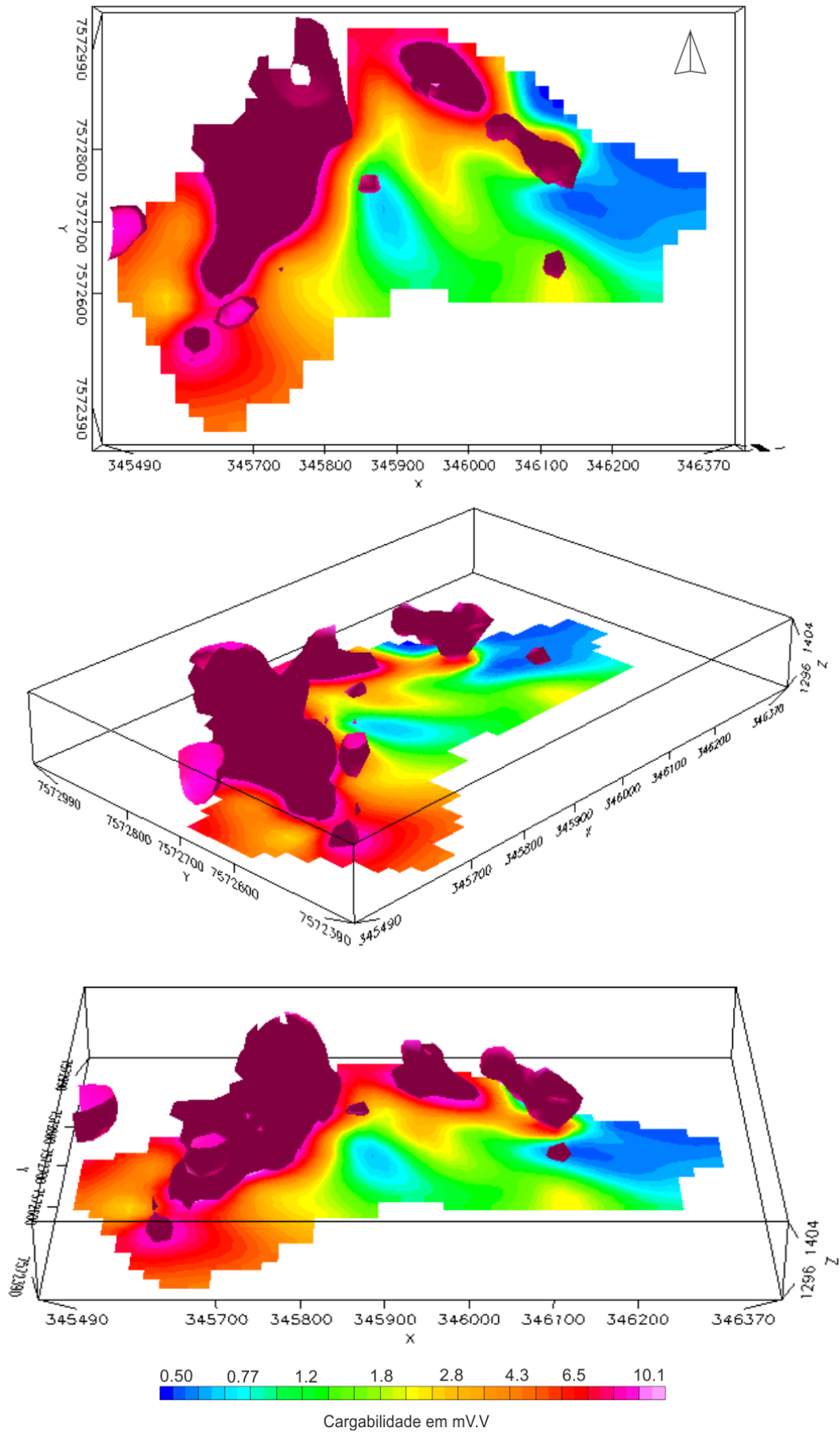
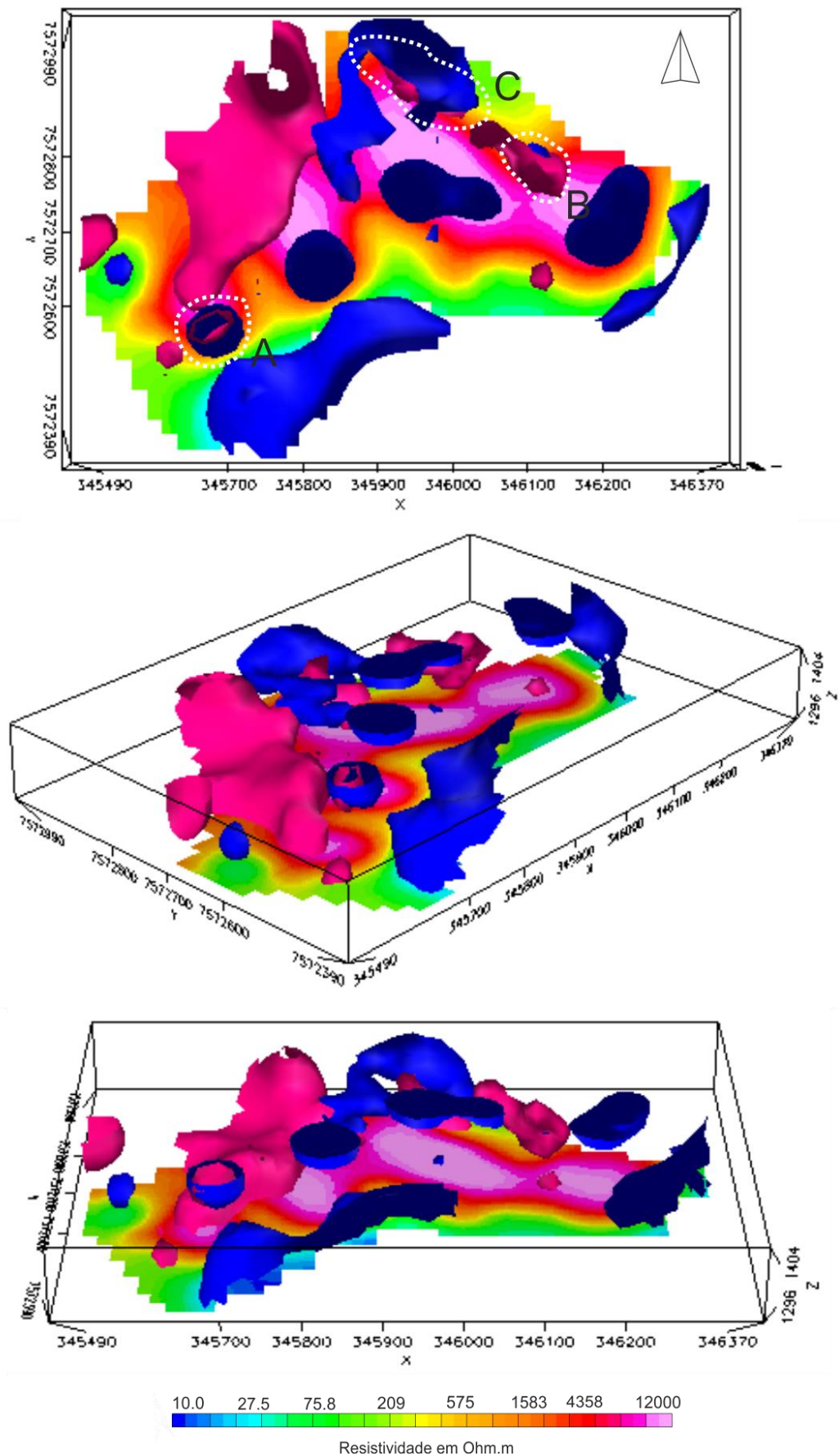


