



**PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO  
EM GEOCIÊNCIAS  
E MEIO AMBIENTE**

---

**ESTUDO INTEGRADO DE GEOFÍSICA E  
GEOLOGIA ESTRUTURAL NA IDENTIFICAÇÃO  
DE DRENAGEM ÁCIDA EM MINA DE URÂNIO**

**Pedro Lemos Camarero**

---

Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“Júlio de Mesquita Filho”  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

PEDRO LEMOS CAMARERO

ESTUDO INTEGRADO DE GEOFÍSICA E GEOLOGIA  
ESTRUTURAL NA IDENTIFICAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA EM  
MINA DE URÂNIO

Tese de Doutorado apresentada ao  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
do Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita  
Filho”.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro - SP  
2022

C172e Camarero, Pedro Lemos  
Estudo integrado de geofísica e geologia estrutural na  
identificação de drenagem ácida em mina de urânio /  
Pedro Lemos Camarero. -- Rio Claro, 2022  
139 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista  
(Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio  
Claro  
Orientador: César Augusto Moreira

1. Geofísica. 2. Hidrogeologia. 3. Geologia Ambiental.  
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.

PEDRO LEMOS CAMARERO

ESTUDO INTEGRADO DE GEOFÍSICA E GEOLOGIA  
ESTRUTURAL NA IDENTIFICAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA  
EM MINA DE URÂNIO

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. CESAR AUGUSTO MOREIRA  
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Profa. Dra. CRISTIANE HEREDIA GOMES  
UNIPAMPA / Caçapava do Sul (RS)

Prof. Dr. SERGIO JUNIOR DA SILVA FACHIN  
FAGEO / UFMT/Cuiabá (MT)

Prof. Dr. MARCOS EDUARDO HARTWIG  
CCENS / UFES/Alegre (ES)

Prof. Dr. IGOR MAGALHÃES CLEMENTE  
UNIPAMPA / Caçapava do Sul (RS)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro/SP, 22 de outubro de 2021

*Para Lígia e Gustavo*

## **AGRADECIMENTOS**

Nossa história de vida é moldada por escolhas que fazemos ao longo da nossa jornada, e no fim, o que fica são memórias que carregamos de momentos especiais. Esse trabalho é reflexo de um período muito especial em minha vida. Ao longo de 4 anos e meio foram muitos acontecimentos e grandes memórias. Um trabalho desse porte não se faz sozinho. São muitas pessoas que contribuíram direta e indiretamente. Difícil mencionar todas elas.

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo. Agradeço em segundo lugar a minha família, por todo o suporte, pelos valores e raízes que carrego. A Lígia, por tudo. A Gustavo Camarero por dar outro sentido à minha vida e me ensinar da maneira mais doce, que nada será como antes.

Aos meus amigos da Unifal que tanto me ensinaram nesses últimos anos. Vinicius Antunes, Marcelo Barison, Carolina Del Roveri, Fabiano Cabanas, Beatriz Duz, Daniel Pamplona, Larissa Brasil, Flavio e Rodrigo, Diego Sardinha, Maurielen, Marco Antônio, Éricles, Guilherme, Ícaro e tantos outros. Em especial a Ana Olívia Barufi por todas as dicas e longas conversas sobre a geologia da mina Osamu Utsumi, e também por ter me apresentado a área de estudos. A Débora Targa pelo apoio no trabalho de campo e pela ajuda com as discussões. A Heber Caponi por facilitar o acesso à área. A instituição e a toda a equipe da Indústrias Nucleares do Brasil (INB) por permitir o estudo e confiar na proposta. Aos amigos de Unesp. Aos amigos do trecho Mario César, Erich Motta, Alexandre, Diogo Gomes, Bruno, Matheus, André Carvalho, Magali e Fecho. A Guilherme Lacerda e Marcelinho Carioca. A minha madrinha.

Agradeço especialmente ao professor César Augusto Moreira, por mais esta parceria. Pela sua dedicação pessoal, pelos inúmeros ensinamentos, pela capacidade inesgotável de motivação e por, sempre, liderar com exemplos. Aquele que me ensinou que a palavra convence, mas o exemplo arrasta.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

Localizado na região sul do Estado de Minas Gerais (Brasil), o Maciço Alcalino de Poços de Caldas apresenta diversas ocorrências de minerais de urânio e tório. A mais importante está localizada na Mina Osamu Utsumi, um complexo mineiro industrial pertencente as Indústrias Nucleares do Brasil (INB). Durante seus 13 anos de operação não contínua, iniciada em 1982, a Mina Osamu Utsumi gerou graves impactos ambientais, especialmente aqueles relacionados a grandes quantidades de resíduos de processamento químico, resíduos rochosos e poluição da água - Drenagem Ácida de Mina (DAM). Atualmente, este complexo mineiro está em fase de descomissionamento e enfrenta um grande desafio na resolução de passivos ambientais. O entendimento e diagnóstico das zonas preferenciais de geração e fluxo de DAM são fundamentais para estabelecer medidas de mitigação para sustentabilidade ambiental de longo prazo, em qualquer empreendimento mineiro em fase de descomissionamento. Assim, esse estudo fornece uma análise dos principais mecanismos de geração de drenagem ácida e onde eles ocorrem na região da antiga cava da Mina Osamu Utsumi, área afetada pelo passivo. Uma investigação geofísica foi realizada ao longo de cada frente da mina com o emprego da técnica de tomografia elétrica, a partir dos arranjos Dipolo-dipolo e Schlumberger. O espaçamento entre eletrodos adotado foi de 10m. Para uma melhor compreensão do sistema de aquífero fraturado local, um mapeamento estrutural da área a céu aberto foi necessário. Foram utilizados, também dados hidroquímicos de poços de monitoramento ao longo da cava para agregar na interpretação dos dados geofísicos. A compilação de resultados de campo e dados geoquímicos de poços de monitoramento proporcionou condições para distinguir áreas onde a água flui por fraturas no maciço e áreas com maior contribuição de águas ácidas, com valores de resistividade elétrica inferiores a 15 Ohm.m. Foram identificadas contribuições de drenagem ácida em todas as frentes de exploração da cava, associada a zonas mineralizadas remanescentes. O método geofísico da Eletrorresistividade se mostrou adequado a proposta do estudo. A partir desses resultados, são citadas propostas medidas de mitigação do passivo como tratamento de maciço rochoso.

**Palavras-chave:** Eletrorresistividade. Tomografia elétrica. Passivo ambiental. Hidroquímica. Poços de Caldas.

## ABSTRACT

Located in the southern region of Minas Gerais State (Brazil), the Poços de Caldas alkaline massif presents several occurrences of uranium and thorium minerals. The most important one is placed at the Osamu Utsumi Mine, an industrial mining complex owned by Nuclear Industries of Brazil (INB-Indústrias Nucleares do Brasil). During its 13 years of non continuous operation, started in 1982, the Osamu Utsumi Mine has generated serious environmental impacts, specially those related to large amounts of chemical processing waste, rocky waste and water pollution – Acid Mine Drainage (AMD). Nowadays, this mining complex is in the decommissioning phase and faces a major challenge in solving environmental liabilities. The understanding and diagnosis of preferential zones of generation and flow of AMD are fundamental to establish mitigation measures for long-term environmental sustainability in any mining undertaking in the stage of decommissioning. Thus, this study provides an analysis of the main mechanisms of acid drainage generation and where they occur in the region of the old pit of the Osamu Utsumi Mine, an area affected by the liability. A geophysical investigation was carried out along each from of the mine pit using electrical resistivity tomography (ERT), using dipole-dipole and Schlumberger arrays. The spacing between electrodes adopted was 10m. For a better understanding of the local fractured aquifer system, a structural mapping of the open-pit area was necessary. Hydrochemical data from monitoring wells along the pit were also used to add to the interpretation of geophysical data. The compilation of field results and geochemical data from monitoring wells provided conditions to distinguish areas where water flows through fractures in the massif and areas with a greater contribution of acid water, with electrical resistivity values below 15 Ohm.m. Contributions of acid drainage were identified in all exploration fronts of the pit, associated with remaining mineralized zones. The geophysical method of Electroresistivity proved to be adequate for the purpose of the study. From these results, proposed mitigation measures are cited as rock mass support.

**Key-words:** Resistivity. Electrical resistivity tomography. Environmental liabilities. Hydrochemical. Poços de Caldas.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Localização área de estudos.....	19
Figura 2: Principais anomalias de urânio e tório mapeadas no Maciço Alcalino de Poços de Caldas – MG. ....	20
Figura 3: Mapa com a delimitação do complexo mineiro INB/Caldas e localização das principais pilhas de estéril (BF4 e BF8), cava da MOU, estação de tratamento de águas ácidas – ETA, área industrial de beneficiamento, bacia de contenção de águas ácidas (D1, D2, D3, D4, BNF e BIA), Bacia de Rejeitos, rede hidrográfica e o divisor de bacias hidrográficas.....	22
Figura 4: Vista da frente NW – esquema de bancadas da cava a céu aberto.....	23
Figura 5: Acessos a cava da mina e a representação do resíduo DUCA.....	24
Figura 6: Padrão de drenagens e dique anelar do maciço Poços de Caldas.....	25
Figura 7: Mapa geológico do maciço Alcalino de Poços de Caldas – MG. ....	28
Figura 8: Modelo esquemático de evolução da caldeira vulcânica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. ....	29
Figura 9: Padrão de lineamentos estruturais do Maciço Alcalino de Poços de Caldas – MG extraídos a partir da combinação de imagens de RADAR e Landsat - TM5....	30
Figura 10: Mapa litológico da cava da mina Osamu Utsumi. ....	31
Figura 11: Ilustração esquemática dos corpos mineralizados descritos na cava da MOU: corpo A; corpo B e corpo E. ....	34
Figura 12: Vista aérea da cava da MOU .....	37
Figura 13: Esboço com etapas preliminares para evitar a formação de DAM.....	42
Figura 14: Esquema de dreno anóxico de calcário. ....	44
Figura 15: Linhas do campo elétrico (linhas cheias) e linhas tracejadas que representam uma seção transversal das superfícies equipotenciais para um campo uniforme. ....	52
Figura 16: Propagação de corrente elétrica através de meio com dimensões conhecidas. ....	53
Figura 17: Propagação de campo elétrico em meio tridimensional, por meio de um dispositivo de quatro eletrodos.....	55
Figura 18: Exemplo tomografia elétrica com arranjo Dipolo-dipolo. ....	59
Figura 19: Esquema da distribuição do arranjo Schlumberger.....	61

Figura 20: Contorno de sensibilidade dos arranjos a) arranjo Schlumberger; b) arranjo Dipolo-dipolo. ....	63
Figura 21: Representação das linhas de tendência dos sinais dos arranjos Schlumberger e Dipolo-dipolo em meio homogêneo. Linhas pontilhadas representam valores negativos. ....	64
Figura 22: Representação de um plano em duas dimensões - a esfera de projeção em 3D, a projeção na esfera e por último a projeção estereográfica. ....	70
Figura 23: Relação entre as redes de projeções estereográficas; a) Rede de Wulff – mantém as proporções dos ângulos; b) Rede de Schimdt – mantém a proporção da área. ....	71
Figura 24: Imagem de Satélite com a localização das linhas de tomografia elétrica ensaiadas na cava da mina. ....	73
Figura 25: Vegetação na base do talude da frente NE. ....	74
Figura 26: a) Detalhe do resistímetro ABEM Terrameter LS em operação; b) Detalhe do eletrodo cravado no solo durante a aquisição de dados; c) Bobina de cabos elétricos em uma das linhas geofísicas. ....	75
Figura 27: Exemplo de arranjo dos blocos utilizado no modelo (Dipolo-dipolo). ....	76
Figura 28: Cava da Mina Osamu Utsumi e as quatro frentes de lavra onde foram feitos os levantamentos estruturais. ....	78
Figura 29: Localização dos poços de monitoramento. ....	79
Figura 30: Lineamentos de fraturas regionais extraídos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. ....	82
Figura 31: Padrão de drenagem condicionado ao controle estrutural de fraturas regionais próximo à Mina Osamu Utsumi. ....	83
Figura 32: Diagrama de contorno com todas as medidas coletadas na cava da mina, 811 medidas ao todo. ....	84
Figura 33: Diagrama de contorno dos planos de fraturas da frente NE. ....	85
Figura 34: a) Vista em detalhe do maciço na frente NE; b) vista geral da frente com indicação do local da imagem 34a. ....	86
Figura 35: Diagrama de contorno dos planos de fraturas da frente SE. ....	87
Figura 36: a) Vista em detalhe do maciço na frente SE; b) indícios de percolação de água; c) vista geral do maciço com indicação do local de percolação de água. ....	88
Figura 37: Diagrama de contorno dos planos de fraturas da frente SW. ....	89
Figura 38: Vista do talude de bancada do maciço na frente SW. ....	89

Figura 39: Diagrama de contorno dos planos de fraturas da frente NW. ....	90
Figura 40: Vista geral da frente NW e indicação de bancadas de coletas de dados. ....	90
Figura 41: Mapa litológico e a localização das linhas geofísicas.....	91
Figura 42: Modelo de inversão da linha 1. ....	93
Figura 43: Modelo de inversão da linha 2. ....	94
Figura 44: Modelo de inversão da linha 3. ....	95
Figura 45: Modelo de inversão da linha 4. ....	96
Figura 46: Modelo de inversão da linha 5. ....	97
Figura 47: Modelo de inversão da linha 6. ....	97
Figura 48: Modelo de inversão da linha 7. ....	98
Figura 49: Modelo de inversão da linha 8. ....	99
Figura 50: Modelo de inversão da linha 9. ....	100
Figura 51: Detalhe de dique de rochas ultrabásicas. ....	100
Figura 52: Modelo de inversão da linha 10. ....	101
Figura 53: Modelo de inversão da linha 11. ....	102
Figura 54: Modelo de inversão da linha 12. ....	103
Figura 55: Modelo de inversão da linha 13. ....	103
Figura 56: Dados integrados dos poços, diagrama de contorno das frentes e as linhas geofísicas escolhidas para representar cada frente. ....	108
Figura 57: Análise integrada Frente NE: a) modelo geológico; b) diagrama de contorno da frente; c) modelo de inversão da linha 1 interpretado com dados do poço 39. ...	109
Figura 58: Análise integrada Frente SE: a) modelo geológico; b) diagrama de contorno da frente; c) modelo de inversão da linha 4 interpretado com dados do poço 33. ...	111
Figura 59: Detalhe do cruzamento de fraturas observados em campo. ....	112
Figura 60: Análise integrada Frente SW: a) modelo geológico; b) diagrama de contorno da frente; c) modelo de inversão da linha 8 interpretado com dados do poço 35. ...	113
Figura 61: Análise integrada Frente NW: a) modelo geológico; b) diagrama de contorno da frente; c) modelo de inversão da linha 11 interpretado.....	114
Figura 62: Padrão de fraturamento com mergulhos mais altos e baixa persistência – frente NW. ....	115
Figura 63: Mapa com principais ocorrências de DAM identificadas nas tomografias elétricas e em poços de monitoramento.....	118
Figura 64: Esquema da técnica <i>Jet Gouting</i> .....	120

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Estágio 1 – Os grãos finos da pirita (granular) são oxidados tanto pelo ar quanto pelas bactérias (T. Ferrooxidans), com igual quantidade de ácido produzido pela oxidação do sulfeto a sulfato (reação da equação 1) e pela hidrólise do $Fe^{+3}$ (incluída na equação da reação 2). A queda do pH ocorre de forma moderada e chega a um pH – 4,5.....	39
Tabela 2: Estágio 2 – Com o decorrer da reação da equação 2, mais uma vez, é possível para o pH apresentar estabilidade nesta região, entretanto isto normalmente só acontecerá quando a permeabilidade ou a quantidade da área superficial exposta da pirita for pequena. Caso contrário, o pH irá decrescer continuamente, o que levará ao estágio 3, onde a produção de ácido é mais rápida.....	39
Tabela 3: Estágio 3 – Em $pH < 3$ , o aumento da solubilidade do Fe e o decréscimo da taxa de precipitação de $Fe(OH)_3$ , resultam em uma atividade de $Fe^{+3}$ aumentada. O estágio 3 começa, quando a atividade do $Fe^{+3}$ ocorre de maneira significativa a um pH de ~2,5. Um ciclo vicioso de oxidação da pirita e oxidação bacteriana do $Fe^{+2}$ , resulta de um efeito combinado das reações 3 e 4. Este estágio inclui tanto a pirita granular, quanto a framboidal.....	40
Tabela 4: Exemplo da resistividade média de algumas rochas.....	57
Tabela 5: Dados pluviométricos em mm acumulados durante as etapas de coleta e aquisição de dados.....	80
Tabela 6: Parâmetros físicos dos poços de monitoramento.....	108
Tabela 7: Principais cátions e ânions das amostras.....	108
Tabela 8: Principais metais amostrados.....	109
Tabela 9: Parâmetros físico-químico das amostras.....	109

## LISTA DE ABREVIATURAS

DAM – Drenagem ácida de mina

USGS – United States Geological Service

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

NUCLEBRÁS - Empresa Nucleares Brasileira S/A

MOU – Mina Osamu Utsumi

INB – Indústrias Nucleares do Brasil

ETA – Estação de tratamento de águas ácidas

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

PRAD – Plano de Recuperação de Áreas Degradadas

DUCA – Resíduo de tratamento rico em hidróxidos metálicos e Diuranato de Cálcio

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico Brasileiro)

Ma – Milhões de anos

ETR – Elementos Terra Rara

ADP - Difosfato de Adenosina

ATP - Trifosfato de Adenosina

DAC - Drenos Anóxicos de Calcários

ppm – Parte por Milhão

SI – Sistema Internacional de Unidades

SEV – Sondagem Elétrica Vertical

TE – Caminhamento Elétrico

1D – Uma dimensão

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

TEM – Método Transiente Eletromagnético

IP – Polarização Induzida

SP – Potencial Espontâneo

GPR – Ground Penetration Radar

RMS – Root Mean Square

UNESP – Universidade Estadual Paulista

USP – Universidade de São Paulo

ANA - Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico

Cetesb - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

EPA – USEPA – Agência de Proteção Ambiental Norte Americana

LAPOC – Laboratório de Poços de Caldas

PM – Poço de monitoramento

CP – Cimento Portland

ARI – Alta Resistência Inicial

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Generalidades	15
1.2 Hipótese	17
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo principal	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. ÁREA DE ESTUDOS	19
3.1 Localização e histórico da área	19
3.2 Histórico do empreendimento mineiro Osamu Utsumi	21
3.3 Fisiografia	25
4. GEOLOGIA	27
4.1 Geologia regional	27
4.2 Geologia da cava	31
4.3 Metalogênese	33
4.3 Hidrogeologia	36
5. DRENAGEM ÁCIDA DE MINA	39
5.1 Conceitos de gênese	39
5.2 Métodos de prevenção e remediação	42
5.3 Drenagem ácida de mina em minerações de urânio	46
6. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	49
6.1 Geofísica	49
6.1.1 <i>Introdução</i>	49
6.1.2 <i>Campo elétrico e potencial elétrico</i>	51
6.1.3 <i>Resistência e resistividade</i>	52
6.1.4 <i>Método da Eletroresistividade</i>	54
6.1.5 <i>Mecanismos que controlam a propagação do campo elétrico em materiais geológicos</i>	57
6.2 Técnicas e arranjos geoeletricos	58
6.2.1 <i>Arranjo Dipolo-dipolo</i>	61
6.2.2 <i>Arranjo Schlumberger</i>	61
6.2.3 <i>Análise comparativa entre arranjos</i>	62
6.3 Geofísica aplicada a estudos ambientais em mineração	64
6.4 Interpretação fotogeológica	68
6.5 Geologia estrutural aplicada a hidrogeologia	69
7. MÉTODOS, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	73
7.1 Geofísica	73
7.1.1 <i>Processamento de dados geofísicos</i>	75
7.2 Dados de geologia estrutural	77
7.3 Dados hidroquímicos	79
8. RESULTADOS	82
8.1 Resultados de fotoanálise e análise estrutural geométrica	82
8.1. <i>Frente NE</i>	84

8.1.2 Frente SE	86
8.1.3 Frente SW	88
8.1.4 Frente NW	90
8.2 Resultados geofísicos	91
8.2.1 Frente NE	93
8.2.2 Frente SE	94
8.2.3 Frente SW	99
8.2.4 Frente NW	101
8.3 Análise dos dados hidroquímicos	104
8.4 Análise integrada dos dados	107
9. PROPOSTAS DE REMEDIAÇÃO DA CAVA	117
10. CONCLUSÕES	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
ANEXO I	136
ANEXO II	137
ANEXO III	138
ANEXO IV	139



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Generalidades

Na segunda metade da década de 40 o mundo estava em recessão generalizada devido aos efeitos da Segunda Guerra mundial. A engenharia nuclear já era uma realidade nessa década, inclusive com papel determinante para a trégua do império japonês devido aos acontecimentos de Hiroshima e Nagasaki em agosto de 1945. A engenharia passou a ter grande importância do ponto de vista estratégico para as duas maiores nações no mundo pós-guerra – Estados Unidos e União Soviética. Havia uma necessidade de novas fontes de recursos energéticos. O petróleo era uma fonte energética consolidada no cenário mundial, mas uma nova e promissora tecnologia despontava no cenário científico – a energia nuclear, comum para fins militares (JOHNSTON, 2009).

A fonte da energia nuclear é baseada em minerais radioativos, assim, o controle sobre depósitos minerais radioativos como urânio e tório davam sinais de poderio energético e bélico. Nesse contexto histórico, houve uma demanda mundial para insumos radioativos e diversos projetos de pesquisa mineral foram iniciados. As principais reservas de urânio no mundo são concentradas na Austrália (1,6 milhões de toneladas e 31% das reservas mundiais) e Cazaquistão (629 mil toneladas e 9% das reservas mundiais). Apesar de ocupar a segunda colocação em reservas, o Cazaquistão lidera a produção mundial com 36% da produção global (PIRES, 2013).

Em termos de mineração e produção mineral, o Brasil sempre ocupou uma posição de destaque internacional. O país possui hoje uma reserva comprovada de urânio de 309 mil toneladas, além de mais 800 mil toneladas em reservas estimadas. As principais reservas são: Itataia/Santa Quitéria (CE) com reservas de 142 mil toneladas; Lagoa Real/Caetité (BA) com reservas de 93,2 mil toneladas e a mina Osamu Utsumi/Caldas-Poços de Caldas (MG) com 4,5 mil toneladas (PIRES, 2013).

Este último empreendimento mineiro deixou de ser explorado economicamente em meados da década de 90 e atualmente está em fase de descomissionamento. O descomissionamento é uma das etapas do Plano de Fechamento de Mina (PFM) estabelecido pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Segundo a Resolução ANM nº68 de 30 de abril de 2021, o descomissionamento da área da mina envolve a desmobilização de estruturas provisórias de suporte às operações de lavra e

beneficiamento, a estabilização física e química das estruturas permanentes e seus monitoramentos, além de habilitar a área para outro uso futuro ou novo aproveitamento mineral (ANM, 2021).

Para o descomissionamento completo de uma área todos os passivos ambientais devem ser estabilizados física e quimicamente. No caso da Mina Osamu Utsumi (MOU) existem alguns passivos ambientais e o principal deles é um passivo ambiental de natureza química frequente em minerações ricas em sulfetos, a geração de Drenagem Ácida de Mina (DAM).

Na região da MOU a água meteórica infiltra na cava e nas pilhas de estéreis e, ao percolar nas rochas, promove interação química do oxigênio da água ou do ar com diversos minerais, entre eles a pirita –  $\text{FeS}_2$ , o que resulta no fenômeno da drenagem ácida (ALBERTI, 2017). A drenagem ácida causa um desequilíbrio no meio ambiente e afeta diretamente a fauna e flora local, e baixos valores de pH podem mobilizar metais pesados como urânio em drenagens locais.

Existem diversos estudos voltados ao problema de drenagem ácida mineira, inclusive muitos na própria mina Osamu Utsumi (NORDSTROM et al., 1992; MIEKELEY et al., 1992; WEST et al., 1992; FERNANDES et al., 1995; FERNANDES et al., 1998; BENEDETTO et al., 2005; FRANKLIN, 2007; LADEIRA & GONÇALVES, 2007; PEDROBOM et al., 2017; ALBERTI, 2017; BERTOLI et al., 2019; TARGA et al., 2019). A origem do problema é complexa e está associada à assembleia mineral do depósito (presença de sulfetos), a metodologia de exploração e gestão de resíduos adotadas no empreendimento.

A geofísica é uma alternativa interessante para investigações de passivos ambientais em empreendimentos mineiros com ênfase em impactos em solo e sistemas aquíferos. Métodos Elétricos e Eletromagnéticos permitem identificar estruturas principais do aquífero fraturado onde ocorrer contraste de propriedades físicas entre áreas estanques e com percolação de água (EVERETT, 2013). Esta ferramenta, aliada a mapeamentos geológicos deve auxiliar na identificação, dimensionamento e morfologia das principais zonas de contribuição à drenagem ácida gerada em empreendimentos mineiros.

A geofísica tem sido aplicada em depósitos uraníferos em diversos locais. A literatura apresenta diversos exemplos da aplicação de métodos geofísicos relacionados a prospecção reservas de urânio como Mwenifumbo et al. (2004), Legault et al. (2008), Mandal et al. (2013), Tuncer et al. (2006). Porém há poucos

relatos de estudos geofísicos aplicado em estudos hidrogeológicos e ambientais relacionados a depósitos de urânio.

Diante do exposto o presente estudo desenvolve uma análise inédita do passivo ambiental de drenagem ácida de mina com a aplicação do método geofísico da Eletrorresistividade, integrado a dados de geologia (mapeamento e levantamento estrutural) e dados hidroquímicos (cedidos pela empresa INB), com o intuito de identificar os principais caminhos de fluxo de drenagem ácida mineira na cava da Mina Osamu Utsumi (MOU) e contribuir com alternativas integradas de estudo de passivos ambientais de mineração e especificamente na MOU.

## **1.2 Hipótese**

Analises químicas de águas superficial e subterrânea indicam valores de pH muito baixos e um conjunto de elementos químicos dissolvidos que caracterizam a existência de drenagem ácida de mina na área de estudos.

Diante deste fato, compreender quais os fatores e processos controladores de geração e fluxo de drenagem ácida de mina, numa cava com minério de urânio com sulfetos associados?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo principal**

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o processo de geração e fluxo de drenagem ácida em maciço fraturado de uma mina de urânio em fase de descomissionamento, por meio da integração de dados geofísicos, estruturais e hidroquímicos.

### **2.2 Objetivos específicos**

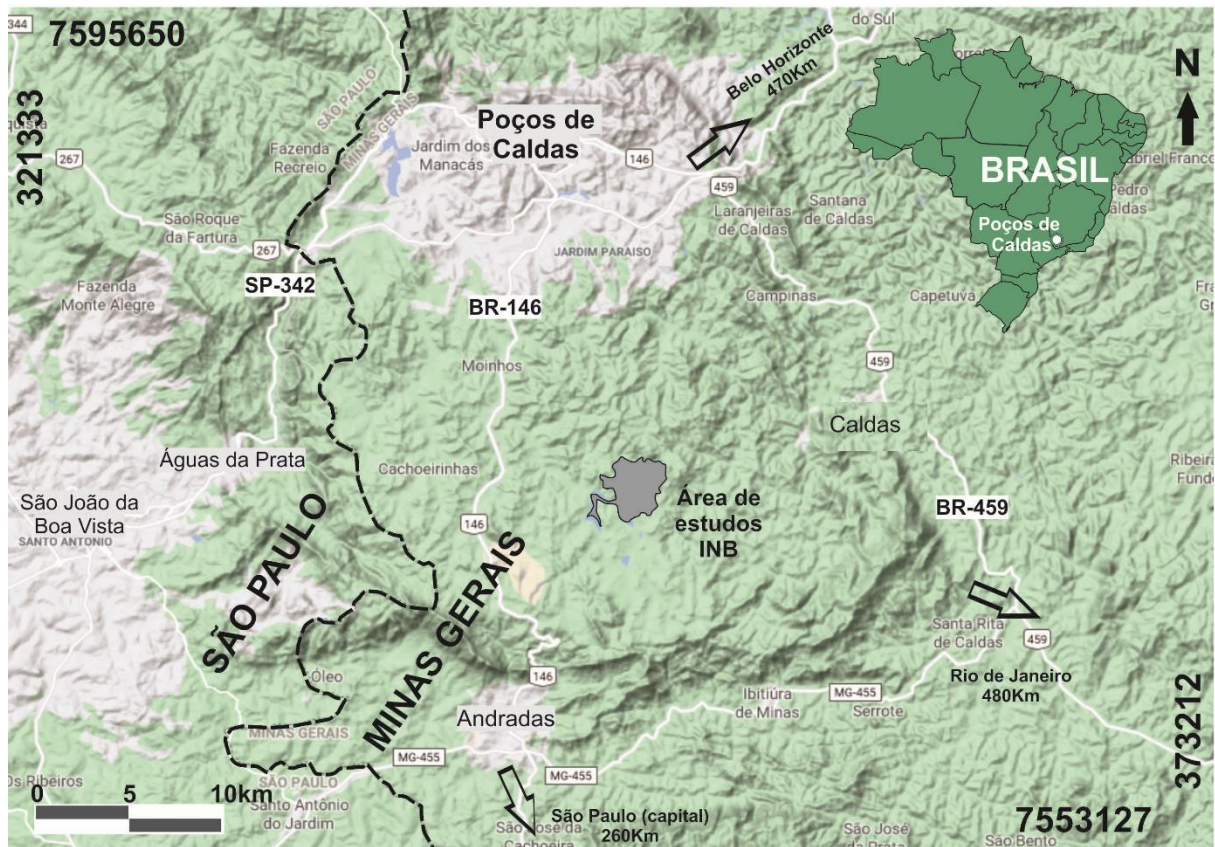
- Análise comparativa entre vantagens e desvantagens dos arranjos geofísicos de tomografia elétrica Dipolo-dipolo e Schlumberger;
- Discriminar os principais caminhos de fluxo de drenagem ácida de mina e suas relações com zonas de minério residual;
- Recomendar alternativas de atenuação dos impactos ambientais da drenagem ácida de mina num empreendimento em fase de descomissionamento.

### 3. ÁREA DE ESTUDOS

#### 3.1 Localização

A área de estudos é localizada no sul do estado de Minas Gerais, próximo à divisa do estado de São Paulo (Figura 1). Os principais municípios localizados no complexo são: Poços de Caldas – MG, Caldas – MG, Andradadas – MG e Águas da Prata – SP. O complexo é situado em uma estrutura vulcânica alcalina (caldeira). Possui área de aproximadamente 800 km<sup>2</sup> dispostos de forma circular, com diâmetro de 35 km. Possui um relevo de contraste fisiográfico por sua altitude cerca de 500m acima das regiões circunvizinhas. Em uma posição geográfica privilegiada no eixo sudeste, é distante a 470km da capital do estado Belo Horizonte, há 270km da cidade de São Paulo – SP e a 490km da cidade do Rio de Janeiro – RJ. O acesso a área de estudos é realizado por uma estrada vicinal a partir do quilometro 20,6 da rodovia BR-146 que ligam as cidades de Andradadas a Poços de Caldas.

Figura 1: Localização área de estudos.



Fonte: Adaptado de Google.

A região possui economia diversificada e abrangente, onde são explorados os setores econômicos da agropecuária, setor turístico, setor industrial e o setor de mineração com presença de importantes indústrias nacionais. Dentre os principais produtos de mineração explorados no maciço são destacados os depósitos de bauxita e minerais radioativos.

Em 1948 foram reportadas as primeiras ocorrências de minerais radioativos no complexo alcalino de Poços de Caldas. Na década de 50 foram encomendadas pesquisas minerais na região, com trabalhos exploratórios que envolveram levantamentos aéreos (cintilométrico, magnetométrico e fotogramétrico), radiometria terrestre, além de campanhas de sondagens e trincheiras de inspeção (PIRES, 2013). O resultado foi a descoberta de 44 anomalias radioativas (Figura 2).

Figura 2: Principais anomalias de urânio e tório mapeadas no Maciço Alcalino de Poços de Caldas – MG.



Fonte: Adaptado de Frayha, 1962.

### 3.2 Histórico do empreendimento mineiro – Mina Osamu Utsumi

Apesar do Maciço Alcalino de Poços de Caldas ser estudado desde o final do século XIX, foi apenas no final da década de 40 que houve a confirmação da suspeita de minerais radioativos no maciço. Em 1952 foram realizadas as primeiras campanhas oficiais de pesquisa mineral voltadas a minerais radioativos, em estudos encomendados pelo Conselho Nacional de Pesquisa em parceria com o serviço geológico norte americano – USGS (PIRES, 2013). Nos anos seguintes estudos realizados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e pela Empresa Nucleares Brasileira S/A (NUCLEBRAS) identificaram 44 ocorrências radioativas no complexo, dentre as quais existem ocorrências de urânio e tório.

Uma dessas ocorrências deu origem a mina do córrego do Cercado localizada no município de Caldas - MG, que mais tarde veio a chamar Mina Osamu Utsumi - MOU, homenagem póstuma a um dos geólogos envolvido nos estudos pioneiros de prospecção de urânio no maciço de Poços de Caldas (FRANKLIN, 2007).

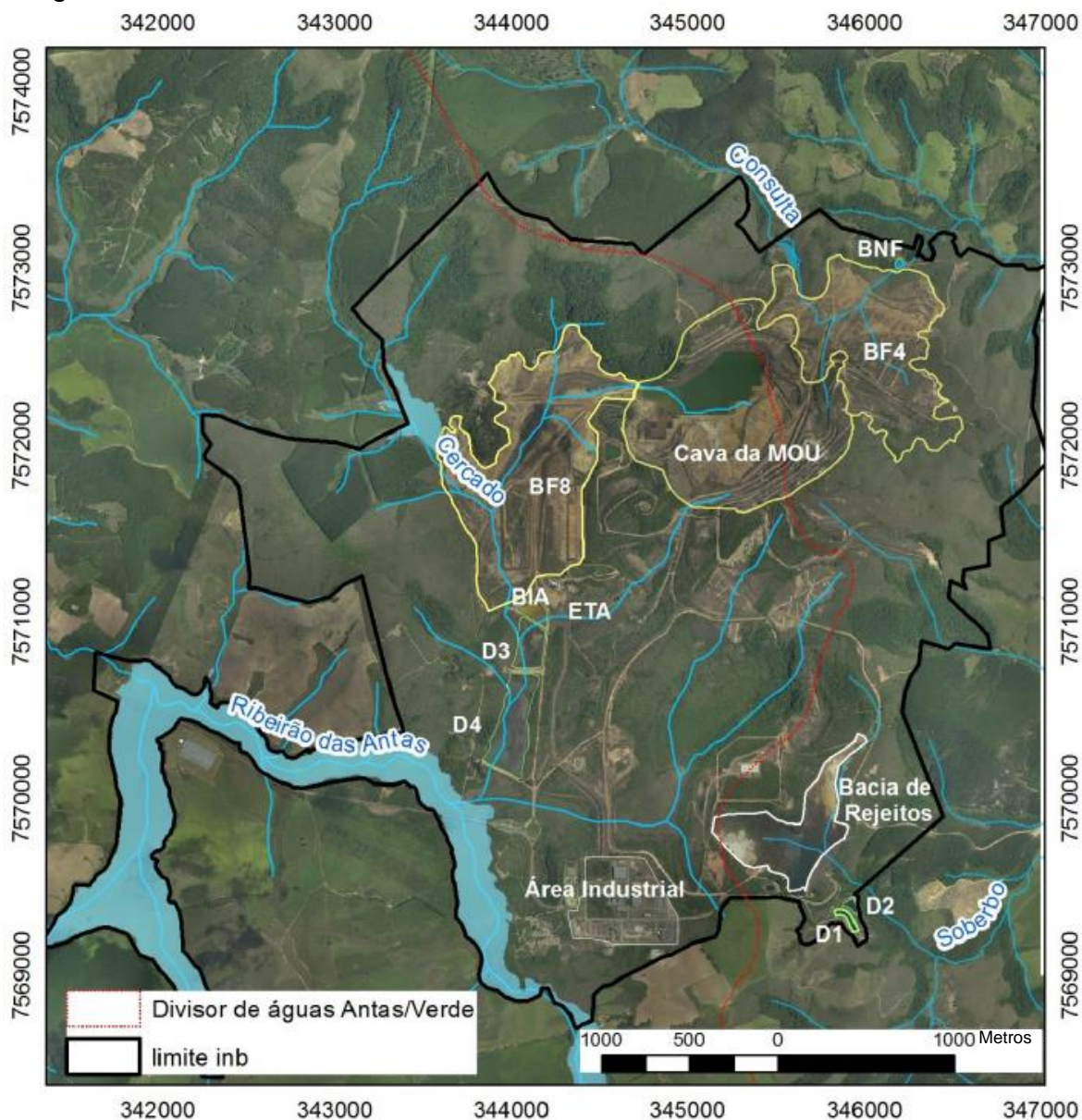
A mina Osamu Utsumi na região de Poços de Caldas – MG foi durante muitos anos a principal mina de Urânio do Brasil. Porém a medida que novas ocorrências apresentaram maiores teores, o complexo mineiro passou a apresentar uma relação de custo-benefício desfavorável, o que tornou a operação inviável. Inicialmente o complexo mineiro foi operado pela empresa estatal NUCLEBRAS que por sua vez deu origem a também estatal Indústrias Nucleares do Brasil (INB). A estatal que monopoliza a exploração de minerais radioativos no Brasil, decidiu em 1995 encerrar as atividades no complexo mineiro de Poços de Caldas e investir em jazidas com teores maiores (FRANKLIN, 2007). Atualmente a mina está em fase de descomissionamento.

Na mina Osamu Utsumi, todas as atividades de extração, operação e produção do minério deram origem a passivos ambientais. Segundo a estimativa de Cipriani (2002), 94,5 bilhões de toneladas de rocha foram removidas na região. Desse montante, apenas 2% foi destinado ao processamento e o restante depositado em pilhas de estéreis. Esse material foi depositado em vales adjacentes a cava da mina.

O complexo mineiro ocupa uma área aproximada de 15 km<sup>2</sup> onde é localizada a planta industrial de beneficiamento desativada (Figura 3). A cava da mina Osamu Utsumi, diversas pilhas de estéril, uma barragem de rejeitos, bacias de contenção de

águas ácidas (D1, D2, D3 e D4), uma estação de tratamento de águas ácidas – ETA e um reservatório de águas denominado Águas Claras (ALBERTI, 2017).

Figura 3: Mapa com a delimitação do complexo mineiro INB/Caldas e localização das principais pilhas de estéril (BF4 e BF8), cava da MOU, estação de tratamento de águas ácidas – ETA, área industrial de beneficiamento, bacia de contenção de águas ácidas (D1, D2, D3, D4, BNF e BIA), Bacia de Rejeitos, rede hidrográfica e o divisor de bacias hidrográficas.



Fonte: Alberti, 2017.

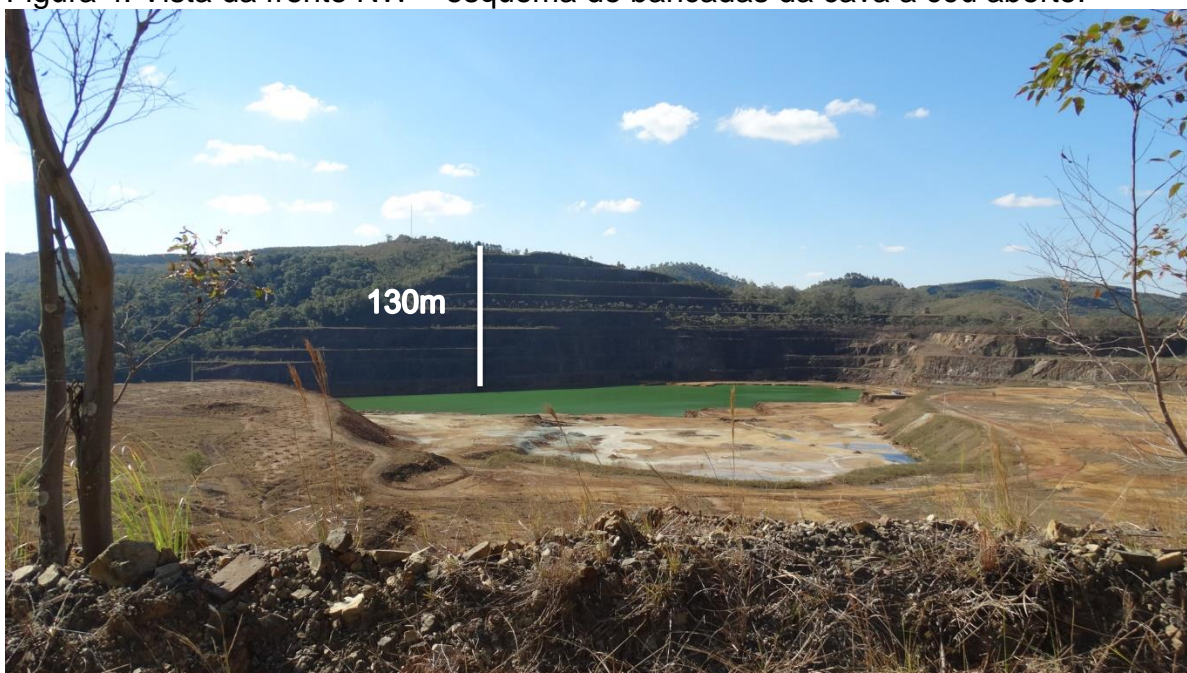
O método de lavra adotado foi lavra a céu aberto, apesar das particularidades geológicas do depósito de chaminé brechada, em que o método mais comum empregado nesse tipo de depósito é o método de lavra subterrânea. A cava possui a forma de uma elipse com diâmetros de 1200m no eixo de maior alongação (NE – SW)



e 800m no eixo de menor alongação (NW – SE). As atividades de decapagem prévia iniciaram em 1977 (FRANKLIN, 2007).

O método de exploração foi realizado por degraus, onde as alturas das bancadas variavam de 16m em zonas de material estéril até 2m em zonas mineralizadas. A movimentação de terra era realizada por tratores de esteiras e pás carregadeiras, quando em rocha era realizado o desmonte por explosivos (Figura 4).

Figura 4: Vista da frente NW – esquema de bancadas da cava a céu aberto.



Fonte: Dados da pesquisa.

A movimentação de carga era realizada por meio de caminhões até a planta de beneficiamento. O material então passava pelas etapas de britagem primária e secundária, moagem e espessamento. No primeiro processo de beneficiamento físico o minério era pré concentrado em pilhas nos pátios. Na segunda etapa – britagem secundária era adicionado a mistura de óxido de pirolusita e rocha fosfática. A pirolusita promove a oxidação do urânio, o que facilitava a extração do mesmo. A rocha fosfática contribui para a remoção do zircônio. Na última fase do beneficiamento físico, adensamento, o minério era misturado com água e cal, que gerava uma polpa bombeada a usina de beneficiamento químico (CIPRIANI, 2002). Na planta de beneficiamento químico era transformado em diuranato de amônia, conhecido como *yellow cake*.

Após o encerramento das atividades de lavra em 1995, o complexo mineiro iniciou as tratativas para a implementação do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). Enquanto o PRAD não é resolvido, o passivo ambiental deixado pela MOU é mitigado em uma estação de tratamento de águas ácidas que funciona o ano inteiro.

As águas ácidas são provenientes da percolação de águas meteóricas pelas pilhas de rejeito e pelo próprio maciço da cava. Parte dessa água aflora naturalmente no lençol freático da região da cava. A interação com zonas mineralizadas promove a gênese da drenagem ácida. Essas águas são bombeadas então para estação de tratamento de águas ácidas (ETA), onde são tratadas com cal ( $\text{CaO}$ ) ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) com o intuito de promover o aumento do pH. Com o aumento do pH a maioria dos radionuclídeos são precipitados, o resultado desse processo é um resíduo de neutralização composto predominantemente por diuranato de cálcio e hidróxidos metálicos, conhecido localmente como DUCA (FRANKLIN, 2007).

Esses efluentes pastosos, mistura do precipitado com água do processo, era inicialmente lançada em uma bacia de rejeitos, mas com o esgotamento dessa, a polpa é lançada na cava da mina (Figura 5).

Figura 5: Acessos a cava da mina e a representação do resíduo DUCA.



Fonte: Dados da pesquisa.

### 3.3 Fisiografia

O clima local é de tropical de altitude, com duas estações bem definidas: estação seca (estiagem), entre os meses de março e setembro; e estação chuvosa entre os meses de outubro a março. A média de temperaturas oscilam entre 7,5°C a 25,9°C na média. A precipitação média anual é de 1700mm (POÇOS DE CALDAS, 2007).