Figura 54 - Modelos pseudo-3D de isovalores conjugados. A cor rosa representa cargabilidade da ordem de  $>9$  mV/V e a azul valor de resistividade de  $<20$   $\Omega$ .m. O mapa de base correspondem à ultima cota do modelo multinível referente à resistividade e as áreas pontilhadas A, B e C as porções mais críticas de geração e mobilização da contaminação.



## 10. CONCLUSÕES

Os resultados geofísicos foram satisfatórios no estudo da dinâmica de drenagem ácida de mina em pilha de estéril, além do reconhecimento de núcleos sulfetados reliquiais. A análise foi possível baseado no contraste de propriedades elétricas por meio dos métodos da Eletroresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP), onde foi possível diferenciar zonas com drenagem ácida (abaixo de 50  $\Omega$ .m) e água subterrânea não contaminada, além de elevada cargabilidade em zonas sulfetadas (acima de 10 mV/V), cujas correlações permitiram compreender o processo de geração do contaminante.

Os resultados obtidos demonstraram a complexidade de fluxo neste sistema aquífero granular artificial, condicionado pela heterogeneidade granulométrica, litológica e de compactação dos materiais. Foram observados fluxos subterrâneos nos mais variados níveis de profundidade, o que inclui regiões próximas ao canal do Córrego Consulta, onde foi constatada uma provável e significativa contribuição dessas águas superficiais por meio de infiltrações para o interior da BF-04. Contudo, a água pluvial é provavelmente a maior fonte de contribuição para o interior da pilha de estéril, evidenciado pela origem rasa de fluxos principais, que seguem para maiores profundidades sentido a bacia BNF. Com base nisso, foi possível concluir que a falta e falhas de impermeabilização do canal e do topo da pilha são os principais fatores desencadeadores da contaminação local, pois permitem a percolação de água no sistema e a consequente geração do contaminante.

Por conta da resolução dos dados geofísicos, condicionado pelo espaçamento de 10 m entre eletrodos, é provável que ocorram fluxos subterrâneos subordinados de menores proporções que não foram visíveis nos modelos de inversão 2D e 3D. Essa hipótese foi levantada com base na análise da água contaminada coletada no piezômetro 3 (Pz3), situado entre anomalias de baixa resistividade. Entretanto, a inexistência de uma base de dados mais recentes de análises químicas impossibilitou uma melhor correlação entre o modelo geofísico proposto com dados diretos de qualidade da água no poço de monitoramento/piezômetro.

A indicação dos núcleos principais de geração de drenagem ácida possibilitará ações de planejamento e de recuperação de forma mais direta sobre essas áreas críticas, seja através de medidas de remoção pontual desse material mais reativo ou de técnicas de remediação *in situ*, o que incluiria o impedimento da oxidação das zonas sulfetadas por impermeabilização. O tempo de residência da água pluvial no sistema hidrogeológico da BF-04 indica que qualquer ação de remediação local mostraria resultados após um período de até três meses.

A pirita ainda presente de forma disseminada no material estéril pode ser um foco contínuo de geração de DAM em menores proporções, mas ainda por muitas décadas. Contudo, vale ressaltar que ações de remediação dos principais núcleos reativos devem reduzir drasticamente a geração de DAM, cuja eliminação ou isolamento poderá garantir um efluente com salinidade e pH mais próximos de níveis aceitáveis definidos em legislação, com consequente redução nos custos de tratamento ou até lançamento direto das águas em drenagens locais, capazes de incorporar e diluir essas águas sem prejuízo ao meio natural.

Este estudo gerou dados inéditos e valiosos para as Indústrias Nucleares do Brasil – INB para a tomada de ações que tornem a geração de DAM bastante restrita e com características químicas próximas dos padrões naturais, algo bastante desejável em processos de descomissionamento de empreendimentos mineiros. Os procedimentos e métodos utilizados neste estudo poderão ser replicados em outras minerações com rejeitos sulfetados sob efeito da drenagem ácida de mina.

## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELOUAS, A. Uranium mill tailings: geochemistry, mineralogy, and environmental impact. *Elements*, v. 2, p. 335-341, 2006.

ABEM. Terrameter LS – Instruction manual. ABEM Instrument AB, Sundbyberg, 122 p. 2012.

ABREU, A. T. *Ensaio cinéticos para previsão e prevenção de drenagem ácida: estudo de caso das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), Caldas, MG*. 2012, 245 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Ouro preto, 2012.

AKCIL, A., KOLDAS, S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, n. 12, p.1139-1145, 2006.

ALBERTI, H. L. et al. Characterization of  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  present in  $\text{SO}_4$  in the groundwater in an attempt to identify the processes of oxidation/reduction by sulfur-reducing bacteria at Osamu Utsumi – uranium mine. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE – INAC, 7. São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABEM, 2015, p. 9.

ALBERTI, H. L. C. *Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio – Osamu Utsumi, Planalto de Poços de Caldas (MG)*. 2017, 194 p. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

ALMEIDA, S.K. *Deteção de bactérias redutoras de sulfato em efluente e sedimento de mina de urânio*. 2005, 91 p. Dissertação de Mestrado – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte, 2005.

ANTERRIEU, O.; CHOUTEAU, M.; AUBERTIN, M. Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. *Bull. Eng. Geol. Environ*, n. 69, p. 533–548, 2010.

AUBERTIN, M. et al. Evaluation of the hydrogeological and geochemical behaviour of waste rock piles (in French). In: SYMPOSIUM CIM ROUYN-NORANDA: ENVIRONMENT AND MINES, 1., 2005. Rouyn-Noranda, *Anais...* Rouyn-Noranda: CIM, 2005, p 39.

BANIA, G.; CWIKLIK, M. 2D Electrical Resistivity Tomography interpretation ambiguity – example of field studies supported with analogue and numerical modelling. *Geology, Geophysics & Environment*. v. 39, n. 4. p.331-339. 2013.

BARRETO, R.P. *Difusão e adsorção de Al, Fe, Mn e F por um solo laterítico visando a aplicação como barreira impermeabilizante para bacia de captação da drenagem ácida gerada pela pilha de estéril 4 da UTM-Caldas*. 2011, 236 p. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, 2011.