O relevo do planalto alcalino de Poços de Caldas apresenta uma feição marcante do dique anelar da caldeira (Figura 6). O dique possui forma circular e possui os pontos mais altos do relevo local. Alguns pontos turísticos importantes fazem parte do relevo do dique anelar, como o pico do Gavião e a Serra de São Domingos. Toda hidrografia local é influenciada pela intrusão do corpo magmático. É situada na província geomorfológica Planalto Sul de Minas que é subdividido em três unidades: a Superfície do Alto Rio Grande, o Planalto de São Pedro de Caldas e o Planalto de Poços de Caldas (CPRM, 1979).

Figura 6: Padrão de drenagens e dique anelar do maciço Poços de Caldas



Fonte: Dados da pesquisa.

Grande parte das drenagens da porção interior e adjacente estão encaixadas em feições estruturais do tipo lineamentos. O próprio dique anelar limita as bacias hidrográficas do planalto. Há dois padrões de drenagem, um radial centrífugo e outro de caráter semi-anelar. O primeiro ocorre na porção centro-oeste do Maciço, porção oeste e a sul da cidade de Poços de Caldas. O segundo padrão de caráter semi-anelar predominantemente a porção S-SW do maciço (ALEMIDA FILHO & PARADELLA, 1977).

Os rios da região são afluentes da margem esquerda do Rio Pardo. Há dois sistemas de drenagem principais, o Rio Verde e o Ribeirão das Antas (FRAENKEL et al., 1985). A cava da mina Osamu Utsumi foi instalada em cima do divisor de águas das duas bacias hidrográficas citadas. Na porção NE da cava as drenagens locais formam o Córrego do Consulta que desemboca no Rio Verde. Na porção a SW as drenagens locais são direcionadas ao Córrego do Cercado que desemboca no Ribeirão das Antas.

## 4. GEOLOGIA

### 4.1 Geologia regional

O Complexo Alcalino de Poços de Caldas está inserido no contexto da Província Mantiqueira, mais precisamente no Complexo Varginha, que compreende rochas anfibolíticas a granulíticas (CPRM, 1979).

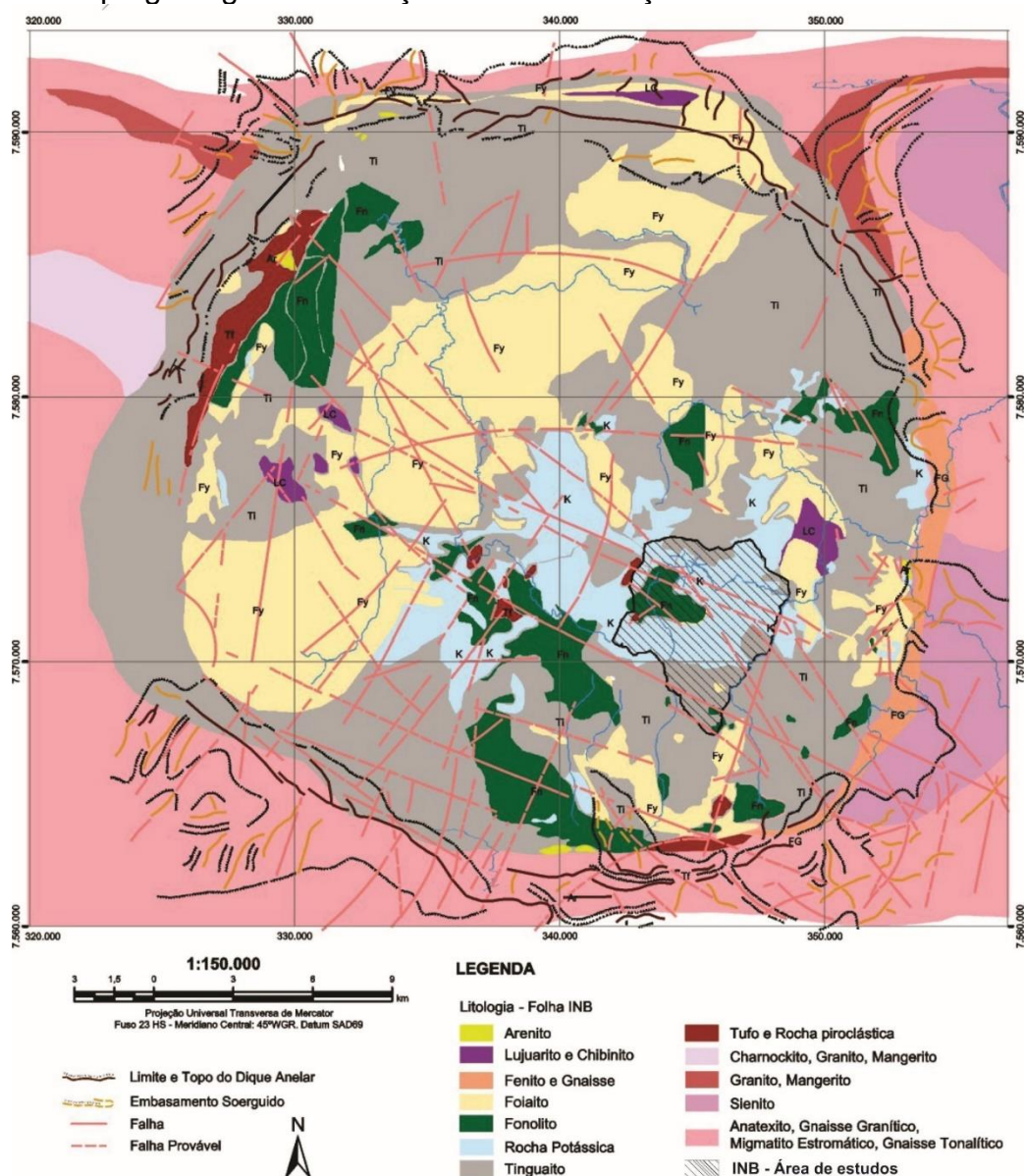
No Complexo Varginha, ocorrem intrusões de corpos alcalinos, pertencentes à Província Alcalina do Brasil Meridional. A província por sua vez, representa corpos alcalinos distribuídos ao longo do território nacional em dois alinhamentos principais distintos – NW do litoral sentido interior, e NE que segue a costa brasileira (SCHOBENHAUS et al., 1984).

Os primeiros registros de estudos geológicos na região do complexo datam do final do século XIX – trabalhos de Derby (1887) e Machado (1888) onde foi identificado a natureza vulcânica da região. Porém as pesquisas sobre os minerais radioativos no Complexo Alcalino de Poços de Caldas tiveram início na década de 50, através de trabalhos elaborados pelo Conselho Nacional de Pesquisa em parceria com o Serviço Geológico Norte Americano - USGS (TOLBERT, 1966).

O Maciço Alcalino de Poços de Caldas é representado por uma grande intrusão alcalina, próxima a borda nordeste da Bacia do Paraná, que teve início evolutivo a 87Ma e terminou por volta de 52Ma (ULBRICH e GOMES, 1981). Possui posição de destaque no cenário de exploração mineral nacional devido a presença de anomalias radioativas (urânio e tório) e também grandes depósitos de bauxita. É também considerado o maior complexo alcalino da América do Sul. Sua origem e desenvolvimento são relacionados ao processo de deriva continental e separação das placas Africana e Sul-americana (SCHORSCHER e SHEA, 1992). Possui magmatismo do tipo fissural – associado a distensão crustal e deriva continental (HASUI et al., 2012).

As principais rochas encontradas no maciço são: rochas potássicas decorrentes de processos metassomáticos, rochas intrusivas (sienitos, foiaíto, lujauritos e chibinitos, granitos e charnokitos), rochas hipoabissais (tinguaítos), rochas extrusivas (fonolitos), além de brechas, tufo e aglomerados (Figura 7).

Figura 7: Mapa geológico do maciço Alcalino de Poços de Caldas – MG.



Fonte: Adaptado de Sardinha et al. (2015).

Rochas potássicas: são rochas extrusivas fonolíticas que normalmente apresentam elevado grau de intemperismo físico e químico. Também foram afetados por processos hidrotermais. São rochas de cores claras (esbranquiçadas) e podem possuir infiltrações de óxidos de ferro associado (Frayha, 1972);

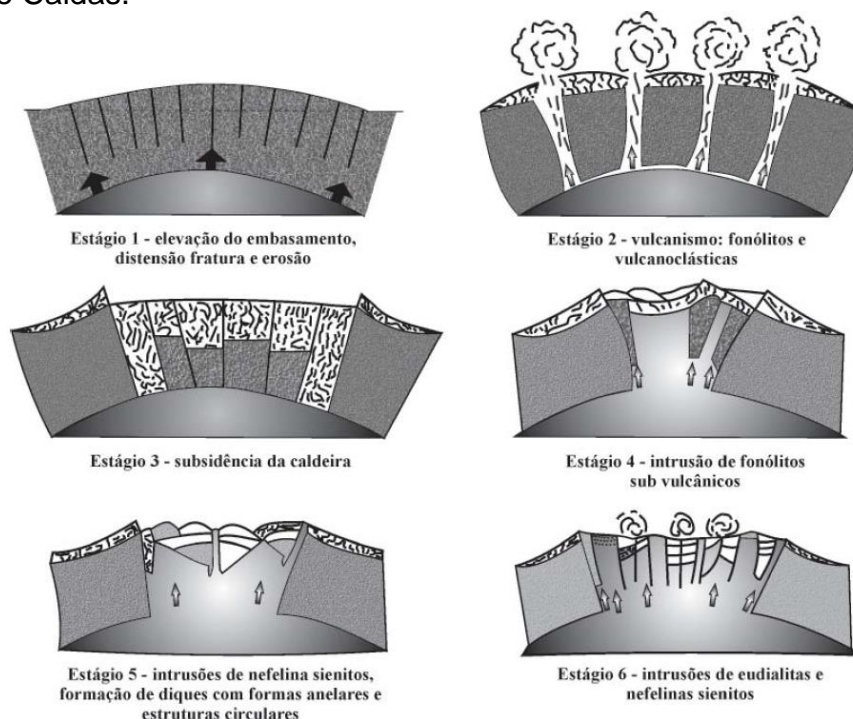
Foaítos, tinguaitos e fonolitos: são rochas de natureza química e composição química semelhantes, mas com diferentes texturas. O Foaíto é uma variação de nefelina sienito com granulação grossa e eventualmente textura pegmatóide, o tinguaito é uma rocha hipoabissal com granulação média e o fonolito é o correspondente efusivo com granulação fina (Frayha, 1972).

Os lujaunitos e os chibnitos são rochas plutônicas com composição mineralógica semelhante, diferenciando as últimas pela presença de eudialita. As ocorrências dessas rochas são concentradas na Serra de São Domingos – porção norte do Maciço Alcalino e próximo ao contato com o embasamento (Frayha, 1972).

Há ocorrência pontual de arenitos dentro do complexo alcalino. Esse material é interpretado como rochas remanescentes da Formação Botucatu. E por último é possível destacar que a intrusão magmática alterou as rochas encaixantes (granitos e gnaisses de idade pré-Cambriana – Complexo Guaxupé) e em alguns locais, processos de metassomatismo deram origem a fenitos.

Existem diversos estudos que retratam a evolução tectônica do Maciço Alcalino – estudos de Ulbrich (1984), Motoki (1988), Garda (1990) e Alves (2003) são alguns dos trabalhos com versões diferentes para a evolução do maciço. Porém, a teoria de evolução tectônica estrutural do maciço mais consagrada na bibliografia, é a teoria compatível com o modelo clássico de formação de caldeiras vulcânicas, descrito inicialmente por Ellert (1959), Le Bas (1977) e aperfeiçoado em Fraenkel et al. (1985), Chapman et al. (1991), Schorscher e Shea (1992), Holmes et al. (1992) e Sardinha et al. (2015). Essa teoria defende que o modelo de evolução ocorreu em seis principais estágios (Figura 8).

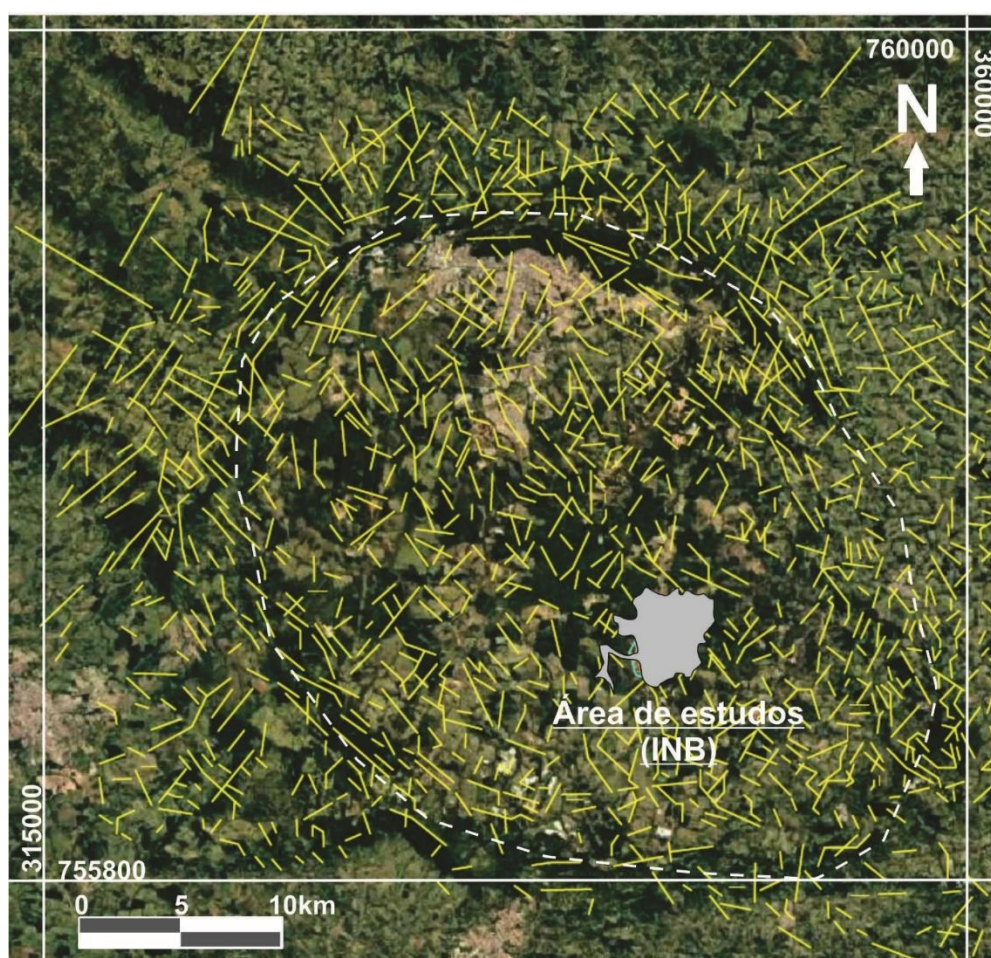
Figura 8: Modelo esquemático de evolução da caldeira vulcânica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas.



Fonte: Sardinha et al. (2015).

No estágio 1 ocorreu um soerguimento do embasamento e surgimento das primeiras fraturas devido a instalação da pluma magmática; em seguida, estágio 2, houve um momento de atividade vulcânica que incluíram emissões de lava e explosões. No terceiro estágio o domeamento formado pela intrusão colapsou na porção central. Ainda no terceiro estágio ocorreu intenso tectonismo e formação de tufos vulcânicos. No quarto estágio de evolução ocorreu novo soerguimento com a atividade vulcânica e intrusão de fonolitos sub-vulcânicos; em seguida, quinto estágio, ocorreram intrusões de nefelinas-sienitos – formação dique anelar. Por fim, no sexto e último estágio uma nova atividade vulcânica com atuação de eventos hidrotermais tarde a pós-magmáticos, além de brechas e lujauritos e chibinitos. Segundo Loureiro e Santos (1988) nesse último estágio foi notabilizado por intensa erosão. Todos os eventos de ascensão e subsidência das rochas encaixantes e do próprio maciço geraram um intenso fraturamento regional (Figura 9).

Figura 9: Padrão de lineamentos estruturais do Maciço Alcalino de Poços de Caldas – MG extraídos a partir da combinação de imagens de RADAR e Landsat - TM5.



Fonte: Adaptado de Moreira et al., 2007.

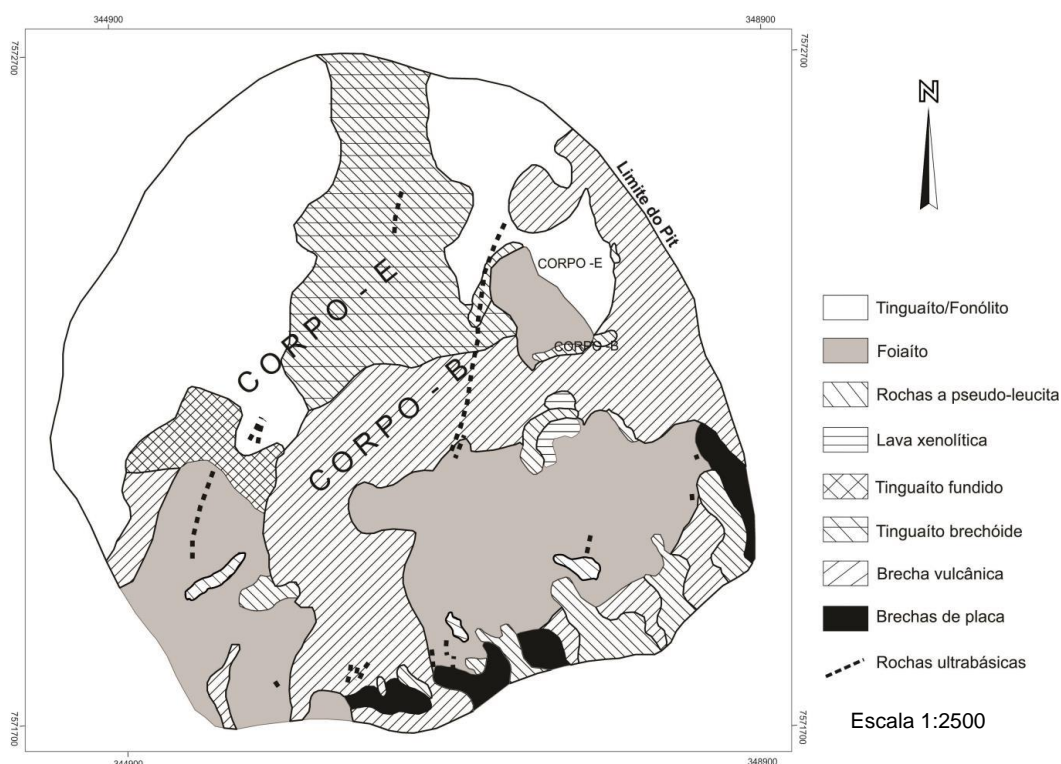


Em âmbito regional há grandes falhamentos no entorno do maciço, porém aqueles orientados para N70-80 desempenharam um papel mais importante no modelamento do relevo (ALMEIDA FILHO & PARADELLA, 1977). Esse padrão de fraturamento obedece a duas direções principais NE-SW e NW-SE (FRAENKEL et al. 1985). Scudino (1992) defende que o padrão de fraturamento NW está relacionado a grandes rupturas oriundas do embasamento cristalino, ao passo que o padrão NE está relacionado a instalação do corpo magmático. As mineralizações de urânio estão diretamente associadas ao padrão de direção NE e NW (MOREIRA et al. 2007). Em menor expressão ocorre um fraturamento de direção N-S. O padrão de fraturamento é mais alterado próximo as bordas da caldeira, onde por vezes ocorre de maneira a acompanhar a curvatura da mesma.

## 4.2 Geologia da cava

A mina de urânio Osamu Utsumi é essencialmente um produto de processos hidrotermais e supergênico. Ela ocupa uma área aproximada de 20km<sup>2</sup> e geologicamente é situada na borda de corpo intrusivo secundário de foiaíta, alocado nas rochas potássicas (Figura 10).

Figura 10: Mapa litológico da cava da mina Osamu Utsumi.



Fonte: Adaptado de Magno Júnior, 1985.

A intrusão desse corpo foiaítico foi seguida por diversos eventos explosivos que afetaram substancialmente as rochas hospedeiras e originaram um pacote de rochas brechadas. Em função da alta permeabilidade dos corpos de brechas, soluções hidrotermais impregnaram a matriz dessas rochas com elementos com urânio e molibdênio e deram origem a mineralização primária (MAGNO JÚNIOR, 1985). A seguir são descritas as principais litologias da cava.

Fonolitos: os fonolitos que sofreram hidrotermalismo representam a maior parte da área exposta da mina. Todos os fonolitos são geneticamente próximos e representam diferentes fases de colocação durante a atividade magmática. Os fonolitos da mina de urânio Osamu Utsumi são mais leucocráticos em comparação com os fonolitos regionais de fora da área da mina (SCHORSCHER e SHEA, 1992). Apenas os fonolitos na porção noroeste da cava não foram afetados por hidrotermalismo e possui muita semelhança com os fonolitos regionais (WABER et al., 1992).

Tinguaítos: são rochas hipoabissais e possuem semelhança com os fonolitos. O termo tinguaíto é usado para definir uma rocha do tipo fanerítica fina, ao passo que os fonolitos são afaníticos. Existe ainda a ocorrência de uma variação comum de pseudo-leucita com fenocristais idiomórficos (MAGNO JÚNIOR, 1985).

Foaítos: uma variação de nefelina sienitos, essas rochas são hololeucocráticas e leucocráticas de granulação média a grossa, equigranulares e inequigranulares. Em determinadas áreas da cava as rochas de granulação média podem apresentar variação porfirítica. O mineral predominante é o feldspato alcalino, seguido pela nefelina e clinopiroxênios. Segundo Waber et al. (1992) em todos os tipos de sienitos nefelinos estudados na cava da mina, ocorrem frequentemente veios pegmatóides compostos por feldspatos alcalinos com nefelina ocasional.

Brechas: esse grupo de rochas constitui as principais rochas hospedeiras dos processos de mineralização primária dos elementos com urânio (U), Tório (Th), Zircônio (Zr) e Elementos Terras Raras (ETR). Os processos hidrotermais relacionados com a brecha desempenharam um papel apenas nas porções de granulação muito fina da matriz. Portanto, fragmentos de rocha e minerais com dimensões inferiores a 2 mm são classificados como matriz (WABER et al., 1992). Dentre as assembleias minerais desenvolvidas por hidrotermalismo as mais abundantes são fluorita+pirita+carbonato+argilominerais e pirita+argilominerais.

De acordo com Magno Júnior (1985) as brechas ainda são subdivididas em Brechas vulcânicas monogenéticas – formadas por rochas afaníticas e faneríticas finas. São responsáveis essencialmente pela chaminé (*pipe*) do depósito. Apresentam elevada variação estrutural; Brechas vulcânicas poligênicas – representam o grupo de rochas da transição entre as brechas não genéticas e a rocha intrusiva. Seus elementos são fragmentos de rochas afaníticas e faneríticas; Brechas de placas - caracterizada por fragmentos pontiagudos em forma de placa. Esta estrutura sugere uma partição da rocha por efeitos de um choque térmico ou mecânico. Ocorre localmente na porção sul e sudeste da cava.

Rochas ultramáficas: são lamprófiros que ocorrem em diversos pontos da cava da mina, porém de forma pontual e em diques. Eles cortam todas as unidades litológicas presentes na área da mina, até mesmo os corpos de brecha. Todos os diques têm orientação semelhante e em nenhum lugar eles se cruzam. Os diques são todos ultrapotássicos (alto teor em  $K_2O$ ) em comparação com outras rochas ultramáficas. Não sofreram alteração hidrotermal, embora tenham sofrido alteração deutérica específica indicada por carbonitização parcial, zeolitização e argilação (WABER et al., 1992).

### 4.3 Metalogênese

As várias fases de estágio de evolução do complexo magmático de Poços de Caldas e as fases ígneas policíclicas condicionaram um ambiente favorável a mineralização da mina Osamu Utsumi, esta, relacionada inicialmente a processos metassomáticos de alteração hidrotermal e posteriormente por alteração intempérica de tinguaítos.

O hidrotermalismo foi responsável pela mineralização primária, ao passo que os processos intempéricos foram responsáveis pela mineralização secundária. Todos os corpos mineralizados são instalados em uma chaminé de brecha tectônica cônica, com dimensões em superfície de 1200 X 600m. A estrutura é composta por brechas tinguaíticas predominantemente, intersectadas por vários diques de tinguaíto e fonolito. As rochas encaixantes são definidas como três principais corpos: foiaítos/nefelina-sienitos, fonolitos e brechas. Ao sul da grande brecha, há uma falha que limita a estrutura, a qual condiciona o contato litológico com lavas tinguaíticas e fonolíticas. As rochas da brecha e subjacentes sofreram alterações hidrotermais, em

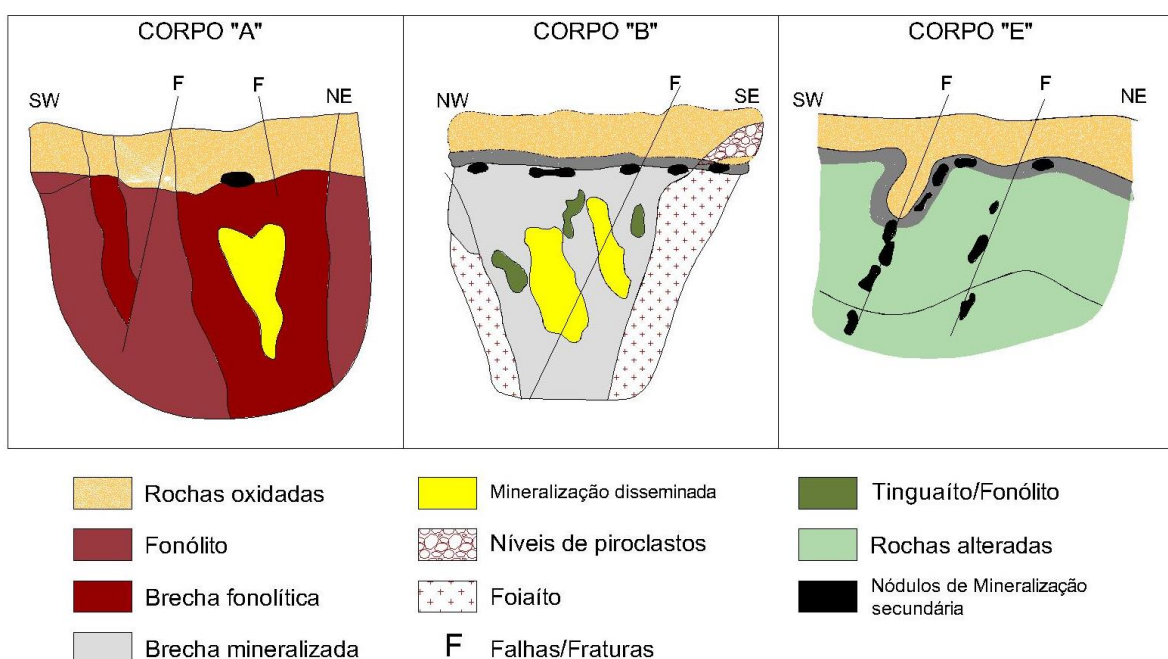
que os principais tipos de alteração são argilização pervasiva e piritização (BIONDI, 2015).

A mineralização primária ocorreu em pulsos magmáticos de foiaitos a elevadas pressões que forçaram a migração da parte fluida do magma nas rochas encaixantes. Os halos de alteração hidrotermal são evidenciados por caolinitas, sericitas e halloysita. Nesse estágio o urânio foi depositado de maneira disseminada nos poros das rochas em forma de pechblenda/uraninita. Também foram depositados fluorita e pirita em veios. Em alguns pontos é possível verificar o fenômeno da fluidização, que representou um importante mecanismo de transporte ascendente do urânio e deu origem a uma brecha de matriz mais fina (FRANKLIN, 2007).

O processo de alteração intempérica, mineralização secundária, foi favorecido pelo intenso fraturamento e alta permeabilidade das rochas da brecha. Esse processo gerou a oxidação da pirita e condicionou a dissolução de sais na água e conseqüentemente a geração de águas ácidas. A água de caráter ácido lixiviou parte do urânio disseminado e o concentrou em nódulos na zona de oxidação/redução.

As diversas formas de ocorrência do minério na cava levaram a parcialização e separação de três diferentes corpos mineralizados, denominados como corpo "A", corpo "B" e corpo "E" (Figura 11).

Figura 11: Ilustração esquemática dos corpos mineralizados descritos na cava da MOU: corpo A; corpo B e corpo E.



Fonte: Adaptado de Magno Júnior, 1985.

Corpo A: O teor médio de  $U_3O_8$  é na ordem de 700ppm. Localizado na porção oeste da cava é representado por um corpo secundário de brecha intrudido em tinguaitos. É relacionado a fenômeno de fluidização. Composto por tinguaitos e fonolitos, possui uma assembleia mineral mineralizada caracterizada por uraninita, baddeleyita, pirita, galena, molibdenita, zircão uraníferos entre outros (BIONDI, 2015).

Corpo B: O teor médio de  $U_3O_8$  é na ordem de 800ppm. Constitui a maior parte das reservas – cerca de 60%. Localizado na porção centro-sul da cava, é um grande corpo de brecha composto por fragmentos de fonolitos, tufos, cinzas e rochas ultrabásicas sob a forma de uma grande chaminé (*pipe*) intrusiva. Sua origem é relacionada as intrusões de foiaítos (MAGNO JÚNIOR, 1985). A assembleia mineral também é variada e os principais minerais de minério são uraninita, molibdenita e zircão. A mineralização principal é do tipo primário, porém também ocorre mineralização secundária na porção superior do corpo.

Corpo E: O teor médio de  $U_3O_8$  é na ordem de 1200ppm. Constitui cerca de 30% das reservas. Está localizado na porção noroeste da cava. A litologia dominante são tinguaitos e fonolitos extremamente fraturados e alterados por hidrotermalismo (MAGNO JÚNIOR, 1985). É composto por nódulos de minérios secundários depositados de forma supergênica na zona de oxidação/redução. Nesse corpo há uma importante contribuição da pirita devido a formação de águas ácidas, que em um primeiro momento solubilizaram o minério previamente disseminado. Na sequência esse minério foi depositado no limite da zona de oxidação frente a zona redutora. Por isso a forma de ocorrência é irregular e descontínua. Na porção superior do perfil – zona oxidada, onde o minério possui menor teor, o urânio foi fixado por adsorção em argilas e hidróxidos de ferro. Na porção inferior – limite entre a zona oxidada e redutora, o minério ocorre em maior teor sob a forma de óxidos de urânio. Em zonas mais fraturadas do corpo, o minério também é concentrado nas fraturas e em argilas que preenchem fraturas.

A assembleia mineral do depósito inclui, além dos minerais de minério como uraninita, minerais gerados durante os diferentes estágios do evento hidrotérmico e são encontrados como impregnação disseminada nas rochas e/ou como preenchimento de veios e vazios. Os principais minerais são fluorita, barita, carbonatos, argilominerais (illita, sericita e caolinita), molibdenita, jorstdisita, zircão e

minerais de Zr, monazita, minerais de ETR (cheralita, bastnasita, crandallita, florencita, gorceixita e goyazita) e especialmente a pirita (WABER et al., 1992).

A pirita é o principal mineral nas rochas afetadas por hidrotermalismo. E os tipos de pirita são divididos em pré, sin e pós-brecha, apenas baseado nas relações texturais. Onde a pirita pré-brecha é a mais abundante e ocorre em todos os fonolitos, tinguaitos e foiaítos. O volume é estimado em 2 a 3%. As piritas sin e pós-brechas ocorrem em pequenos veios da rocha hospedeira, alocados em cavidades abertas e planos de fratura (WABER et al., 1992).

#### **4.4 Hidrogeologia**

No Maciço Alcalino de Poços de Caldas a instalação da caldeira no planalto e os vários eventos de evolução tectônica da área promoveram um intenso fraturamento das rochas encaixantes e intrudidas. Muitas dessas fraturas são profundas que favorece a infiltração e circulação de águas meteóricas. Esse contexto estrutural também favorece o intemperismo químico, o desenvolvimento da pedogênese e avanço do manto de alteração das rochas alcalinas.

No maciço de Poços de Caldas há um predomínio de aquífero fissural. São identificáveis três principais zonas: a zona compreendida no aquífero raso, zona de aquífero intermediária e zona de aquífero profunda (CRUZ e PEIXOTO, 1991). Essa última associada as águas hidrotermais que compreende ainda hoje um importante atrativo turístico através de águas hidrotermais.

A cava possui uma forma ovalada de aproximadamente 1200 x 800m. Toda essa geometria confere a ela a condição de uma grande bacia captadora de águas pluviais. Parte dessas águas são absorvidas pelo próprio maciço fraturado da cava e abastece o aquífero fissural. Porém o aporte hídrico na cava é considerável e, atualmente, para manter o nível freático estável, parte dessas águas são esgotadas através de bombas que operam 24 horas por dia. O volume de águas bombeadas é da ordem de 50m<sup>3</sup> na estação de estiagem e 100m<sup>3</sup> na estação chuvosa (HOLMES et al., 1992).

Na cava da Mina Osamu Utsumi ocorreram diversas intervenções na topografia original e relevo da área. Essas modificações alteraram o padrão de fluxos subterrâneos e fez com que nível freático fosse rebaixado para instalação da cava a céu aberto. Essas mudanças desencadearam uma alteração na frente redox (frente

de oxidação-redução) da cava. Rochas que antes estavam na frente de redução (abaixo do nível freático) foram expostas a zona de oxidação, o que também expôs a atmosfera minerais típicos de ambientes redutores – como sulfetos (Figura 12).

Figura 12: Vista aérea da cava da MOU



Fonte: Alberti, 2017.

Historicamente a oscilação do nível freático na área da cava teve um papel fundamental na formação do depósito, principalmente na concentração de minérios secundários. As frentes redox exibem uma superfície muito irregular devido às variações nas propriedades físicas da rocha e a condutividade hidráulica em torno das fraturas. Um dos exemplos dessa alternância é relatado no estudo de Waber et al. (1992) onde o furo de sondagem denominado F1 interceptou obliquamente algumas dessas fraturas presentes em fonolitos da cava. Foi verificado que um pacote de fonolitos oxidados está topograficamente abaixo do pacote de rochas redutoras. Esse mecanismo é explicado pelos autores por um mecanismo de difusão.

Outras observações importantes enfatizadas no mesmo estudo evidenciam que alguns minerais específicos como pirita, fluorita, carbonatos em geral são dissolvidos na frente de oxidação. Argilominerais como illita e caolinita tendem a diminuir na frente de oxidação. Esfarelita e outros sulfetos ocorrem somente na frente de redutora. O feldspato potássico é dissolvido na zona redutora e nesses locais podem ocorrer o surgimento nódulos de pechblenda secundária na matriz dessa rocha

reduzida. Minerais como jarosita e alunita podem ocorrer em função da oxidação da pirita.

Há um modelo hidrogeoquímico conceitual da cava proposto por Alberti (2017) baseado em dados de poços de monitoramento. Nesse estudo foram elaboradas superfícies potenciométricas do aquífero e condutividade hidráulica dos poços. O autor comprova que o fluxo subterrâneo na cava da MOU é influenciado pelo bombeamento das águas ácidas na cava, o qual mantém o nível potenciométrico abaixo da cota de 1328m, o que por sua vez desencadeia um fluxo das águas subterrâneas na direção do lago da cava. As áreas na borda da cava são áreas de recarga e o nível potenciométrico destas áreas de recarga, de maiores altitudes topográficas, direciona o fluxo subterrâneo para áreas de menor carga hidráulica.

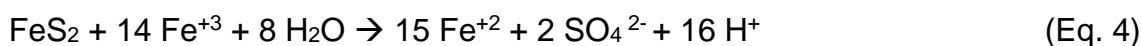
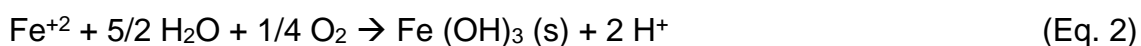
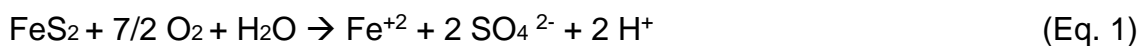


## 5. DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

### 5.1 Conceitos gerais

A drenagem ácida de mina – DAM, é um fenômeno caracterizado pelo baixo valor de pH, liberação de sulfatos e mobilização de metais como Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Urânio (U) em forma de íons (LANDA, 1999). A exposição de minerais sulfetados em atividades como escavação, decapeamento, desmonte e disposição de rochas alteram a permeabilidade do solo e promove maior interação com a atmosfera. O rebaixamento do nível freático também contribui para maior exposição de sulfetos presentes nas rochas, que tende a acelerar o processo de oxidação de tais minerais. Esse processo de oxidação pode gerar acidez do meio e a mobilização de íons presentes na rocha/minério. Toda essa gama de efeitos contribui para contaminação de corpos hídricos e aquíferos no entorno de complexos mineiros (EVANGELOU, 1998).

Em condições de subsuperfície os minerais sulfetados tendem a apresentar estabilidade e equilíbrio químico com o meio, porém, uma vez expostos a atmosfera ou em contato com gases da atmosfera, apresentam tendência a oxidação. O mineral de sulfeto mais abundante e comumente encontrado em diversas minerações é a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e a reação de oxidação da pirita é usualmente empregada para a descrição de DAM. É um processo complexo que ocorre em diversas etapas e sofre influências bacterianas (*T. Ferrooxidans*) e de parâmetros químicos de pH e Eh (EVANGELOU, 1995). As reações mais representativas desse processo são:



As equações descritas ocorrem em diferentes estágios com diferentes parâmetros químicos associados. São diversas variantes que ocorrem ao longo da cadeia de oxidação: condições físico-químicas no interior da rocha, condições hidro geológicas do meio, tempo de exposição ao oxigênio atmosférico e processos

microbiológicos. A seguir são apresentadas as tabelas 1, 2 e 3 com os quadros resumo em diferentes estágios descritos por Kleinmann et al. (1981).

Tabela 1: Estágio 1 – Os grãos finos da pirita (granular) são oxidados tanto pelo ar quanto pelas bactérias (T. Ferrooxidans), com igual quantidade de ácido produzido pela oxidação do sulfeto a sulfato (reação da equação 1) e pela hidrólise do  $Fe^{+3}$  (incluída na equação da reação 2). A queda do pH ocorre de forma moderada e chega a um pH – 4,5.

Mecanismo	Eq. 1 $FeS_2 + 7/2 O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{+2} + 2 SO_4^{2-} + 2 H^+$	Ocorre tanto abioticamente, quanto pela influência direta das bactérias.
	Eq. 2 $Fe^{+2} + 5/2 H_2O + 1/4 O_2 \rightarrow Fe (OH)_3 (s) + 2 H^+$	Ocorre abioticamente, reduz a velocidade da oxidação a medida que o pH cai. (Como a oxidação abiótica do $Fe^{+2}$ reduz a velocidade, a bactéria assume papel primário de oxidar $Fe^{+2}$ , a permitir enquanto isso que a reação da equação 2 continue a produzir acidez e hidróxido férrico.) Isto inicia o 2º estágio do processo reacional.
Química	pH > ~ 4,5; ↑ aumento na concentração de $SO_4$ ↓ diminuição na concentração de Fe Pouca ou nenhuma acidez	

Fonte: Adaptado de Kleinmann et al. (1981).

Tabela 2: Estágio 2 – Com o decorrer da reação da equação 2, mais uma vez, é possível para o pH apresentar estabilidade nesta zona do Maciço, entretanto isto normalmente só acontecerá quando a permeabilidade ou a quantidade da área superficial exposta da pirita for pequena. Caso contrário, o pH irá decrescer continuamente, o que levará ao estágio 3, onde a produção de ácido é mais rápida.

Mecanismo	Eq. 1 $FeS_2 + 7/2 O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{+2} + 2 SO_4^{2-} + 2 H^+$	Ocorre tanto abioticamente, quanto pela influência direta das bactérias.
	Eq. 2 $Fe^{+2} + 5/2 H_2O + 1/4 O_2 \rightarrow Fe (OH)_3 (s) + 2 H^+$	Ocorre a uma taxa determinada primariamente pela atividade da bactéria (T. Ferrooxidans)
Química	pH na faixa 2,5 a 4,5 ↑ aumento na concentração de $SO_4$ ↓ diminuição na concentração de $Fe^{+3}/Fe^{+2}$ e ↑ aumento na concentração de Fe-total ↑ aumento da acidez	

Fonte: Adaptado de Kleinmann et al. (1981).

Tabela 3: Estágio 3 – Em pH < 3, o aumento da solubilidade do Fe e o decréscimo da taxa de precipitação de Fe(OH)<sub>3</sub>, resultam em uma atividade de Fe<sup>+3</sup> aumentada. O estágio 3 começa, quando a atividade do Fe<sup>+3</sup> ocorre de maneira significativa a um pH de ~2,5. Um ciclo vicioso de oxidação da pirita e oxidação bacteriana do Fe<sup>+2</sup>, resulta de um efeito combinado das reações 3 e 4. Este estágio inclui tanto a pirita granular, quanto a framboidal.

Mecanismo	Eq. 3 $\text{Fe}^{+2} + 1/2 \text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{+3} + 1/2 \text{H}_2\text{O}$	Ocorre a uma taxa totalmente determinada pela atividade da bactéria ( <i>T. Ferrooxidans</i> ). A taxa da reação da equação 3 mostra controle primário no ciclo de oxidação, o qual limita a disponibilidade de Fe <sup>+3</sup> , que é o principal oxidante da pirita.
	Eq. 4 $\text{FeS}_2 + 14 \text{Fe}^{+3} + 8 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 15 \text{Fe}^{+2} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$	Ocorre a uma taxa determinada primariamente pela taxa da reação da equação 3. (A atividade de equilíbrio do Fe <sup>+3</sup> é determinada pelos efeitos combinados da oxidação bacteriana do Fe <sup>+2</sup> e pela redução do Fe <sup>+3</sup> pela pirita, e a formação de complexos hidróxidos e sulfatos férricos associados).
Química	pH <~ 2,5 ↑ aumento na concentração de SO <sub>4</sub> ↑ aumento na concentração de Fe <sup>+3</sup> /Fe <sup>+2</sup> e ↑ aumento na concentração de Fe-total ↑ aumento da acidez	

Fonte: Adaptado de Kleinmann et al. (1981).

Outra importante espécie de bactéria que atua como agente catalisador na oxidação do íon ferroso a férrico são as *Acidithiobacillus Ferrooxidans*. A espécie utiliza o substrato inorgânico como fonte de crescimento e fonte de energia. A oxidação do íon Fe<sup>2+</sup> transfere elétrons que fornecem energia para a fosforilação do difosfato de adenosina (ADP) e posterior formação do trifosfato de adenosina (ATP), responsável pela circulação de energia da célula. As condições ideais para o desenvolvimento da espécie são pH em torno de 3 e temperatura em 30° C (EVANGELOU, 1995).

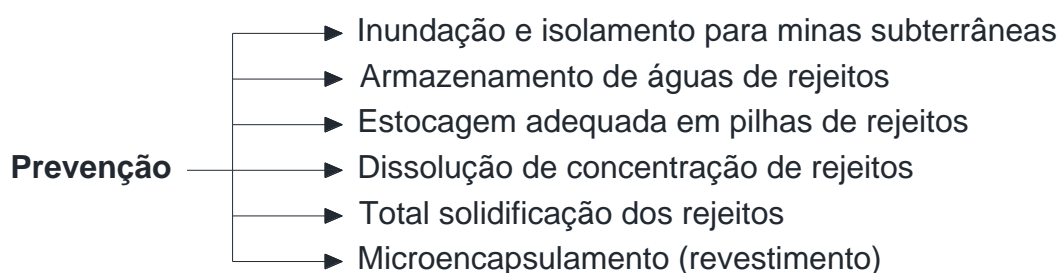
Os efeitos da poluição ocasionada pela drenagem ácida e os valores baixos de pH pode aparecer tardiamente. E em determinados empreendimentos mineiros, esse efeito tardio muitas vezes é interpretado, de maneira equivocada, como áreas inertes ao passivo ambiental de DAM. Isso ocorre porque carbonatos e outros minerais que

contribuem para a alcalinidade do meio são consumidos lentamente pelos ácidos do processo de oxidação da pirita. Após o consumo desses elementos, os ácidos aumentam a concentração total e intensificam o processo de acidificação do meio. Por isso é necessário fazer uma previsão com o potencial gerador de acidez de piritas e outros minerais sulfetados. O acompanhamento mineralógico das frentes de lavras também é essencial, uma vez que as composições desses minerais são variadas na composição rochosa.

## 5.2 Métodos de prevenção e remediação

O problema da DAM não é novidade em minerações. Em diversos empreendimentos mineiros são descritos o fenômeno (ARNOLD et al., 2011; FERNANDES et al., 1998; GROUDEV et al., 2008; KLIMKOVA et al., 2011; JOHNSON & HALLBERG, 2005; ROIG et al., 1997). A partir do momento do conhecimento das causas e dos processos de formação da drenagem ácida, a melhor forma de resolver o problema é prevenir para evitar que ocorra. A figura 13 apresenta um esboço de etapas preliminares em minas em fase de descomissionamento para implementação com o intuito de evitar ou minimizar a ocorrência do fenômeno.