BIONDI, J.C. *Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros*. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

BLOWES, D. W. The Environmental Effects of Mine Wastes. In: PROCEEDINGS OF EXPLORATION 97: FOURTH DECENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINERAL EXPLORATION, 4. 1997, Toronto. *Anais...* Toronto: Prospectors and Developers Associaton, 1997, p. 887–892.

BONOTTO, D.M. Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani. São Paulo: Editora UNESP, 2004. 251 p.

BRAGA, A. C. O. *Métodos geoeletricos em hidrogeologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 159 p.

BRODA, S. et al. Improving control of contamination from waste rock piles. *Environmental Geotechnics. Journal of Environmental Geotechnics*, v. 4, p. 1-10, 2015.

BUETTNER, M. . Electrical resistance tomography of unsaturated flow and transport in Yucca Mountain. In: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 1. 1999, Oakland. *Anais...* Oakland: SAGEEP, 1998, p. 341-347

CAMPBELL, D.L.; HORTON, R.J.; BEANLAND, S. Geoelectrical laboratory measurements of materials from the May Day Mine dump, southwestern Colorado: *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 00-382, 26 p., 2000.

CAMPBELL, D.L.; FITTERMAN, D.V., 2000. Geoelectrical methods for investigating mine dumps. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE, 5., 2000, Denver. *Anais...* Denver: ICARD, 2000, p. 1513-1523.

CAMPBELL, D.L.; BEANLAND, S. Spectral induced polarization measurements at the Carlisle mine dump, New Mexico: *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 01-363, 11 p, 2001.

CAMPANER, V. P.; SILVA, W. L. Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão. *Quim. Nova*, vol. 32, No. 1, p. 146-152, 2009

CAMPOS, D. et al. Using geophysical methods to image the internal structure of mine waste rock piles. In: 9th EAGE/EEGS Meeting. 9., 2003, Praga. *Anais...*, Prague: EAGE. 2003, p. 4.

CAMPOS, M.B.C. et al. Environmental assessment of water from a uranium mine (Caldas, Minas Gerais State, Brazil) in a decommissioning operation. *Environ Earth Sci* v. 62, p. 857–863, 2011.

CAPOVILLA, M. M. G. M. Urânio nos hidrotermais potássicos (“rocha potássica”) da mina Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG. 2001, 149 p. Tese de doutorado –Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, São Paulo, SP, 2001.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V.E. Drought in Brazil during Summer and Fall 2001 and associated atmospheric circulation features. *Climanálise*, ano 2, n. 1, p. 1-10, 2002.

CETESB (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO). Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. 2 ed. São Paulo: CETESB, 2001.

CETESB (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO). *Poluição das águas subterrâneas*, 2016. Disponível em:

<<http://aguassubterraneas.cetesb.sp.gov.br/poluicao-das-aguas-subterraneas/>>. Acesso em: 15 de Set. de 2016.

CHULA, A.M.D.; BRITO, W. Caracterização Mineralógica/Petrográfica de Rochas Alcalinas de Poços de Caldas – MG. Poços de Caldas: *Relatório CDTN/CNEN*, 27 p., 1999.

CIPRIANI, M. *Mitigação dos Impactos Sociais e Ambientais Decorrentes do Fechamento Definitivo de Minas de Urânio*. 2002, 332 p. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas - Instituto de Geociências, Campinas, 2002.

CRUZ, W.B.; PEIXOTO, C.A.M. A Evolução química das águas subterrâneas de Poços de Caldas – MG. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, cap. 1, p. 23-33, 1991.

CORSEUIL, H. X.; MARINS, M. M. Contaminação de águas subterrâneas por derramamento de gasolina: o problema é grave? *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v.2, n.2, p.50-54, 1997.

DAHLKAMP, F. J. Uranium Deposits of the World - USA and Latin America. Berlin: *Springer*. 692 p., 2010.

DEVOS, K.J.; PEHME, P.; GREENHOUSE, J. P. 1997. Ground geophysical surveys for mine wastes. In: Proceedings of Exploration '97, Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration. 4., 1997. *Anais...* Toronto: Prospectors and Developers Association of Canada, 1997, p. 917-916.

DERBY, O. A. On nepheline rocks in Brasil, with special reference to the association of phonolite and foyaite, *Quart. Jour. Geol. Soc.*, v. 43, pp. 457-473, 1887.

ELLERT, R. Contribuição à geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. São Paulo: Boletim Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo - USP, v.237, n. 18, p. 5-63, 1959.

FAGUNDES, J.R.T. *Balanço hídrico do bota – fora BF4 da mina Osamu Utsumi, INB, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida*. 2005, 121 p. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2005.

FAGUNDES, J. R. T.; LEITE, A. L.; FERRAZ DE MELLO, E.; GOMES, R. C. Balanço Hídrico do Bota-fora BF4 da Mina de Urânio Osamu Utsumi, como Subsídio para Projetos de Remediação de Drenagem Ácida. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, n.1, p.19-28, 2008.

FERNANDES, H. M.; FRANKLIN, M. R.; VEIGA, L. H. Acid rock drainage and environmental impacts. A study case of the Uranium mining and milling facilities at Poços de Caldas. *Waste Management*, vol. 18, p. 169-181. 1998.



FERNANDES, H. M.; FRANKLIN, M. R. Remediation of acid rock drainage at the poços de caldas uranium mining site – Brazil. In: INTERNATIONAL MINE WATER ASSOCIATION SYMPOSIUM, 2001, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: IMWA, 2001, 8 p.

FERRARI, C.R. *Avaliação de efeitos ambientais de efluentes radioativos de mineração de urânio sobre as características físicas, químicas e diversidade da Comunidade Zooplancônica na Unidade de Tratamento de Minérios, Represa das Antas e Represa Bortolan, Poços de Caldas (MG)*. 2010, 132 p. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo – Instituto Butantan – IPT. São Paulo, 2010.

FILHO, C.A.C. *Avaliação da qualidade das águas superficiais no entorno das instalações minero-industriais de urânio de Caldas*. 2014, 341 p. Tese de Doutorado – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte, 2014.

FRANKEL, M. O et al. Jazida de urânio no planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais. In: DNPM. *Principais depósitos minerais do Brasil – Recursos Minerais Energéticos*. Brasília - DF, 1, cap.5, 1985, p. 89-103.

FRANKLIN, M.R. *Modelagem numérica do escoamento hidrológico e dos processos geoquímicos aplicados à previsão da drenagem ácida em uma pilha de estéril da mina de urânio de Poços de Caldas – MG*. 2007, 337 p. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

GEOMOTO SOFTWARE. RES2DINV, version 3.53, Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-square method - Geoelectrical Imaging 2-D & 3D, Geotomo Software, Penang, Malaysia, 129 f. 2003.

GONÇALVES, C. R. *Remoção de manganês e recuperação de urânio presentes em águas ácidas de mina*. 2006, 75 p. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2006.

GRAY, N. F. 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology*, v. 30, p. 62–71, 1997.

GRIFFITHS, D. H.; BAKER, R. D. Two-dimensional resistivity imaging and Modeling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, v. 29, p. 211-226, 1993.

GUERZONI, H. T. G. *Reactive transport model of acid drainage generation in a waste rock pile at osamu utsumi mine (Brazil)*. 2013, 79 p. Dissertação de Mestrado, Applied Environmental Geosciences, Universität Tübingen, Tübingen, 2013.

GYENES, G.; SZABÓ, L. B. Geophysical mapping of the Rudabánya mine waste rock piles and Hámor lake. *Geosciences and Engineering*, v. 1, n. 2, p. 63–68, 2012.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009 vol 4.

- HOLMES, D. C.; PITTY, A. E.; NOY, D. J. Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera analogue study sites. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 45, p. 215-247, 1992.
- INAP - The International Network for Acid Prevention. *The Global Acid Rock Drainage Guide – Gard Guide*. 2012. Disponível em: <<http://www.gardguide.com>>. Acesso em 10 jun. 2018
- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL S.A. – INB. *Relatório das Condições atuais do CIPC – Administração e Operação*. Relatório Interno. Gerência Geral de Engenharia Mineral, Gerência de Meio ambiente e Qualidade, Poços de Caldas, MG, 1996.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT, 1984, Considerações sobre a evolução do bota-fora 4. Relatório no 50, São Paulo, 38p.
- KEAREY, P; BROOKS, M; HILL, I. *An introduction to Geophysical exploration*. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. 1º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 429 p.
- KNODEL, K.; LANGE, G.; VOIFT, H.-J. *Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies*. Germany: Springer, 2007, 1357 p.
- KORNEEVA, T. et al. A geochemical and geophysical characterization of acid drainage and sulfide tailings at karabash mine site (South Ural, Russia). *International Journal of Advances in Science, Engineering and Technology*, v. 4, p. 114-120, 2016.
- KING, A. R.; HYNES, T. Applications of geophysical methods for monitoring acid mine drainage. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE IN THE ABATEMENT OF ACIDIC DRAINAGE, 3., 1994, Pittsburg. *Anais...*, Pittsburg: ICAAD, 1994, p. 317-325.
- KLEINMAN, R., At-source control of acid mine drainage. *International Journal of Mine Water*, v. 9 (1-4), p.85-96, 1990.
- LANDIM, P.M.B. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: Editora UNESP , 1998, 226 p.
- LEITE, J. S. M. *Previsão de drenagem ácida por meio de testes estáticos do material do bota fora da mina de Osamu Utsumi – Caldas, MG*. 2010, 59 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia, Ouro Preto, 2010.
- LIMA, P. *Recuperação de urânio e de terras raras do resíduo gerado no tratamento de águas ácidas*. 2014, 77 p. Dissertação de mestrado - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2014.
- LOKE, M. H.; BAKER, R. D., Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, v. 44, p. 131-152, 1996.
- LOKE, M. H. A. *Practical guide 2-D and 3-D surveys*. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, 2010. 136 p.