Figura 13: Esboço com etapas preliminares para evitar a formação de DAM.



Fonte: Adaptado de Johnson & Hallberg, 2005.

A interação entre água, oxigênio e minerais sulfetados são algumas das premissas necessárias para que a DAM ocorra e perpetue, por tanto uma maneira de mitigar os impactos é evitar a interação entre esses três materiais. Uma técnica frequentemente adotada em minas profundas abandonadas ou em fase de descomissionamento é a inundação e selagem da cava subterrânea. Segundo Johnson & Hallberg (2005) essa técnica só é de fato eficiente quando as entradas de ar são conhecidas e controladas. Li et al. (1997) descrevem a técnica de estocagem

de águas subterrâneas provenientes de rejeitos da mineração, também com o intuito de evitar contato direto da água com o oxigênio.

Dentre as técnicas de evitar interação direta de oxigênio com água a técnica de blendagem representa a mistura de materiais que apresentam pH abaixo de 7 com compostos biológicos consumidores como descrito por Mehling et al. (1997). O intuito dessa técnica é estabilizar quimicamente o meio.

Uma outra técnica é evitar o contato direto de água com os rejeitos, que utiliza a solidificação total dos rejeitos. Essa representa uma demanda constante de empreendimentos mineiros, uma vez que além da DAM, problemas como estocagem de rejeitos são encarados com maior seriedade após os eventos de rompimento das barragens de rejeitos da Samarco em 2015, e da barragem de rejeitos da Vale de Brumadinho em 2019 (WILLIAMS, 2021).

Também é muito comum uma técnica conhecida como barreira de oxigênio que consiste em cobrir as pilhas de rejeitos com material de granulometria mais fina, o que resultaria em um isolamento do material frente ao potencial oxigênio. Técnica análoga a selagem e isolamento (PARK et al., 2019).

Mesmo com o conhecimento de que a prevenção é a melhor maneira para o problema de DAM, muitas vezes as técnicas preventivas não são aplicadas ou mesmo não são suficientemente eficientes. Nesse caso é preciso considerar a questão ambiental com a percepção de resolução do problema, o qual é denominado de processos de remediação ambiental. O intuito principal é realizar um tratamento das águas ácidas, para aumentar a concentração de pH, de maneira que a água tratada possa retornar ao meio ambiente.

A remediação ambiental também abrange diversas técnicas e maneiras de abordagem, as quais são divididas em processos biológicos e processos abióticos, que por sua vez, em ambos os casos são subdivididos em sistemas passivos e ativos. Usualmente as técnicas abióticas consistem em aplicar constantemente materiais alcalinos para neutralizar águas ácidas e precipitar metais dissolvidos.

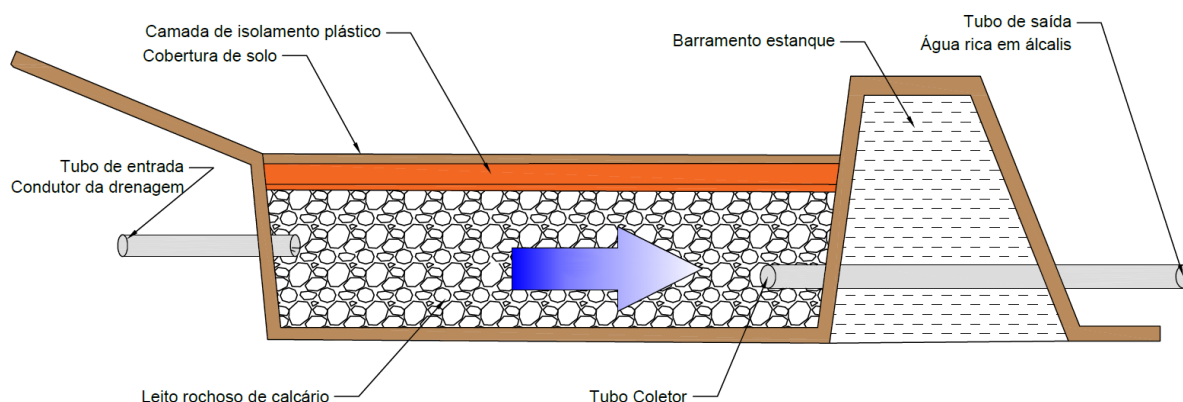
Sistemas passivos possuem menos manutenção do que sistemas ativos, porém podem apresentar custos maiores para implementação, o que por vezes torna o emprego da técnica inviável.

O sistema ativo de remediação abiótica é representado majoritariamente pela técnica da adição de cal e aeração, o que resulta em uma neutralização induzida. O princípio básico da técnica não envolve grandes tecnologias, possui resultados

práticos bons, porém, a depender da quantidade de águas para tratamento podem apresentar altos custos de manutenção e ainda geram precipitados químicos como rejeitos do processo.

As tecnologias passivas possuem como principal vantagem a necessidade de pouca ou nenhuma manutenção; não requerem a adição constante de reagentes químicos, o que torna uma tecnologia com baixo custo operacional. A técnica mais empregada na remediação abiótica, aquela que não envolve organismos vivos, é o dreno anóxico de calcários (DAC; Figura 14). O principal objetivo dessa técnica é adicionar álcalis enquanto mantém o ferro em sua forma de cátion reduzida, de maneira a evitar a precipitação de ferro ferroso  $Fe^{2+}$ , o qual pode comprometer a eficiência dos agentes redutores álcalis. Os DACs são usualmente empregados como um componente do sistema de tratamento e podem estar associados a outras técnicas (KLEINMANN et al.,1998).

Figura 14: Esquema de dreno anóxico de calcário.



Fonte: Adaptado de HÄMÄLÄINE, E. TURUNEN (2012).

No interior dos drenos, os teores de dióxido de carbono são elevados, o que causa uma aceleração das taxas de dissolução do calcário. O dreno funciona como uma câmara estanque com apenas uma entrada e uma saída. A água ácida é canalizada e direcionada a fluir sobre um leito de pedregulho de calcário dentro do dreno e em seguida água flui pelo orifício de saída do dreno, após interagir com o calcário. Uma das limitações dos drenos é em relação a drenagens com altos teores de  $Fe^{3+}$  e alumínio dissolvidos. A abundância desses elementos pode gerar precipitados na forma de hidróxidos, o que compromete a capacidade de permeabilidade dos drenos em médio a longo prazo. O tempo de vida útil dos drenos

depende justamente da composição da drenagem, mas costumam ter uma vida útil de 15 a 20 anos (WOLKERSDORFER, 2008). Evangelou (1998), também alerta para as dificuldades de dissolução do calcário na presença de carbonatos de ferro e manganês precipitados no processo.

Métodos de remediação biológicos ou bioremediação do fenômeno DAM são métodos que consideram a capacidade de certos organismos de gerar um meio alcalino e neutralizar e imobilizar certos metais presentes no meio. De certa forma são organismos capazes de reverter as reações que desencadearam a acidez do meio, o qual representa processo inverso. Dentre as principais técnicas abordadas por esse método é possível destacar as técnicas ativas e passivas, que englobam tanques aeróbicos, reatores e biorreatores e barreiras permeáveis reativas (JOHNSON & HALLBERG, 2005).

Na literatura técnica existem diversos relatos de bioremediação. Chockalingam & Subramanian (2006) utilizaram casca de arroz e uma cultura da bactéria *Desulfotomaculum nigrificans* em uma mineração abandonada de cobre no distrito de Karnataka na Índia. O objetivo foi neutralizar a ocorrência de DAM no local, gerada principalmente pelos altos teores de pirita presente na rocha. Em uma escala experimental os autores chegaram a remover quase que por completo os íons de ferro, zinco, cobre e ainda reduzir em 73% os níveis de sulfato dissolvidos.

No trabalho de Jin et al. (2008), os autores empregaram a técnica de injeção de uma mistura de material inóculo em poços de injeção em uma antiga mineração de carvão. O material injetado era composto por uma mistura de efluentes sólidos coletados de uma estação de tratamento de água com substâncias inoculas derivadas de resíduos de produção láctea de fazendas. O acompanhamento das injeções foi realizado por monitoramento eletromagnético através de arranjo Dipolo. Nos primeiros dois anos os resultados apontaram um aumento significativo dos valores de pH das águas, de 1,3 os valores passaram para 5,7 e em alguns pontos chegaram a 7,3. Os autores ressaltam que a técnica de monitoramento é muito mais barata e menos invasiva do que perfurar diversos poços de monitoramento. Também é enfatizado a importância da identificação dos pontos de maior contribuição de drenagem ácida, o qual eles adotam o termo de *hotspots*.

Além das técnicas de remediação e prevenção abordadas há um método de tratamento que também tem sido aplicado cada vez mais, que abrange uma temática de sustentabilidade: os métodos de reciclagem de resíduos. Uma tendência mundial

de conscientização é cada vez mais pujante. Nesse sentido empresas e universidades investem em pesquisas para o aproveitamento dos resíduos e rejeitos da mineração.

O trabalho de Park et al. (2019) aborda o assunto e discute as melhores e mais concretas aplicações dos resíduos, sendo elas:

- Material de construção para estradas e rodovias: alternativa construtiva de materiais empregado como agregado na execução de bases e sub-bases de pavimentação e também como agregado da mistura asfáltica;
- Aditivos para cimentos: pirita e minerais ricos em oxigênio diminuem a temperatura de calcinação para a formação do clínquer, pois a decomposição desses materiais liberam calor e oxigênio respectivamente. Os autores ainda alertam para a dosagem desses materiais, pois a adição em excesso pode afetar as propriedades físicas do cimento;
- Geopolímeros (compostos inorgânicos) e blocos de tijolos: a maioria dos rejeitos de mineração são ricos em teores de Si e Al, que são materiais essenciais para geopolímeros. Algumas das vantagens levantadas pelos autores são: ganho de resistência rápido, alta resistência a ataques ácidos, aderência superior a agregados, imobilização de substâncias tóxicas e um consumo reduzido de energia e emissão de gases para sua produção. Para a fabricação de tijolos é preciso que as concentrações de Si/Al estejam dentro dos valores proporcionais de 1 a 5 e Na/Al próximo a 1.

### **5.3 Drenagem ácida de mina em minerações de Urânio**

A geração de resíduos e rejeitos também ocorre em minerações de urânio. O urânio não é um elemento abundante na crosta terrestre e sua forma de ocorrência mais comum é óxido de urânio,  $U_3O_8$ . Por possuir concentrações relativamente baixas os teores desses minérios são comumente tratados com parte por milhão (ppm). Os maiores teores de minério do mundo são encontrados em minas do Canadá, onde algumas chegam a apresentarem teores de 200.000 ppm, mas a maioria dos depósitos de urânio no mundo apresentam teores médios superiores a 1000 ppm (PIRES, 2013).

Por esses motivos a extração do minério gera uma quantidade significativa de rejeitos e estéreis. E o problema das drenagens ácidas ocorre quando a assembleia mineralógica do depósito inclui minérios da classe dos sulfetos, o que não é raro em



depósitos de urânio. Por tanto, é relativamente comum ocorrer problemas de DAM associados a depósitos de urânio.

O depósito de Curilo, localizado no oeste da Bulgária, operou até a 1990 com métodos de lavra misto – lavra a céu aberto e lavra subterrâneo. O depósito rico em urânio também continha elevados teores de pirita, o que desencadeou problemas com DAM, além de elevados teores de radionuclídeos e metais pesados. Para controlar o passivo ambiental foram utilizados diversos métodos de tratamento. Tanques anaeróbicos, barreiras permeáveis reativas e drenos alcalinos, os quais são reportados detalhadamente por Groudev et al. (2008).

Outro exemplo de tratamento em mina de urânio é relatado por Johnson & Hallberg (2005) em uma planta piloto de bioremediação passiva monitorada durante dois anos, na mina de Wheal Jane tin, em Cornwall, Inglaterra. A técnica de bioremediação também foi empregada por Haferburg et al. (2006) em uma mina de urânio exaurida na cidade de Kauern, na Alemanha.

Em outra mina subterrânea abandonada de urânio na Alemanha – mais precisamente no município de Königstein, estado da Saxônia, Arnold et al. (2011) utilizaram a técnica de espectroscopia de fluorescência resolvida no tempo para identificar especiações de urânio em ambientes de drenagem ácida de mina. Na mesma área de estudos, Krawczyk-Bärsch et al. (2011) desenvolveram experimentos com biofilmes para combater a migração de urânio.

Em outro estudo experimental realizado em escala de laboratório, Klimkova et al. (2011) desenvolveram um tratamento de águas ácidas provenientes de uma mineração na cidade de Straz pod Ralskem, República Tcheca, com o emprego da técnica de nanopartículas de ferro com valência zero. Os resultados do experimento comprovaram a eficiência das nanopartículas pois houve aumento do pH, diminuição do potencial Eh e das concentrações de todos os poluentes.

No estuário de Huelva, formado pelos rios Tinto e Odiel, no distrito de Huelva – Espanha, o estudo conduzido por Hierro et al. (2013) analisou o impacto e a formação de precipitados de urânio no local. O rio Tinto é poluído com drenagem ácida, radionuclídeos e metais pesados oriundos da exploração da região denominada de Cinturão de Pirita Ibérico. Nesse estudo os autores demonstram a importância das faixas de valores de pH nos processos de precipitação de urânio no meio estuarino.

No mesmo estuário Villa et al. (2011) confirmaram a região do Cinturão de Pirita Ibérico como uma das fontes de contaminação de urânio e também apontou uma segunda fonte proveniente de fabricas na jusante do rio, que descartam efluentes de fosfogesso no local.

Na mina de urânio Hejiacun, na região central de Hunan, China, Peng et al. (2009) propuseram um estudo para estimar e avaliar a extensão da poluição por metais pesados de DAM despejados no rio Wolong. Os autores utilizaram a técnica de Espectrometria de Massa com Fonte de Plasma e concluíram que as águas superficiais da área da mina têm altos valores de metais pesados e são a fonte potencial de contaminação por metais pesados do ambiente circundante. Os autores ainda sugeriram o tratamento adequado das águas de caráter ácido antes de serem drenadas para fora do local da mina.

A própria MOU já foi objeto de estudos alternativos para tratamentos da DAM. A remoção de contaminantes em efluentes a partir de troca iônica foi empregado por Nascimento et al. (2004) com o intuito de remover e recuperar o urânio dos resíduos. O estudo foi realizado em escala experimental. Os autores conseguiram um índice de descontaminação 94% mais eficiente do que o atual método de tratamento dos efluentes, porém o alto custo de implementação em grande escala inviabilizou o tratamento.

## **6. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **6.1 Geofísica**

#### **6.1.1 Introdução**

A geofísica é uma ciência que aplica os princípios da física para estudar o planeta Terra. A maneira que esses estudos são realizados é a partir de medições na superfície ou próximo a ela e busca atingir objetivos diversos através do contraste entre propriedades físicas de materiais da Terra (KEAREY et al., 2002). Dessa maneira a geofísica trabalha com parâmetros e dados qualitativos para investigação de subsuperfície. Para comparação, um método alternativo de investigação da geologia, coleta de dados quantitativos, é representado por campanha de sondagens e recuperação de testemunhos, porém com a desvantagem de dados pontuais, com menor abrangência relativa.

Os levantamentos geofísicos, representado pelos métodos de exploração geofísica, podem apresentar ambiguidades ou até incertezas durante a etapa de interpretação. E comparados a métodos de amostragem direta, representam um meio relativamente rápido e barato para obtenção de dados geológicos de subsuperfície. É importante salientar que os estudos geofísicos não dispensam a necessidade de levantamentos por sondagens, mas pode otimizar as áreas de interesse e minimizar o número de sondagens (KEAREY et al., 2002).

A interpretação dos dados é de suma importância nos resultados finais de um estudo geofísico. Isso porque a solução de um problema pode não ser única – o que implica que não apenas um modelo geológico explica os dados obtidos. As medidas geofísicas de forma absoluta são precisas, porém essa ambiguidade costuma surgir justamente na etapa de interpretação dos dados. A dificuldade e ambiguidade de resultados é passível de amenização a partir de um conjunto de técnicas/métodos geofísicos (KEAREY et al., 2002). Ainda assim, o domínio de modelos geológicos e o conhecimento sobre as limitações e usos são essenciais para melhor compreensão dos dados e aproximação com a geologia local.

Dentro da ciência da geofísica existe uma divisão geral dos métodos geofísicos empregados para os mais diferentes objetivos, desde pesquisa mineral, estudos ambientais, hidrogeológicos, geotécnicos, arqueológicos, dentre outros. De acordo

com Reynolds (2011) são separados em dois grupos distintos: os métodos passivos que detectam variações de campos naturais (ou potenciais) da Terra, como os métodos gravitacionais e magnéticos onde são investigadas perturbações localizadas que são causadas por feições geológicas ocultas; e os métodos ativos que compreende os métodos em que sinais são gerados artificialmente e transmitidos para o maciço, onde na sequência é avaliado a intensidade com que esses sinais retornam a fonte geradora ou a outros canais receptores – por exemplo os métodos sísmicos, polarização induzida e Eletrorresistividade.

A adequação dos métodos é realizada para diferentes objetivos, sempre baseado no contraste de propriedades físicas entre o alvo e o meio ao redor. O resumo dos métodos geofísicos, parâmetros medidos e propriedades físicas operativas é apresentado no quadro 1.

Quadro 1: Métodos geofísicos.

<b>Método</b>	<b>Parâmetro medido</b>	<b>Propriedades físicas operativas</b>
Sísmico	Tempos de percurso de ondas sísmicas refletidas / refratadas	Densidade e módulos elásticos, os quais determinam a velocidade de propagação de ondas sísmicas
Gravitacional	Variações espaciais da força do campo gravitacional da Terra	Densidade
Magnético	Variações espaciais da força do campo geomagnético	Suscetibilidade magnética e remanência
Elétrico		
Resistividade	Resistência elétrica da Terra	Condutividade elétrica
Polarização induzida	Voltagens de polarização ou resistência do solo dependente da frequência	Capacitância elétrica
Potencial espontâneo	Potenciais elétricos	Condutividade elétrica
Eletromagnético	Resposta às radiações eletromagnéticas	Condutividade e indutância elétricas
Radar	Tempos de percurso de pulsos de radar refletidos	Constante dielétrica

Fonte: Adaptado de Kearey et al. (2002).

No presente estudo o método empregado é o método da Eletrorresistividade. O método da Eletrorresistividade foi desenvolvido no início do século XX com uso voltado primeiramente para pesquisa mineral. Porém ganha popularidade a partir das décadas de 70 e 80, com emprego da geofísica aplicada em estudos de engenharia, hidrogeologia e meio ambiente – com foco em investigações de alvos mais rasos;

além de avanços tecnológicos como o advento de *softwares* e o uso de computadores para agilizar o tratamento dos dados (REYNOLDS, 2011). O avanço tecnológico também permitiu o desenvolvimento de diferentes técnicas de aplicação do método que serão abordados e discutidos na sequência do capítulo.

A escolha do método foi baseada nos objetivos propostos no trabalho. Parte das rochas alcalinas presentes na área de estudo tendem a apresentar assinatura geofísica com elevada resistividade elétrica relativa - quando em meios com características isotrópicas (no caso da área de estudos, porções do maciço com baixo grau de fraturamento e alteração química). A elevada resistividade elétrica ocorre principalmente ao predomínio de silicatos na composição mineralógica das rochas. Mas no caso da cava da MOU, existem outros fatores que favorecem o contraste de propriedades físicas entre as rochas. Os principais são a grande variedade litológica presente na cava, além de diversos processos vulcânicos e tectônico. Esses últimos favoreceram um intenso fraturamento e alteração química do maciço.

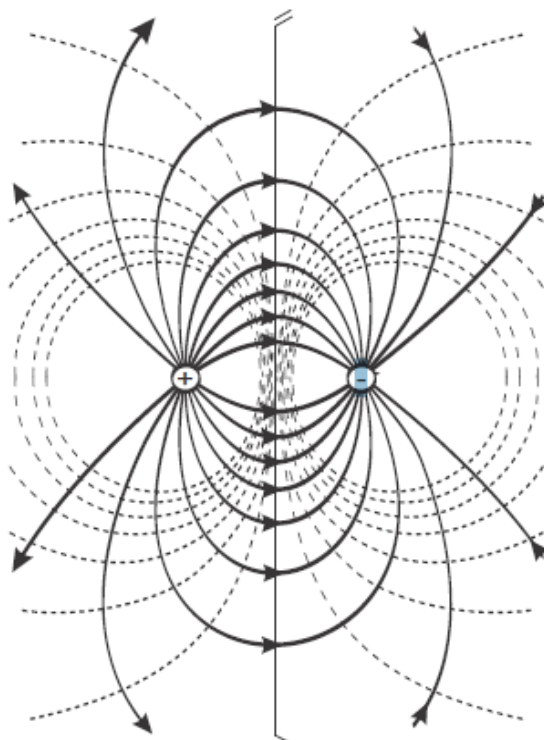
O elevado fraturamento do maciço da cava favoreceu o aquífero fissural da cava. Essa permeabilidade secundária e a saturação contribuem para um dos meios de propagação do campo elétrico. Por tanto zonas com maior presença de água tendem a apresentar uma assinatura geofísica de baixa resistividade elétrica, especialmente as águas com altas concentrações de íons. Minerais presentes no maciço com a pirita, quando expostos, sofrem dissolução e tendem a liberar íons e sais no meio aquoso e conseqüentemente desencadeiam passivos ambientais como drenagem ácida de mina. A quantidade de sais no meio aquoso é o mais importante fator de condutividade elétrica, chamada de propagação iônica ou eletrolítica – o que, por sua vez, implica em uma assinatura geofísica de mais baixa resistividade em meios com mais sais e íons dissolvidos.

### **6.1.2 Campo elétrico e potencial elétrico**

O campo elétrico é uma grandeza vetorial que apresenta magnitude e sentido, influenciada pela intensidade e também pela natureza das cargas (HALLIDAY et al., 2009). Uma carga elétrica apresenta um campo elétrico associado, assim como um corpo de carga apresenta um campo gravitacional associado. No Sistema Internacional – SI, o campo elétrico é representado pela unidade de newtons por Coulomb ( $N.C^{-1}$ ) ou seu equivalente volts por metro ( $V.m^{-1}$ ).

O potencial elétrico representa a energia potencial por unidade de carga em um ponto do espaço, e o campo elétrico é definido em termos de potencial elétrico ou superfícies equipotenciais (Figura 15). Superfícies equipotenciais podem ser uma superfície real ou imaginária que possuem pontos vizinhos com o mesmo potencial elétrico. São distribuídas sempre perpendicularmente ao campo elétrico (HALLIDAY et al., 2009)

Figura 15: Linhas do campo elétrico (linhas cheias) e linhas tracejadas que representam uma seção transversal das superfícies equipotenciais para um campo uniforme.



Fonte: Adaptado de Halliday et al. (2009).

### **6.1.3 Resistência e resistividade**

A resistência elétrica representa a dificuldade de a corrente elétrica fluir pelo condutor, no caso, a resistência à corrente. A primeira lei de Ohm afirma que a corrente que atravessa um material é sempre diretamente proporcional à diferença de potencial aplicada a esse material. Dessa maneira, quando aplicamos uma mesma diferença de potencial em uma barra de cobre e em outra barra de vidro com as mesmas dimensões que a primeira, os resultados são distintos. E a característica

própria do material que determina essa diferença do potencial é denominada de resistência elétrica. Para o cálculo da resistência entre dois pontos de um condutor, é aplicado uma diferença de potencial (V) entre esses pontos e medido a corrente (i) resultante (HALLIDAY et al., 2009). A relação matemática é apresentada pela equação 5:

$$R = \frac{V}{i} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

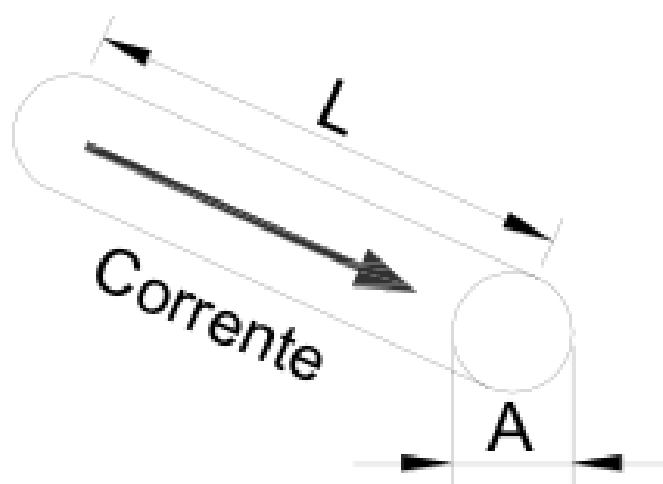
V = diferença de potencial com unidade de medida expressa em Volts (V);

R = resistência elétrica com unidade de medida expressa em Ohms ( $\Omega$ );

i = corrente elétrica com unidade de medida expressa em Ampere (A).

Porém a segunda lei de Ohm trata da resistência elétrica. Essa propriedade física de cada material depende tanto das dimensões como também de sua forma geométrica. É conhecida como resistividade elétrica ( $\rho$ ) a propriedade física dos materiais que condiciona a facilidade ou dificuldade em transmitir corrente elétrica (Figura 16). Expressa matematicamente pela equação 6:

Figura 16: Propagação de corrente elétrica através de meio com dimensões conhecidas.



Fonte: Adaptado de HALLIDAY et al., 2009.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

R = resistência elétrica com unidade de medida expressa em Ohms ( $\Omega$ );

L = comprimento do material com unidade de medida expressa em metros (m);

A = área da seção do material com unidade de medida expressa em metros quadrados ( $\text{m}^2$ );

$\rho$  = resistividade com unidade de medida expressa em ohm.m.

A equação 6 também pode ser expressa pela equação 7:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L} \quad (\text{Eq.7})$$

A resistência é a propriedade de um dispositivo, enquanto a resistividade é uma propriedade de um material. A unidade de medida de resistividade adotado no SI é Ohm.m. Podemos citar também a condutividade, que representa basicamente o inverso da resistividade. A condutividade é entendida como a capacidade de um material sustentar o fluxo de corrente por determinado período (EVERETT, 2013).

#### **6.1.4 Método da Eletroresistividade**

As primeiras experiências que envolveram métodos geoeletricos com registros na história são datadas da primeira metade do século XVIII, com um trabalho pioneiro sobre a resistividade de rochas publicado em 1720 por Gray e Wheeler, e outro trabalho pioneiro sobre a resistividade dos solos publicado por Watson em 1746 (ORELLANA, 1972).

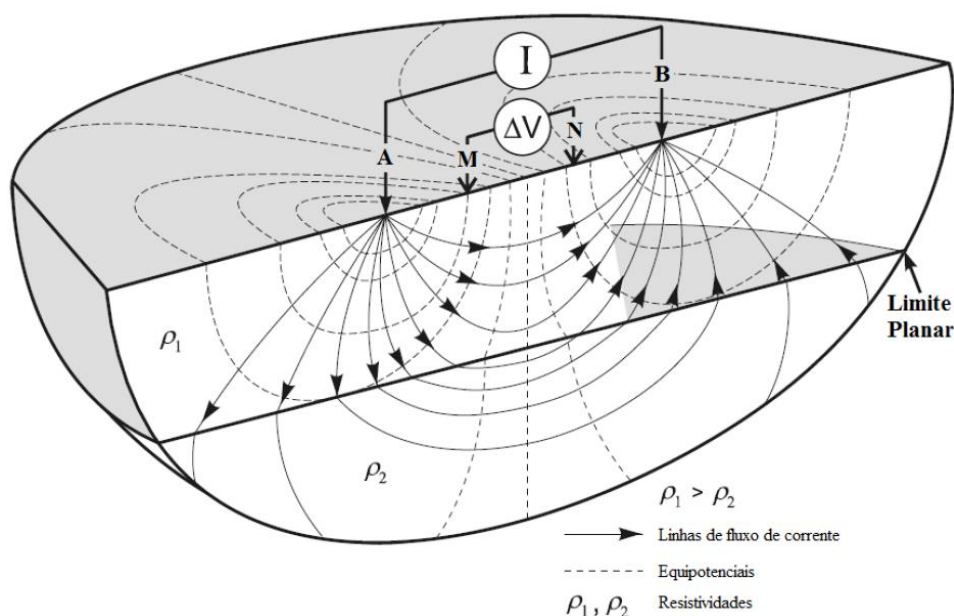
Porém é no início do século XX que o método recebe atenção especial de cientistas que revolucionaram as operações em campo. Em 1915 Conrad Schlumberger na França e Frank Wenner nos Estados Unidos idealizaram, de forma independente, dispositivos de quatro eletrodos arranjados em disposição geométrica específica e voltados a prospecção de subsuperfície, que mais tarde receberiam as denominações de arranjo Schlumberger e arranjo Wenner. Conrad Schlumberger se juntou com seu irmão, Marcel, ao físico francês Raymond Maillet e ao matemático italiano Sabba S. Stefanescu para aprimorar o método e solucionar problemas



matemáticos de propagação de correntes elétricas contínua em meios estratificados – isotrópicos e anisotrópicos. Em 1932 publicaram fundamentações teóricas que ainda servem de base para aplicações do método (ORELLANA, 1972).

O método da Eletrorresistividade, depois do método sísmico, é um dos métodos geofísicos mais difundidos e a base de operação consiste em injetar no solo correntes elétricas contínuas ou de frequência muito baixas, artificialmente geradas por intermédio de um par de eletrodos denominados de A e B. Essa tensão introduzida gera um desequilíbrio elétrico no meio e as diferenças de potencial resultantes são medidas na superfície por intermédio de outro par de eletrodos, denominados M e N na área de influência do campo elétrico (Figura 17).

Figura 17: Propagação de campo elétrico em meio tridimensional, por meio de um dispositivo de quatro eletrodos



Fonte: Knödel et al., 2007.

A principal maneira de propagação da corrente elétrica no meio é através de condução iônica ou eletrolítica. Isso ocorre devido a presença de íons existentes em fluídos que preenchem a porção de vazios de solos e rochas. Um segundo mecanismo de propagação pela própria condução eletrônica através da matriz da rocha. Essa segunda maneira é mais rara pois a gama de minerais condutores é resumida a alguns minerais metálicos e outros poucos metais nativos (KEAREY et al., 2002).

Águas com altos teores de sais dissolvidos tendem a apresentar maior quantidade de íons. Os íons presentes na solução aquosa facilitam a excitação

elétrica induzida pela corrente elétrica no solo. Dessa maneira, áreas com altos teores de sais dissolvidos e contaminadas por hidrocarbonetos por exemplo, tendem a apresentar uma assinatura geofísica de baixa resistividade, em contraste acentuado com o meio. Essa capacidade de mapear zonas contaminadas (plumas de contaminação) é um dos motivos que o método da Eletroresistividade possui grande aplicabilidade em estudos ambientais.

Ao injetar uma corrente elétrica diretamente no solo a partir de uma fonte posicionada na superfície do terreno a corrente irá fluir através do semi-espaço inferior. No semi-espaço superior a resistividade é considerada infinita devido ao caráter isolante do ar. Isso gera uma variação da voltagem introduzida (Eq. 8):

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (\text{Eq.8})$$

Em que:

V = representa o potencial elétrico (V);

I = representa a corrente elétrica (A);

r = representa a distância entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial é medido (m).

A equação 8 representa uma relação fundamental para o método da Eletroresistividade com medidas realizadas a partir da superfície do terreno. Essa expressão é válida para meios homogêneos. A Terra representa um meio heterogêneo e anisotrópico e a resistividade obtida pela equação 8 é denominada de resistividade aparente. Na prática, o que é medido em campo é a diferença de potencial resultante entre os eletrodos potenciais (Eq. 9).

$$\Delta V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (\text{Eq.9})$$

Ao isolarmos a resistividade a equação é expressa novamente através da equação 10:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} 2\pi \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (\text{Eq.10})$$

A partir da equação 10, é possível estabelecer uma relação com o coeficiente geométrico  $K$ , que possui dimensões de comprimento e representa a geometria da disposição dos eletrodos, com a equação 11:

$$K = 2\pi \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (\text{Eq.11})$$

Portanto, a partir da intensidade de corrente que percorre o subsolo ( $I$ ), a geometria da disposição dos eletrodos ( $K$ ) e a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) medido pelos eletrodos receptores, é possível calcular o valor da resistividade aparente ( $\rho$ ) (Equação 12).

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Eq.12})$$

A unidade da resistividade aparente é o ohm.m (Ohm.m) a diferença de potencial é medida em milivolt (mV), a intensidade de corrente é medida em miliampère (mA) e o coeficiente geométrico  $K$  em metros.

### **6.1.5 Mecanismos que controlam a propagação do campo elétrico em materiais geológicos**

Existem fatores geológicos que influenciam diretamente o método de Eletrorresistividade. A maioria dos minerais componentes de solos e rochas apresentam alta resistividade, porém alguns minerais específicos como magnetita, especularita, grafita, pirita, ouro, pirrotita, entre outros, podem alterar significativamente a resistência elétrica do meio. A depender da própria mineralogia e da concentração de tais minerais.

Além disso a propagação elétrica em solos e rochas, geralmente, é disseminada por poros e/ou interstícios da matriz rochosa. Outro fator físico importante é em relação entre os índices físicos da rocha/solo: a porosidade, o teor de umidade, concentração de sais dissolvidos nas águas presentes no meio, temperatura (viscosidade) e a concentração e composição de colóides. De fato, a saturação do meio representa um importante variável de resistividade uma vez que a

água e os sais dissolvidos contribuem na condutividade da corrente elétrica (McNEILL, 1980). A tabela 4 apresenta exemplos de resistividade média de algumas rochas.

Tabela 4: Exemplo da resistividade média de algumas rochas.

<b>Rocha ou solo</b>	<b>Resistividade (Ohm.m)</b>
Granito	de $3 \times 10^2$ a $> 10^3$
Diabásio	de 20 a $2 \times 10^4$
Sienito	de $10^2$ a $10^5$
Folhelho	de 10 a $10^4$
Calcário	de 50 a $5 \times 10^5$
Areia	de 1 a $5 \times 10^3$
Silte	de 20 a $1,5 \times 10^3$
Argila	de 5 a $1,5 \times 10^3$

Fonte: Fernandes, 1984.

A topografia também pode influenciar os levantamentos elétricos, uma vez que as linhas de fluxo de corrente tendem a acompanhar a superfície do terreno. Em áreas com distorções topográficas as superfícies equipotenciais são, assim, distorcidas, e podem resultar em leituras anômalas (KEAREY et al., 2002).

Outro fator importante é a potência e a sensibilidade do equipamento utilizado na aquisição. Esse fator, aliado ao espaçamento entre eletrodos irá limitar a profundidade de investigação. Há uma relação entre profundidade de investigação e resolução dos dados. Na medida em que há um aumento da profundidade ocorre uma perda de qualidade da resolução dos dados. O espaçamento entre os eletrodos é o fator que controla a profundidade de investigação e essa, por sua vez, é sempre proporcional ao espaçamento entre eles (KEAREY et al., 2002).

## 6.2 Técnicas e arranjos geoeletricos

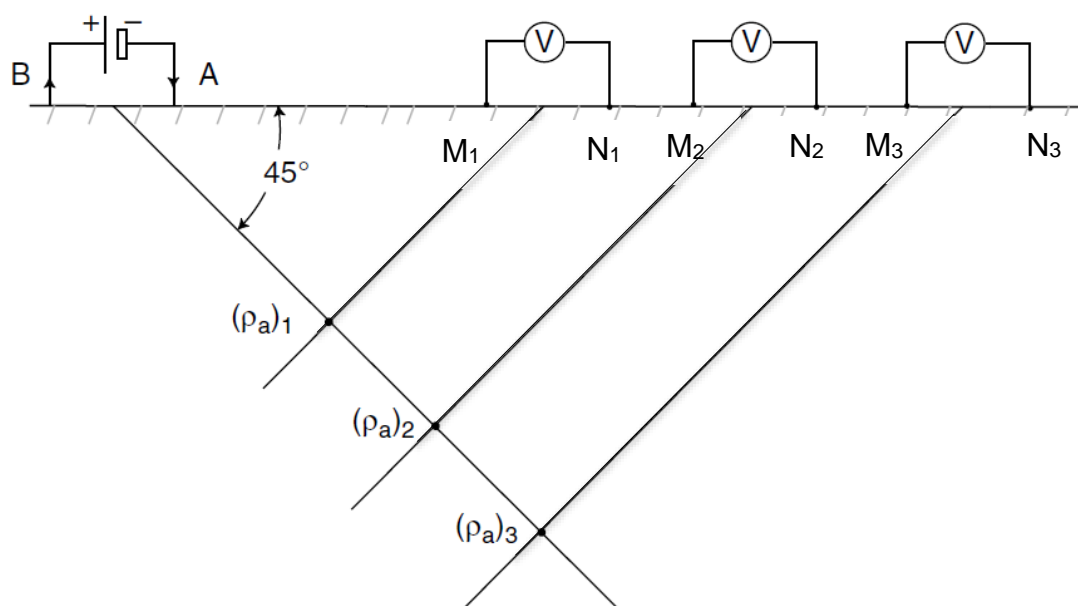
Para a aquisição dos dados de campo do método da Eletrorresistividade existem diversas técnicas. Entre as técnicas mais comuns, as mais empregadas são Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o caminhamento elétrico (também conhecido por tomografia elétrica). A primeira investiga predominantemente a variação de resistividade em profundidade a partir de medidas realizadas na superfície do terreno e apresentam dados em uma dimensão (1D) – vertical. Empregado largamente em estudos hidrogeológicos a técnica de SEV é considerada a melhor técnica para investigação da resistividade de camadas horizontalizadas (TELFORD et al., 1990).

A técnica de caminhamento elétrico surgiu da necessidade de investigação lateral do meio, pois diferentemente das SEVs, a técnica desenvolve dados com distribuição lateral (ou horizontal) além do componente vertical do meio. A aquisição é realizada a partir da superfície do terreno e o resultado final é disposto em uma seção com componentes em duas dimensões (2D) (Figura 18). Em mineração, engenharia e no setor industrial é mais comum o uso da técnica de tomografia elétrica do que as SEVs, pois normalmente há um interesse de investigação maior em variação lateral (MUSSET & KHAN, 2000).

Existem diferentes terminologias para designar a técnica de aquisição em 2D em si – caminhamento elétrico é uma das definições mais consagradas na literatura, mais ainda são definidos como perfilagem elétrica, levantamento elétrico 2D, imageamento elétrico e tomografia elétrica. Essa última terminologia, tomografia elétrica, ganha expressividade e popularidade em meados dos anos 2000 e principalmente a partir da década de 2010. Para fins de esclarecimento, no presente estudo a terminologia adotada para a técnica descrita é “Tomografia Elétrica (TE)”.

Uma das vantagens da técnica da tomografia elétrica é a grande quantidade de dados disponíveis na seção que é gerada, onde é possível descartar um ou outro dado tido como ruídos, sem prejuízo da qualidade final do produto gerado (ZHOU & DAHLIN, 2003).

Figura 18: Exemplo tomografia elétrica com arranjo Dipolo-dipolo.



Durante a aquisição de dados, a disposição geométrica dos eletrodos AB e MN controlam o fator geométrico K, empregado na equação 12. As diferentes disposições geométricas dos eletrodos combinado com a quantidade dos mesmos são denominadas de “arranjos”. Cada arranjo possui particularidades e conseqüentemente vantagens e desvantagens em relação aos outros. Dentre os principais arranjos é possível citar os arranjos: Wenner, Schlumberger, Dipolo-dipolo, pólo-dipolo, pólo-pólo, Wenner-Schlumberger e gradiente.

A escolha do arranjo é um importante fator no momento da aquisição, pois os resultados podem mascarar ou realçar feições de acordo com a morfologia do alvo. Por possuírem diferentes configurações geométricas e alguns deles possuem melhor ou pior razão sinal/ruído, que representa a capacidade de a corrente elétrica sair do eletrodo de injeção de corrente, penetrar no meio e retornar com ao eletrodo receptor. O “sinal” por tanto é entendido como a magnitude da diferença de potencial ( $\Delta V$ ). A depender da resistividade do meio e de estruturas presentes o sinal tende a ter maior ou menor dificuldade de transmissão e a escolha do arranjo influencia a relação de sinal/ruído, pois a resposta da resolução lateral/vertical da resistividade é diferente para cada tipo de arranjo (KEAREY et al., 2002)

É importante também ter noção da profundidade do alvo investigado, uma vez que a aquisição é realizada através de uma linha (perfil) em subsuperfície, onde são distribuídos os eletrodos. A distância entre a separação dos eletrodos de potencial e de corrente irá influenciar diretamente na profundidade investigativa. Dessa maneira, quanto maior for a separação entre esses eletrodos, maior será a profundidade de investigação. Porém é importante salientar que quanto maior esse espaçamento, há uma tendência perda de resolução, algo análogo a escalas de detalhamento em mapas. Quanto maior e mais profunda a área investigada, maior será a necessidade de abertura entre eletrodos de injeção e corrente e, conseqüentemente, menor o nível de detalhe (resolução). Por tanto a escolha do espaçamento dos eletrodos também deve levar em conta, além da profundidade e dimensão do alvo investigado, o nível de detalhamento desejado e também a potência e sensibilidade do equipamento utilizado na aquisição.

No presente trabalho foi adotada a técnica de tomografia elétrica a partir dos arranjos Dipolo-dipolo e Schlumberger devido aos bons resultados que os arranjos apresentam na investigação de estruturas presentes como o fraturamento da maciço.

### 6.2.1 Arranjo Dipolo – dipolo

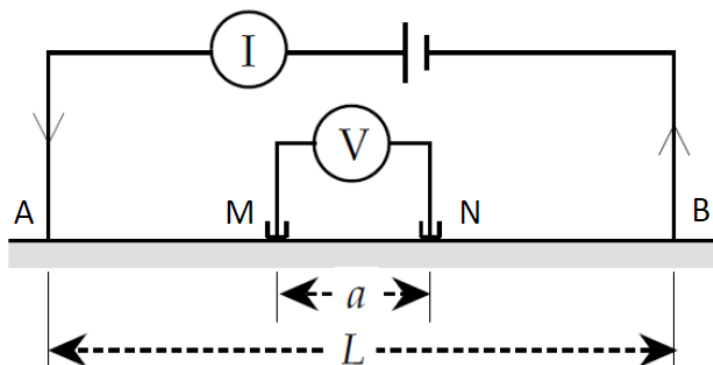
O arranjo Dipolo-dipolo é constituído como um dos arranjos mais utilizados e empregados em estudos geofísicos. Seu uso é amplamente distribuído em estudos hidrogeológicos, ambientais, prospecção mineral e estudos geotécnicos.

A principal característica desse tipo de arranjo é que o espaçamento entre os eletrodos de corrente e potencial permanecem fixa para cada nível de investigação durante a execução do ensaio. Dessa maneira, a aquisição em campo é realizada através da manutenção fixa do espaçamento entre dos eletrodos de corrente ( $I$ ) e de potencial ( $V$ ), de maneira a aumentar a separação entre os eletrodos. A cada afastamento entre eletrodos aumenta o nível de profundidade de investigação (MUSSET & KHAN, 2000). No ponto médio entre os eletrodos de corrente e potencial, ocorre a intersecção de duas retas que partem a  $45^\circ$  do centro de cada par de eletrodo, nesse ponto é realizado a medida da resistividade aparente do meio no determinado nível de investigação. O arranjo possui boa resolução lateral e apresenta melhor desempenho no mapeamento de estruturas verticais (WARD, 1990).

### 6.2.2 Arranjo Schlumberger

Nesse arranjo, diferentemente do arranjo Dipolo-dipolo, é adotado um ponto central na linha da tomografia elétrica e os eletrodos de corrente AB são dispostos externamente aos eletrodos de potencial MN (Figura 19).

Figura 19: Esquema da distribuição do arranjo Schlumberger.



Fonte: Lowrie, 2007.

Para aumentar a profundidade de investigação é necessário aumentar o espaçamento  $L$  porém sem alterar o espaçamento de  $a$  – eletrodos de potencial. A distância entre MN e os eletrodos de corrente é pequena e deve atender a relação de  $MN \leq AB/5$ . A configuração geométrica desse arranjo favorece a resolução de estruturas horizontais, por isso é comumente empregado para a execução de Sondagens Elétricas Verticais – SEVs, em que um dos objetivos principais é a variação de resistividade com a profundidade. O arranjo ainda apresenta praticidade operacional.

### **6.2.3 Análise comparativa entre arranjos**

O método da Eletrorresistividade é sensível as medidas espaciais da distribuição de resistividade próxima a superfície. Os processamentos do cálculo da média da resistividade dependem justamente do modelo de arranjo geofísico empregado (EVERETT, 2013). Os arranjos geofísicos, por sua vez, são selecionados de acordo com as características do alvo investigado. A depender das características do alvo, existem vantagens e/ou desvantagens de cada arranjo. A análise comparativa aqui descrita será realizada para os arranjos empregados no trabalho: Dipolo-dipolo e Schlumberger.