LOWRIE, W. *Fundamentals of Geophysics*. Segunda edição. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 381 p.

MAGNO JÚNIOR, L. B.. *Osamu Utsumi Mine, Geologic Presentation*. In: Relatório interno NUCLEBRÁS. Rio de Janeiro, RJ, 1985.

MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, v. 106, p. 3144, 2015.

MELLO, J.W.V.; DUARTE, H. A.; LADEIRA, A. C. Q. *Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina*. 2014. Cadernos temáticos de Química Nova. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/08/0-CTN4.pdf>> Acesso em 12 de jun. de 2018.

MENTE, A; MONTALVERNE, A.F., 1981. Mapa hidrogeológico do Brasil na escala 1:2.500.000. In: *Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, 4., 1981, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: ABRH, 1981. V.1, p. 597-610.

MENTE, A. J. *Análise das informações sobre recursos hídricos subterrâneos no país*. Relatório técnico 015, jun. 2009. Projeto de assistência técnica ao setor de energia. Mente, Albert. J. Mendo Consultoria. Ministério de Minas e Energia e Banco Mundial. Disponível em:[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256660/P07\\_RT15\\_Analise\\_das\\_Informacoes\\_sobre\\_Recurso\\_Hidricos\\_Subterraneos\\_no\\_Pais.pdf/59673539-b83b-469b-b874-493991ccbb6e](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256660/P07_RT15_Analise_das_Informacoes_sobre_Recurso_Hidricos_Subterraneos_no_Pais.pdf/59673539-b83b-469b-b874-493991ccbb6e). Acesso em: 15 de junho 2016.

MERKEL, R. H. The use of resistivity to delineate acid mine drainage in ground water. *Ground Water*, vol. 10, n. 5, p. 38-42, 1972.

MIEKELEY, N. et al. Natural series radionuclide and rare earth element geochemistry of waters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil. Estocolmo, *Skb Technical Report*, 81 p., 1991.

MIEKELEY, N.; LINSALATA; OSMOND, J. K. Uranium and thorium isotopes in groundwaters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro natural analogue sites, Poços de Caldas, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 45, p. 345 – 363, 1992.

MIEKELEY, N. et al. Chemical and physical characterization of suspended particles and colloids in waters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 45, p. 409-437, 1992.

MILSON, J. *Field Geophysics*. Wiley, England, 232 p., 2003.

MINARDI, P. S. P.; AUN, P. E.; PINTO, G. G. Estudos de fluxos subterrâneos na bacia de rejeitos do CIPC com traçadores naturais e artificiais. Relatório Interno. Poços de Caldas: *Indústrias Nucleares do Brasil SA*, 83 p., 1982.

MIYASAKI, G. S. *Plano de recuperação de áreas degradadas – PRAD*, RT-006\_099-515-3023\_01-J. Parecer Técnico DIFOR número 01/14, 2014

MORAES, F. T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Fisiografia da região do planalto de Poços de Caldas, MG/SP. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, n. 1, p. 196-208, 2008.

MOREIRA, C. A.; DOURADO, J. C.; BRAGA, A. C. O. Aplicação da técnica de caminamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 1-10, 2006.

MOREIRA, C. A., LAPOLA, M. M., CARRARA, A. Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer. *Geofísica Internacional*, vol. 55, 2, p. 119 – 129, 2016.

MORIN A. K., HUTT N. M. Kinetic tests and risk assessment for ARD. In: 5th ANNUAL BC METAL LEACHING AND ARD WORKSHOP. Vancouver, *Anais...* Vancouver: KTRAARD, 1998, p 1-10.

MURTA, F.C. *Ensaio de colunas para a avaliação de remediação passiva de Drenagem Ácida na mina Osamu Utsumi (INB), Caldas/MG*. 2006, 130 f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, 2006.

MURTA, F. C.; LEITE, A. L.; MOTA DE LIMA, H. Estudos cinéticos de sistemas de coberturas alcalinas em pilha de estéril para a prevenção de drenagem ácida de mina. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, n. 2, p. 227-236, 2008.

MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. *Looking into the earth: an introduction to geological geophysics*. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2000, 470 p.

NANCUCHEO, I.; BITENCOURT, J. A. P.; SAHOO, P. K.; ALVES, J. O.; SIQUEIRA, J. O.; OLIVEIRA, G. Recent developments for remediating acidic mine waters using sulfidogenic bacteria. *Biomed. Res. Int.* 2017: 1–17. 2017.