O Dipolo-dipolo é um dos arranjos mais difundidos em estudos rasos em gerais. O sucesso do arranjo passa pela simplicidade operacional. O espaçamento entre os eletrodos de corrente e eletrodos potenciais são constantes para cada nível investigado. O ângulo de incidência de corrente elétrica no meio favorece uma boa resolução lateral, o que otimiza contrastes de estruturas verticalizadas. Porém uma das grandes desvantagens do arranjo é a baixa relação sinal/ruído.

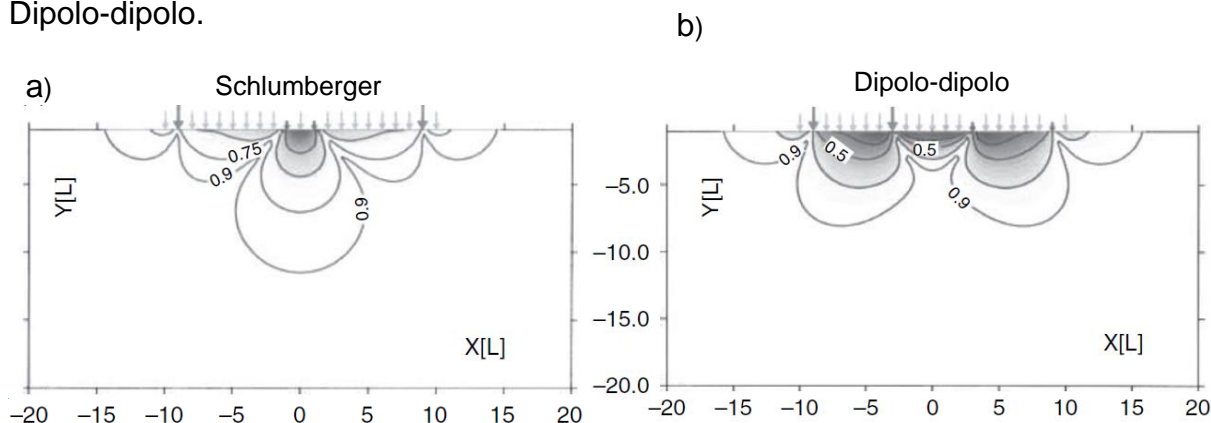
O arranjo Schlumberger também é um arranjo consagrado e amplamente utilizado em estudos geofísicos. Diferentemente do arranjo Dipolo-dipolo, o arranjo Schlumberger apresenta boa resolução vertical, o que favorece estudos de estruturas horizontalizadas. Segundo Everett (2013) o arranjo foi desenvolvido para investigações em profundidade e apresenta uma boa razão de sinal/ruído.

Para exemplificar os níveis de sensibilidade de cada arranjo, Everett (2013) apresenta um comparativo dos níveis de sensibilidade de cada arranjo com um padrão de quatro eletrodos. Nesse estudo, as imagens gráficas apresentam o contorno de



sensibilidade nos níveis 25, 50, 75 e 90%. As imagens fornecem uma boa indicação da região da subsuperfície à qual dado arranjo é mais sensível (Figura 20).

Figura 20: Contorno de sensibilidade dos arranjos a) arranjo Schlumberger; b) arranjo Dipolo-dipolo.

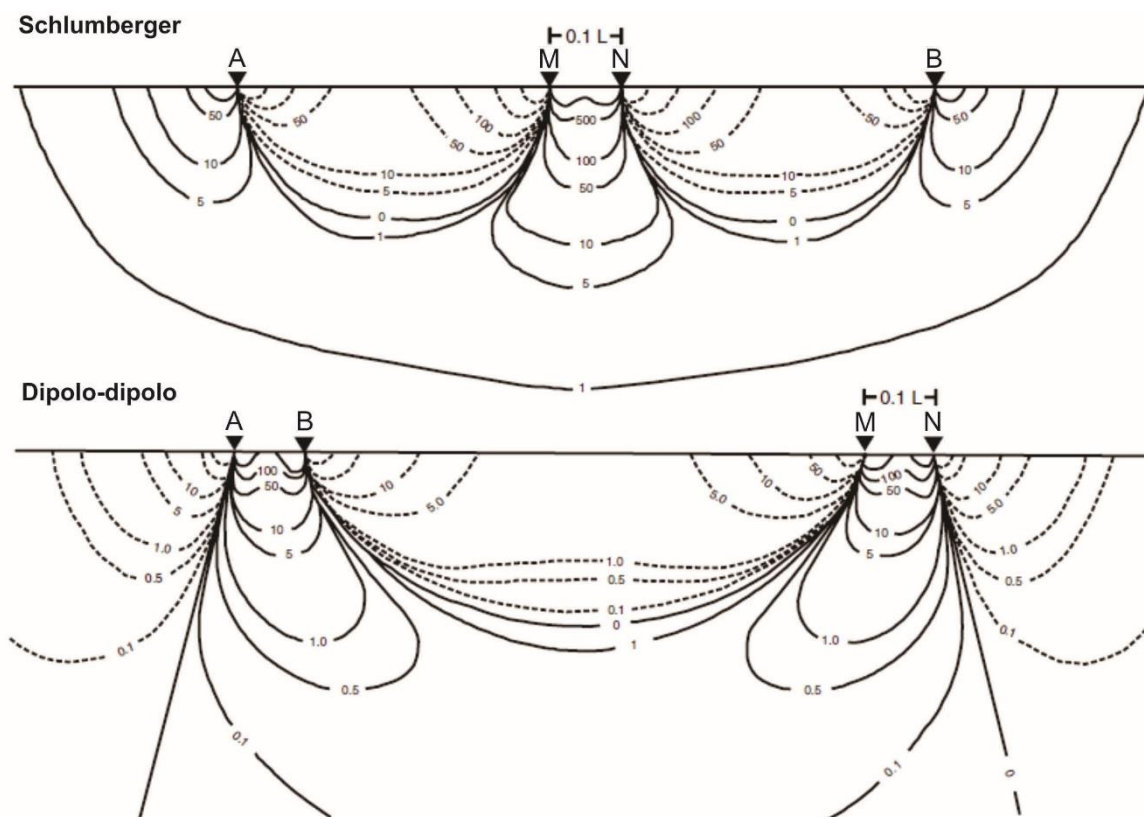


Fonte: Adaptado de Everett, 2013.

O arranjo Schlumberger apresenta um nível de sensibilidade maior imediatamente abaixo dos eletrodos potenciais (Figura 20a). Essa característica favorece um padrão vetorial com maior alcance vertical. Diferentemente, o arranjo Dipolo-dipolo é mais sensível em áreas imediatamente abaixo dos eletrodos de corrente e potencial, com menos sensibilidade para a região intermediária entre os dois dipolos (Figura 20b). Devido à baixa razão sinal-ruído apresentada pelo arranjo Dipolo-dipolo heterogeneidades próximas a superfície podem apresentar maiores variações.

A figura 21 apresenta a relação da contribuição de sinais em um meio homogêneo para cada arranjo elétrico abordado. Quando o espaçamento entre eletrodos é aumentado no arranjo Dipolo-dipolo, todos os eletrodos são movidos juntos e os resultados de resistividade de corpos próximos à superfície tendem a variar de leitura para leitura. Diferentemente do arranjo Schlumberger, em que os efeitos próximos à superfície tendem a variar muito menos, desde que apenas os eletrodos externos sejam movidos (MILSON & ERIKSEN, 2011).

Figura 21: Representação das linhas de tendência dos sinais dos arranjos Schlumberger e Dipolo-dipolo em meio homogêneo. Linhas pontilhadas representam valores negativos.



Fonte: Adaptado de Milson & Eriksen, 2011.

### 6.3 Geofísica aplicada a estudos ambientais em mineração

As principais áreas de aplicação de métodos geofísicos são: prospecção mineral, estudos ambientais, engenharia, hidrogeologia e indústria do petróleo. Há uma vasta bibliografia publicada sobre diferentes temáticas e emprego do método. A seguir é apresentado um levantamento de trabalhos publicados que abordem o tema análogo a proposta da tese – geofísica aplicada a estudos ambientais em mineração.

O trabalho de Epov et al. (2017) aplicou métodos geofísicos em uma lagoa de rejeitos de uma mina no distrito de Salair, Rússia. Os rejeitos possuem alto teor de sulfetos que processados e expostos a atmosfera favorecem a acidificação das águas locais. Os autores aplicaram os métodos de tomografia elétrica e eletromagnéticos, onde o objetivo da pesquisa foi demonstrar o contraste de propriedades geofísicas da infiltração da água no maciço, aliado a uma análise de dados hidroquímicos. O arranjo utilizado foi o Schlumberger com espaçamento de 5 metros entre os eletrodos. Foram geradas três tomografias elétricas de 235m cada e uma profundidade média de

investigação de aproximadamente 60 metros. Com os resultados foi possível identificar contatos entre os rejeitos e topo rochoso além de zonas de maior contribuição para a drenagem ácida, comprovados por dados hidroquímicos.

Na Espanha Gómez-Ortiz et al. (2010) aplicaram técnicas de tomografias elétricas para caracterizar duas áreas de rejeitos abandonadas de antigas minerações de cobre. O objetivo inicial foi delimitar os limites entre rejeitos e maciço natural. A partir da técnica de arranjos Wenner-Schlumberger com espaçamento variável de eletrodos entre 1 e 5 metros, foram geradas linhas de tomografias de 47 a 235 metros de comprimento e uma profundidade de investigação de aproximadamente 25 metros. Com os resultados os autores conseguiram não apenas delimitar a morfologia dos corpos de rejeito, como identificar zonas de fluxo de água através do barramento da lagoa, apesar de não ter sido evidenciado nenhum caso de contribuição da drenagem ácida para o maciço, resultado do bom isolamento criado pelo corpo do barramento.

Buselli e Lu (2001) integraram os métodos transiente eletromagnético (TEM) com métodos geoeletricos – Eletrorresistividade, polarização induzida (IP) e potencial espontâneo (SP) para investigar possíveis infiltrações na base de barragens de rejeito em Ranger no norte da Austrália. Os dados geofísicos também foram interpretados com dados químicos de águas de poços locais. Foram testadas algumas técnicas de arranjo de eletrodos, mas por fim, foi confirmado que a técnica de arranjo que mais e adequava aos objetivos do trabalho foi o arranjo Schlumberger. O espaçamento adotado entre eletrodos foi de 10 metros. As conclusões dos autores sobre o estudo evidenciaram a importância da integração dos métodos geofísicos. A Eletrorresistividade juntamente com o método eletromagnéticos transiente foram importantes na delimitação do contexto geológico, bem como identificação e morfologia da disposição dos rejeitos, ao passo que os métodos de IP e SP foram precisos na delimitação do fluxo interno de fluídos e identificação das zonas percoladas com água no corpo da barragem, principalmente pelo fato das águas possuírem características ácidas e com muitos sais dissolvidos.

Outro estudo relevante que envolve geofísica aplicada a drenagem ácidas foi reportado por Yuval et al. (1996) onde foram empregados os métodos de Eletrorresistividade e polarização induzida (IP). O estudo foi realizado na mineração de Copper Cliff região sudeste do Canadá. Através do arranjo Dipolo-dipolo, com espaçamento de eletrodos de 10 a 20 metros, foram geradas seções geofísicas com o intuito de estimar as concentrações de sólidos totais dissolvidos na água e as zonas

ricas em sulfeto – o que corrobora com a gênese de drenagens ácidas. Foram utilizados dados hidroquímicos de poços do entorno e comparados com os valores geofísicos para obter relação diagnóstica.

No distrito de Karabash ao sul dos montes Urais na Rússia foi desenvolvido uma pesquisa de integração de dados geofísicos e geoquímicos (de poços de controle e de superfície) por Korneeva et al. (2016), com o objetivo de caracterizar a contaminação causada por rejeitos de uma antiga mina de cobre, com altos níveis de sulfetos primários (pirita, calcopirita, esfarelita e galena). Os autores comprovaram a contaminação do lençol freático pela drenagem ácida e introduziram o termo de “onda ácida” para indicar o sentido de fluxo dos contaminantes – ricos em metais dissolvidos. Com os resultados das tomografias elétricas, os dados em duas dimensões foram interpolados e gerado um modelo de visualização em três dimensões (3D) a partir do *software* Voxler 3D. Dessa maneira foi possível identificar a camada de rejeitos rica principalmente em pirita com aproximadamente 1 metro de espessura e a influência da drenagem ácida até 15 metros abaixo da camada de pirita. Além do intemperismo dos sulfetos, o processo é catalisado pelas pluviosidade e clima local.

No Canadá, na mina de Laronde em Quebec, os autores Poisson et al. (2009) aplicaram os métodos integrados GPR (Ground Penetration Radar), condutivímetro de terreno (EM) e Eletorresistividade para analisar a formação de drenagem ácida na porção superior de uma pilha de estéril de mineração de ouro, cobre, zinco e prata, com altos teores de minerais sulfetados, responsável pela geração de drenagem ácida. A pilha de estéril foi erguida nas décadas de 80 e 90, possui aproximadamente 25 metros de altura. Devido à dimensão considerável da pilha, os autores decidiram por delimitar uma zona de estudos experimental no centro da pilha de 30 x 30 metros, onde a cada 5 metros foi realizado uma tomografia elétrica. Para o levantamento de Eletorresistividade foi adotado o arranjo Wenner- $\alpha$  e espaçamento mínimo entre eletrodos de 1 metro, com uma profundidade de investigação de 6 metros. Além do levantamento geofísico, os autores realizaram análises geoquímicas em trincheiras escavadas na pilha, onde é possível identificar as zonas de oxidadas, com alto potencial de geração de drenagem ácida, e as zonas não oxidadas, com baixo potencial gerador. Esse dado é importante pois nos resultados da pesquisa foi possível identificar três zonas distintas nos 6 metros superficiais da pilha, bem como zonas mais permeáveis e o fluxo da gênese da drenagem ácida.

No estado de Indiana – Estados Unidos, foi realizado um estudo integrado de geofísica para delimitação da contaminação do lençol freático por material despejado indevidamente em vales locais. Esse estudo de uma mineração de carvão foi relatado pelos autores Ebraheem et al. (1990). Com o arranjo Wenner os autores correlacionaram os valores de resistividade dos solos com os valores de resistividade da água em subsuperfície. Nos resultados foi possível determinar zonas onde foram depositados os rejeitos de mineração no passado, além de dados quanto a geologia local.

Um importante estudo foi realizado por Placencia-Gómez et al. (2010) em uma mina de ouro e cobre abandonada na região de Haveri no sudoeste da Finlândia. Os autores integraram tantos dados hidroquímicos de superfície como dados de Eletorresistividade, onde foram adquiridas nove tomografias elétricas, com o emprego misto de arranjos Wenner- $\alpha$  e Dipolo-dipolo. O espaçamento entre eletrodos variou entre 2,5 a 5 metros e profundidade de investigação em torno de 25 metros da superfície. O estudo conseguiu comprovar mudanças físico-químicas no grão de minerais sulfetados dispostos no rejeito, influenciada pela porosidade do rejeito e da posição da zona oxidada em relação ao nível de água – zona vadosa. Foi evidente os valores mais baixos de resistividade nessas zonas oxidadas e que contribuem para a gênese de drenagem ácida. Além disso o estudo conseguiu delimitar o corpo de rejeitos do leito rochoso e identificar zonas de faturamento do maciço.

Martínez-Pagan et al. (2009) também reportaram um estudo de caso com o emprego do método Eletorresistividade em antigas lagoas de rejeitos na região de Sierra Minera no sudeste da Espanha. Nesse estudo é relatado a aplicação do método Eletorresistividade em duas minerações próximas: El Lirio e Brunita – ambas minerações de cobre, chumbo e zinco, ricas em minerais da classe dos sulfetos. A técnica de arranjo utilizada foi Wenner-Schlumberger com espaçamento entre eletrodos de 5 metros. Foram geradas tomografias elétricas e o processamento com geração de blocos em três dimensões. Além disso também foram coletadas amostras de solo para análises químicas. Com os resultados foi possível identificar zonas com rejeitos mais finos, zonas com rejeitos mais grossos e o contato entre o substrato rochoso – maciço, cada um deles apresentam valores distintos de resistividade. Os valores mais baixos de resistividade estão associados ao material mais fino, ricos em teores de Cd, Cu, Pb e Zn, ao passo que o material mais grosso encontrado principalmente na lagoa de Brunita é associado a material carregado por um evento de

acidente de rompimento do dique ocorrido em 1972. Na lagoa de El Lirio foi possível determinar o sentido de fluxo de águas contaminadas no interior da antiga lagoa.

O emprego do método da Eletrorresistividade em estudos de impactos ambientais relacionados a geração de drenagem ácida não é recente. Um dos primeiros trabalhos publicados dessa natureza foi relatado por Merkel (1972), em uma pesquisa para delimitação da pluma de drenagem ácida originadas de extração de carvão em uma área próximo a universidade de Kylertown, Pensilvânia, EUA. Com uma técnica de aquisição realizada a partir do arranjo polo-dipolo, o autor conseguiu delimitar o limite entre rejeitos e o substrato rochoso além de identificar zonas de formação de drenagem ácida de mina.

Outro importante estudo foi realizado por Rucker et al. (2009) no estado de Montana, EUA. Os autores utilizaram o método da Eletrorresistividade para rastrear a contaminação do lençol freático por drenagem ácida de uma antiga mina de ouro. O desmonte do maciço para extração de ouro expôs a atmosfera sulfetos (principalmente pirita). Além de expor sulfetos, as detonações contribuíram para aliviar as tensões do maciço, o que facilitou a circulação de águas no maciço. As oxidações desses minerais desencadearam os processos de drenagem ácida. O diferencial da pesquisa foi a escala de aplicação, muito mais abrangente o que possibilitou resultados e dados geofísicos mais profundos.

Foram adquiridas 15 linhas de tomografia elétricas a partir do arranjo polo-polo com espaçamento de 3 metros, com comprimentos que chegavam a 525 metros, o que possibilitou uma investigação mais profunda do local - mais de 100 metros de profundidade. O levantamento foi realizado em duas cavas a céu aberto. Os dados foram tratados em duas e três dimensões e integrados com dados geoquímicos de poços de inspeção. Foi possível delimitar as zonas onde ocorrem maior aporte da drenagem ácida. Os menores valores de resistividade estavam relacionados aos maiores valores de sólidos dissolvidos na água.

#### **6.4 Interpretação fotogeológica**

A interpretação fotogeológica, ou fotointerpretação, pode ser realizada a partir de imagens de satélite (sensores remotos) e/ou fotografias aéreas. O objetivo principal dessa técnica é identificar elementos geológicos expostos nas imagens com o propósito de elucidar possíveis problemas geológicos (ARCANJO, 2011). O método

convencional para a interpretação fotogeológica, adotado no presente estudo, foi desenvolvido pela escola americana e é baseado em padrões de drenagens e aspectos de relevo.

Uma importante etapa da fotointerpretação é a etapa de fotoanálise, onde são traçadas as drenagens, principais lineamentos estruturais, séries de juntas/fraturas, análises de relevo, traçados de falhas e se possível classificação das mesmas em relação a movimentação.

## **6.5 Geologia estrutural aplicada a hidrogeologia**

A geologia estrutural é um campo da geologia que estuda a ocorrência de estruturas deformacionais geológicas na litosfera como falhas, dobras, foliação e outras estruturas, bem como as formas de ocorrências. A compreensão das ocorrências de tais estruturas é importante para a compreensão da evolução geológica de determinada área e as relações com o meio (FOSSEN, 2012).

As estruturas geológicas deformacionais apresentam registros do passado e influenciam o comportamento dinâmico das rochas e maciços rochosos. Essas estruturas são oriundas de eventos tectônicos e das tensões atuantes no maciço por longos períodos. Os registros de tais deformações ocorrem desde escala global até microscópica.

Para a compreensão dessas deformações é necessária a análise estrutural detalhada a partir dos dados estruturais. De acordo com Fossen (2012) existem quatro principais tipos de análises estruturais. A seguir são abordados aspectos técnicos relacionadas a cada uma das análises estruturais.

- Análise estrutural geométrica: é a análise em que são considerados dados geométricos em relação à forma (descrição espacial das superfícies relacionadas a camadas dobradas ou superfícies de falhas), orientação geográfica ou atitudes das camadas (orientação dos vetores planares ou lineares no espaço) e relações entre estruturas primárias e secundárias.

- Análise cinemática: representa basicamente a forma como os cristais das rochas são movimentados durante a deformação. Para isso são considerados dados como estrias em planos de falhas;

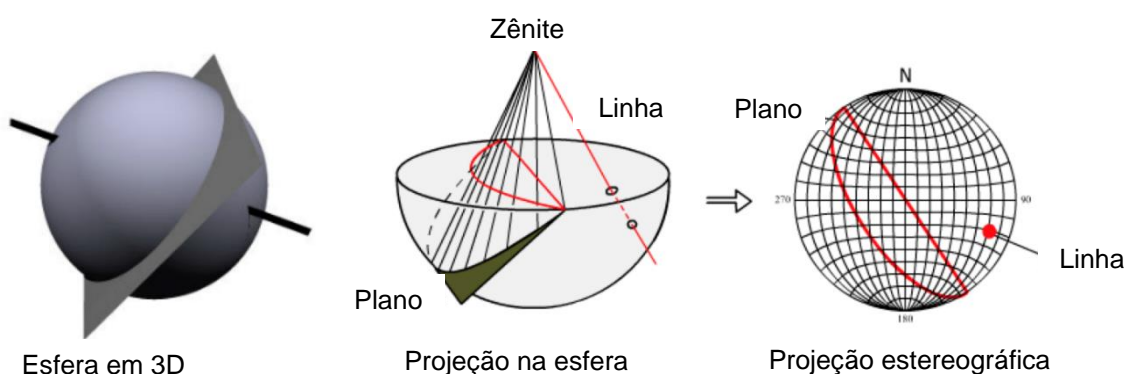
- Análise dinâmica: abrange forças que dão origem a estruturas e a acumulação de deformação. Envolve ainda análises do ponto de vista reológico e mecânico;

- Análise tectônica: representada por uma compilação das análises estrutural geométrica, cinemática e dinâmica empregada em escalas regionais, como um cinturão orogênico.

No presente estudo foi empregado a análise estrutural geométrica para a compreensão do resultado dos esforços tectônicos atuantes na cava da MOU. Para isso foram coletadas medidas estruturais na cava da MOU e posteriormente esses dados foram tratados em estereogramas. Esse tipo de análise é essencial para a compreensão da hidrogeologia local, fluxo de água subterrâneo e interpretações geotécnicas.

Estereogramas ou projeções estereográficas são utilizados em geologia estrutural para representar estruturas do maciço rochoso em três dimensões, como lineações, estratificações e foliações. É a representação da atitude de um plano em uma esfera, onde o plano passa necessariamente pelo centro da esfera. Em geologia estrutural é considerada a porção do hemisfério inferior da esfera para as análises. Para a geração da projeção é necessário conectar o ponto inferior do grande círculo da esfera com o ponto mais alto da esfera, denominado zênite (FOSSEN, 2012). A linha normal ao plano é denominada polo (Figura 22).

Figura 22: Representação de um plano em duas dimensões - a esfera de projeção em 3D, a projeção na esfera e por último a projeção estereográfica.



Fonte: Adaptado de Fossen, 2012.

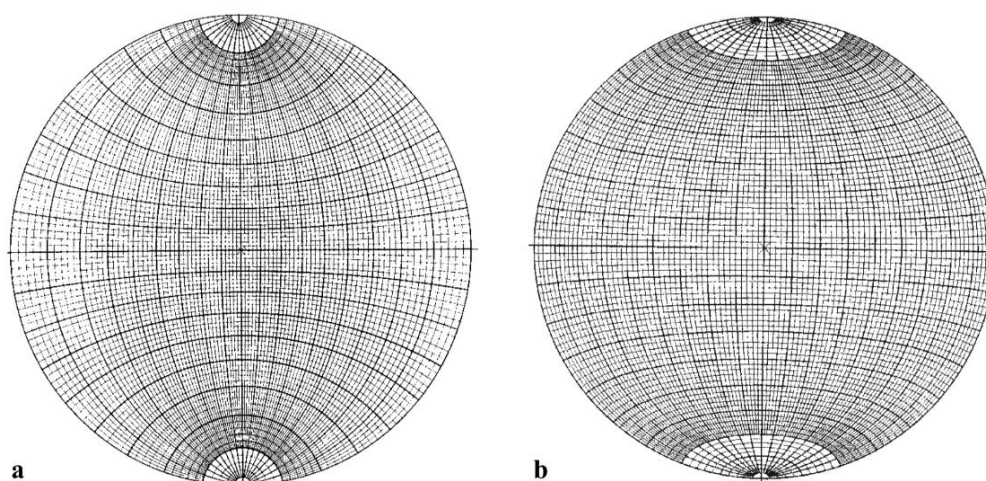
Os estereogramas representam importantes ferramentas para análise estrutural e comparação de discontinuidades. São empregadas tanto para representação de planos quanto de linhas (lineações).

Há dois tipos principais de rede de projeções estereográficas – a rede de Wulff (que preserva os ângulos entre os planos – equiangular) mais empregada em trabalhos de cristalografia, e a rede de Schimdt (onde as relações de áreas são



mantidas constantes) amplamente empregada na geologia estrutural pois facilita a comparação entre dados (Figura 23).

Figura 23: Relação entre as redes de projeções estereográficas; a) Rede de Wulff – mantém as proporções dos ângulos; b) Rede de Schimdt – mantém a proporção da área.



Fonte: Rowland et al., 2007.

Outro produto importante para a compreensão da análise estrutural geométrica são os diagramas de roseta. Assim com os estereogramas são um tratamento estatístico das medidas estruturais adquiridas, onde são representadas as frequências e as direções das estruturas. São representadas por um círculo completo –  $360^\circ$ , ou pelo semicírculo –  $180^\circ$ .

Para a análise estrutural geométrica regional foram adquiridos dados a partir de técnicas de sensoriamento remoto e imagens de satélite para a extração de grandes lineamentos do entorno da cava. Muitas vezes essas feições são representadas por lineamentos direcionais no relevo. Descontinuidades no maciço representam zonas de menor resistência mecânica e maior susceptibilidade a alteração química. Isso ocorre devido a possibilidade de percolação de fluídos por essas estruturas, o que favorece principalmente o ataque e alteração química. É comum que zonas de fraturamento são mais facilmente erodidas devido ao estado de alteração dos minerais em zonas principalmente de fraturamento.

O resultado prático dessas condições é que muitas zonas de fraturamento e falhas no maciço são associadas a drenagens de âmbito regional. Uma das técnicas de extração de lineamentos estruturais consiste em buscar e extrair das imagens de satélites esses lineamentos e padrões retilíneos em drenagens. Posteriormente esses

resultados foram comparados com os dados de medidas estruturais coletados em campo por toda a extensão da cava.

Estruturas geológicas influenciam diretamente a hidrogeologia. A maioria das rochas possuem estruturas geológicas que tendem a facilitar a permeabilidade do maciço. As estruturas mais comuns são fraturas. Fraturas são estruturas planares em que a rocha sofre uma perda parcial da coesão. Há diversos fatores que ajudam a controlar o fluxo de água subterrânea através das fraturas como rugosidade, temperatura, tensão do maciço, geometria das discontinuidades, persistência, abertura, densidade, preenchimento de fraturas, cimentação e intemperismo (SINGHAL & GUPTA, 2010).

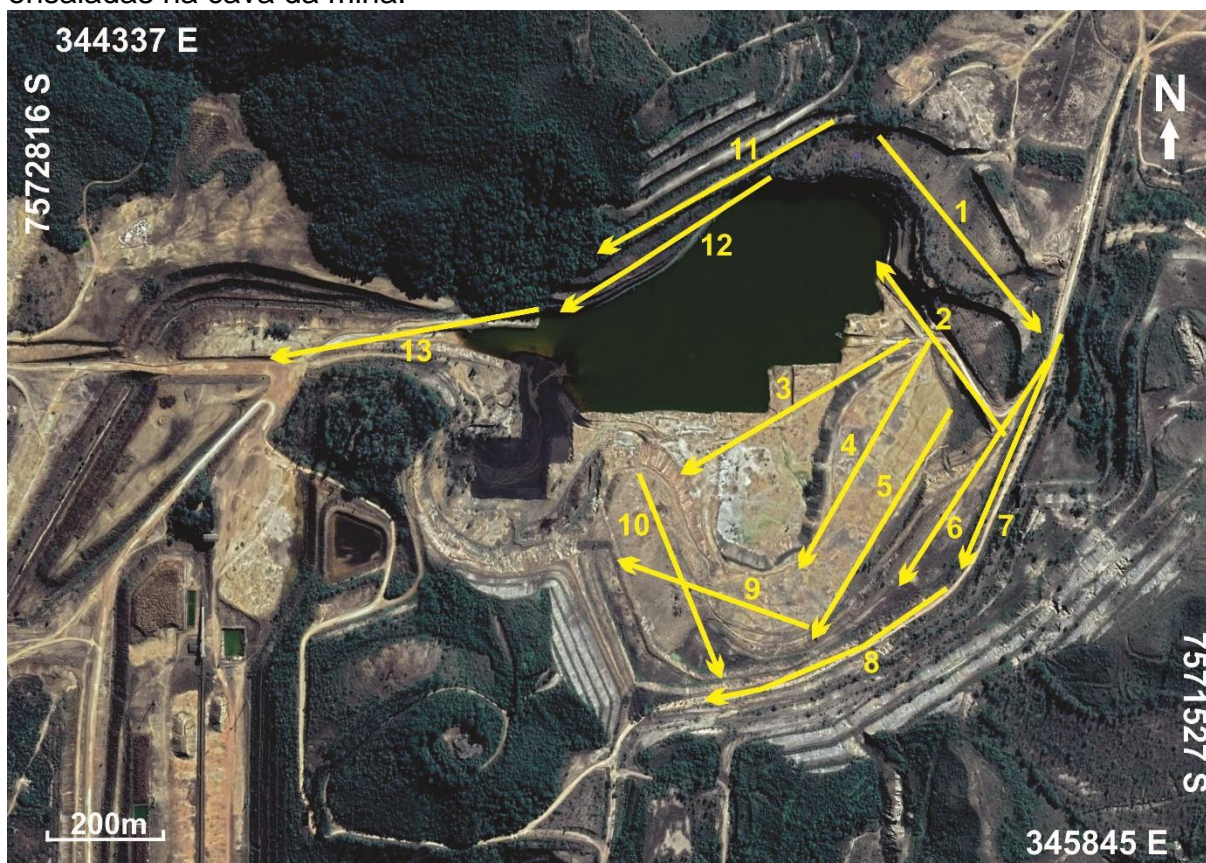
Quanto maior for a persistência e conectividade entre fraturas haverá uma maior permeabilidade no maciço, por isso a importância de uma descrição geológica estrutural da área de estudos. Neves & Morales (2007) apresentaram um estudo sobre fatores que controlam a produtividade de poços artesianos em terreno cristalino na região de captação do rio Jundiaí, estado de São Paulo. O estudo analisou dados de 1006 poços artesianos e concluiu a importância de estruturas geológicas como falhas e fraturas na recarga do aquífero local.

## 7. MÉTODOS, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

### 7.1 Geofísica

Para a execução do estudo foi realizada uma campanha de coleta de dados geofísico em agosto de 2017, época de estiagem e que apresenta menores registros de precipitação. Durante os dias 25 a 28 de agosto foram adquiridas treze linhas de tomografia elétrica a partir da técnica de tomografia elétrica (Figura 24). As linhas possuem comprimentos que variam entre 300 e 400m, onde a maioria delas possui 400m de comprimento. O espaçamento entre eletrodos adotado foi de 10m com o intuito de abranger uma maior profundidade de investigação. A disposição das linhas teve o intuito de cobrir a maior área possível da cava. Foi empregado a técnica de arranjo de tomografia elétrica e dois tipos de arranjos: arranjo Dipolo-dipolo e arranjo Schlumberger.

Figura 24: Imagem de Satélite com a localização das linhas de tomografia elétrica ensaiadas na cava da mina.



Fonte: Dados da pesquisa.

A mina está fora de operação desde 1995, por esse motivo possui diversos locais de difícil acesso. Taludes irregulares e vegetação acentuada em alguns pontos dificultam a execução do ensaio (Figura 25). Em determinados locais da cava não foi possível realizar o ensaio por dificuldade de acesso, como na porção oeste da cava, onde é concentrado o resíduo do tratamento de águas diuranato de cálcio, e onde ocorre uma porção do lago.

Figura 25: Vegetação na base do talude da frente NE.



Fonte: Dados da pesquisa.

O equipamento utilizado foi o resistímetro Terrameter LS (Figura 26a), fabricado pela empresa sueca ABEM Instrument e de propriedade do laboratório de geofísica do Departamento de Geologia da Universidade Estadual Paulista (UNESP). O resistímetro Terrameter LS opera com um módulo de transmissão e recepção de sinais pré-programado, com 84 canais, potência de 250 W, corrente máxima de 2,5 A e resolução de 1  $\mu$ V. Esse equipamento é calibrado para medidas de resistividade por meio de ciclos periódicos de corrente elétrica alternada e de baixa frequência, procedimento que permite a filtragem de ruídos do sinal adquirido (ABEM, 2012). Consiste em um equipamento apto a realizar os métodos geofísicos de Eletroresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo. Foram utilizados eletrodos metálicos na aquisição dos dados (Figura 26b). Na figura 26c é possível

observar a bobina dos cabos elétricos em uma das linhas geofísicas no momento da aquisição de dados.

Para todas as linhas de tomografia elétrica os parâmetros de aquisição e dados de calibração adotados foram: 300mA de corrente, tempo de aquisição de 1s.

Figura 26: a) Detalhe do resistivímetro ABEM Terrameter LS em operação; b) Detalhe do eletrodo cravado no solo durante a aquisição de dados; c) Bobina de cabos elétricos em uma das linhas geofísicas.



Fonte: Dados da pesquisa.

### **7.1.1 Processamento dos dados geofísicos**

Os dados geofísicos coletados nas campanhas de campo são armazenados na memória interna do equipamento em formato de extensão de arquivo *.dat* e posteriormente são exportados e processados em computador através do programa

Res2DInv (GEOTOMO SOFTWARE, 2003), para geração de modelos de inversão de dados e a partir dos dados de entrada (dados gerados em campo). O fator da variação da topografia local foi considerado e inserido ao modelo para corrigir distorções da seção gerada.

O *software* emprega os parâmetros de inversão por suavização através do método matemático de mínimos quadrados com vínculo de suavidade e utiliza algoritmos baseados em um esquema de células (denominadas também por blocos), que busca a suavização e redução das diferenças dos valores de resistividade aparente. O *software* também considera a subsuperfície terrestre como blocos retangulares que possuem valores constantes para o parâmetro investigado (DEGROOT-HEDLIN & CONSTABLE, 1990; LOKE & BAKER, 1996).

Inicialmente os dados são expressos por uma pseudo-seção de resistividade elétrica. Pseudo-seções representam a distribuição das resistividades em subsuperfície, onde a profundidade de cada ponto de investigação é teórica, determinada por algoritmos com informações a respeito da geometria dos eletrodos. As formas dos contornos dependem dos valores de resistividade medidos em campo e da geometria do arranjo empregado. Nesse momento, a natureza dos resultados ainda é qualitativa, pois os dados não representam a distribuição da resistividade elétrica verdadeira. Por isso é necessário o emprego de técnicas numéricas para uma possível interpretação quantitativa que melhor aproxime os dados a realidade.

Os métodos de inversão procuram aplicar um modelo cuja as respostas reflitam os dados medidos em campo, na tentativa de amenizar as diferenças entre os valores calculados pelo programa e os valores medidos em campo. No modelo de células (ou blocos) utilizado pelo Res2DInv, a subsuperfície é dividida em células (blocos) e cada um bloco possui um valor de resistividade “verdadeira” (calculada), uma largura e uma espessura (Figura 27).

Figura 27: Exemplo de arranjo dos blocos utilizado no modelo (Dipolo-dipolo).



Fonte: Adaptado de GEOTOMO SOFTWARE, 2003.

O tamanho e a distribuição dos blocos são gerados de maneira automática pelo programa, que adota os coeficientes empíricos estabelecidos por Edwards (1977), conforme o arranjo adotado (GEOTOMO SOFTWARE, 2003).

O método dos mínimos quadrados por suavização procura minimizar a diferença entre os dados medidos em campo para os calculados. Em vista disso é realizado um ajuste de resistividade nos blocos do modelo. Essa diferença é denominada de erro médio quadrático ou erro RMS (*Root Mean Square*). O erro RMS é de certa forma análoga ao conceito de desvio padrão, em que é expresso pela raiz quadrada da média aritmética das diferenças entre os dados medidos e os valores calculados, elevadas ao quadrado. Esse erro diminui a cada iteração do modelo.

Por fim, os resultados finais são dispostos sob a forma de seções de resistividade em termos de distância x profundidade. Os valores de resistividade elétrica são expressos em Ohm.m, por meio de uma escala gráfica logarítmica e intervalos de interpolação de valores de cor – escala cromática. A escala cromática de cores utilizada foi padronizada para todas as imagens geofísica apresentadas no trabalho.

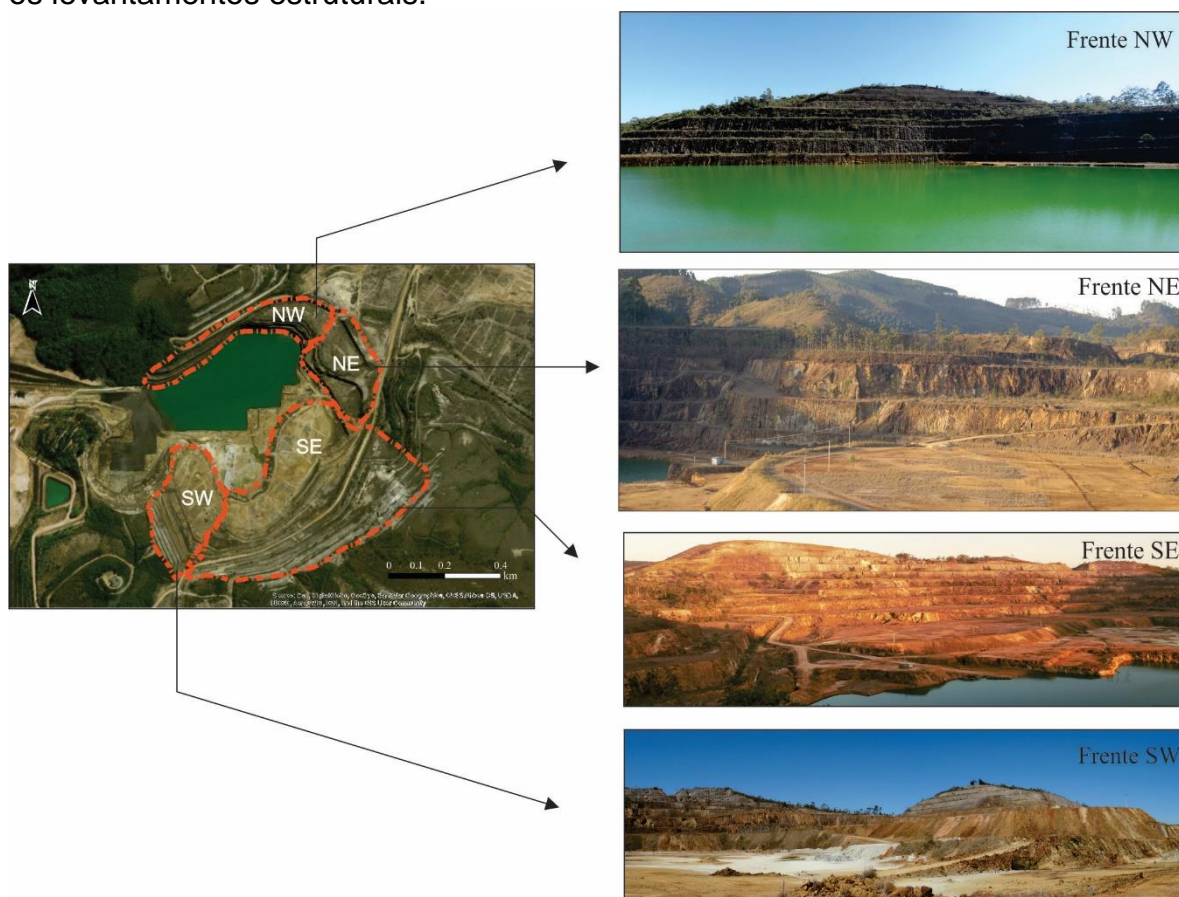
## **7.2 Dados de Geologia Estrutural**

Inicialmente foram adquiridos dados por técnicas de fotoanálise do método convencional de fotointerpretação. Foram analisadas imagens de satélite LANDSAT TM5 para a extração de feições estruturais de caráter regional – grande amplitude. Através da utilização dessas imagens, foram analisados principais lineamentos estruturais, redes de drenagem e relevo para posteriormente foi realizado uma análise comparativa com os dados de geologia estrutural obtidos na cava da mina.

A coleta de dados estruturais de campo foi realizada nos taludes da cava, em diferentes cotas e bancadas da cava. A aquisição seguiu um padrão de coleta de dados em uma faixa do piso até no máximo dois metros de altura em cada bancada analisada. Cada frente foi criteriosamente analisada com o intuito de evitar coleta de dados em fraturas oriundas de desmonte explosivo, pois essas fraturas são superficiais e possuem baixa persistência no maciço, com pouca representatividade para a geologia estrutural. Com a utilização de uma bússola geológica de notação Clar, foram adquiridas 811 medidas de planos de fraturas. A declinação magnética

local é de  $21^{\circ}37'$ . O levantamento foi realizado por setores na cava da mina (Figura 28).

Figura 28: Cava da Mina Osamu Utsumi e as quatro frentes de lavra onde foram feitos os levantamentos estruturais.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados coletados em campo foram processados no *software* OpenStereo. Esse programa foi desenvolvido pela Universidade de São Paulo – USP para o tratamento de dados estruturais. É uma plataforma livre e escrita em linguagem Python. A inserção dos dados pode ser realizada por arquivos de texto simples formato *.txt* com os dados de direção de mergulho separados do mergulho real por um simples espaçamento ou vírgula (GROHMANN et al., 2011).

A técnica de representação adotada é direção de mergulho/mergulho onde é considerado primeiro a direção do mergulho e em seguida o valor do mergulho. O programa utiliza o método estatístico da distribuição de probabilidade contínua de Fisher. Foram geradas projeções estereográficas para representação das medidas coletadas a partir da rede de igual área de Schmidt no hemisfério inferior. A projeção estereográfica, ou estereograma, é a representação gráfica da orientação e mergulho



de um plano ou lineção no espaço. É uma ferramenta consagrada e amplamente empregada em estudos de geologia estrutural.

### 7.3 Dados hidroquímicos

Os dados hidroquímicos abordados na tese foram cedidos pela INB. Esses dados são públicos pois constam na tese de doutorado de Alberti (2017). São dados de monitoramento periódicos que a empresa realiza parte em laboratório próprio e parte em parceria com o Laboratório de Poços de Caldas (LAPOC-CNEN). As amostragens e coletas ocorrem em diversos pontos do complexo mineiro – como bota-fora, planta de beneficiamento, planta industrial, zona de descarte de decapeamento da cava, nos córregos consulta e cercado, além de diversos pontos na cava da mina.

Os poços de monitoramento (PM) localizados na cava possuem profundidade que variam entre 6 a 48 metros. O único local de amostragem que não é confinado é o lago da cava da mina – representado por CAVA (Figura 29). Esses dados foram compilados de maneira a selecionar somente os pontos de interesse ao estudo.

Figura 29: Localização dos poços de monitoramento.



Fonte: Dados da pesquisa.

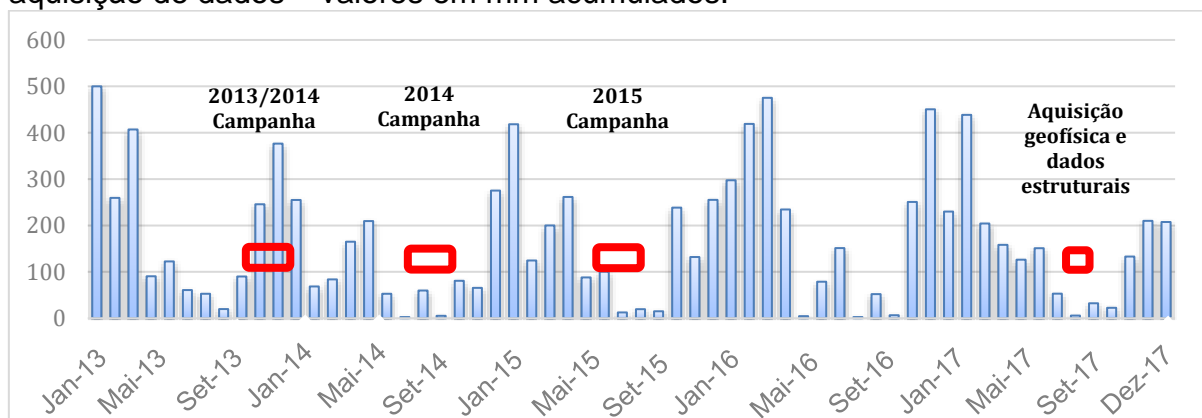
A princípio não houve critérios técnicos prévios para a locação dos poços de monitoramento. Os métodos de bombeamento de baixa vazão descritos na norma brasileira – ABNT NBR 15847 foram empregados na coleta das amostras. Nesse sistema, a água é coletada diretamente da seção filtrante do poço e não há entrada de água com vazão acima da produção fornecida pelo aquífero, o que minimiza distúrbios no poço durante a coleta. As amostras de água foram preservadas segundo o “Guia Nacional de coleta e preservação de amostras” elaborado pela Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) em 2011.

O resumo dos parâmetros analisados nas amostras de água, a técnica de coleta e preservação das amostras e as análises químicas utilizadas pelos laboratórios onde foram realizadas as análises químicas é apresentado no Anexo I. Segundo Alberti (2017) os poços de monitoramento foram construídos a partir do método de perfuração roto-pneumático com diâmetro de 8” no topo do poço, e posterior redução para perfurações de 6”. De acordo com os relatórios da empresa construtora, foram instalados nos poços filtros e tubos geomecânicos de PVC em que o espaço anelar foi preenchido com pré-filtro em todo intervalo de entrada de água e com compactolite, bentonita e selo de cimento na porção superior do poço.

Para a determinação dos parâmetros físico-químicos foi utilizado a sonda multiparamétrica Horiba U-23 acoplado a uma célula de fluxo. Os elementos Cd, Cu, Mo e Pb foram determinados por espectrometria de absorção atômica com forno de grafite GF-AAS; o ânion  $\text{Cl}^-$  foi determinado pelo método de volumetria;  $\text{F}^-$  foi determinado pelo método Potenciometria. As análises de Al, Cr, Fe total, Mn, Zn, Mg, Ba, Ca, Co, Si, Ni, Sr, Ti, Y e Zr foram determinados por espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), segundo métodos da Agencia de Proteção Ambiental Norte Americana EPA-USEPA SW-846 6010/2007; O elemento As foi determinado por espectrometria de absorção atômica com geração de hidretos Hg-AAS, segundo metodologia descrita EPA-USEPA SW 846 3051A/2007; O Hg foi determinado por decomposição térmica e espectrometria de Absorção Atômica com amalgamação em ouro, segundo métodos EPA-USEPA SW 846 7473/2007; Os cátions  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  foram determinados por Absorção Atômica – Chama;  $\text{NO}_3$  foi determinado pela metodologia descrita por Mackereth et al. (1978); P foi determinado por espectrofotometria com molibdato e o  $\text{SO}_4$  foi determinado por espectrometria com cloreto de bário.

Foram fornecidos dados de 3 campanhas de amostragem. A primeira campanha foi realizada entre novembro de 2013 e janeiro de 2014, a segunda campanha nos meses de julho e agosto de 2014 e a terceira campanha entre os meses de junho e abril de 2015. Tanto em campanhas de coletas hidroquímicas como campanhas de aquisições geofísicas, o teor de umidade pode influenciar nos resultados obtidos. Por isso dados pluviométricos passam a ser um fator de análise necessário. A tabela 5 apresenta os dados pluviométricos em mm acumulados mensalmente entre as campanhas de coletas hidroquímicas e a campanha de aquisição dos dados geofísicos.

Tabela 5: Dados pluviométricos em mm acumulados durante as etapas de coleta e aquisição de dados – valores em mm acumulados.



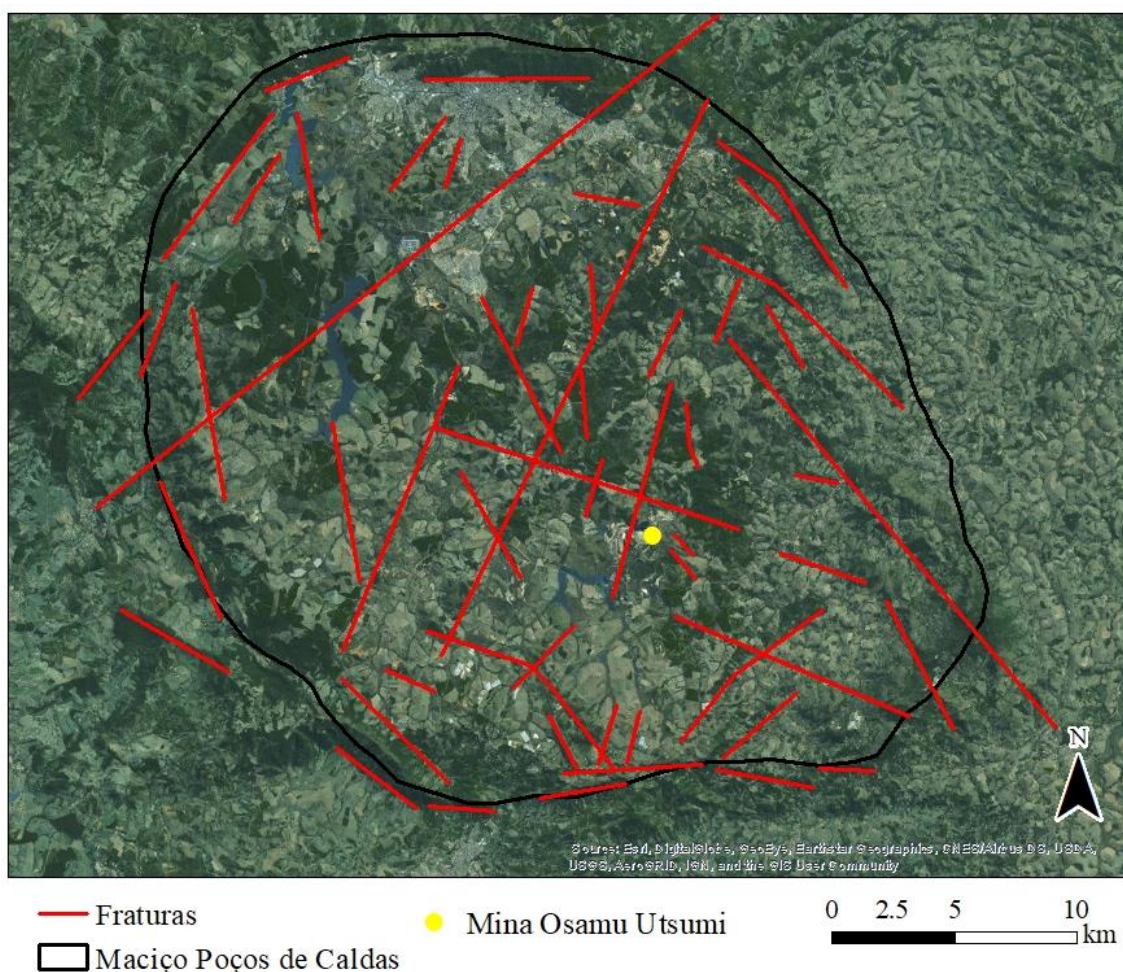
Fonte: Dados da pesquisa.

## 8. RESULTADOS

### 8.1 Resultados de fotoanálise e análise estrutural geométrica

Os dados de geologia estrutural são utilizados como base para compreensão dos dados geofísicos, para o entendimento do regime de fluxo subterrâneo de águas na cava da MOU e para análises geotécnicas. Na figura 30 são apresentados a análise de imagens LANDSAT para compreensão e identificação dos lineamentos e fraturamentos de âmbito regional do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. As linhas em vermelho representam padrões retilíneos de drenagens no maciço que estão associados a instalação dos corpos intrusivos de rochas alcalinas do maciço.

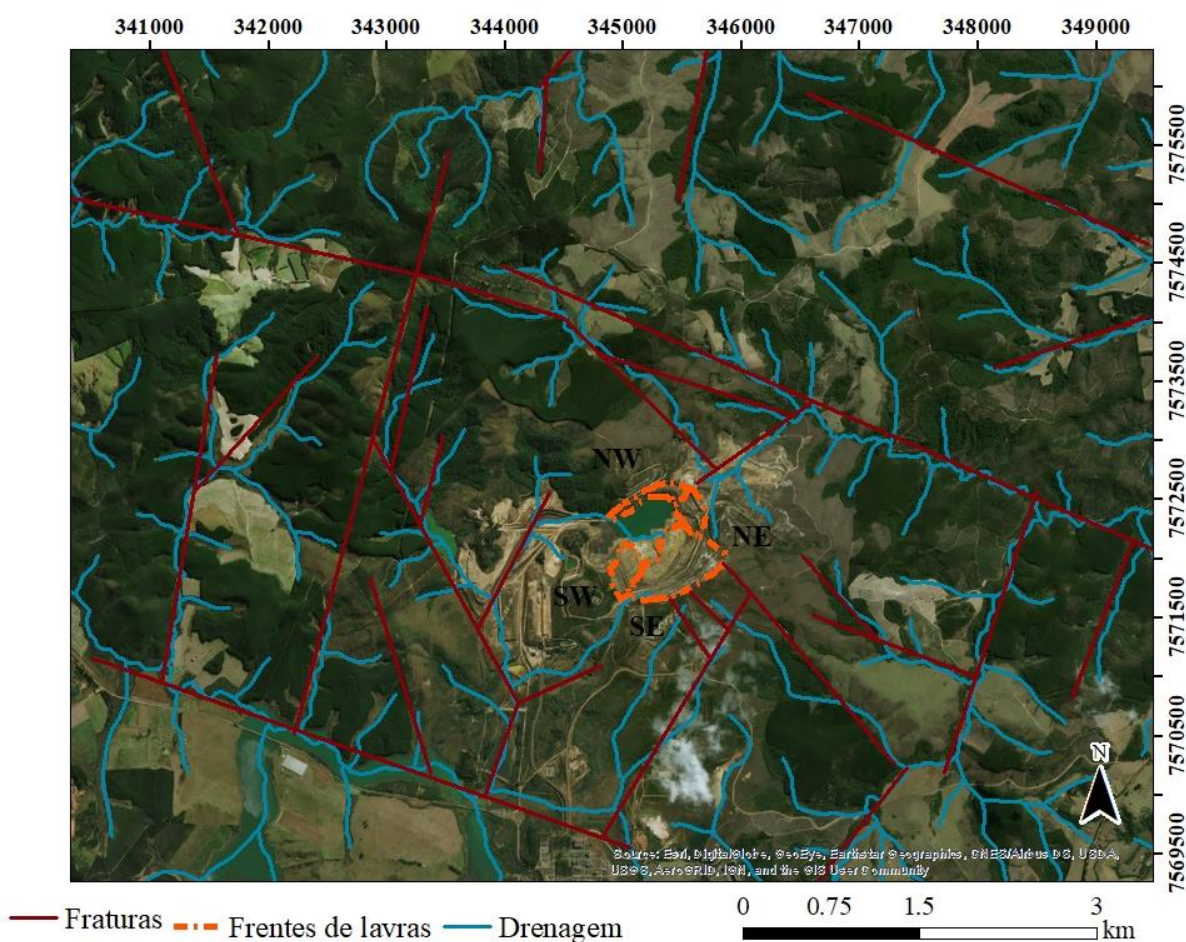
Figura 30: Lineamentos de fraturas regionais extraídos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas.



Fonte: Dados da pesquisa.

Próximo a mina Osamu Utsumi há um predomínio de lineamentos de direção NE-SW e NW-SE, enquanto que próximo a cidade de Poços de Caldas, no quadrante noroeste da figura 29 há um grande lineamento com direção NE-SW (aproximadamente N45). Nas proximidades da mina o padrão de lineamentos continua próximo do padrão regional, em que os principais lineamentos são NE-SW e NW-SE (figura 31).

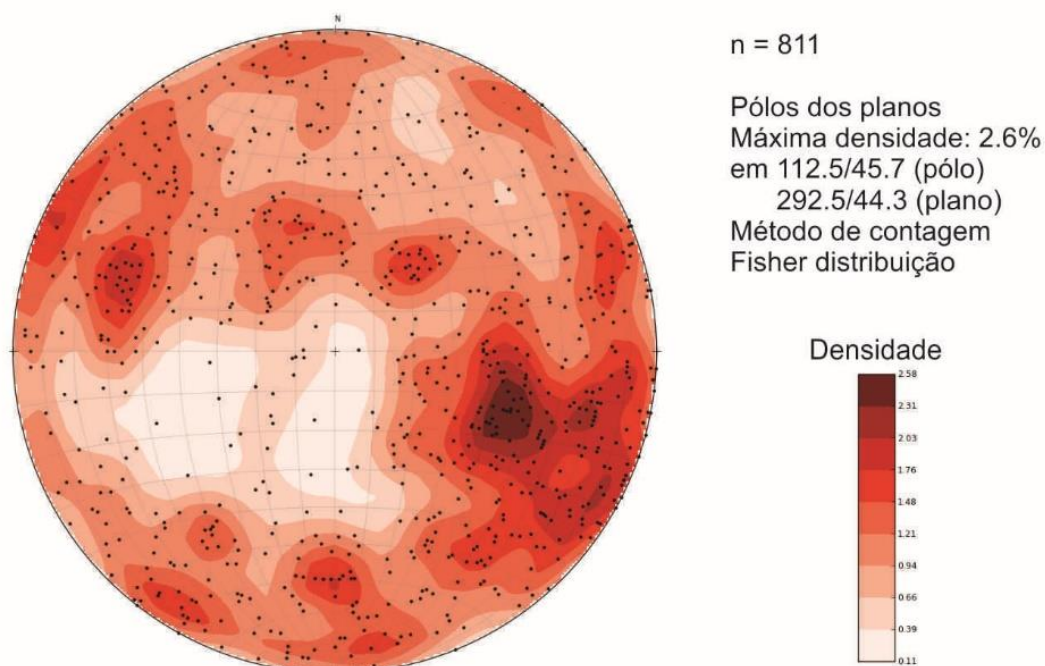
Figura 31: Padrão de drenagem condicionado ao controle estrutural de fraturas regionais próximo à Mina Osamu Utsumi



Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados de fotoanálise em diferentes escalas indicarem um predomínio de lineamentos NE-SW e NW-SE para o maciço e no entorno da cava da MOU. As medidas de campo em escala local coletadas juntamente com a campanha geofísica são apresentadas a seguir. A figura 32 compreende o diagrama de contorno das 811 medidas coletadas na cava da mina Osamu Utsumi, em todas as cavas.

Figura 32: Diagrama de contorno com todas as medidas coletadas na cava da mina, 811 medidas ao todo.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados do diagrama de contorno indicam uma predominância de medidas de orientação NE. É possível nomear essa família principal como F1 e o predomínio na orientação N10-30. Há também uma família de orientação N300 com expressividade considerável que foi denominada de F2. Essas duas famílias possuem semelhança com os lineamentos observados em âmbito regional e são observadas em diversos pontos do maciço (Figuras 29 e 30). Em menor expressividade é notável uma terceira família de orientação E-W, denominada de F3.

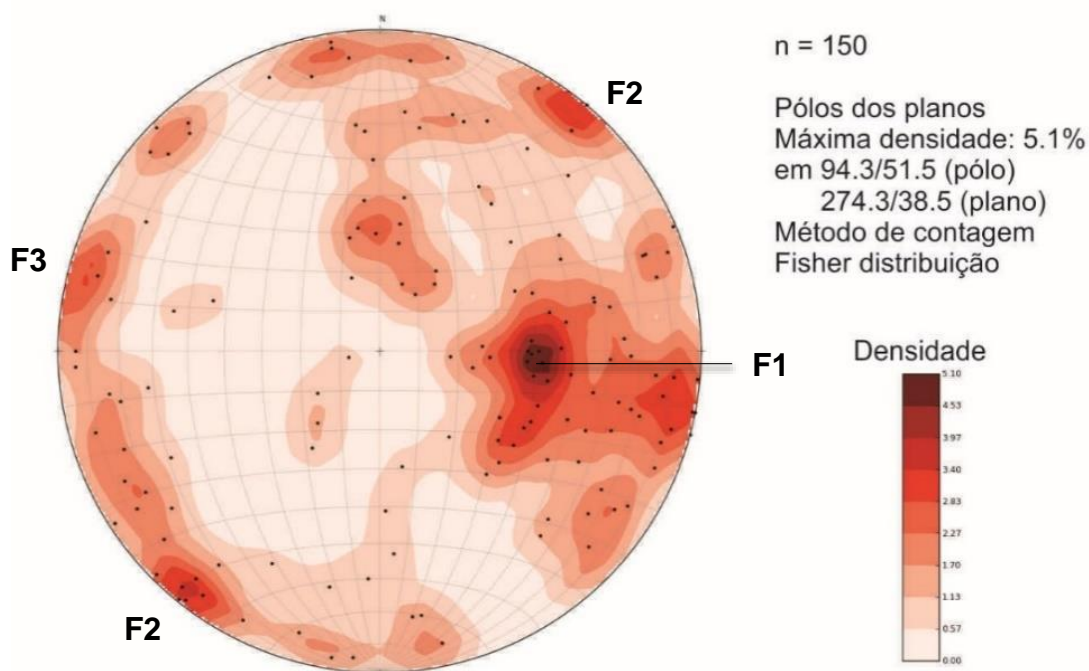
### 8.1.1 Frente NE

Na frente nordeste foram adquiridas 150 medidas estruturais. O diagrama de contorno da frente com a distribuição da frequência das direções é apresentado na figura 33. Os dados apresentam medidas dispersas, porém com uma concentração de pólos que indica uma família principal com direção N10-20 e mergulho aproximadamente de 40° para NW-W.

Na frente NE há também uma família secundária (F2) com direção N300 e mergulho subvertical, com direção de mergulho ora para NE, ora para SW. Assim,

como a família principal, essa família secundária também pode contribuir para o fluxo de água interno do maciço. Esse fato é importante, uma vez que, o maior bota fora do complexo mineiro, o Bota-Fora 4 (BF4), é localizado justamente nos limites da frente NE. É possível identificar uma terceira família F3 de orientação E-W.

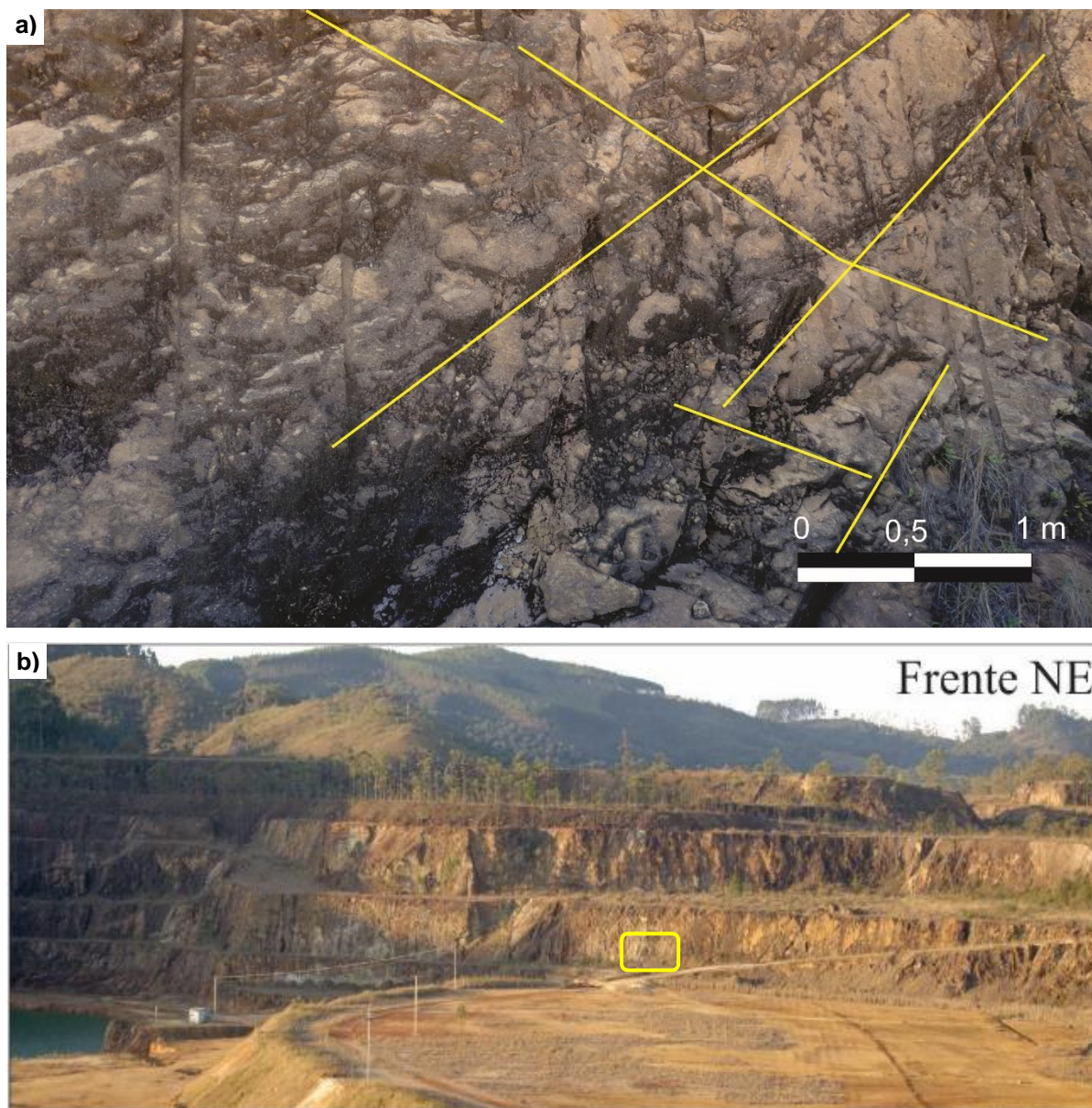
Figura 33: Diagrama de contorno dos planos de fraturas da frente NE.



Fonte: Dados da pesquisa.

Em campo foram identificadas famílias de fraturas com indícios de percolação de água no talude (figura 34a). Apesar da época de aquisição de dados ser estação de seca – com pouca pluviosidade, há vegetação e umidade nas fraturas. A figura 34b apresenta a visão geral da frente NE, composta por 4 bancadas principais de trabalho, essa frente é que possui menos bancadas e faz divisa no fundo com o Bota-fora 4.

Figura 34: a) Vista em detalhe do maciço na frente NE; b) vista geral da frente com indicação do local da imagem 34a.



Fonte: Dados da pesquisa.

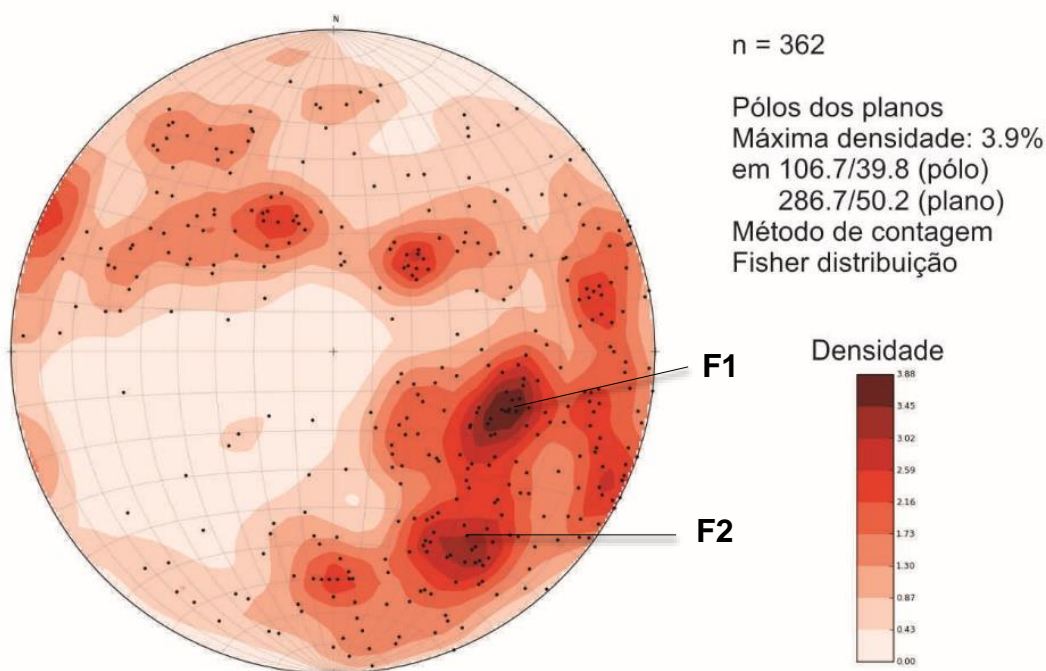
### 8.1.2 Frente SE

Na frente sudeste foram adquiridas 362 medidas estruturais. A partir dos resultados é possível notar uma concentração de pólos que indica uma família principal (F1) com orientação N20 e mergulho superiores a  $50^\circ$  e em alguns casos próximos a  $80^\circ$ . Algumas medidas isoladas possuem pouca representatividade para a interpretação dos resultados. Há também outra família que possui expressividade na frente SE, com orientação N50-70 nessa frente denominada F2. O diagrama de



contorno da frente com a distribuição da frequência das direções é apresentado na figura 35.

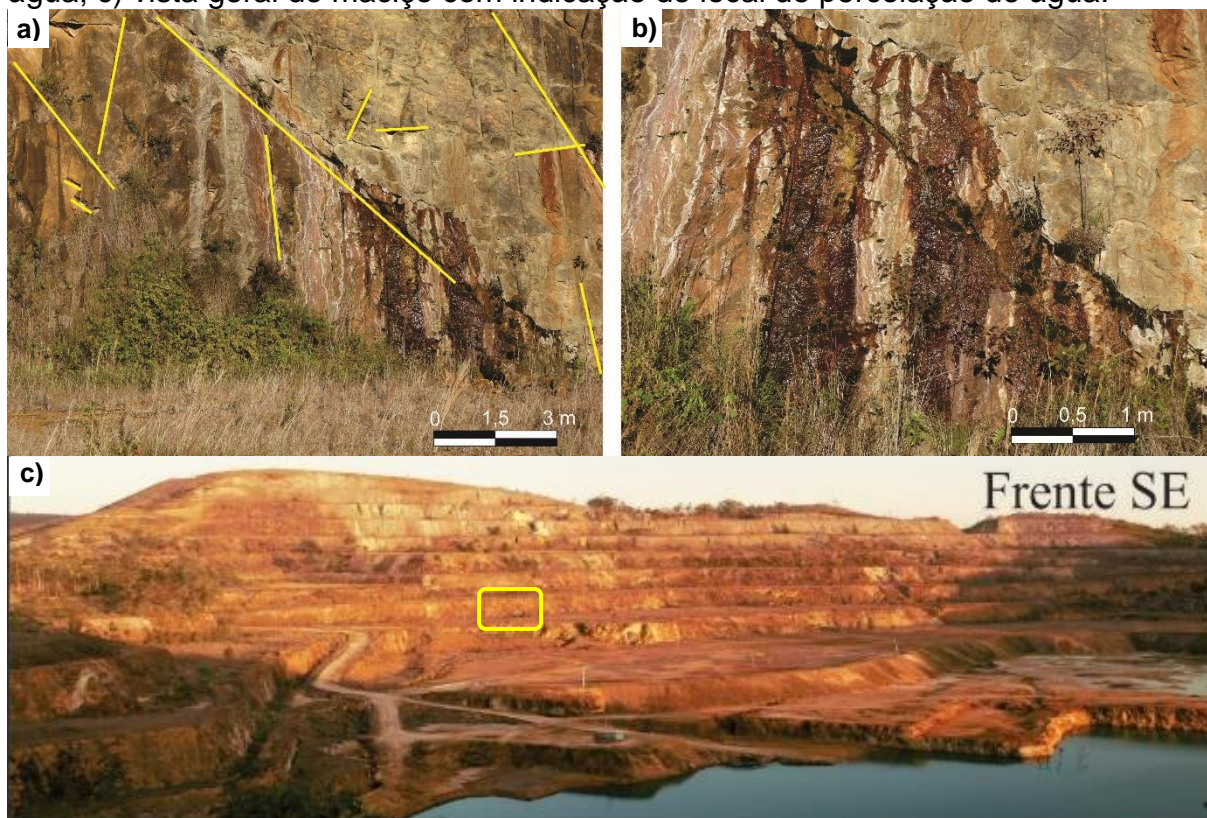
Figura 35: Diagrama de contorno dos planos de fraturas da frente SE.



Fonte: Dados da pesquisa.

Nessa frente há percolação de água pelo maciço e que por vezes aflora nas faces do talude (figura 36a e 36b). O aporte de água é maior quando ocorre o cruzamento de duas ou mais fraturas. Essa água que aflora, flui das bancadas intermediárias até o centro da cava ou para um ponto mais baixo. Isso favorece o desenvolvimento de vegetação nesses pontos. A frente SE representa a frente com mais bancadas de trabalho (Figura 36c). Ao todo são 10 bancadas com altura variável entre bancadas.

Figura 36: a) Vista em detalhe do maciço na frente SE; b) indícios de percolação de água; c) vista geral do maciço com indicação do local de percolação de água.



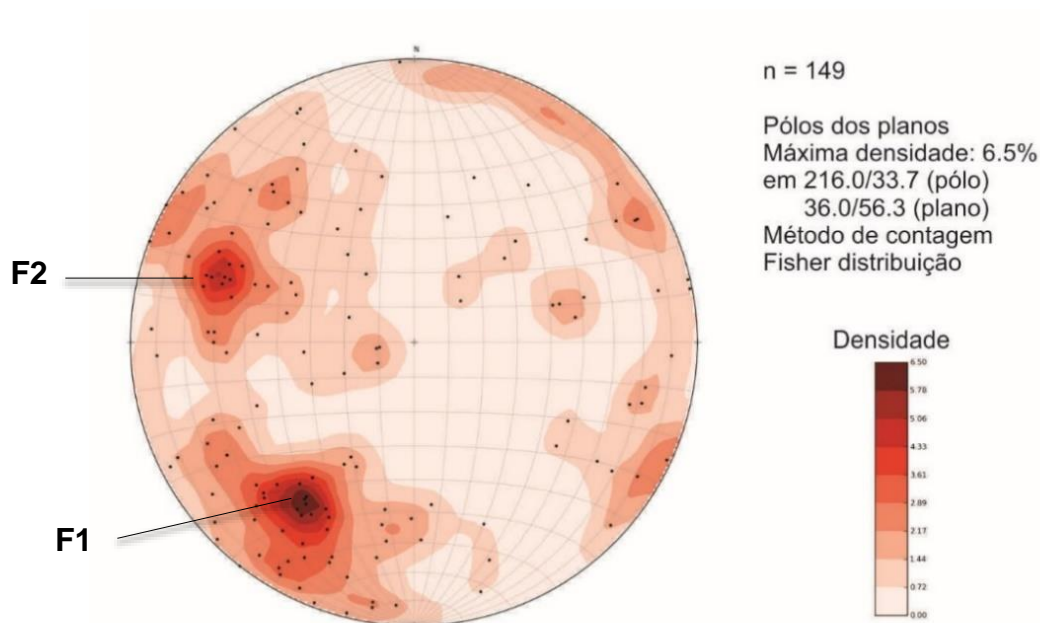
Fonte: Dados da pesquisa.

Essa frente também é localizada próxima a outros bota foras, os BF1 e BF3, que são notadamente menores que o BF4. O fraturamento principal indica mergulho justamente para NW – centro da cava, o que pode indicar aporte de águas que percolam o maciço e águas adjacentes – proveniente dos bota foras – para dentro da cava.

### 8.1.3 Frente SW

Na frente sudoeste foram adquiridas 149 medidas estruturais. O diagrama de contorno estrutural da frente com a distribuição da frequência das direções é apresentado na figura 37. Há uma concentração de polos que indicam duas famílias principais, uma família com orientação N300 (F1) e mergulho para NE, superiores a 60°; e outra família com orientação N10-30 (F2) com mergulho para SW e também superiores a 60°.

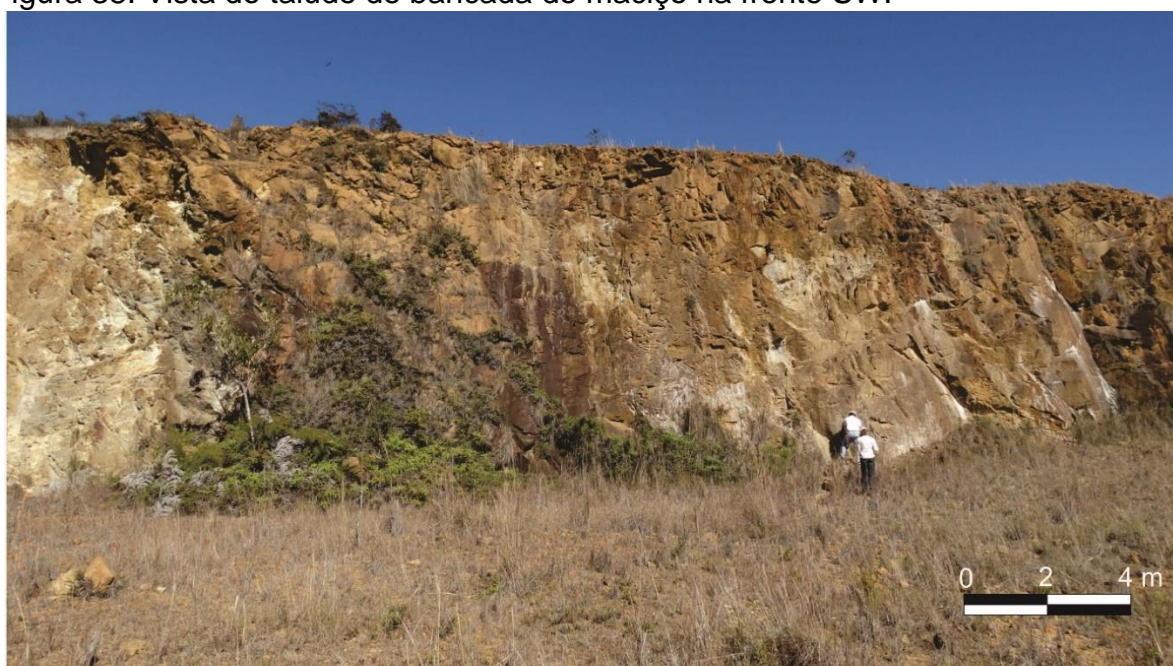
Figura 37: Diagrama de contorno dos planos de fraturas da frente SW.



Fonte: Dados da pesquisa.

A frente SW não apresentou um fluxo significativo de água durante as etapas de aquisição de dados, porém há indícios claros de percolação de água no maciço, como a presença de manchas esbranquiçadas típicas de percolação de água em maciços, presença de argilominerais por vezes preenchendo fraturas e presença de vegetação no sopé de taludes de bancadas (figura 38).

Figura 38: Vista do talude de bancada do maciço na frente SW.

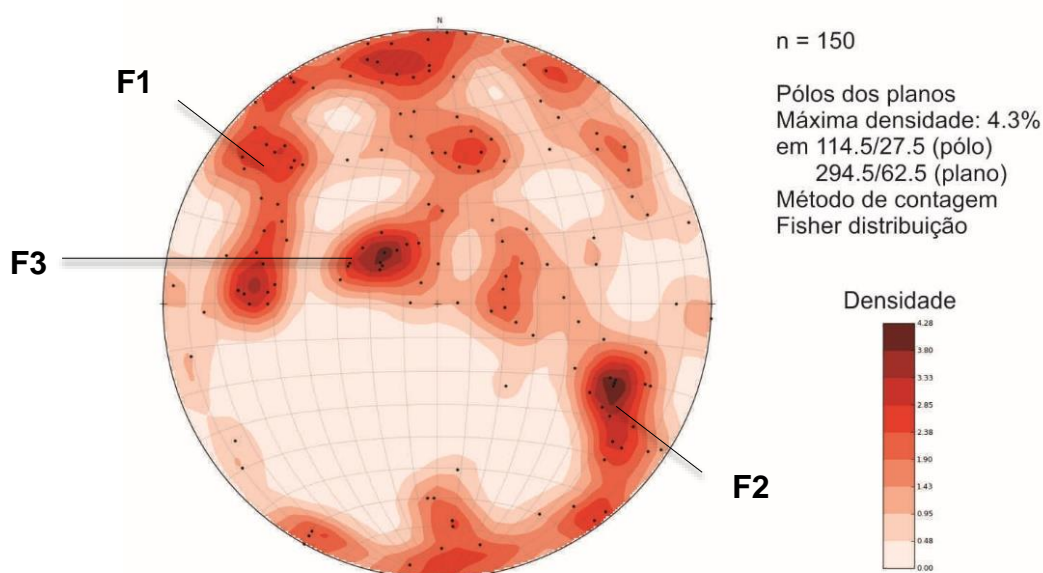


Fonte: Dados da pesquisa.

### 8.1.3 Frente NW

Na frente noroeste foram adquiridas 150 medidas estruturais. O diagrama de contorno estrutural da frente com a distribuição da frequência das direções é apresentado na figura 39. Há uma concentração de polos que indicam duas famílias principais, ambas com direção NE-SW, porém com variação do mergulho, a família F1 com mergulho para SE e a família F2 com mergulho para NW. Há ainda uma terceira família com orientação E-W (F3), com mergulho para E. A frente NW apresenta os taludes mais verticais da cava (Figura 40).

Figura 39: Diagrama de contorno dos planos de fraturas da frente NW.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 40: Vista geral da frente NW e indicação de bancadas de coletas de dados.

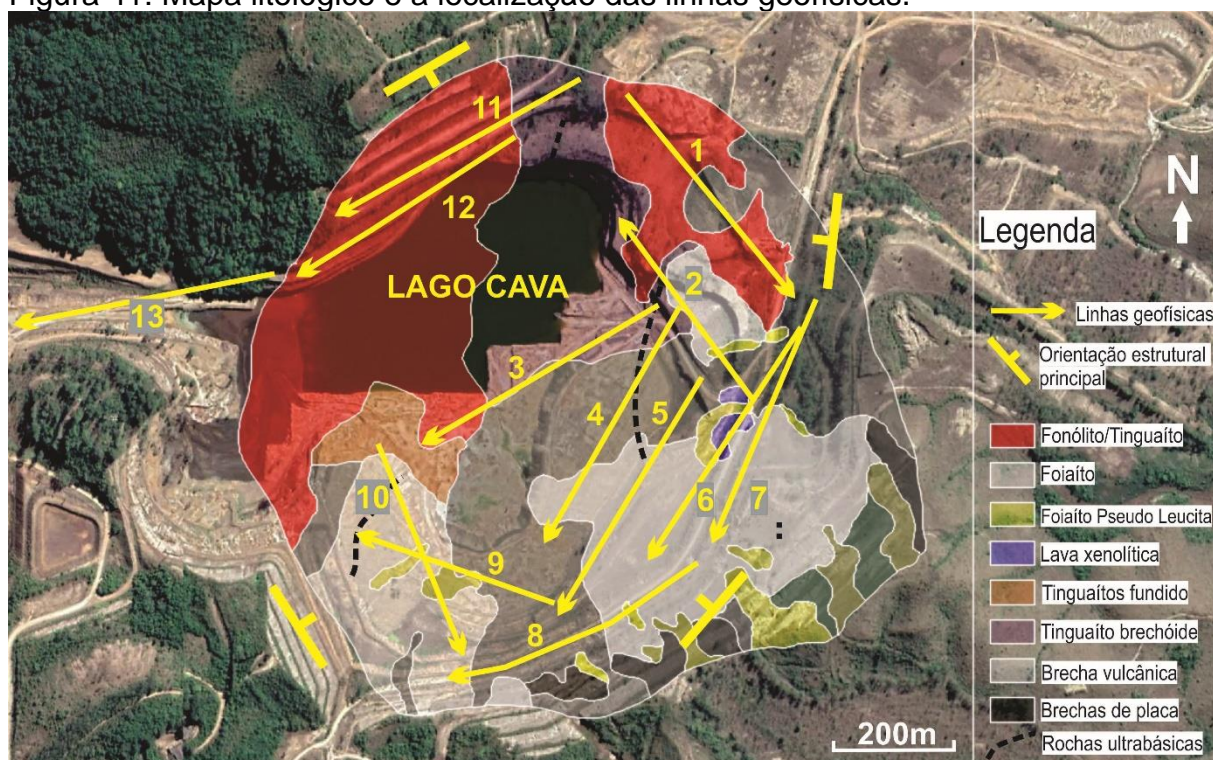


Fonte: Dados da pesquisa.

## 8.2 Resultados geofísicos

A disposição das linhas de imageamento elétrico foi realizada de acordo com a Figura 41. Com o intuito de enriquecer a interpretação dos dados, nessa mesma figura foi sobreposto o mapa litológico da cava da mina apresentado em Magno Júnior (1985). Os dados de tomografia elétrica são apresentados a seguir da seguinte maneira (figuras 42 a 55): na porção superior são apresentados os modelos calculados a partir do arranjo elétrico Dipolo-dipolo. Na porção inferior da imagem são apresentados os modelos calculados a partir do arranjo elétrico Schlumberger. Os valores de resistividade foram padronizados em escala gráfica e cromática onde: zonas com cores predominantemente frias (tons de azul) representam zonas com valores mais baixos de resistividade; zonas com cores de tons amarelos e vermelhos tendem a zonas com maiores valores de resistividade.

Figura 41: Mapa litológico e a localização das linhas geofísicas.



Fonte: Dados da pesquisa.

No contexto geológico local as zonas com menor resistividade são interpretadas como zonas propícias a maior fluxo de água, logo, zonas onde ocorrem maior aporte hídrico condicionado por estruturas geológicas. A intersecção de fraturas da rocha favorece a percolação de água no meio, o que contribui para o aumento da

permeabilidade do maciço. Dessa maneira zonas onde ocorrem predomínio de valores baixos de resistividade elétrica consideradas zonas com maior fluxo de água e, conseqüentemente maior permeabilidade. Zonas de alta resistividade elétrica são interpretadas como zonas de predomínio de rochas inalteradas, com baixo grau de fraturamento e alterabilidade.

Em geral as rochas quando desprovidas de água, apresentam um valor de resistividade relativamente alto ( $> 400 \text{ Ohm.m}$ ), mas fatores como o grau de alteração, grau de fraturamento, presença de minerais específicos e percolação de água tendem a diminuir a resistividade elétrica. Portanto, devido à grande variedade litológica da cava da mina são esperadas diferentes respostas em relação à resistividade elétrica de cada litologia. O contraste de resistividade elétrica é mais pronunciado nas tomografias elétricas em que há contatos litológicos evidenciados. As brechas presentes na cava da mina Osamu Utsumi são rochas que passaram por alto grau de tensão e, por isso, tendem a apresentar elevado grau de fraturamento, por isso também apresentam maior facilidade para alteração ocasionada intemperismo químico. Essas condições físicas da rocha favorecem uma assinatura geofísica que resultam em baixos valores de resistividade.

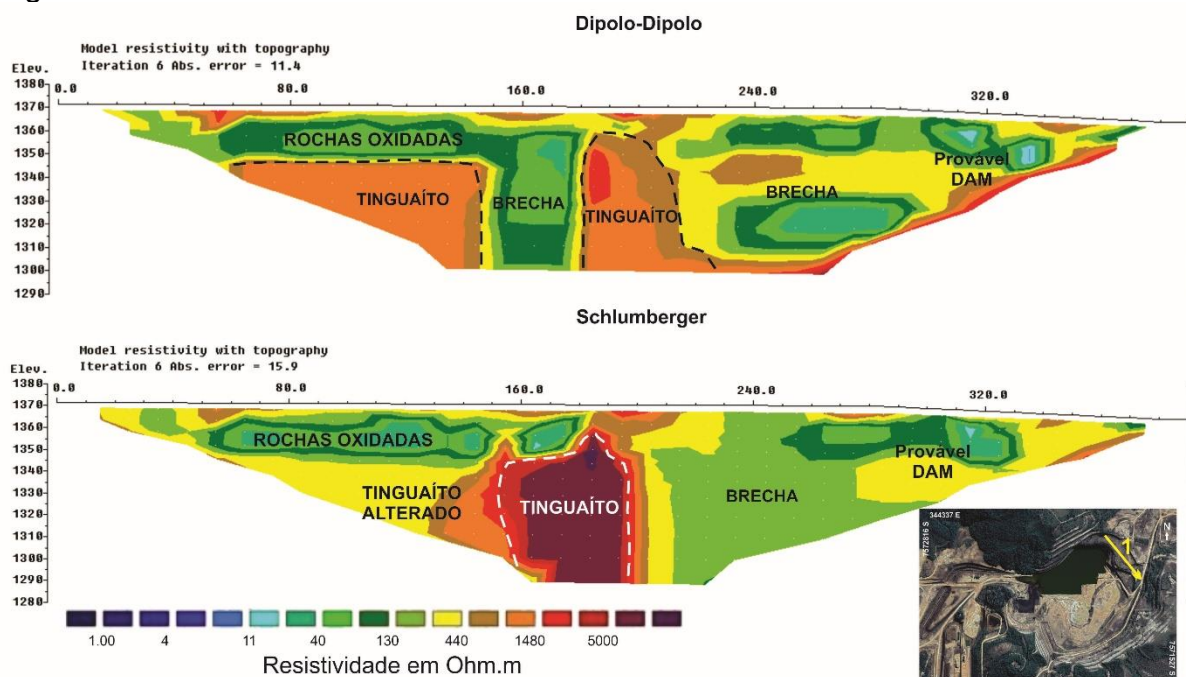
Em drenagens ácidas é comum existirem íons dissolvidos na água, principalmente íons de sulfato ( $\text{SO}_4$ ) e metais como Fe, que são provenientes da lixiviação de sulfetos e cuja presença pode ser indicativa de DAM. O resultado prático é que esses íons provocam altos valores de condutividade e, conseqüentemente, baixos valores de resistividade ( $< 15 \text{ Ohm.m}$ ). Apenas o quimismo das águas confirma a presença de drenagem ácidas, porém os baixos valores de resistividade representam possíveis indicadores do fenômeno. Para valores de resistividade entre  $15 \text{ Ohm.m}$  a  $130 \text{ Ohm.m}$ , são esperadas rochas com avançado estado de alteração e alto fraturamento com presença de água. Valores de resistividade entre  $130 \text{ Ohm.m}$  e  $440 \text{ Ohm.m}$  são correlacionáveis com maciços com um estágio de fratura médio e com percolação de água leve. Para valores acima de  $440 \text{ Ohm.m}$ , rochas com baixo fraturamento e baixo grau de alteração - conseqüentemente, baixa circulação de água é esperada. Finalmente, valores acima de  $5000 \text{ Ohm.m}$  representam massas inalteradas e insaturadas.