NASCIMENTO, M. R. L., Remoção e recuperação de urânio de águas ácidas de mina por resina de troca iônica. 1998, 93 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São Carlos, 1998.

NÓBREGA, F.A.; LIMA, H.M.; LEITE, A.L. Análise de múltiplas variáveis no fechamento de mina - Estudo de caso da pilha de estéril BF-4, Mina Osamu Utsumi, INB Caldas, Minas Gerais. Ouro Preto, *Revista Escola de Minas*, v. 61, n. 2, p. 197-202, 2008.

NORDSTROM, D. K.; SMELLIE, J. A. T.; WOLF, M. Chemical and isotopic composition of groundwaters and their seasonal variability at the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil. Estocolmo, *Skb Technical Report*, 81 p., 1990.

NORDSTROM, D. K. et al. Ground water chemistry and geochemical modeling of water-rock interactions at the Osamu Utsumi mine and the Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 45, p. 249-287, 1992.

OLIVEIRA, A. P. *Estimativa Simultânea de Parâmetros Hidráulicos e de Transporte em Estéreis de Mineração de Urânio*. 2010, 163 p. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2010.

OLIVEIRA, N. E C. Método de polarização induzida em zona sulfetada com mineralização de ouro, na região de Várzea Grande – MT. In: XV SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, AVANÇOS NA GEOLOGIA DO BRASIL CENTRAL, 15, 2017, Goiânia. *Anais...* Goiânia: SGCO, 2017, 5 p.

PASTORE, E. L.; MIOTO, J. A. Impactos ambientais em mineração com ênfase à Drenagem Mineira Ácida e transporte de contaminantes. *Solos e Rochas*, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 33-56, 2000.

PATERSON, N.; STANTON-GRAY, R. Application of remote sensing and geophysics to the detection and monitoring of acid mine drainage. MEND Project 4.6.3, CANMET Library, 562 Booth Street, Ottawa, Ontario, 1994.

PEREIRA, W.S. et al. Release of Uranium by an Ore Treatment Unit at Caldas, MG, Brazil. *Journal of Environmental Protection*, v. 4, p. 570-574, 2013.

PEREIRA, W.S. et al. Análise de agrupamento na avaliação do comportamento de elementos químicos estáveis e parâmetros físico-químicos em efluente de mineração de urânio. In: IX LATIN AMERICAN IRPA REGIONAL CONGRESS ON RADIATION PROTECTION AND SAFETY - IRPA. 9., 2013. Rio de Janeiro, *Anais...* Rio de Janeiro: IRPA, 2013.

PICHTEL, J. R.; DICK, W. A. Sulfur, iron and solid phase transformations during biological oxidation of pyritic mine spoil. *Solid Biology & Biochemistry*, v. 23, p. 101-107, 1991.

POISSON, J.; CHOUTEAU, M.; AUBERTIN, M. CAMPOS, D. Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile. *Journal of Applied Geophysics*, v. 67, p. 179–192, 2009.

POZO-ANTONIO, S. et al. Techniques to correct and prevent acid mine drainage: A review. *Dyna*, v. 81, n.184, p. 73-80. 2014.

POWER, C.; TSOURLLOS, P.; RAMASAMY, M.; NIVORLIS, A.; MKANDAWIRE, M. Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada. *Journal of Applied Geophysics*, 150, 40-51.

PRADO, V. C. S. *O Impacto da Produção de Concentrado de Urânio sobre a Qualidade da Água dos Rios - Um estudo de Caso na Área do Complexo Mineiro Industrial do Planalto de Poços de Caldas*. 1994, 195p. Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia - Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1994.

RODGHER, S. et al. Evaluation of surface water quality in aquatic bodies under the influence of uranium mining (MG, Brazil). *Environ. Monit. Assess*, 12 p., 2012.

RODRIGUES, J. A. *Drenagem Ácida do Bota-Fora 4 (Mina de Urânio de Caldas - MG): Aspectos Hidroquímicos e Hidrogeológicos*. 2001, 194p. Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto – MG, 2001.

RONQUI, L.B. *Caracterização limnológica e Avaliação de Efeitos Ambientais causados por Efluentes de Mina de Urânio sobre populações microbianas planctônicas da Represa das Antas, Caldas (M.G.)*. 2008, 133 p. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo – Instituto Butantan – IPT. São Paulo, 2008.

RONQUI, L.B. *Estudo de rede trófica microbiana (protozooplâncton e bacterioplâncton) e aspectos limnoquímicos em lago ácido de mina de urânio (cava da mina Osamu Utsumi), no reservatório das Antas e no reservatório Bortolan, sob influência de efluentes da unidade de tratamento de minério, Caldas, MG*. 2013, 257f. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo – Instituto de Ciências Biomédicas. São Paulo, 2013.