A despeito dos critérios de análise dos arranjos geofísicos foram consideradas as vantagens e desvantagens de cada um deles – discutido no subcapítulo 6.2.3 Análise comparativa entre arranjos.

### 8.2.1 Frente NE

As linhas da frente NE são as linhas 1 e 2. A linha 1 foi ensaiada em um local próximo ao limite físico da cava – um platô localizado na cota 1370m e o sentido do caminhamento foi de NW para SE (Figura 42). No arranjo Dipolo-dipolo foi possível identificar uma zona central de alta resistividade (valores  $> 1000 \text{ Ohm.m}$ ) entre as estacas 180m e 210m interpretada como uma intrusão de tinguaiúto, devido a forma do corpo e os valores de resistividade. Entre as estacas 150m e 180m há uma zona de rochas alteradas (brecha). Entre as estacas 310m e 330m há zonas de baixa resistividade ( $< 15 \text{ Ohm.m}$ ) possivelmente afetadas com DAM. O arranjo Schlumberger apresentou resultados semelhantes, principalmente na zona de baixa resistividade e no corpo de tinguaiúto, porém devido a limitação de identificação de estruturas verticais, o arranjo mascarou a presença da brecha.

Figura 42: Modelo de inversão da linha 1.



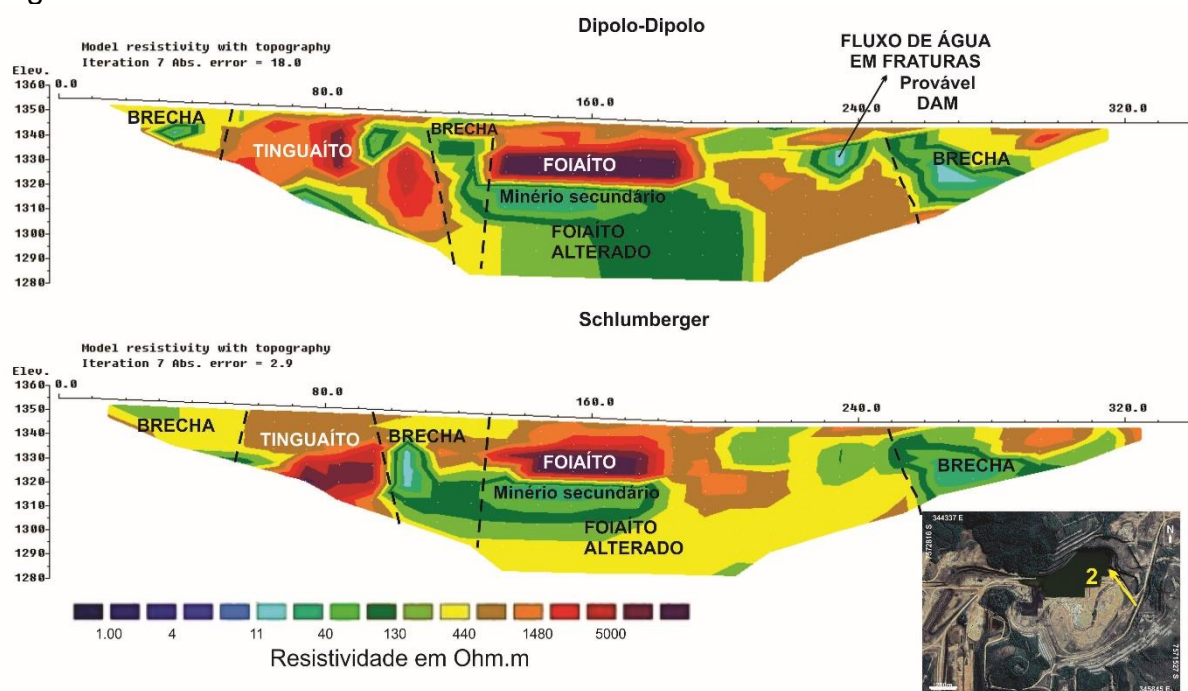
Fonte: Dados da pesquisa.

Em uma posição um pouco mais central da cava, a linha de tomografia elétrica 2 foi ensaiada próximo a estrada de acesso ao centro da cava. Possui 340 m de comprimento e 80m de profundidade de investigação e o sentido de caminhamento foi de SE para NW (Figura 43). Nesse local ocorre contribuição de drenagem em zonas

de médio a baixa resistividade e há uma zona com baixos valores de resistividade possivelmente afetada por DAM (valores inferiores a 15 Ohm.m) no final da linha, próximo ao lago na zona de brecha.

Foi possível identificar uma variedade litológica maior. No local há presença de foiaítos com diferentes níveis de fraturamento e alterabilidade, tinguaiúto com valores de resistividade  $> 400$  Ohm.m e as brechas com menores valores de resistividade. As imagens dos dois arranjos apresentaram bastante semelhanças. Na porção central das imagens há um núcleo de alta resistividade ( $> 5000$  Ohm.m) e imediatamente abaixo ocorre uma zona com valores mais baixos de resistividade (valores entre 40 e 130 Ohm.m). Essa zona de baixa resistividade é associada a mineralização secundária e a cota em que se inicia, 1330m, é a mesma cota do nível do lago, o que pode justificar valores mais baixos nesse mesmo nível, em que águas do nível freático percolam o maciço no local da linha 2.

Figura 43: Modelo de inversão da linha 2.



Fonte: Dados da pesquisa.

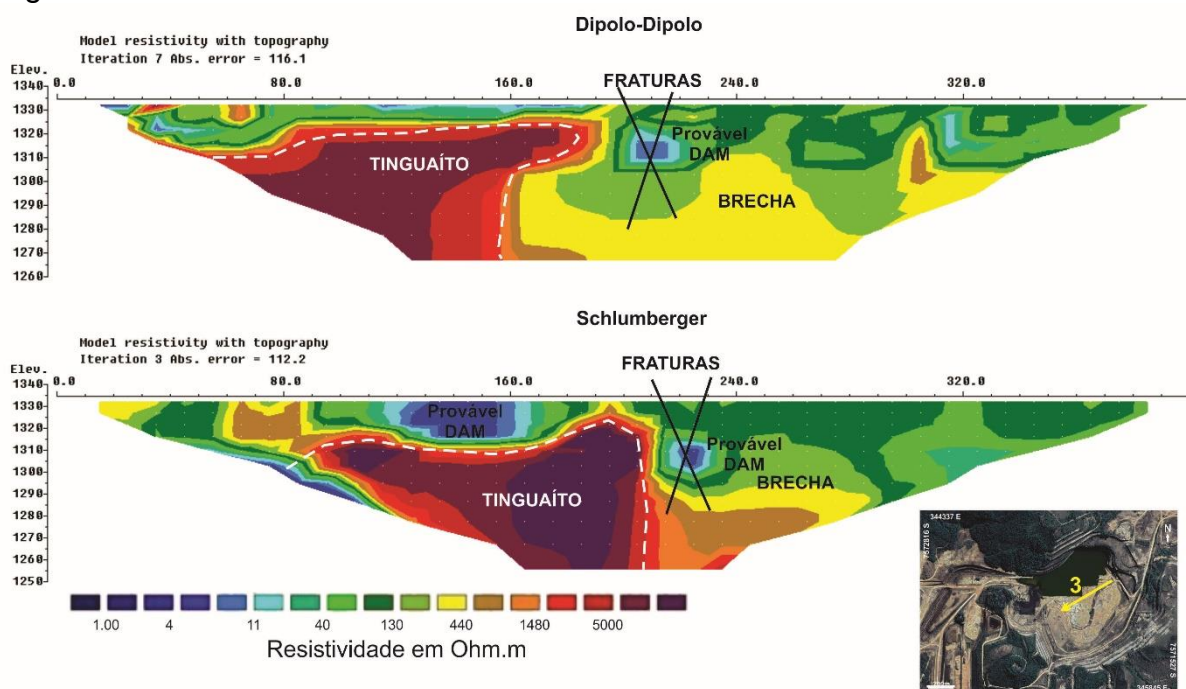
### 8.2.2 Frente SE

A linha de tomografia elétrica 3 é localizada na porção central da cava da mina, localizada próximo ao lago da cava e na menor cota ensaiada (1335m). Com 400m



de comprimento a linha 3 apresenta contrastes bem marcados de valores de resistividades (Figura 44). Zonas de baixa resistividade são visíveis no arranjo Schlumberger em duas porções principais: entre as estacas de 120m e 170m e com ocorrência próxima a cota de 1310m, e pontualmente próximo à estaca 220m. Essa segunda zona também ocorre no arranjo Dipolo-dipolo, a qual possivelmente contribui para uma zona de gênese de DAM, dado os valores baixos de resistividade (<15 Ohm.m). O contraste de valores ocorre devido à proximidade com zonas de alta resistividade, o qual representa zonas de rochas pouco alteradas que ao mesmo tempo são afetadas por fraturamento pontuais e bem delimitados – essa zona de alta resistividade é interpretada como um corpo de tinguáito.

Figura 44: Modelo de inversão da linha 3.



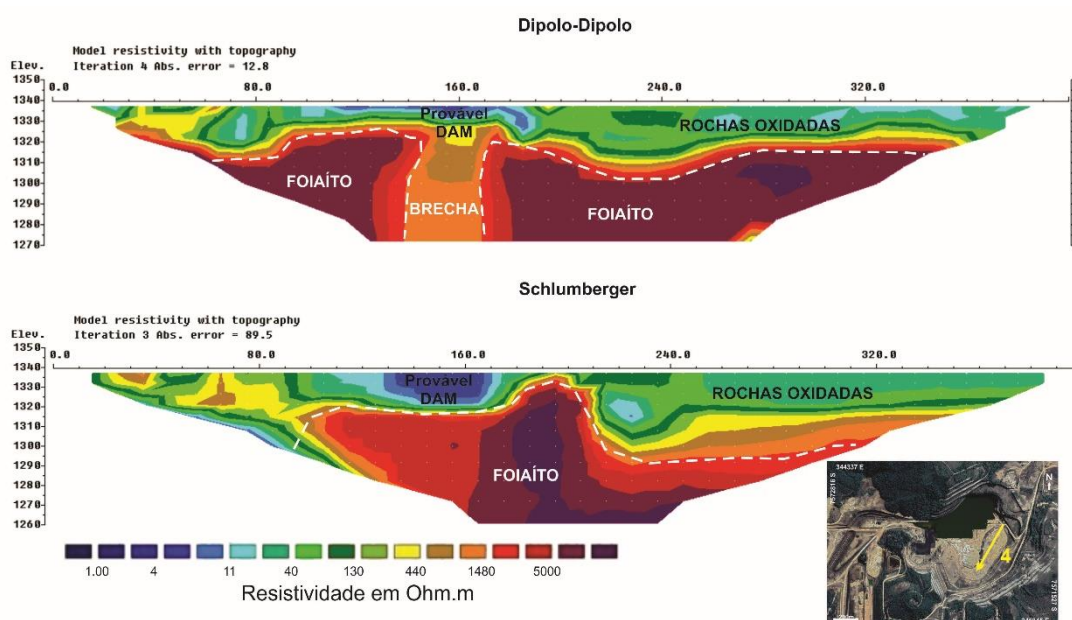
Fonte: Dados da pesquisa.

A linha da tomografia elétrica 4 é localizada em uma porção mais central da cava da mina (Figura 45). Os dois arranjos apontam uma zona de alta resistividade (>1000 Ohm.m) que inicia próximo a cota de 1320m, associado a prováveis intrusões de foiaíto. No arranjo Dipolo-dipolo essa zona sofre uma breve interrupção entre as estacas 120m e 180m, ao passo que no arranjo Schlumberger essa estrutura ocorre de forma contínua. Isso ocorre devido as particularidades de sensibilidade de cada arranjo, onde no Dipolo-dipolo há uma resolução lateral melhor, por isso esse local

(entre as estacas 150m e 170m) é interpretado como brecha. O arranjo Schlumberger mascarou a ocorrência desse litotipo.

Nessa mesma zona de rochas brechadas, entre as cotas de superfície (1340m) e a cota 1320m há uma incidência de zona de baixa resistividade (<15 Ohm.m) possivelmente associada a DAM. Uma zona de baixa resistividade ocorre nos dois arranjos. No arranjo Schlumberger é possível notar uma dimensão maior dessa zona, com uma maior distribuição lateral e vertical que, nesse caso representa com maior precisão a realidade.

Figura 45: Modelo de inversão da linha 4.



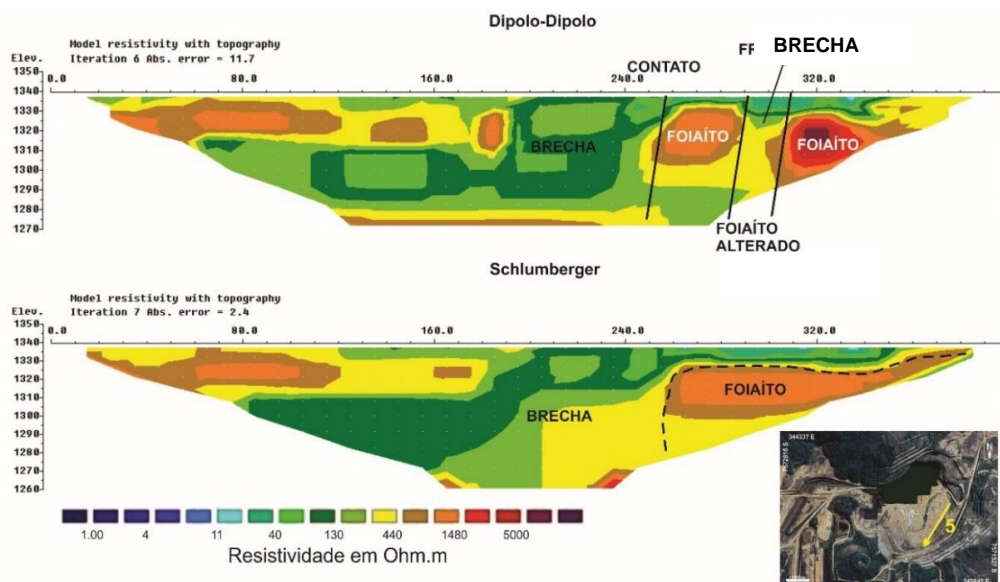
Fonte: Dados da pesquisa.

A linha de tomografia elétrica número 5 foi ensaiada na cota 1340m (Figura 46). Com os mesmos 400m de comprimento profundidade e 80m de investigação vertical. Não foram observadas zonas que indicassem assinaturas geofísicas associadas a DAM (resistividade <15 Ohm.m). A linha está inserida no contexto litológico de foiaítos e brechas. O arranjo Dipolo-dipolo possui melhor resolução dos contatos verticalizados da linha, onde é possível identificar o primeiro contato entre essas litologias na estaca 260m. Entre as estacas 290m e 310m há uma zona de brecha. De 310m até o final da linha há uma zona de alta resistividade relativa interpretada novamente como foiaíto.

O arranjo Schlumberger novamente mascarou os contatos verticais e interpretou tudo como uma massa de alta resistividade (no caso, foiaíto com valores

de resistividade próximos a 1500 Ohm.m). Os contatos litológicos de caráter verticalizados entre brecha e foiaíto foram passíveis de identificação somente no arranjo Dipolo-dipolo.

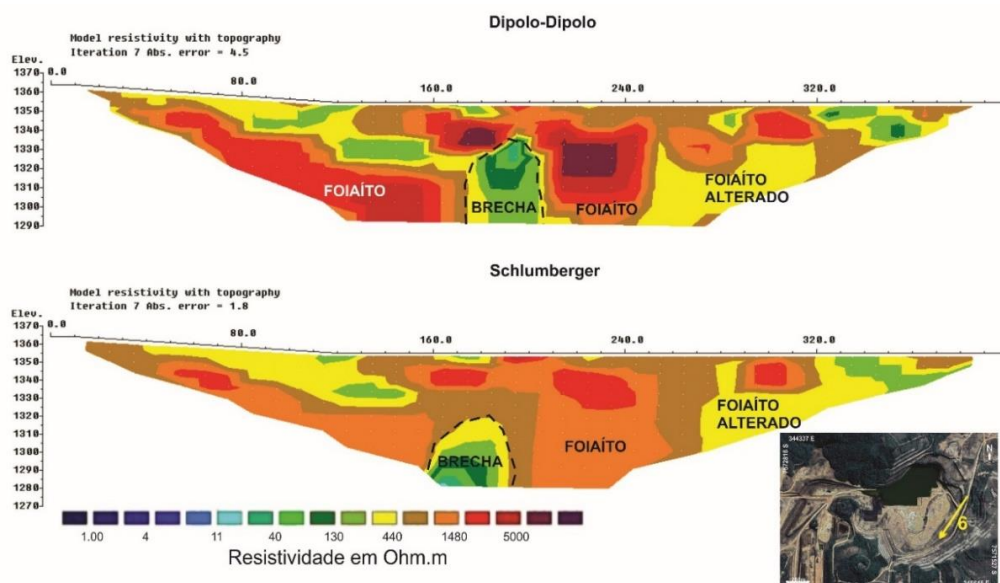
Figura 46: Modelo de inversão da linha 5.



Fonte: Dados da pesquisa.

A linha de tomografia elétrica número 6 foi ensaiada paralelamente as linhas 4 e 5, em uma bancada de cota superior. Ela possui um leve desnível pois inicia na cota 1365m e logo decai para cota de 1360m (Figura 47).

Figura 47: Modelo de inversão da linha 6.

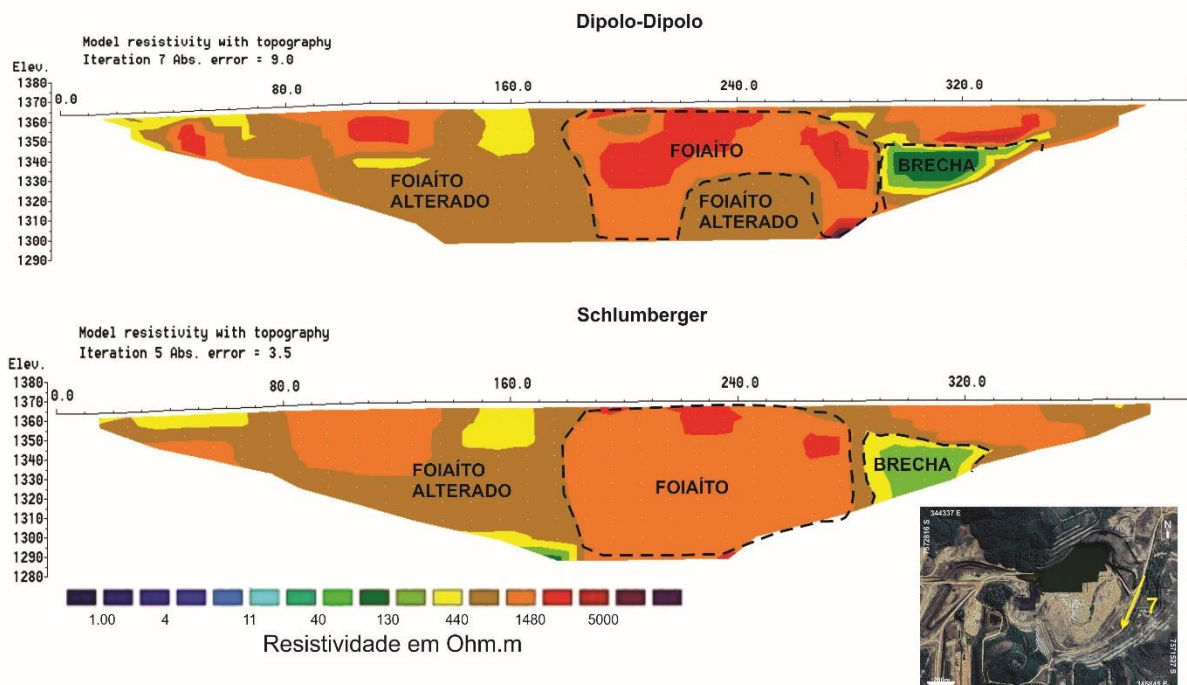


Fonte: Dados da pesquisa.

O contexto litológico da linha 6 é muito parecido com a linha 5, a diferença é a presença de um corpo brechado na porção central (entre as estacas 160m e 200m), e um predomínio maior da litologia de foiaítos. Também não foram notadas prováveis assinaturas geofísicas associadas a DAM e nem diferenças substanciais entre os arranjos.

As linhas de tomografia elétrica 7 e 8 foram ensaiadas na estrada de acesso principal a cava. A linha 7 possui 400 metros de comprimento e uma resolução com profundidade aproximada de 80m (Figura 48). O início da linha está em uma cota aproximada de 1365m e termina com um pequeno desnível positivo na cota de 1370m. O sentido de caminhamento foi de NE para SW. Nas imagens é possível identificar zonas com alta resistividade que ocorrem próximo a porção central da linha. O contexto litológico é de predomínio de foiaíto. Há apenas uma pequena ocorrência de resistividade mais baixa entre as estacas 290m e 330m que é interpretado como um corpo brechado, fraturado e com fluxo de água, porém sem indicativos de DAM (valores de resistividade acima de 40 Ohm.m).

Figura 48: Modelo de inversão da linha 7.

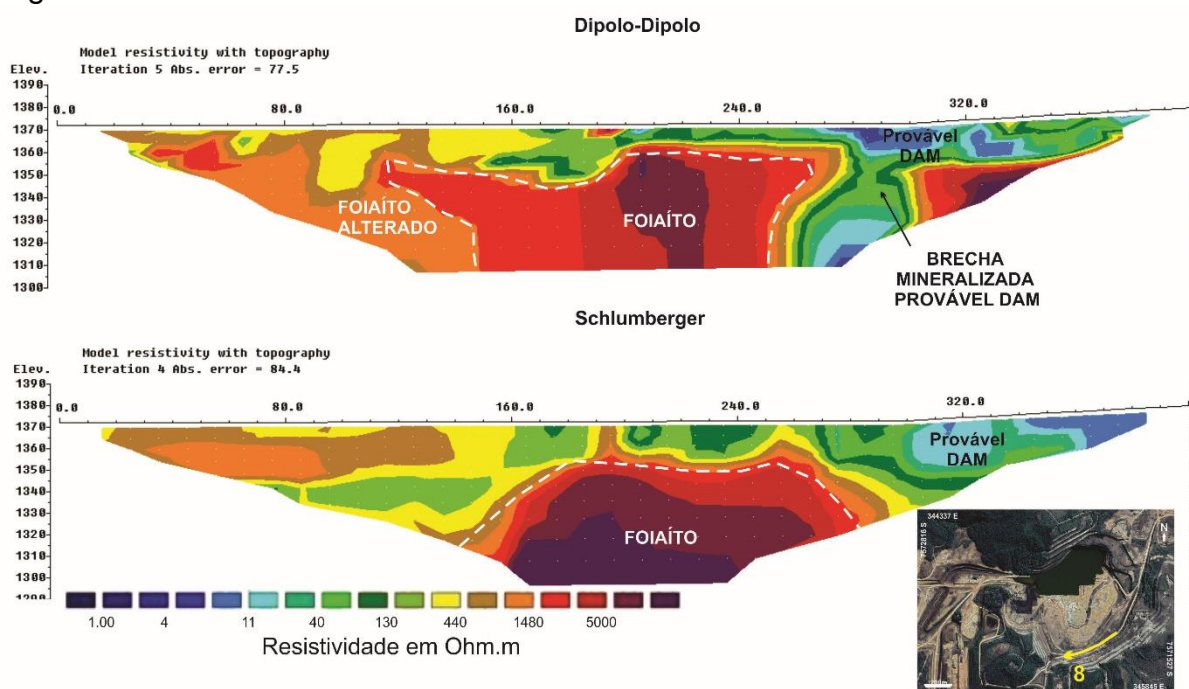


Fonte: Dados da pesquisa.

### 8.2.3 Frente SW

A linha tomografia elétrica 8 foi ensaiada no limite entre as frentes SW e SE, porém, o autor considerou mais representativa na frente SW. Nos resultados dos dois arranjos há uma ocorrência de uma zona de alta resistividade (valores  $> 1500 \text{ Ohm.m}$ ) na porção central (Figura 49). Essa zona é interpretada como um foiaíto pouco fraturado e insaturado. A partir da estaca 270m surge um contato litológico com brechas vulcânicas mineralizadas com assinatura geofísica compatível com provável geração de DAM (resistividade  $< 15 \text{ Ohm.m}$ ). Os contatos entre essas duas litologias ocorrem de forma inclinada/verticalizada e o arranjo que favorece a identificação mais precisa é o Dipolo-dipolo.

Figura 49: Modelo de inversão da linha 8.

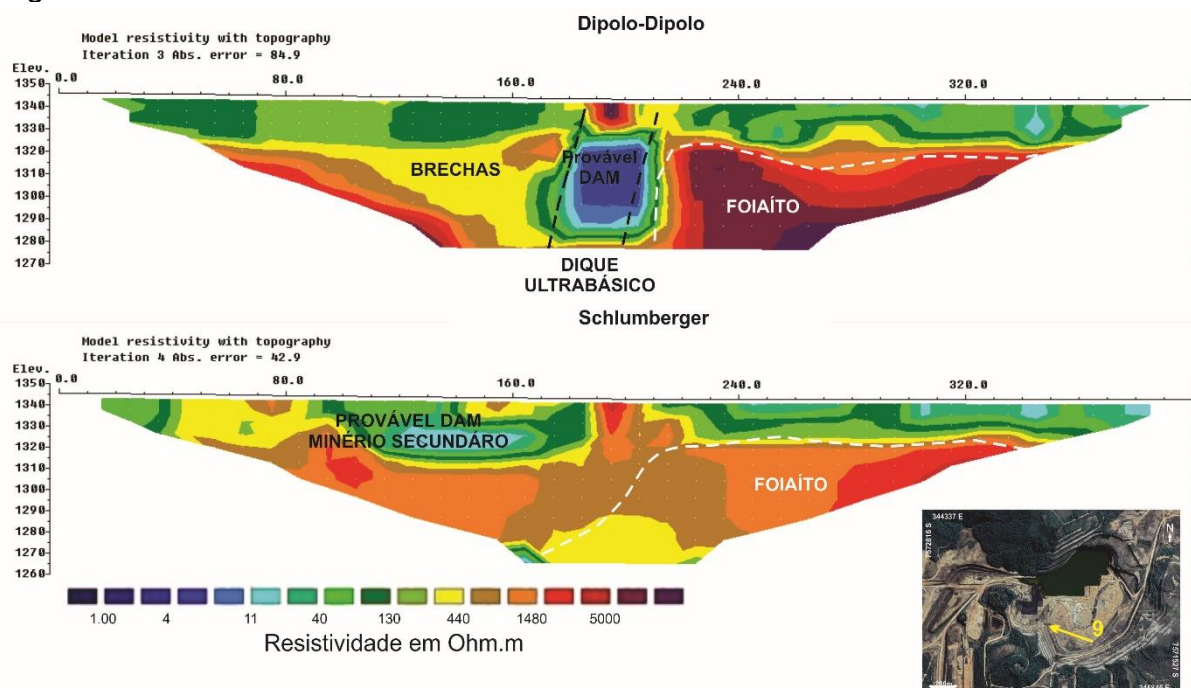


Fonte: Dados da pesquisa.

A linha de tomografia elétrica 9 possui 400m de comprimento e profundidade de investigação próxima a 80m (Figura 50). A cota de ocorrência é de 1350m. No arranjo Dipolo-dipolo ocorre uma anomalia de baixa resistividade elétrica (valores inferiores a  $10 \text{ Ohm.m}$ ) na porção central da linha, próxima à estaca 200m, com morfologia semicircular. O fato dessa zona ser perceptível apenas no arranjo Dipolo-dipolo sugere que nesse local exista uma influência de corpos intrusivos verticais – diques de rochas ultrabásicas com controle estrutural marcado por fraturamento

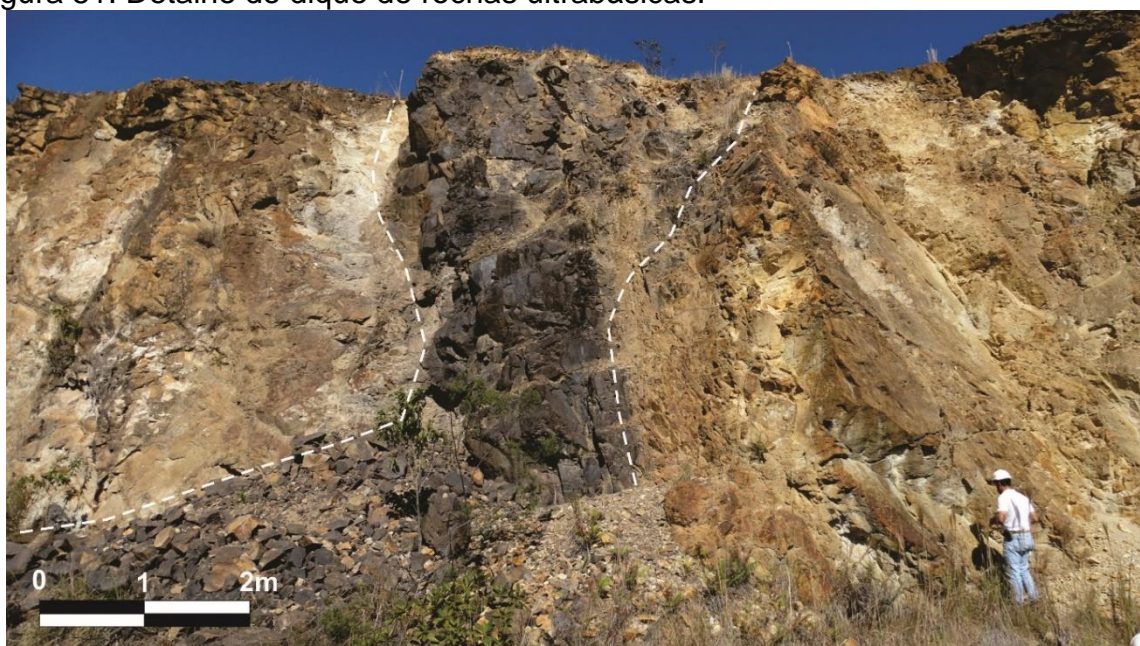
vertical (Figura 51). O caráter vertical dos contatos favoreceu a visualização pelo arranjo Dipolo-dipolo em detrimento do Schlumberger. Porém somente nos resultados do arranjo Schlumberger ocorre outra zona de baixa resistividade horizontalizada entre as estacas 100m e 170m e uma cota aproximada de 1310m compatível com o modelo de mineralização secundária e provável geração de DAM.

Figura 50: Modelo de inversão da linha 9.



Fonte: Dados da pesquisa.

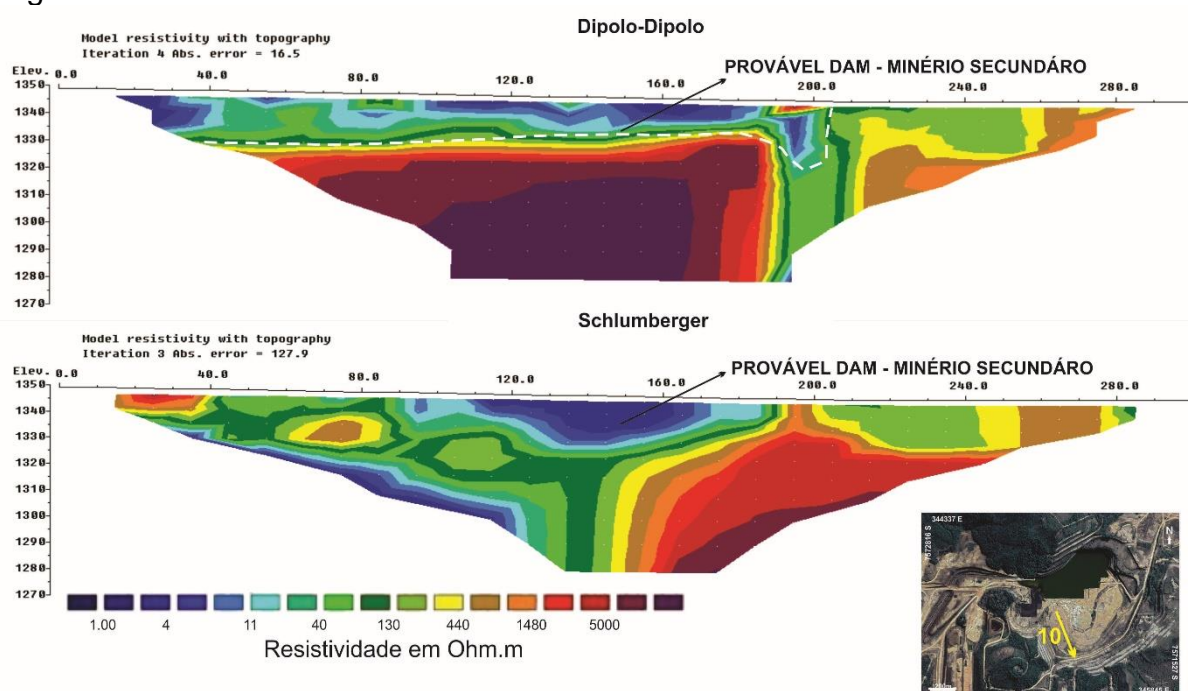
Figura 51: Detalhe de dique de rochas ultrabásicas.



Fonte: Dados da pesquisa.

A linha de tomografia elétrica 10 foi realizada na frente SW da cava da mina. Ela é a linha com menor comprimento, ensaiada com 300m (Figura 52). A cota de ensaio foi 1350m e o sentido de caminhamento foi NW para SE. Os resultados dos dois arranjos apresentaram muitas divergências abaixo da cota 1330m, porém é possível estabelecer uma relação das zonas com valores muito baixos de resistividade (valores inferiores a 15 Ohm.m). Essas zonas aparecem nos resultados de ambos arranjos entre a superfície e a cota de 1330m – mesmo modelo de mineralização do corpo de minério “A” – mineralização supergênica (minério secundário) e possivelmente local com DAM. No arranjo Dipolo-dipolo também é possível identificar uma zona de baixa resistividade entre as estacas 190m e 200m com forte indício vertical – associado a fraturas verticais.

Figura 52: Modelo de inversão da linha 10.



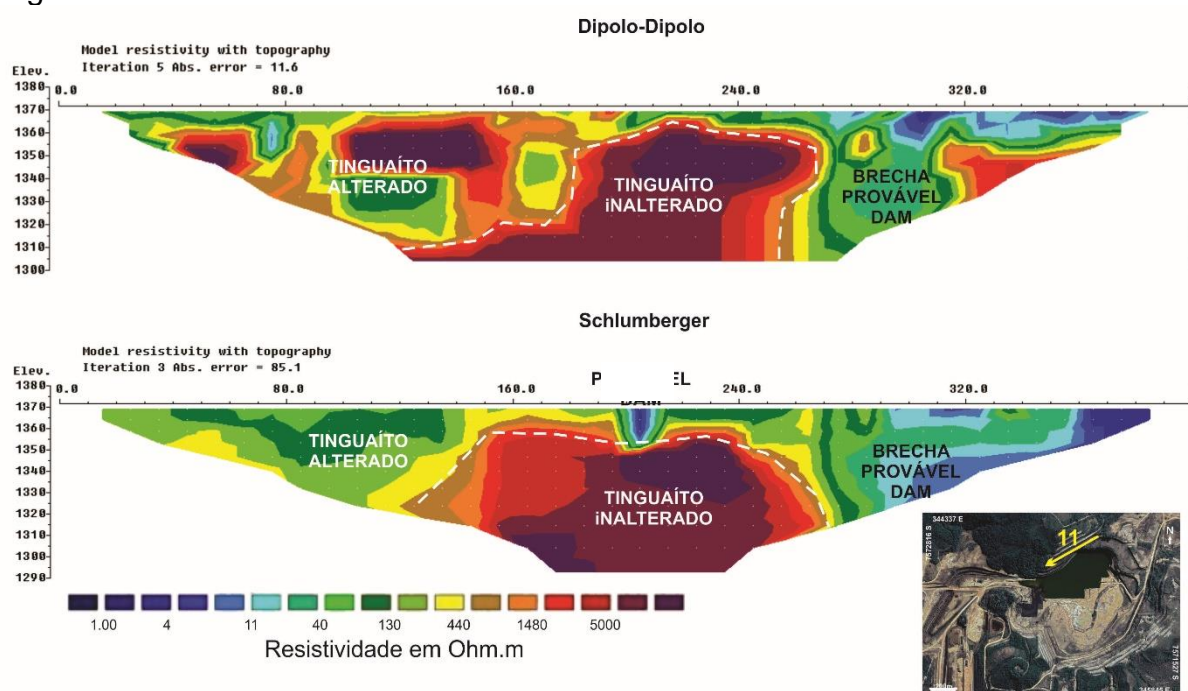
Fonte: Dados da pesquisa.

#### 8.2.4 Frente NW

Foram ensaiadas 3 linhas na frente NW, todas as três linhas com 400m de extensão uma profundidade média de investigação da ordem de 80m. Os sentidos de caminhamento foram todos de NE para SW. Nessa frente há um predomínio das litologias tinguaítos, fonolitos e brechas de tinguaítos. Nessa região da cava da mina os taludes são mais inclinados e as bermas mais estreitas.

A linha de tomografia elétrica 11 (figura 53) apresenta em ambos arranjos uma grande zona de alta resistividade ( $> 1500 \text{ Ohm.m}$ ). Porém, em uma porção mais superficial das linhas é possível identificar zonas de baixa resistividade (valores inferiores a  $15 \text{ Ohm.m}$ ), zona de provável geração de DAM. No arranjo Dipolo-dipolo esse contraste ocorre entre as estacas 270m e 400m e até uma profundidade na cota de 1355m. No arranjo Schlumberger a mesma zona ocorre com menor expressão lateral – entre as estacas 290m e 400m, porém com maior alcance em profundidade – até a cota 1320m. Esse limite entre as zonas de baixa e alta resistividade marca o contato litológico entre o tinguaiúto e a brecha tinguaiútica.

Figura 53: Modelo de inversão da linha 11.

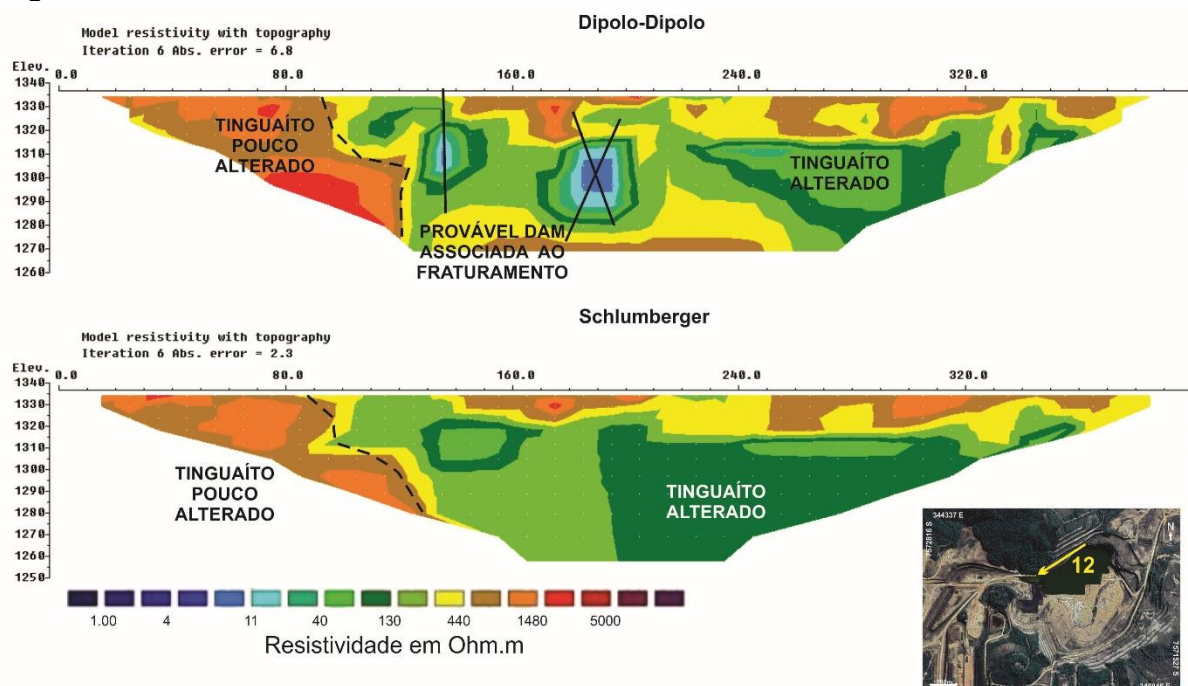


Fonte: Dados da pesquisa.

A linha de tomografia elétrica 12 foi ensaiada paralelamente a linha 11, mas em uma cota inferior - 1340m (figura 54). O arranjo Dipolo-dipolo favoreceu a identificação de duas zonas de percolação de água ácidas com padrão de fraturamento vertical e/ou subvertical do maciço – a primeira entre as estacas de 130m e 140m, entre as cotas 1320m e 1300m. A segunda apresenta uma geometria um pouco maior entre as estacas de 180m a 200m, e as cotas de 1310 a 1290m. O arranjo Schlumberger não identificou essas estruturas verticais. A litologia da frente é composta por tinguaiútos e não há contatos litológicos marcantes no local.



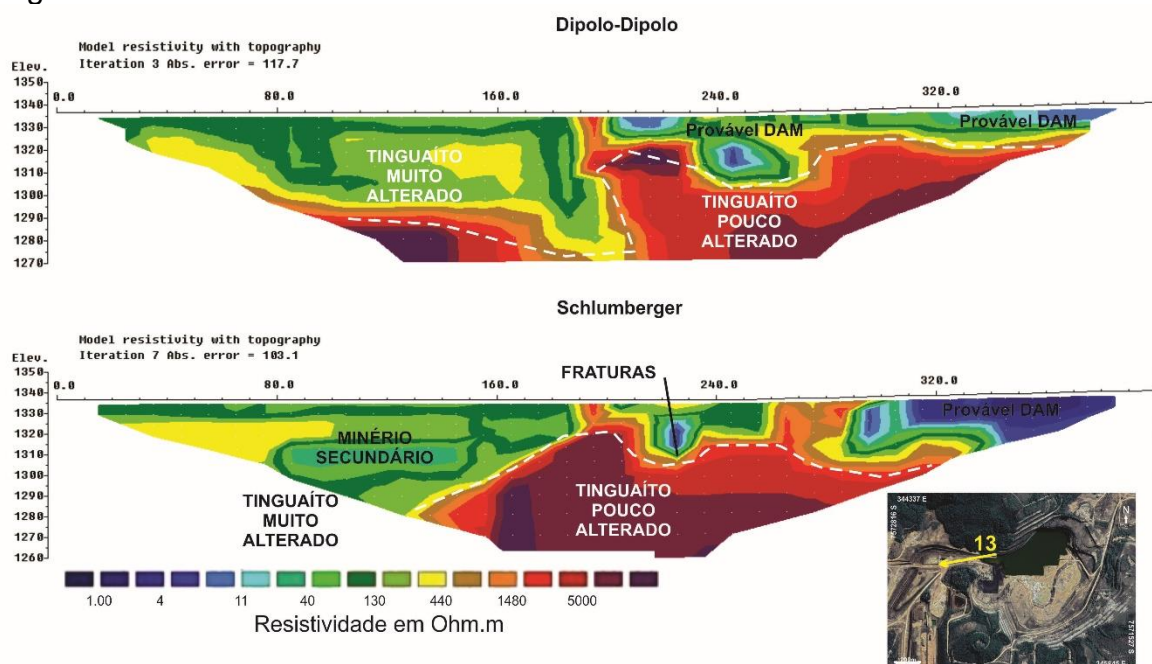
Figura 54: Modelo de inversão da linha 12.



Fonte: Dados da pesquisa.

Por último a linha de tomografia elétrica 13 foi realizada nos limites da porção NW/E da cava da mina, em continuidade a linha 12, na mesma cota (figura 55). Essa porção da cava está localizada próxima ao sistema de escoamento natural das águas da cava para as drenagens do córrego do Cercado.

Figura 55: Modelo de inversão da linha 13.



Fonte: Dados da pesquisa.

Há zonas em grande contraste de resistividade elétrica. O arranjo Dipolo-dipolo apresenta duas zonas de alta resistividade (valores acima de 1400 Ohm.m) – a primeira compreendida entre as estacas 80m a 170m e entre as cotas 1295m a 1270m. Uma segunda zona de alta resistividade ocorre entre as estacas 190m e 400m, entre as cotas 1325m a 1270m – porém com um contraste de zona de baixa resistividade – valores inferiores a 10 Ohm.m – entre as estacas 240m a 255m e as cotas 1320m a 1305m, zona de provável geração de DAM.

No arranjo Schlumberger há uma grande zona de alta resistividade em subsuperfície – compreendida entre as estacas 130m a 320m e com uma profundidade variável. São identificáveis outras duas zonas de baixa resistividade. Uma das zonas é situada da superfície até a cota 1320m e entre as estacas 290m a 400m. A outra zona de baixa resistividade é mais pontual, situada entre as estacas 240m a 250m e entre as cotas 1325m a 1315m.

### **8.3 Análise dos dados hidroquímicos**

Os dados hidroquímicos são de suma importância para uma correlação com os dados geofísicos e os dados estruturais. Todos os parâmetros são importantes para uma análise abrangente, porém para diagnósticos de drenagem ácida os principais parâmetros considerados são: pH, concentração dos íons  $\text{SO}_4$  e  $\text{HCO}_3^-$ , concentração do metal Fe e o parâmetro físico da condutividade elétrica. A alta concentração de sulfato e Fe podem ser indicativos de lixiviação de pirita. A concentração de  $\text{HCO}_3^-$  depende principalmente da quantidade de gás carbônico e não ocorrem em ambientes ácidos, por isso a alta concentração desse íon indica um ambiente redutor.

Os resultados hidroquímicos foram repassados pela INB. A tabela 6 apresenta os dados físicos dos poços (cota de topo, cota de fundo, coordenadas). A tabela 7 apresenta os principais cátions e ânions amostrados, a tabela 8 apresenta os principais metais analisados e a tabela 9 os parâmetros físico-químicos das amostras. Neste subitem são apresentados os valores referentes a campanha de amostragem hidroquímica de 2015, cronologicamente a mais próxima da campanha de aquisição de dados geofísicos, porém nos anexos II, III e IV estão disponíveis os dados das três campanhas de amostragem. A ordem de apresentação é separada pelas frentes da cava.

Tabela 6: Parâmetros físicos dos poços de monitoramento.

Poços	Cota de topo (m)	Cota de fundo (m)	Filtro (m)	Cota nível d'água (m) 2015	Frente
16	1366	1360	04-06	1365	SE
30	1366	1342	18-24	1365,8	SE
35	1349	1343	04-06	1346,5	SE
19	1383	1359	20-24	1374,8	SW
33	1337	1319	14-18	1329,7	SW
34	1333	1321	08-12	1330,7	SW
10	1335	1323	08-12	1227,3	NW
37	1448	1412	22-36	1429,7	NW
38	1333	1303	24-30	1324,2	NW
39	1335	1323	4,5-12	1332,9	NE
40	1334	1286	30-48	Jorrante	NE
Cava	1330	-		1330	-

Fonte: Relatório INB.

Tabela 7: Principais cátions e ânions das amostras.

Campanha	2015	Ca	K	Na	Mg	F	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Frente
Data	Poço	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	-
23/abr	16	2,4	4,9	0,2	0,2	2,1	0	0,7	<3	20,7	0,7	SE
23/abr	30	3,9	7,9	0,4	0,8	2,3	0	0,0	<3	38,1	2,3	SE
19/mai	35	10,4	9,7	0,3	0,4	12,9	0	0,0	<3	58,2	0,2	SE
02/jun	19	0,4	10,7	0,6	0,2	0,9	0	0,4	<3	0,0	5,8	SW
14/abr	33	258,1	66,0	1,7	31,2	0,9	0	0,0	<3	8424,0	0,8	SW
17/abr	34	36,2	30,7	1,0	6,7	3,1	0	0,0	<3	130,8	1,1	SW
27/abr	10	5,1	3,7	0,4	0,5	0,8	0	0,0	<3	48,1	0,4	NW
09/jun	37	0,3	2,7	0,4	0,2	0,8	0	3,0	<3	0,0	0,8	NW
16/jun	38	67,2	8,0	8,4	0,1	4,0	0	12,8	<3	220,0	0,5	NW
26/mai	39	40,6	11,9	0,9	5,6	31,4	0	0,0	<3	245,7	0,1	NE
18/jun	40	158,2	60,7	1,8	7,5	4,9	0	1,8	<3	474,7	0,1	NE
26/mai	Cava	437	12,7	1,4	16,7	14,2	0	0,0	<3	1198,3	0,2	-

Fonte: Relatório INB.

Tabela 8: Principais metais amostrados.

Coleta 2015	Poços	Si	Al	Fe (total)	Mn	Zn	Frente
27/abr	16	7,0	1,3	0,1	0,5	0,2	SE
23/abr	30	9,4	2,6	0,1	1,2	0,2	SE
02/jun	35	17,3	5,9	0,1	0,1	2,1	SE
23/abr	19	9,4	0,0	0,0	0,1	0,1	SW
14/abr	33	68,8	810	890	160,8	70,3	SW
17/abr	34	18,3	5,0	0,5	11,7	3,6	SW
19/mai	10	7,0	3,1	0,2	2,5	0,4	NW
09/jun	37	5,8	0,3	0,0	0,0	0,0	NW
16/jun	38	8,2	0,5	1,0	0,1	0,0	NW
26/mai	39	15,6	29,6	22,5	19,6	2,7	NE
18/jun	40	15,9	2,2	21,2	20,3	1,2	NE
26/mai	Cava	7,0	1,3	0,1	0,5	0,2	-

Fonte: Relatório INB.

Tabela 9: Parâmetros físico-químico das amostras

Coleta 2015	Poços	OD (mg/L)	Turbidez (UT)	Eh (V)	pH	Cond. $\mu\text{S/cm}$	Frente
27/abr	16	6,07	10,3	0,375	1,67	114	SE
23/abr	30	3,31	2	0,374	4,91	103	SE
02/jun	35	0,78	1,5	0,393	3,77	233	SE
23/abr	19	3,07	2,4	0,173	5,35	37	SW
14/abr	33	0,28	23,6	0,367	2,9	6620	SW
17/abr	34	3,7	2	0,153	4,51	362	SW
19/mai	10	3,85	19,23	0,409	4,5	83	NW
09/jun	37	7,98	1,5	0,198	5,37	14	NW
16/jun	38	0,63	15,1	-0,198	9,05	593	NW
26/mai	39	1,25	5,8	0,401	4,07	607	NE
18/jun	40	1,1	14	-0,02	5,4	933	NE
26/mai	Cava	7,28	14	0,373	4,04	1810	-

Fonte: Relatório INB.

Os valores de pH dos poços variam entre 2,9 a 9,05. O poço PM-33 localizado na porção centro-SW da cava, relativamente próximo ao lago da cava, foi instalado a uma profundidade de 18m perfurados em rocha. Nesse poço, o pH apresenta valores  $\leq 3,8$ , valores de condutividade elétrica acima de  $6620 \mu\text{S/cm}$ , concentrações de íons sulfato acima de  $7790 \text{ mg/L}$ , concentrações de  $\text{Fe} \geq 890 \text{ mg/L}$  e concentrações de outros elementos como Ca, K, Na e Mg. Todos esses valores são elevados comparados com dados de outros poços de monitoramento.

No outro extremo o poço PM-38, localizado na frente NW da cava apresenta o único poço com caráter básico –  $\text{pH} \geq 7,4$ . Apesar do caráter básico, os valores de condutividade elétrica não são baixos – valores  $> 500 \mu\text{S/cm}$ . Esse poço está instalado a uma profundidade de 30m. Baseado nos dados geoquímicos é provável que essa porção do maciço não esteja mais sobre influência da DAM. Curiosamente, ao lado do PM-38 existe o PM-10, que difere do outro poço pela profundidade de instalação – 12m, o que significa que as cotas de fundo de cada um desses poços são instaladas a uma diferença de 18m. A profundidade de instalação (ou base do poço) é um importante parâmetro de análise e monitoramento, pois serve de comparativo com diferentes cotas investigadas do maciço. As análises químicas do PM-10 indicaram um caráter químico de pH diferentes do seu par vizinho, pH de até 4,5.

Essa diferença de valores discrepantes é justificável justamente pela diferença de cotas de investigação de cada poço. No caso do PM-38 de caráter básico, não há influencia alguma de DAM e uma região de rocha maciça. Ao passo que o PM-10, de

caráter ácido apresenta forte influência de águas superficiais e contaminadas com DAM.

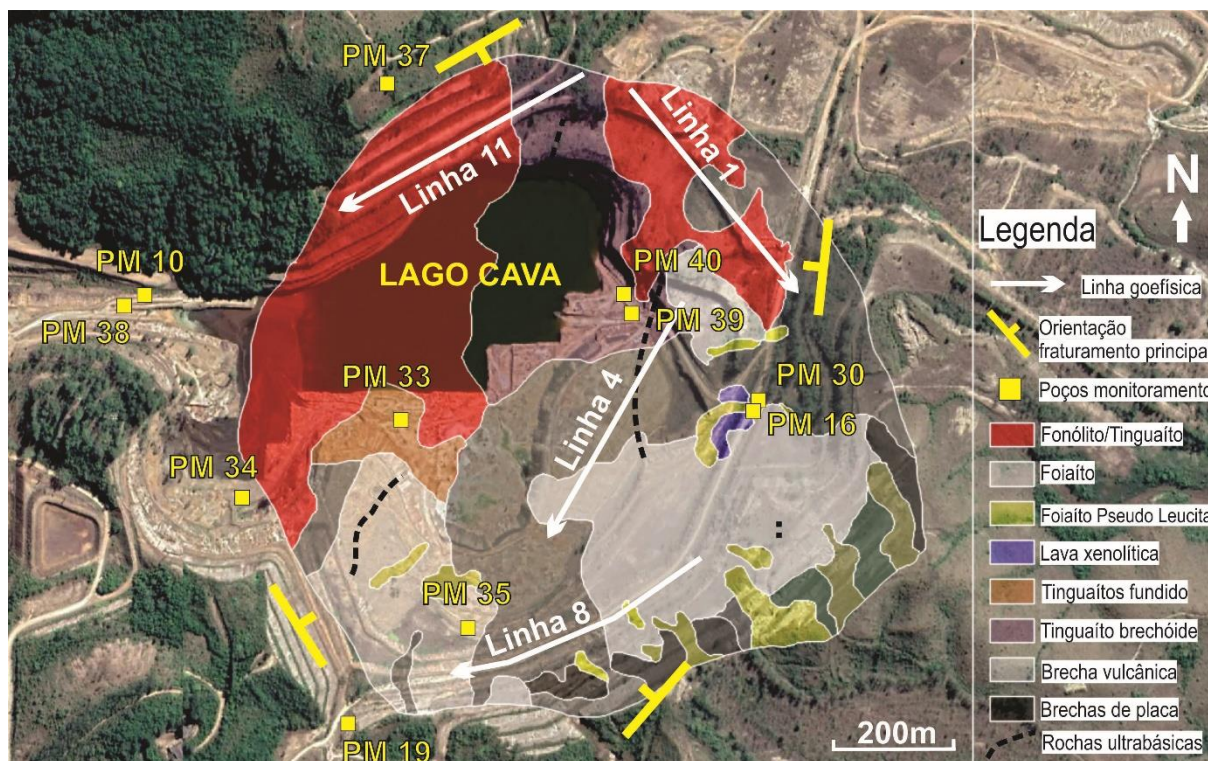
Com exceção do PM-38, todos poços de monitoramento da cava indicam valores de caráter ácido das águas. Isso demonstra uma dispersão do problema de drenagem ácida de mina ao longo de toda a região da cava. Esse resultado é confirmado pelo baixo valor de caráter químico das águas da cava, pH 4, alta condutividade elétrica  $\geq 1800 \mu\text{S}/\text{cm}$  e altas concentrações de sulfatos  $\geq 1198 \text{ mg}/\text{L}$ .

O cálcio (Ca) é um elemento que precisa de uma análise minuciosa, principalmente nos poços mais próximos ao lago da cava. As principais fontes naturais de cálcio do local são carbonatos. O cálcio apresenta valores altos nas proximidades da cava e especialmente na análise das águas do lago – valores superiores a  $430 \text{ mg}/\text{L}$ . Valores muito elevados de concentração desse elemento fogem ao padrão natural das rochas locais e essa diferença é resultado do processo de tratamento de águas do complexo mineiro. Para o tratamento de águas de caráter ácido é utilizado cal virgem (CaO), fonte de Ca. Todo esse tratamento é realizado na estação de tratamentos do complexo, mas parte dessa água, após o tratamento, é bombeada de volta ao lago da cava – com resíduos do tratamento, efluente DUCA. Há uma infiltração de águas oriundas do DUCA que foi comprovada no trabalho de Targa et al. (2021).

#### **8.4 Análise integrada de dados**

A partir da integração dos dados hidroquímicos, geofísicos e geológicos (estrutural e litológicos) é possível analisar as zonas de gênese de drenagem ácida de mina. Para uma melhor compreensão e locação dos dados, a figura 56 apresenta a localização dos pontos de monitoramento hidroquímicos, principal direção estrutural em cada frente, o mapa litológico da cava e a localização de quatro linhas geofísicas (uma em cada frente) em que foi possível identificar maior quantidade de estruturas, contatos litológicos, que melhor se ajustaram ao modelo de depósito mineral da cava e que estivessem localizadas relativamente mais próximas a poços de monitoramento para uma correlação de dados geofísicos/hidroquímicos – consideradas assim, as linhas geofísicas mais representativas de cada frente.

Figura 56: Dados integrados dos poços, diagrama de contorno das frentes e as linhas geofísicas escolhidas para representar cada frente.

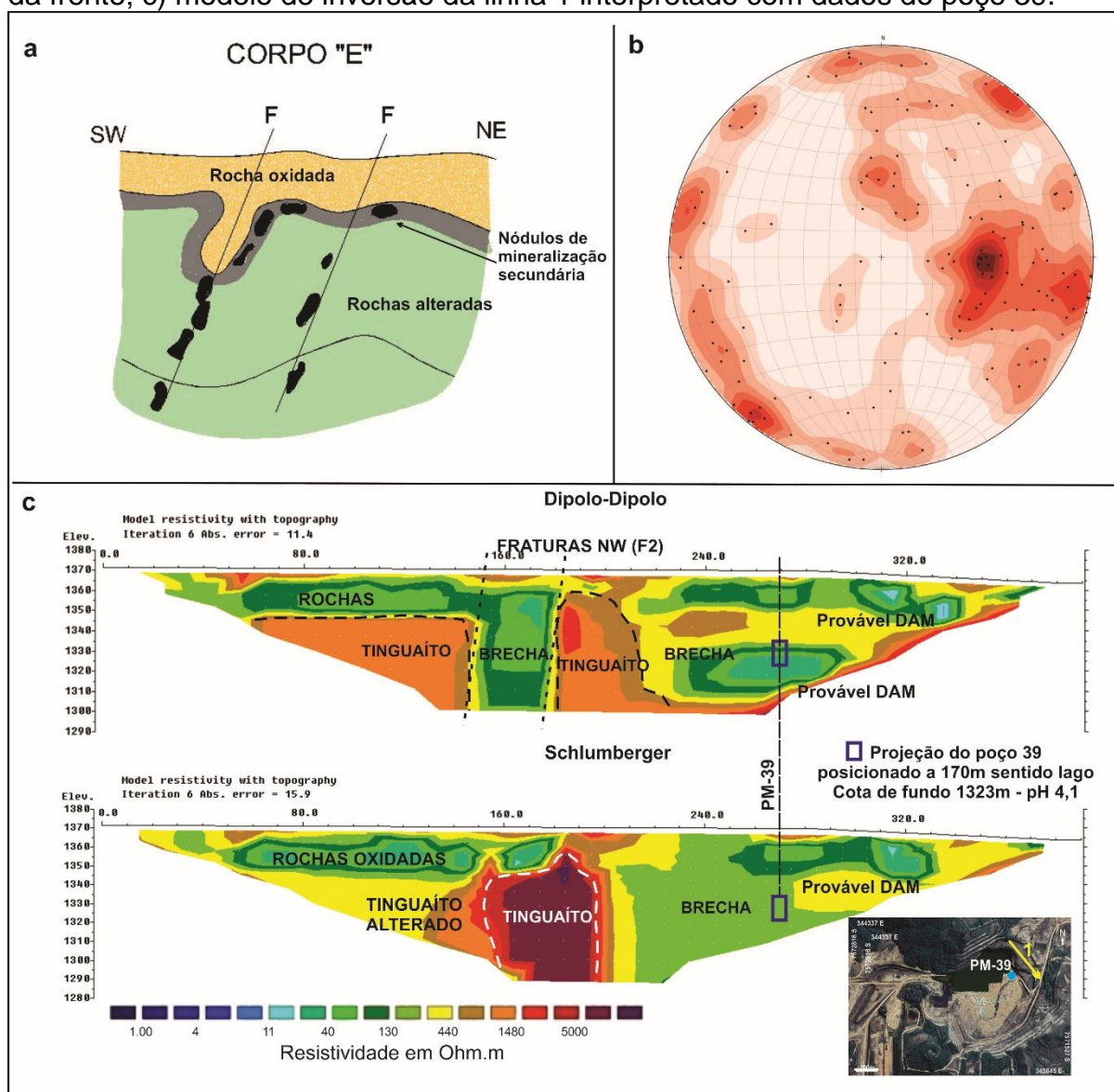


Fonte: Dados da pesquisa.

A frente NE é constituída pelas seguintes litologias: fonolitos, tinguaítos, foiaítos, brecha vulcânica e rochas ultrabásicas. O modelo de gênese mineral associado a essa frente é o do corpo de minério “E”. O arcabouço estrutural remete a um fraturamento principal com direção N-NE e mergulho para W-NW. Há dois poços de monitoramento nessa frente, os poços 39 e 40.

A linha geofísica mais representativa dessa frente é a linha 1. No arranjo Dipolo-dipolo, que possui uma boa resolução lateral – logo é um arranjo indicado para identificação de estruturas verticalizadas, foi possível identificar o contato litológico entre o tinguaítos – com assinatura geofísica de maior resistividade (valores  $\geq 1000$  Ohm.m), com a brecha vulcânica alterada e oxidada (Figura 57). Essa última litologia com maior grau de fraturamento, alteração e permeabilidade, logo a assinatura geofísica dessas rochas apresenta valores mais baixos de resistividade (de 50 a 300 Ohm.m). Foram identificadas muitas fraturas com mergulho vertical a subvertical que corroboram com o modelo do corpo “E”. De acordo com o arranjo Dipolo-dipolo não foram identificadas zonas com possível drenagem ácida.

Figura 57: Análise integrada Frente NE: a) modelo geológico; b) diagrama de contorno da frente; c) modelo de inversão da linha 1 interpretado com dados do poço 39.



Fonte: Dados da pesquisa.

No arranjo Schlumberger, que possui uma boa resolução vertical, logo favorece a identificação de estruturas horizontais, há sim uma zona com assinatura geofísica de DAM (15 Ohm.m) que ocorre entre as estacas 100m e 125m e entre as cotas 1350m e 1325m. Essa zona representa resquícios de mineralização secundária, com nódulos supergênicos de minério. Há ainda uma outra zona com indícios de DAM que aparece no arranjo Dipolo-dipolo entre as estacas 240m e 290m e entre as cotas 1330m e 1310m. Essa zona é controlada por estruturas verticais (fraturas) e por isso é visível apenas no arranjo Dipolo-dipolo.

O poço de monitoramento 39 é localizado a 170m de distância e possui a cota de fundo em 1323, associado a zona com assinatura geofísica indicativa de DAM (Figura 63c). Os dados do poço 39 também são compatíveis com DAM – valores baixos de pH (até 3,9), altas concentrações dos íons sulfato ( $\geq 192$  mg/L), de metal Fe (até 22,5 mg/L) e alta condutividade elétrica ( $> 600$   $\mu$ S/cm).

Os dados de monitoramento do poço 40 não serão considerados para análise integrada. Pelo fato da cota de fundo do poço (1286m) estar em uma cota inferior ao alcance das linhas de tomografia elétrica.

A rochas que compõe a frente SE são foiaítos e brechas vulcânicas. A linha geofísica que representa a frente SE é a linha 4. A orientação da linha é N20 e coincide com a família de fraturamento principal (F1) dessa frente, porém a família N50-70 intercepta as linhas de maneira oblíqua e aparecem em contatos litológicos nos produtos geofísicos.

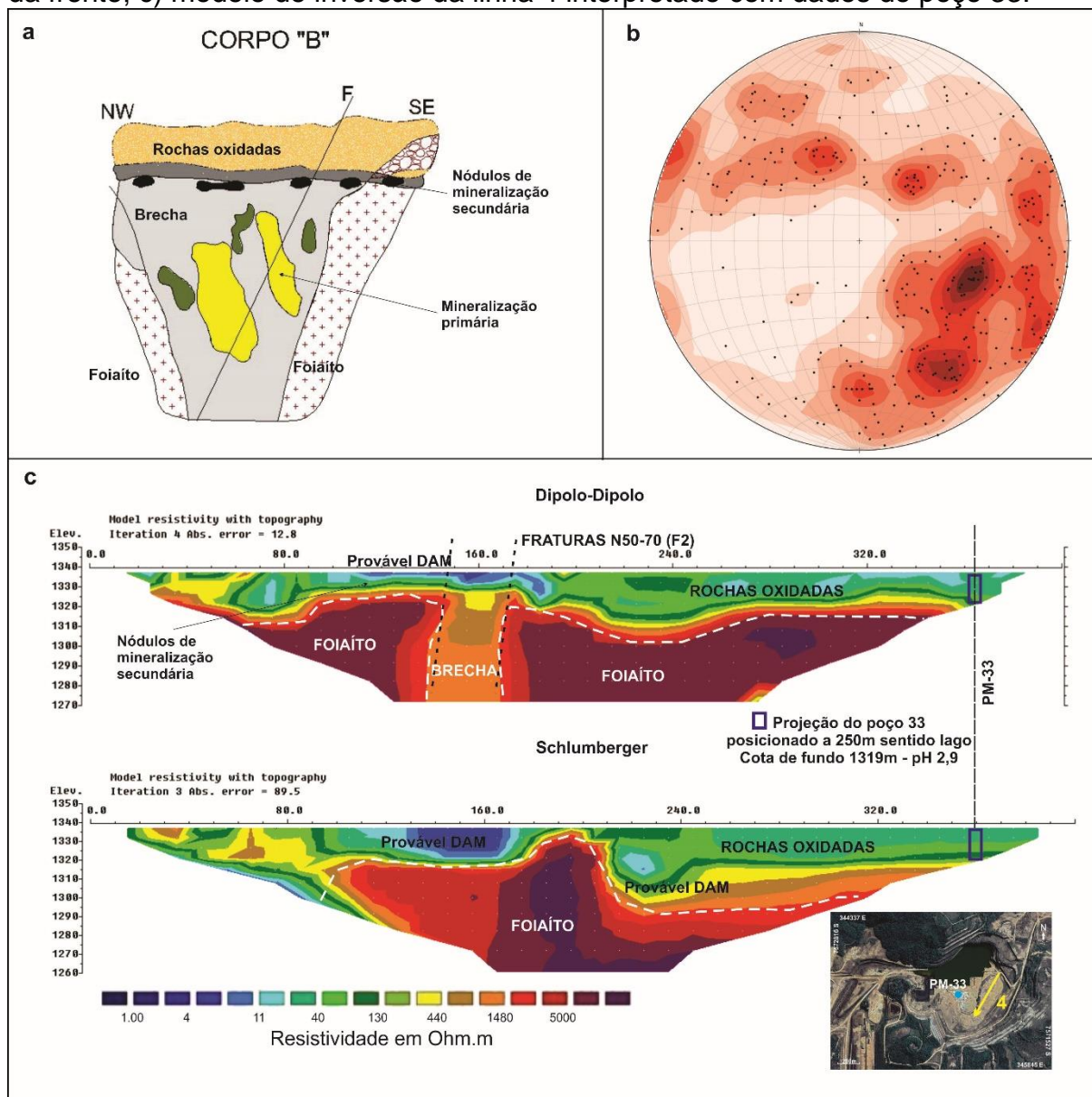
O arranjo Dipolo-dipolo favorece a identificação de contatos litológicos entre o foiaíto de assinatura geofísica com valores elevados ( $> 1000$  Ohm.m), com a brecha vulcânica, caracterizada por uma zona de resistividade inferiores a 500 Ohm.m, entre as estacas 150m e 170m (Figura 58). Essa mesma zona foi ocultada no ensaio com o arranjo Schlumberger, que apresenta uma zona central com valores superiores a 1000 Ohm.m.

Há ocorrências de duas zonas de baixa resistividade caracterizadas como possível DAM. Uma entre as estacas 100 a 170m e as cotas de 1340 (superfície) e 1320m. A outra ocorre de forma pontual entre as estacas 215 a 225m e na cota 1315m. As duas estão associadas a mineralizações secundárias típicas do modelo de depósito do corpo “B”.

O poço de monitoramento mais próximo a linha 4 é o poço 33 a 250m de distância sentido NW. A cota de fundo do poço é 1319m. O poço apresenta características de DAM – pH entre 2,9 e 3,8; condutividade elétrica superior a 6000  $\mu$ S/cm, concentrações elevadas de sulfato  $>7700$  mg/L e Fe  $\geq 890$ . Esse poço é o que apresenta os valores mais acentuados de uma gama de indicadores de drenagem ácida. E de acordo com a cota de fundo do poço, é possível fazer uma correlação direta com o horizonte de rochas oxidadas e provável presença de DAM no produto geofísico.



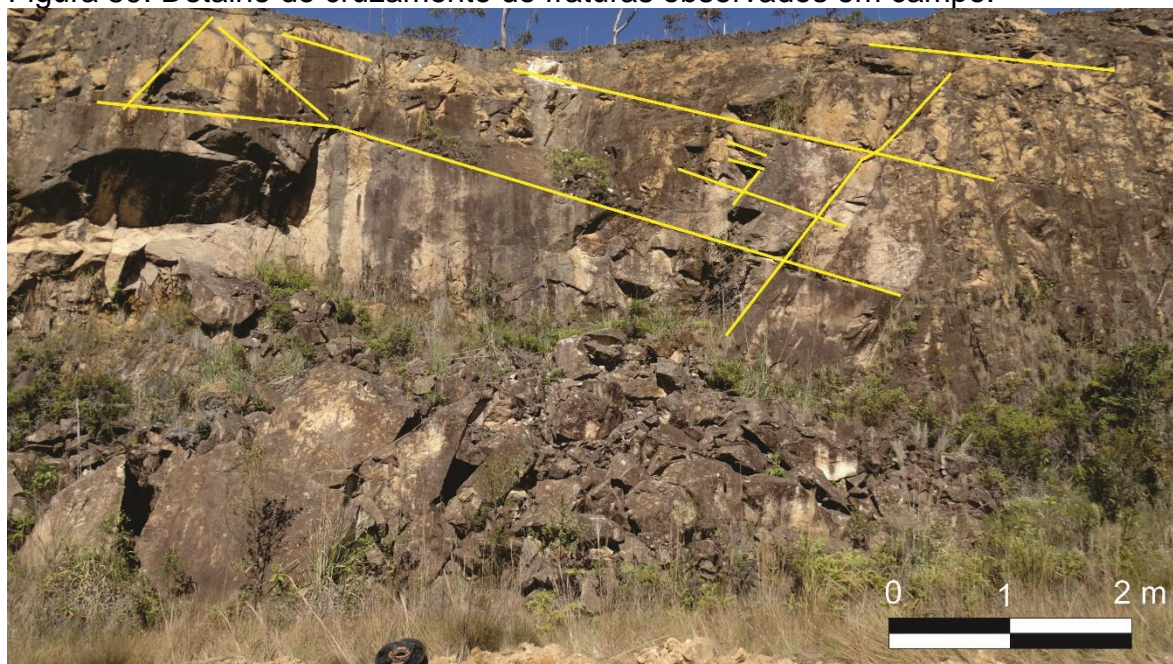
Figura 58: Análise integrada Frente SE: a) modelo geológico; b) diagrama de contorno da frente; c) modelo de inversão da linha 4 interpretado com dados do poço 33.



Fonte: Dados da pesquisa.

É possível identificar uma zona de alta resistividade interpretada como rocha maciça insaturada, onde o grau de fraturamento não influencia mais a geração de drenagem ácida. Por outro lado, em ambos os arranjos também é possível identificar uma zona de baixa resistividade que pelo padrão estrutural são interpretadas como um cruzamento de famílias de fraturas (figura 59).

Figura 59: Detalhe do cruzamento de fraturas observados em campo.



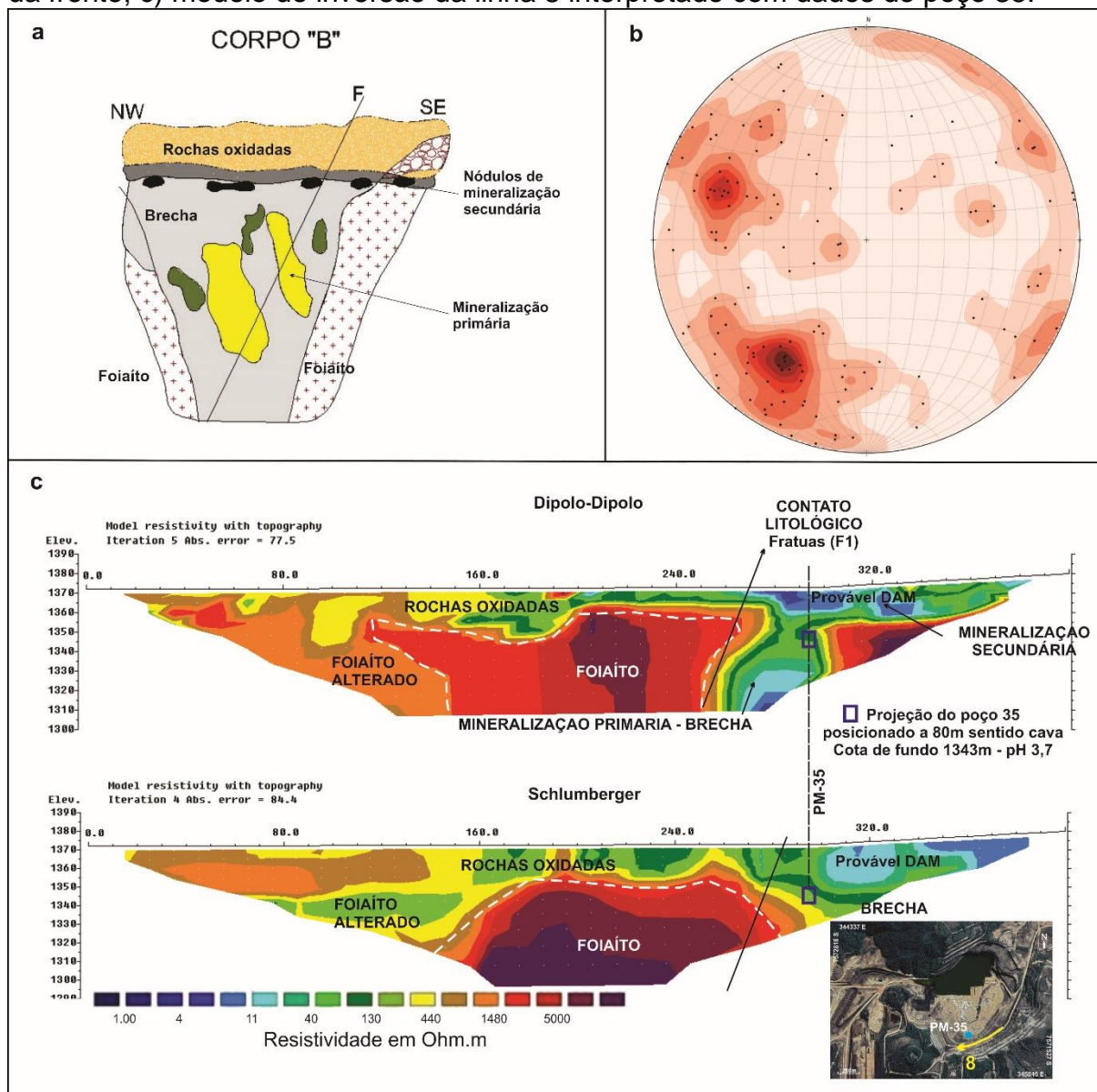
Fonte: Dados da pesquisa.

A frente SW é composta pelas seguintes litologias: fonolito, foiaíto, variação de foiaíto pseudo-leucita, brecha vulcânica, tinguaito e rochas ultrabásicas. É a região da cava de ocorrência do corpo mineralizado “A”. Há dois padrões de fraturamento bem delimitados, o lineamento N300 e o lineamento N10-30. A linha geofísica 8 foi a linha escolhida pelo autor para representar a frente SW.

Nos dois arranjos foi possível identificar o contato litológico entre o foiaíto e a brecha vulcânica. O foiaíto representado por zonas de alta resistividade – valores acima de 500 Ohm.m, e brecha com assinaturas geofísicas de resistividade inferior a 200 Ohm.m (Figura 60). O modelo genético do corpo mineralizado “B” explica as ocorrências de baixa resistividade apresentadas a partir da estaca 300m. A região da brecha possui mineralização primária e o contato com água meteórica estimula a formação de DAM no local (possivelmente apontada por valores inferiores a 15 Ohm.m indicados pela geofísica).

Há dois poços de monitoramento relativamente próximos a linha 2; o poço 35 que está no limite entre as frentes SE e SW e que apresenta características de DAM na mesma cota em que há indícios da mesma nas linhas geofísicas – 1343m. Já o poço 19 localizado um pouco mais distante no sentido oeste ao final da linha, não apresenta indícios de DAM e é situado na cota de fundo 1363m.

Figura 60: Análise integrada Frente SW: a) modelo geológico; b) diagrama de contorno da frente; c) modelo de inversão da linha 8 interpretado com dados do poço 35.



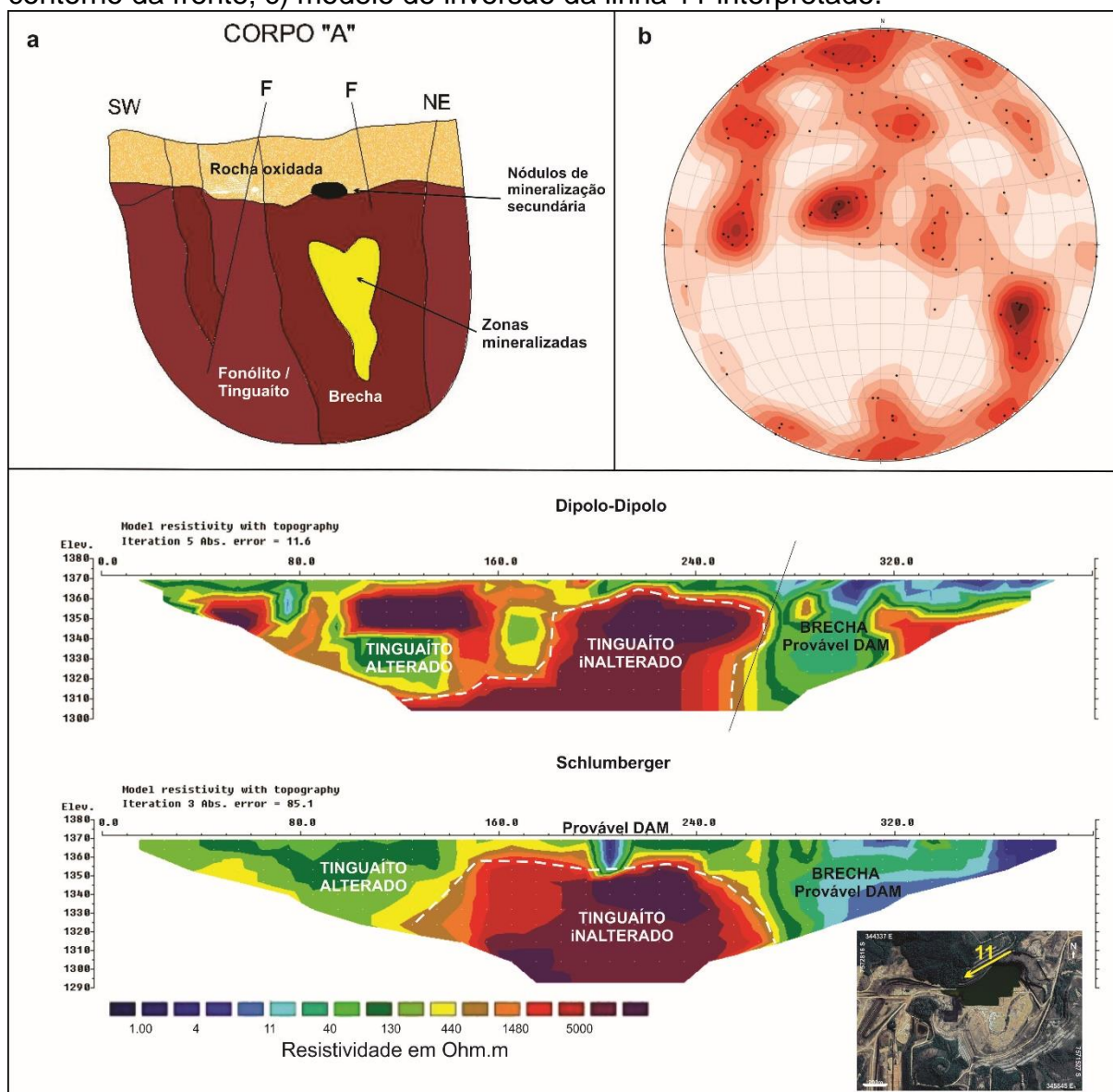
Fonte: Dados da pesquisa.

A frente NW possui os taludes mais verticalizados da cava da mina e o intenso fraturamento é notório pela percolação de água na face dos taludes. Parte desse fraturamento mais intenso é atribuído a litologia – que na frente NW é representada por fonolitos e tinguaitos. A baixa persistência das fraturas nessa frente tem associação com o resfriamento acelerado das rochas extrusivas/hipoabissais, respectivamente fonolitos e tinguaitos.

A família de fratura principal possui orientação N30 e a há uma família secundária de orientação E-W. A linha representativa da frente NW é a linha 11 e a orientação do sentido do ensaio é N60. A análise comparativa dos arranjos indicou

algumas diferenças, porém nada muito discrepante (Figura 61). Os dois arranjos indicaram uma zona de alta resistividade em posição central, relativamente parecidas. Esta zona representa o fonólito com pouca alteração química e baixa permeabilidade – insaturada. Porém o arranjo Schlumberger demonstrou sensibilidade para identificar uma zona de baixa resistividade na porção central da linha. Esta zona possui pouca dispersão lateral e um perfil mais verticalizado. Esses dados são condizentes com o padrão estrutural da área, visto que a frente em questão apresenta maior número de fraturas subverticais.

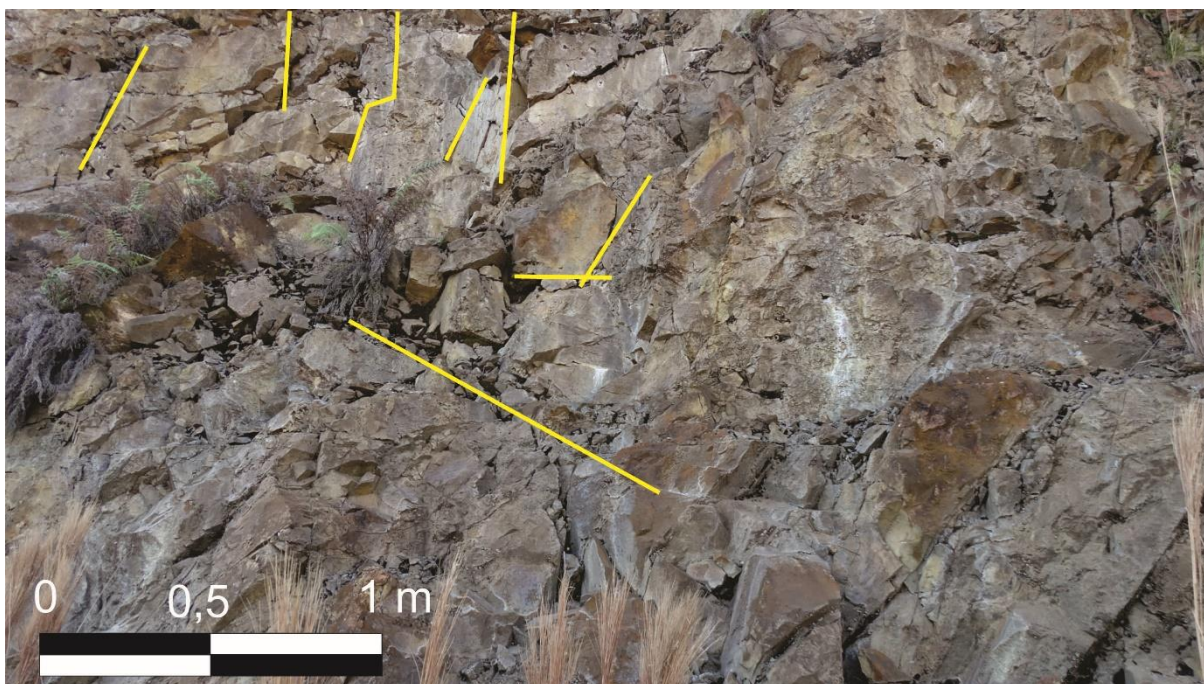
Figura 61: Análise integrada Frente NW: a) modelo geológico; b) diagrama de contorno da frente; c) modelo de inversão da linha 11 interpretado.



Fonte: Dados da pesquisa.

A zona é interpretada como um cruzamento de famílias, família principal com uma família menos frequente. O fato da baixa dispersão lateral indica que a angulação entre essas famílias é próxima a  $90^\circ$  (Figura 62).

Figura 62: Padrão de fraturamento com mergulhos mais altos e baixa persistência – frente NW.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na porção direita da tomografia há uma segunda zona de baixa resistividade representada pelo contato litológico entre o fonolito e o tinguaíto brechóide. Os valores de baixa resistividade podem ser indicativos de águas com caráter ácido. Pelo valor da cota topográfica das ocorrências, é possível associar a zona na porção final da linha (lado direito) a um contato direto com as águas da cava da mina (pH 4,0 e condutividade elétrica  $1810 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). A zona de fraturamento subvertical que aparece somente no arranjo Schlumberger, ocorre acima do nível do lago e é um indício de água que percola o maciço e acaba contaminada pela oxidação de sulfetos e zonas mineralizadas. Importante frisar também que a frente NW, local de ocorrência do corpo mineralizado "A", apresenta registros de mineralizações encaixadas em fraturas do maciço e ainda teores acima da média da cava.

Além dos dados hidroquímicos da água da cava, o poço mais próximo da linha 11 é o PM-37. Porém ele está localizado em um dos pontos mais altos da cava – cota de 1448m e apesar de possuir uma profundidade de instalação a 36m abaixo da superfície, os dados desse poço são representativos apenas para cotas superiores a 1412m. A linha 11 foi adquirida em uma cota de 1372m, consideravelmente abaixo da cota de investigação do PM-37. Por isso os dados desse poço são pouco representativos para a análise integrada.