SANCHEZ, L. E. Mineração e meio ambiente. In: *Tendências Tecnológicas Brasil*. Geociências e Tecnologia Mineral, Edition: 1, 2015, p.191-208.

SANTOS, E.A.; LADEIRA, A.C.Q. Leaching of uranium from the Osamu Utsumi mine wastes, INB Caldas, Minas Gerais. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE – INAC, 2009. Rio de Janeiro. *Anais...*Rio de Janeiro: INAC, 2009.

SANTOS, S. F. *Caracterização de ocorrência de cobre por meio de levantamento estrutural e geofísico em faixa de dobramentos na região de Caçapava do Sul (RS)*. 2017, 79 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Paulista Júlio de Mesquita Filho, IGCE, Rio Claro. 2017.

SCHORSCHER, H. D.; SHEA., M.E. The regional geology of the Poços de Caldas alkaline complex: mineralogy and geochemistry of selected nepheline syenites and phonolites. *J. Geochem. Explor.* v. 45, p. 25-51, 1992.

SHEA, M.E. *Isotopic geochemical characterization of selected nepheline syenites and phonolites from the Poços de Caldas alkaline complex, Minas Gerais, Brazil*. Poços de Caldas Report n° 4. In: NAGRA, SKB, UK DOE. Poços de Caldas Project. 1991.

SILVA, A. P. M. DA; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas*. Relatório de Pesquisa. IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, p. 1–46, 2012.

SOUZA, V. P. *Drenagens ácidas do estéril piritoso da mina de urânio de Poços de Caldas: Interpretação e implicações ambientais*. Escola Politécnica, departamento de Engenharia de Minas, USP, São Paulo. 141p, 1995.

SOUZA, A.M; SILVEIRA, C.S; PEREIRA. R.M. Contribuições dos metais provenientes das pilhas de rejeito da mina Osamu Utsumi a drenagens do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais. *Geochimica Brasiliensis*, v. 27, n. 1, p. 63-76, 2013.

TEDESCHI, L. R. *Hidrogeoquímica e hidrologia do reservatório na cava da mina Osamu Utsumi do Complexo Mineiro-Industrial do Planalto de Poços de Caldas, Caldas, MG*. 2005, 234 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental, Ouro Preto, 2005.

THEDESCHI, M. F.; VIEIRA, P. L. N. C. R.; NOMO, T. A. *Projeto fronteiras de Minas Gerais: Folha Caldas/Poços de Caldas, escala 1:100.000*. Universidade Federal de Minas Gerais, 78 p. 2015.

TELFORD, W. M.W.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. *Applied Geophysics*. 2. ed. London: Cambridge University Press, 1990.

ULBRICH, H.H.G.J. *A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP*. 1984, 530 p. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências. São Paulo, 1984.

ULBRICH, H.H.G.J et al. Penecontemporaneous syenitic-phonolitic and basic-ultrabasic-carbonatitic rocks at the Poços de Caldas Alkaline Massif, SE Brazil: geologic and geochronologic evidence. *Rev. Bras. Geociênc.*, vol. 32, n. 1, pag. 15-2, 2002.

VOGELSANG, D. *Environmental Geophysics: A Practical Guide*. Berlin: Springer-Verlag Eds., 1995, p. 173

VAN DAM, R. et al. Near surface geophysics for the structural analysis of a mine rock pile, Northern New Mexico. In: NATIONAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF MINING AND RECLAMATION, 2005, Montavesta. *Anais...* Montavesta: ASMR, 2005.

WUNDERLY, M. D; BLOWES, D. W.; FRIND, E. O; PTACEK, C. J. Sulfide mineral oxidation and subsequent reactive transport of oxidation products in mine tailings impoundments: a numerical model. *Water Resources Research*, vol. 32, n. 10, p. 3173-3187, 1996.

WIJKMANN, L. O. *Caracterização química e radiológica dos estéreis provenientes da mineração de urânio do planalto de Poços de Caldas*. Universidade de São Paulo – USP. 98p, 1998.

WARD, S. H. Resistivity and induced polarization methods. In: Society of Exploration Geophysics. In: *Investigations in Geophysics, Geotechnical and Environmental Geophysics*. v. 1, n. 5, p. 147-198, 1990.

WEST, J. M.; McKINLEY, I. G.; VIALTA, A. Microbiological analysis at the Poços de Caldas natural analogue study sites. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 45, p. 439-449, 1992.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p.

YUVAL, D.; OLDENBURG, W. DC resistivity and IP methods in acid mine drainage problems: results from the Copper Cliff mine tailings impoundments. *Journal of Applied Geophysics*, v. 34, p. 187-198, 1996.