## 9. PROPOSTAS DE REMEDIAÇÃO DA CAVA

O principal passivo ambiental da cava é geração de drenagem ácida. Mas para o descomissionamento completo da área da cava também é preciso considerar a estabilidade geotécnica da área. O trabalho de Cipriani (2002) faz uma série de recomendações específicas para a mitigação dos impactos ambientais no fechamento de todo o complexo mineiro da MOU, com recomendações e medidas do âmbito técnico, legal e administrativo. Nesse quesito são selecionadas apenas cinco medidas recomendadas especificamente para o fechamento da cava da mina, de acordo com Cipriani (2002):

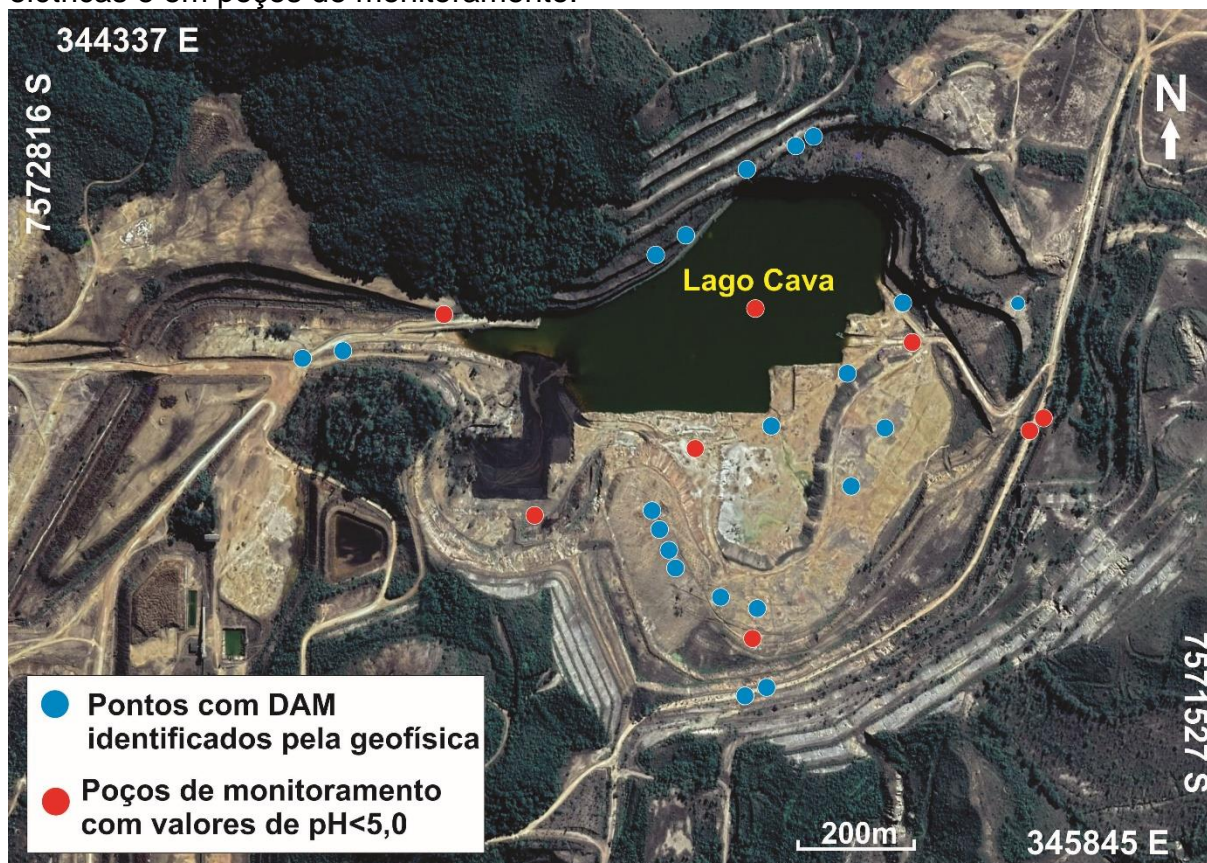
- Caracterizar, mineralógica, petrográfica, geoquímica e geotecnicamente, o leito rochoso da região da cava da mina, identificando os controles e feições estruturais e estratigráficos;
- Determinar a mobilidade e os processos de transferência dos elementos poluentes radioativos e estáveis presentes na cava da mina para o meio ambiente;
- Determinar as causas, mecanismos e processos da geração de drenagem ácida na cava da mina;
- Selecionar os meios a serem usados para mitigar e, se possível, suprimir a geração de drenagem ácida da cava da mina, justificando técnica e economicamente sua seleção e apresentar previsão, elaborada através de modelos matemáticos, do seu abatimento ao longo do tempo a curto e médio prazos;
- Avaliar a reatividade do pacote rochoso que compõe a cava da mina e a estabilidade geomecânica das bancadas;

Essas recomendações são necessárias para o êxito da remediação na área. Baseado nos resultados do presente estudo e nas recomendações acima, foi elaborada uma sugestão de medidas de ações para mitigação e remediação dos impactos com foco no descomissionamento a longo prazo. Uma das propostas do estudo é o mapeamento de zonas de geração de DAM.

A combinação de ocorrência de fraturamento intenso e zonas mineralizadas, permitem condições ideais para a geração de drenagem ácida. Em visto disso uma solução para amenizar os efeitos da drenagem ácida de mina seria evitar a interação

entre as águas de percolação e as zonas mineralizadas. Com o mapeamento dessas zonas de gênese de drenagem ácida por meio dos métodos abordados na presente pesquisa, é possível aplicar soluções geotécnicas de tratamento de maciços rochosos (Figura 63).

Figura 63: Mapa com principais ocorrências de DAM identificadas nas tomografias elétricas e em poços de monitoramento.



Fonte: Dados da pesquisa.

Existem algumas técnicas de tratamento do maciço com o intuito de evitar a percolação de água em determinadas áreas, análogas a barreiras hidráulicas. Uma forma de tratamento seria o controle do nível freático baseado em estações de bombeamento de água. Com o diagnóstico das principais fontes de DAM seria possível elaborar pontos específicos para a instalação dessas bombas. Dessa maneira seria possível desviar parte considerável da água e evitar contato direto com zonas mineralizadas. Porém é preciso considerar que essa não é a melhor alternativa para uma mina em fase de descomissionamento, uma vez que um sistema desses iria gerar uma demanda de manutenção e energia elétrica constantes.



Uma outra técnica alternativa de tratamento é a injeção de polímeros que em contato com água aumentam consideravelmente a viscosidade do fluído, o que dificulta a percolação das águas no meio atuante. Essa técnica é empregada em escavações subterrâneas, principalmente para emboques de túneis em maciços com intenso fraturamento e alto aporte hídrico. Porém também possui um tempo de ação de curto a médio prazo no maciço, o que não atende o fechamento da mina.

As técnicas mais comuns de tratamentos de maciços nesse contexto envolvem injeções de material no maciço, técnicas usualmente empregadas em tratamento de fundações de barragens. Esse tratamento consiste basicamente em preencher os vazios do maciço com um material de propriedades de enrijecimento após um período de tempo – normalmente calda de cimento. Os principais objetivos são reduzir a perda de água por percolação e melhorar as propriedades mecânicas e a resistência elástica de rochas fraturadas (COSTA, 2012). Os principais tipos de injeção que se aplicam ao estudo são as injeções por consolidação e as cortinas de injeção.

No primeiro caso, as injeções por consolidação melhoram as condições mecânicas da rocha e por consequência tendem a suturar fraturas do meio, com um efeito secundário com efeito impermeabilizante. No caso das cortinas de injeção o principal objetivo é criar uma barreira hidráulica e controlar a percolação de água no maciço (COSTA, 2012). Os furos de injeção podem ser verticais ou inclinados, mas o ideal é que os furos de consolidação estejam alinhados com o intuito de formarem uma linha de injeção e dependendo da necessidade pode ser necessário mais de uma linha de injeção.

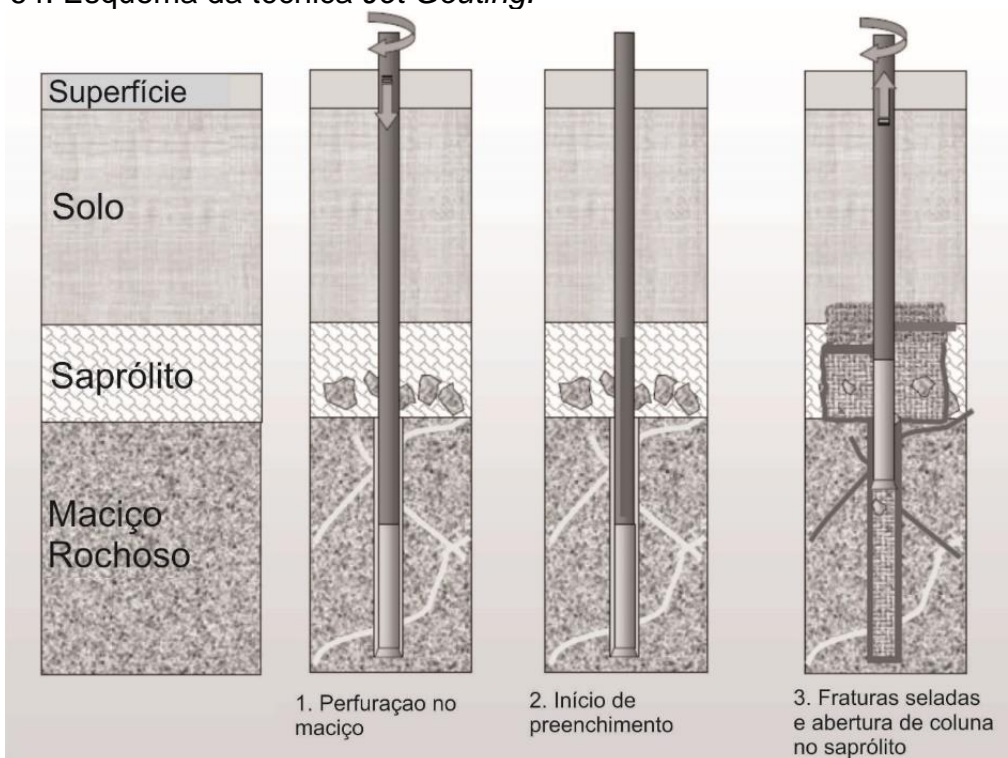
Uma outra técnica aplicável a área de estudos seria a injeção de calda de cimento a alta pressão (conhecido como *Jet-Grouting*). Desenvolvida nos anos 50 na Inglaterra, foi aperfeiçoada no Japão e hoje representa uma das técnicas mais difundidas em tratamento de maciços (ESSLER & YOSHIDA, 2004). Ela é mais empregada em solos com baixa coesão, mas também é adaptada em situações de maciços fraturados para promover o preenchimento de fraturas do maciço (COOMBER, 1986).

O conceito da técnica é a injeção a alta pressão de *grout*, que representa uma mistura de traço de cimento de alta resistência inicial (Cimento Portland do tipo CP-V - ARI), água e aditivos a altas pressões no maciço por meio de um furo vertical ou inclinado. Um tricône de perfuração especial, acoplado por meio de uma haste metálica oca é introduzida no maciço. Na cabeça do tricône há um bico dosador

especial que representa a saída do jato. Há uma interligação entre a máquina de sondagem e uma bomba injetora de alta capacidade que bombeia o *grout* da superfície até o bico dosador do tricô, na sonda do tricô (Figura 64). As pressões utilizadas em solos vão de 30 a 60 MPa e em rochas os valores ultrapassam 200 MPa (ESSLER & YOSHIDA, 2004). No caso da MOU, assim que o traço da calda de cimento enrijece-se, as fraturas seriam seladas e as zonas mineralizadas isoladas.

Uma desvantagem da técnica de Jet-Grouting para o tratamento na cava da MOU é o fato da pressão aplicada ao maciço atingir valores elevados que poderiam desestabilizar geotecnicamente algumas bancadas. Essa técnica é usualmente empregada em profundidade em maciços confinados, cenário diferente de uma cava de mina a céu aberto, com taludes e bancadas expostas, por isso é necessária atenção aos parâmetros de injeção e acompanhamento simultâneo dos taludes próximos ao tratamento.

Figura 64: Esquema da técnica *Jet Gouting*.



Fonte: Adaptado de Burke, 2012.

O passivo ambiental de drenagem ácida de mina é um problema de alta complexidade, especialmente na cava da mina Osamu Utsumi. Uma vez isoladas as fraturas que cortam corpos mineralizados, o problema será mitigado. Porém é importante frisar que essas soluções técnicas terão maior eficiência em corpos

mineralizados em que o minério é concordante com as fraturas, por isso, não representa uma solução técnica definitiva, uma vez que o problema não será resolvido como um todo. As medidas propostas devem, portanto, amenizar os efeitos da DAM, uma vez que zonas de minérios disseminados devem continuar a contribuir para a geração de DAM. Com a amenização das principais zonas é provável que o pH das águas da cava, mesmo apresentando caráter ácido, aumente a ponto de ser inerte ao meio ambiente.

Medidas ainda mais simples como evitar que o parte das águas tratadas na planta de efluentes retorne para o lago da cava e sofra “recontaminação”, reconformação do sistema de escoamento superficial, com a limpeza de valetas existentes e reconstrução das inexistentes ou danificadas, são medidas que facilitam o escoamento de águas meteóricas e dificultam a infiltração no maciço – o que por sua vez iria minimizar os impactos de DAM.

## 10. CONCLUSÕES

A falta de consciência de impactos ambientais na fase de implantação da cava da mina Osamu Utsumi na década de 70, balizou a escolha de método de lavra a céu aberto. A escolha de lavra a céu aberto não era a mais indicada em depósitos com as mesmas características encontradas na MOU. Essas características geológicas do depósito, bem como a assembleia mineral complexa (composta em quantidade significativa por sulfetos) associadas a escolha equivocada do método de lavra culminaram em uma situação favorável a geração de drenagem ácida de mina.

Os problemas de drenagem ácida de mina surgiram ainda no processo de operação. O cenário atual é um passivo ambiental complexo em termos de compressão e tratamento, mas algo necessário para o completo descomissionamento da mina. Hoje, é realizada uma intervenção para tratamento das águas ácidas da cava, porém sem perspectivas de solução do problema. De fato, o que é tratado são os sintomas do problema e não a causa. Enquanto as causas do problema não forem sanadas, o cenário continuará sem resolução definitiva.

O tratamento definitivo passa por diversas medidas. Uma das principais é a identificação dos principais caminhos e do fluxo da DAM no maciço da cava. O presente estudo identificou e analisou as principais zonas de fluxo de DAM a partir de dados geofísicos, hidroquímicos e de geologia estrutural.

A análise estrutural geométrica da cava revelou um arcabouço complexo. De certa forma esperado devido a também complexidade do modelo genético da mina Osamu Utsumi. A análise estatística das medidas compiladas de toda a cava, indicou um média de medidas próximo a moda, isso é importante para ressaltar a confiabilidade dos dados estruturais de uma maneira geral.

Os dados geofísicos apresentaram diferentes resultados por arranjos geofísicos diferentes. O arranjo Dipolo-dipolo apresenta uma melhor resolução de estruturas verticais devido ao ângulo de incidência do sinal que sai dos eletrodos – 45°. Esse fator aliado as características do modelo geológico do depósito – chaminé com rochas intrusivas, contatos litológicos e estruturas verticalizados, foram determinantes para considerar o arranjo Dipolo-dipolo mais adequado ao estudo.

O arranjo Schlumberger, devido as características de disposição de eletrodos, apresenta maior resolução para estruturas horizontalizadas. Ele é mais recomendado para estudos em ambientes geológicos com estratos horizontais, diferente do contexto

da MOU. Porém é importante destacar a eficiência do arranjo no ensaio da cava em corpos de minério secundários. Uma das fases de enriquecimento mineral do depósito é resultado enriquecimento supergênico e precipitação de minérios secundários na zona de oscilação do nível freático. O arranjo mostrou ser eficiente na identificação desses corpos.

Por tanto os dois arranjos demonstraram ser complementares para identificação de zonas de drenagem ácida, porém com uma vantagem ao arranjo Dipolo-dipolo devido ao modelo genético do depósito. Muitas das premissas adotadas pela geofísica foram confirmadas pelos dados hidroquímicos dos poços de monitoramento. O método demonstrou ser eficiente para a identificação de zonas de baixa resistividade possivelmente enriquecidas com minério primário e secundário, ambos residuais no maciço. Essas zonas de mineralização estão interligadas com sulfetos e conseqüentemente representam fontes de geração de DAM. Foi possível relacionar a posição topográfica de zonas de baixa resistividade das imagens geofísicas com parâmetros químicos de poços de monitoramento em cotas equivalentes.

Os dados hidroquímicos são importantes para a validação de hipóteses geradas pela geofísica, desde que analisados de maneira criteriosa. Alguns poços são localizados um ao lado do outro, porém com diferentes cotas de fundo, o que representa diferentes níveis investigativos no maciço. Assim como o caso dos poços PM-10, executado a posição menos profunda do maciço (cota 1323m), e o PM-38 executado em uma posição mais profunda (cota 1303m). Apesar de estarem lado a lado na cota de superfície, compreendem dados de diferentes horizontes no maciço e divergem significativamente nos valores de pH, o que indica um alcance limitado dos efeitos de águas contaminadas no maciço.

Ao final da discussão dos resultados foram apresentadas técnicas para tratamento da DAM com ênfase em métodos de eficiência a longo prazo. É preciso considerar a fase de descomissionamento e fechamento da mina e dar prioridade a medidas que gerem o mínimo de manutenção. Para isso foram indicados o tratamento de maciço com injeções e reconstituição do sistema de escoamento superficial de toda a cava.

O trabalho atingiu os objetivos propostos de discriminar os principais caminhos de fluxo de drenagem ácida no maciço. O método da Eletrorresistividade apresentou resolução satisfatória para identificação do fluxo de DAM. Vale ressaltar que o

levantamento geofísico adotou o espaçamento entre eletrodos de 10m, o qual foi considerado eficiente para uma abordagem de localização das principais zonas de fluxo com águas ácidas. Para um maior detalhamento de estruturas no maciço é recomendado uma nova etapa de aquisição de dados com a utilização de um espaçamento entre eletrodos inferior a 5m. Tal medida seria prudente antes de detalhamento de projetos de tratamento de maciços da cava.

## REFERÊNCIAS

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

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. 194f. Tese (Doutorado em Geologia e recursos naturais) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2017.

ALMEIDA FILHO, R. & PARADELLA, W.R. Estudo do maciço alcalino de Poços de Caldas através de imagens Landsat com ênfase em mineralizações radioativas. Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP. 1977.

ALVES, A. D. Rochas vulcanoclásticas do complexo alcalino de Poços de Caldas – MG/SP. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, p.157, 2003.

ANM – Agência nacional de mineração. Resolução nº 68, de 30 de abril de 2021. Institui o Código Civil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 82, p. 102, 04 mai. 2021.

ARNOLD, T.; BAUMANN, N.; KRAWCZYK-BÄRSCH, E.; BROCKMANN, S.; ZIMMERMANN, U.; JENK, U.; WEIS, S. Identification of the uranium speciation in an underground acid mine drainage environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, p. 2200-2212, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICA – ABNT NBR 15847. Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento - Métodos de purga, primeira edição. 15p, 2010.

BENEDETTO, J. S.; DE ALMEIDA, S. K.; GOMES, H. A.; VAZOLLER, R. F.; LADEIRA, A. C. Q. Monitoring of sulfate-reducing bacteria in acid water from uranium mines. *Minerals Engineering* 18, p.1341–1343, 2005.

BERTOLI, A. C.; QUINTÃO, M. C.; ABREU, H. A.; LADEIRA, A.C.Q.; DUARTE, H. A. Uranium separation from acid mine drainage using anionic resins – an experimental/theoretical investigation of its chemical speciation and the interaction mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 1 (7), 2019.

BIONDI, J.C. Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros. 2º ed. São Paulo. P.552, 2015.

BRASIL, Agência Nacional de Águas – ANA & Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. Guia nacional de coleta e preservação de amostras. Água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. Brasília, DF. p. 326, 2011.

BRASIL. INB. Indústrias Nucleares do Brasil. Programa de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). UTM – Caldas – Minas Gerais. Nº Projeto 099-515-3023. Elaboração R.L. Mapa Geológico Regional (2), 22/08/2011.

BURKE, G. K. The state of the practice of jet grouting. In Proceedings of 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing, New Orleans, Louisiana, American Society of Civil Engineers, New York, vol. 2, p. 74-88, 2012.

BUSELLI, G.; LU, K. Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods. Journal of Applied Geophysics. Vol. 48, p.11-23, 2001.

CHAPMAN, N.A.; McKINLEY, I.G.; SHEA, M.E.; SMELLIE, J.A.T. The Poços de Caldas Project: Summary and Implications for Radioactive Waste Management. Uppsala, SKB-Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., p. 147, 1991.

CHOCKALINGAM, E; SUBRAMANIAN, S. Studies on removal of metal ions and sulphate reduction using rice husk and *Desulfotomaculum nigrificans* with reference to remediation of acid mine drainage. Chemosphere, 2006, 62, p-699-708.

CIPRIANI, M. Mitigação dos impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio, 2002. 334f. Tese (Doutorado em Ciências na área de administração e política de recursos minerais) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.

COGGON, J. H. A comparison of IP electrode arrays. Geophysics, v.38 (4), p. 737-761, 1973

COOMBER, D.B. Groundwater control by jet grouting. Groundwater in Engineering Geology, London, p.445-454, 1986.

COSTA, W. D. Geologia de Barragens. São Paulo: Oficina de Textos, 352p. 2012.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Projeto Sapucaí: relatório final. Escala 1:250.000. São Paulo: DNPM/CPRM, 5 volumes, p.289, 1979.

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.

DEGROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. Geophysics, n. 55, p. 1613–1624, 1990.

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

EBRAHEEM, A. M.; HAMBURGER, M. W.; BAYLESS, E. R.; KROTHER, N. C. A study of acid mine drainage using earth resistivity measurements. Groundwater. Vol. 28, N. 3, p.361-368, 1990.



EDWARDS, L. S. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, Vol. 42 (5), p. 1020-1036, 1977.

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

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). USEPA. Method 7473. Mercury solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation and atomic absorption spectrophotometry. p. 17, 2007.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). USEPA. Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of sediments sludges, soils, and oils. 1rev, p.30, 2007.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). USEPA. Method 6010C. Inductively coupled plasma – atomic emission spectrometry. 3rev, p.34, 2007

EPOV et al. Analysis of mine waste by geochemical and geophysical methods (a case study of the mine tailing dump of the Salair ore-processing plant). *Russian Geology and Geophysics*. 58, p.1543-1552.

ESSLER, R.; YOSHIDA, H. Jet grouting. *In: MOSELEY, M.P.; KIRSCH, K. Ground Improvement (Second Edition)*, Spon Press, Capítulo 5, p160-196, 2004.

EVANGELOU, V.P. Pyrite oxidation and its control. Boca Raton, CRC Press, 293p.1995.

EVANGELOU, V.P.; Pyrite chemistry: the key for abatement of acid mine drainage. *In: Geller A, Klapper H, Salomons W, editors. Acidic Mining Lakes: Acid Mine Drainage, Limnology and Reclamation*. Berlin Springer; p. 197– 222, 1998.

EVERETT, M. E. Near-surface applied geophysics. Cambridge University Press, p. 441, 2013

FERNANDES, C. E. de. Fundamentos de prospecção geofísica. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, p. 190, 1984.

FERNANDES, H.M., VEIGA, L.H.S., FRANKLIN, M.R., PRADO, U.C.S. & TADDEI, J.F. Environmental impact assessment of uranium mining and milling facilities: a study case at the Poços de Caldas uranium mining and milling site, Brazil. *Journal Geochemical Exploration*, 52, p.161-73 1995.

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

FOSSSEN, H. *Geologia Estrutural*. São Paulo, Oficina de Textos, 584p. 2012.

FRAENKEL, M. O.; SANTOS, R. D.; LOUREIRO, F. E. L. e MUNIZ, W. D. S. Jazida de urânio do Planalto de Poços de Caldas – Minas Gerais. In: Os Principais Depósitos Minerais do Brasil, v.1, SCHOBENHAUS, C. (ed). Publicação do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) em convênio com a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), pp.89-103. 1985.

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. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2007.

FRAYHA, R. Urânio e Tório no Planalto de Poços de Caldas. Departamento Nacional de Produção Mineral. 1962.

FRAYHA, R; de SOUZA, O. M; de ARAÚJO, D. N. Projeto Poços de Caldas (ROC-601). Relatório Final - CPRM. Ministério das Minas e Energia. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Convênio CNEN – CPRM. 1972.

GARDA, M.G. A alteração hidrotermal no contexto da evolução geológica do maciço alcalino de poços de caldas, MG-SP. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 139p. 1990.

GEOTOMO SOFTWARE. Res2DInv ver. 3.53: 2D Resistivity and IP Inversion. Geotomo Software, 2003.

GOOGLE. Google earth. Versão 9.2.73.4. [S. I.]: Google LLC. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 12 janeiro 2020.

GROHMANN, C.H.; CAMPANHA, G.A.C.; SOARES JUNIOR A. V. Openstereo: um programa livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. In: 13º SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 2013, Campinas. Anais... Campinas, p.24-26.

GÓMEZ-ORTIZ et al. Application of electrical resistivity tomography to the environmental characterization of abandoned massive sulphide mine ponds (Iberian Pyrite Belt, SW Spain). Near Surface Geophysics. Vol. 8, p.65-74, 2010.

GOOGLE. Google earth. Versão 9.2.73.4. [S. I.]: Google LLC. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 03 setembro 2017.

GROUDEV, S.; GEORGIEV, P.; SPASOVA, I.; NICOLOVA, M. Bioremediation of acid mine drainage in a uranium deposit. Hydrometallurgy, (94), p.93-99, 2008.

HAFERBURG, G.; REINICKE, M.; MERTEN, D.; BÜCHEL, G.; KOTHE, E. Microbes adapted to acid mine drainage as source for strains active in retention of aluminum or uranium. Journal of Geochemical Exploration, (92) p. 196-204, 2006.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos da Física: Volume 3 Eletromagnetismo. 8 Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

- HÄMÄLÄINE, E. TURUNEN, K. Geological Survey of Finland Anoxic limestone drains (ALD). 2012. Disponível em <https://mineclosure.gtk.fi/anoxic-limestone-drains-ald/>. Acessado em 12/05/2019.
- HASUI, C.D.R. CARNEIRO, F.F.M.de. ALMEIDA, A. BARTORELLI. Geologia do Brasil. São Paulo: Ed. Beca, p.850, 2012.
- HIERRO, A.; MARTÍN, J.E.; OLÍAS, M.; GARCÍA, C.; BOLIVAR, J.P. Uranium behavior during a tidal cycle in an estuarine system affected by acid mine drainage (AMD). *Chemical Geology*, 342 , p.110–118, 2013.
- HOLMES D. C.; PITY A.E.; NOY D.J. Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera analogue study sites. *Journal of Geochemical Exploration*, 45: 215-247.1992.
- JIN, S.; FALLGREN, P. H.; MORRIS, J. M.; COOPER, J. S. Source Treatment of Acid Mine Drainage at a Backfilled Coal Mine Using Remote Sensing and Biogeochemistry. *Water air soil pollution*, 188, p-205-212, 2008.
- JOHNSON, D. B. & HALLBERG, K. B. Microbiology of a wetland ecosystem constructed to remediate mine drainage from a heavy metal mine. *Science of the Total Environment*. (338) p.53-66, 2005.
- JOHNSTON, S.F. Implanting a Discipline: The Academic Trajectory of Nuclear Engineering in the USA and UK. *Minerva* 47, p.51–73, 2009.  
<https://doi.org/10.1007/s11024-009-9114-6>
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. An Introduction to Geophysical Exploration. Terceira edição. Wiley-Blackwall Science Ltd, 2002.
- KLEINMANN, R.L.P.; CRERAR, D.A. & PACELLI, R.R. Biochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Min. Eng.* 33:300-306. 1981.
- KLEINMANN, R.L.P.; HEDIN, R.S.; NAIRN, R.W. Treatment of mine drainage by anoxic limestone drains and constructed wetlands. In: Geller A, Klapper H, Salomons W, editors. *Acidic Mining Lakes: Acid Mine Drainage, Limnology and Reclamation*. Berlin Springer; p.303– 19 1998.
- KLIMKOVA , S.; CERNIK, M.; LACINOVA, L.; FILIP, J.; JANCIK, D.; ZBORIL, R. Zero-valent iron nanoparticles in treatment of acid mine water from in situ uranium leaching. *Chemosphere*. (82), p.1178-1184, 2011.
- KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H.J. *Environmental Geology – Handbook of fields methods and case studies*. [s.l.]. Springer, 2007.
- KORNEEVA, T.; YURKEVICH, N.; JUCHER, D.; SAEVA, O. A geochemical and geophysical characterization of acid mine drainage and sulfide tailings at karabash mine site (south ural, russia). *International Journal of Advances in Science, Engineering and Technology*. V. 4, (1), p.114-120. 2016.

KRAWCZYK-BÄRSCH, E.; LÜNSDORF, H.; ARNOLD, T.; BRENDLER, V.; EISBEIN, E.; JENK, U.; ZIMMERMANN, U. The influence of biofilms on the migration of uranium in acid mine drainage (AMD) Waters. *Science of the Total Environment*, 409, p.3059–3065, 2011.

LADEIRA, A.C.Q.; GONÇALVES, C.R. Influence of anionic species on uranium separation from acid mine water using strong base resins. *Journal of Hazardous Materials* 148, P.499–504, 2007.

LANDA, E.R. Geochemical and biogeochemical controls on element mobility in and around uranium mill tailings. *Rev. Econ. Geol.* 6, p.527–538, 1999.

LE BAS, M.J. Carbonatite-Nepheline volcanism. John Wiley & Sons, Ltd. Bristol, Great Britain, 347p. 1977.

LEGAULT, J. M.; CARRIERE, D.; PETRIE, L. Synthetic model testing and distributed acquisition dc resistivity results over an unconformity uranium target from the Athabasca Basin, northern Saskatchewan. *The Leading Edge*, 27, p.46–51. 2008.

LI, M.G.; AUBE B.C.; ST-ARNAUD, L.C. Considerations in the use of shallow water covers for decommissioning reactive tailings. *Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage*, May 30–June 6, Vancouver, BC, vol. I, p. 115–30, 1997.

LOKE, M. H.; BAKER, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, n. 44, p. 131–152, 1996.

LOUREIRO, F. E. L.; SANTOS, R. C. The intra-intrusive uranium deposits of Poços de Caldas, Brazil. *Ore Geol. Rev.*, 3, p. 227-240, 1988.

LOWRIE, W. *Fundamentals of Geophysics*, 2. Ed.[s.l.]. Cambridge University Press, 2007.

MACHADO, J. Beitrag zur petrographie der sudwestlichen grenze zwischen Minas Geraes and São Paulo. *Tschermarks Mineralogische und petrographische mitteilungen*, (9), p. 317-360, 1888.

MACKERETH, F. J. H.; HERON, J.; TALLING, J.F. *Water analysis: Some revised methods for limnologists*. Freshwater Biological Association. Scientific Association. Kendall: Titus Wilson & Son LTD. 117p, 1978.

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

MANDAL, A.; BISWAS, A.; MITTAL, S.; MOHANTY, W.; SHARMA, S. Geophysical Anomalies Associated with Uranium Mineralization from Beldih Mine, South Purulia Shear Zone, India. *Journal Geological Society of India*. Vol.82, 2013.

MARTÍNEZ-PAGÁN, P.; FAZ-CANO, A.; ARACIL, E.; AROCENA, J.M. Electrical resistivity imaging revealed the spatial properties of mine tailing ponds in the Sierra Minera of southeast Spain. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 14, p.63–76. 2009.

McNEILL, J. D. Electrical Conductivity of Soils and Rocks. Geonics Limited, Technical Note TN-5. 1980.

MEHLING, P.E.; DAY, S.J.; SEXSMITH, K.S. Blending and layering waste rock to delay, mitigate or prevent acid generation: a case review study. *Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage*, May 30–June 6, Vancouver, BC, vol. II, p. 953–70. 1997.

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

MIEKELEY, N.; COUTINHO DE JESUS, H.; PORTO DA SILVEIRA, C. L.; DEGUELDRE, C. Chemical and physical characterization of suspended particles and colloids in waters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Pogos de Caldas, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 45, 409-437, 1992.

MILSON, J.; ERIKSEN, A. *Filed Geophysics*. John Wiley & Sons. 4 ed. p.287, 2011.

MOREIRA, E. C.; FERNANDES, L. E. D.; PEREIRA, V. P. A Análise de Lineamentos Estruturais, Sob a Óptica da Geometria Fractal, no Maciço Alcalino de Poços de Caldas (MG). *Revista Pesquisa em Geociências*, Porto Alegre, v. 34, n. 2, p. 89-97, 2007

MOREIRA, C. A.; PEREIRA, A. M.; CAVALHEIRO, M. L. D. Caracterização geométrica do gabro Santa Catarina, São Sepé (RS). *Revista Pesquisa em Geociências*, Porto Alegre, v. 41, n. 1, p.15-23, Jan. 2014.

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*. 55 (2), p. 119-129, 2016.

MOTOKI, A. An outline about problems of volcanic caldera hypothesis of the Poços de Caldas Alkaline Complex rock body, Minas Gerais – São Paulo, Brazil. In: *Congresso Latinoamericano de Geologia, Anais*. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia 7, Vol.1, p.309-323, 1988

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

MWENIFUMBO, C. J.; ELLIOT, B. E.; JEFFERSON, C. W.; BERNIUS, G. R.; PFLUG, K. A. Physical rock properties from the Athabasca Group: designing geophysical exploration models for unconformity uranium deposits. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 55, 2004.

NASCIMENTO, M. R. L.; FATIBELLO-FILHO, O.; TEIXEIRA, L. A. RECOVERY of uranium from acid mine drainage waters by ion exchange. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, 25(2), p.129-142, 2004. <https://doi.org/10.1080/08827500490433197>

NEVES, M. A.; MORALES, N. Well productivity controlling factors in crystalline terrains of southeastern Brazil. *Hydrogeology Journal* 15, p.471–482, 2007.

NORDSTROM, D.K.; MCNUTT, R. H.; PUIGDOMENECH, I.; SMELLIE, J. A. T.; WOLF, M. 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*, vol. 45, 249-287, 1992.

ORELLANA, E. *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Madrid, España: Paraninfo, p. 523, 1972.

PARK et al. A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. *Chemosphere*. 219, p.588-606, 2019.

PEDROBOM, J.H.; EISMANN, C.E.; MENEGÁRIO, A. A.; GALHARDI, J. A.; LUKO, K. S.; DOURADO, T. A.; KIANG, C. A. *In situ* speciation of uranium in treated acid mine drainage using the diffusion gradients in thin films technique (DGT). *Chemosphere* 169, p.249-256, 2017.

PENG, B.; TANG, X.; YU, C. et al. Heavy metal geochemistry of the acid mine drainage discharged from the Hejiacun uranium mine in central Hunan, China. *Environ Geol* 57, p.421–434, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1313-1>

PIRES, F. R. M. *Urânio no Brasil: geologia, jazidas e ocorrências*. Primeira Edição. Eletrobrás. Rio de Janeiro, 2013.

PLACENCIA-GÓMEZ, E.; PARVIAINEN, A.; HOKKANEN, T.; LOUKOLA-RUSKEENIEMI, K. Integrated geophysical and geochemical study on AMD generation at the Haveri Au–Cu mine tailings, SW Finland. *Environmental Earth Science*. 61, p.1435-1447, 2010.

PMPC. Prefeitura Municipal de Poços de Caldas. *Zoneamento Ambiental do Município de Poços de Caldas (MG): subsídios ao planejamento territorial*. Relatório técnico. Poços de Caldas, p.41, 2007.

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*. Vol. 67, p.179-192, 2009.

REYNOLDS, J. M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. 2 ed. John Wiley & Sons, Oxford, p. 696, 2011.

ROIG, M. G.; MANZANO, T.; DÍAZ, M. Biochemical process for the removal of uranium from acid mine drainages. *Water research*. Vol. 31 (8), p.2073-2083, 1997.

ROWLAND S.M.; DUEBENDORFER E.M.; SCHIEFELBEIN I.M. *Structural analysis and synthesis: A laboratory course in Structural Geology*. 3 ed. Blackwell Publishing, p.301, 2007.

RUCKER, D. F.; GLASER, D. R.; OSBORNE, T.; MAEHL, W.C. Electrical resistivity characterization of a reclaimed gold mine to delineate acid rock drainage pathways. *Mine Water Environment*. Vol. 28, p.146-157, 2009.

SARDINHA, D. S.; GODOY, L. H.; JIMENÉZ-RUEDA, J. R.; MORENO, M. M. T. Discussion of the Pocos de Caldas (MG) volcanic caldera evolution from a toposequence pedogeochemical analysis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Vol. 16, (2), 2015.

SCHOBENHAUS C.; CAMPOS D.A.; DERZE G.R.; ASMUS, H.E. *Geologia do Brasil*. Brasília, DNPM, p.435, 1984.

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. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 45, p. 25-51, 1992.

SCUDINO, P.C.B. *Caracterização Hidroquímica do Meio Aquífero Fraturado na Área de Poços de Caldas e Adjacências, Mediante Análise do Conteúdo de Isótopos das Águas Subterrâneas - Dissertação de Mestrado - Escola de Eng. Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 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 nº 4*. In: NAGRA, SKB, UK DOE. *Poços de Caldas Project*. 1991.

SINGHAL, B.B.S.; GUPTA, R.P. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. 2ed. Springer Dordrecht, p.408, 2010.

SOUZA, L.A.P.; SILVA, R.F.; IYOMASA, W.S. *Investigações geofísicas*. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.) *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira e Geologia de Engenharia (ABGE). *Métodos de investigação*. p.165-183, 1998.

TARGA, D. A.; MOREIRA, C. A.; CAMARERO, P. L.; CASAGRANDE, M.F.S.; ALBERTI, H.L.C. Structural analysis and geophysical survey for hydrogeological diagnosis in uranium mine. *Poços de Caldas (Brazil)*. *SN Appl Sci* 1: 299, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0309-7>

TARGA, D.A.; MOREIRA, C.A.; CASAGRANDE, M.F.S. Hydrogeological Analysis of Sulfide Tailings at a Uranium Mine Using Geophysical and Hydrochemical Methods. *Mine and Water Environmental*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00791-1>

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. (Orgs.) Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, p. 568, 2000.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. Applied geophysics. 2ed. Cambridge: Cambridge University Press, p770, 1990.

TOLBERT, J. The uraniferous zirconium deposits of the Poços de Caldas plateau, Brazil. U.S. Geological Survey Bulletin, 1185, p.28, 1966.

TUNCER, V.; UNSWORTH, M. J.; SIRIPUNVARAPORN, W.; CRAVEN, J. A. Exploration for unconformity-type uranium deposits with audiomagnetotelluric data: A case study from the McArthur River mine, Saskatchewan, Canada. Geophysics. Vol. 71 (6), 2006.

ULBRICH, H.H; GOMES, C.B. Alkaline rocks from continental Brazil. Earth Sci.Rev. 17, p.135-154, 1981.

ULBRICH, H. H. G. J. A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienito do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG. São Paulo - SP. Dissertação (Livre Docência) – Universidade de São Paulo - USP, p. 446, 1984.

VILLA, M.; MANJÓN, G.; HURTADO, S.; GARCÍA-TENORIO, R. Uranium pollution in an estuary affected by pyrite acid mine drainage and releases of naturally occurring radioactive materials. Marine Pollution Bulletin, 62, p.1521–1529, 2011.

WABER, N.; SCHORSCHER, H. D.; PETERS, T. Hydrothermal and supergene uranium mineralization at the Osamu Utsumi mine, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. Journal of Geochemical Exploration. 45, p.53-112, 1992.

WARD, S. H. Resistivity and induced polarization methods. Investigations in Geophysics, n5.Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed.Stanley H. Ward, v. 1, 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, vol. 45, 439-449, 1992.

WILLIAMS, D.J. Lessons from Tailings Dam Failures - Where to Go from Here? Minerals, 11, 853, 2021. <https://doi.org/10.3390/min11080853>

WOLKERSDORFER, C. Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines. Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment. Springer. 465 p, 2008.

YUVAL, D. W. O. DC Resistivity and IP methods in acid mine drainage problems: results from the Copper Cliff mine tailings impoundments. Applied Geophysics. Vol. 34, p.187-198, 1996.



ZHOU, B.; DAHLIN, T. Properties and effects of measurements errors on 2D resistivity imaging surveying. *Near Surface Geophysics*, Vol. 1, p. 105-117, 2003.

## Anexo I: Coleta, preservação e técnicas utilizadas nas amostras de água.

Parâmetro	Técnica	Frasco (ml)	Preparação e conservação	Local
Nível d'água	Medidor de nível	Não se aplica	Direto no Poço	INB
pH/EH/Cond./OD/Temp/Turb.	Sonda multiparâmetro acoplada célula de fluxo	Fluxo contínuo de água (aproximadamente 5 L)	Medição <i>In locu</i> , sem filtragem	
Al/Fe/Mn/F/SO <sub>4</sub>	ICP-OES	500	Amostra filtrada (0,45µm) + ácido Nítrico	
NO <sub>3</sub>	Mackereth <i>et al.</i> (1978)	100	Amostra filtrada (0,45µm)	LAPOC (CNEN)
Al/Cr/Fetotal/Mn/Zn/Ba/Ca/Co/Si/Ni/Sr/Ti/V2O2/Y/Zr	ICP-OES	1000		
As	Espectrometria de absorção atômica. GF-AAS			
Cd/Cu/Pb/Mo	Espectrometria de absorção atômica Hg-AAS			
Hg	Espectrometria de Absorção Atômica-amalgamação em ouro			
SO <sub>4</sub>	Espectrometria com cloreto de bário	1000		
Cl	Volumetria			
F	Potenciometria			
K/Na	Absorção Atômica Chama			
HCO <sub>3</sub> /CO <sub>3</sub>	Volumetria / Titulometria			

Anexo II: Campanhas de amostragem de parâmetros físico químicos.

<b>Campanha 1 (2013/2014)</b>	<b>Poços</b>	<b>OD (mg/L)</b>	<b>turbidez(UT)</b>	<b>Eh (V)</b>	<b>pH</b>	<b>Cond. μS/cm</b>
27/11	10	4.28	1.1	0.32	4.65	118
14/01	16	6.97	1.3	0.20	5.44	60
17/01	19	2.86	0	0.14	6.26	44
08/01	30	4.92	0	0.26	5.37	106
29/11	33	0.23	9.7	0.22	3.78	6670
29/11	34	2.74	0	0.13	5.54	406
10/12	35	2.41	0	0.41	4.5	236
22/11	37	6.78	0	0.22	5.6	13
28/11	38	0.35	0	-0.21	7.37	1034
07/01	39	2.94	0	0.21	3.90	819
07/01	40	0.56	24.7	-0.03	6.68	968
10/12	Cava	7.9	12	0.373	4.08	1800

<b>Campanha 2 Coleta (2014)</b>	<b>Poços</b>	<b>OD (mg/L)</b>	<b>turbidez(UT)</b>	<b>Eh (V)</b>	<b>pH</b>	<b>Cond. μS/cm</b>
14/08	10	2.38	9.2	0.23	6.1	92
05/08	16	6.29	9.9	0.26	6.05	53
22/07	19	2.88	4.4	0.23	6.25	41
13/08	30	3.8	5.7	0.23	4.79	95
15/07	33	0.18	6.9	0.19	3.11	6840
31/07	34	3.77	4	0.25	5.29	373
04/08	35	1.44	3.7	0.31	4.16	157
27/08	37	5.29	0	0.00	5.2	13
07/08	38	0.44	15.4	-0.23	8.57	595
17/07	39	0.29	1.1	0.29	5.51	638
28/08	40	0.98	25.3	-0.02	5.05	909
28/08	Cava	6.7	8.7	0.37	3.95	1920

<b>Campanha 3 Coleta (2015)</b>	<b>Poços</b>	<b>OD (mg/L)</b>	<b>turbidez(UT)</b>	<b>Eh (V)</b>	<b>pH</b>	<b>Cond. μS/cm</b>
27/04	10	3.85	19.23	0.409	4.5	83
23/04	16	6.07	10.3	0.375	4.67	114
02/06	19	3.07	2.4	0.173	5.35	37
23/04	30	3.31	2	0.374	4.91	103
14/04	33	0.28	23.6	0.367	2.9	6620
17/04	34	3.7	2	0.153	4.51	362
19/05	35	0.78	1.5	0.393	3.77	233
09/06	37	7.98	1.5	0.198	5.37	14
16/06	38	0.63	15.1	-0.198	9.05	593
26/05	39	1.25	5.8	0.401	4.07	607
18/06	40	1.1	14	-0.02	5.4	933
26/05	Cava	7.28	14	0.373	4.04	1810

Anexo III: Campanhas de amostragem dos principais cations e ânions.

2013/2014 Campanha 1		Ca	K	Na	Mg	F	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>
Data	Poço	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
27/nov	10	7,53	3,94	0,38	0,51	1,70	0	0,00	<3	45,00	1,58
14/jan	16	2,89	4,27	0,22	0,17	2,06	0	0,00	<3	19,44	0,79
17/jan	19	0,68	11,03	0,35	0,15	0,87	0	9,22	<3	0,69	6,37
08/jan	30	4,49	7,72	0,39	0,27	1,41	0	0,00	<3	32,30	2,25
29/nov	33	337,40	81,76	3,04	30,21	0,94	0	0,00	<3	8523,12	0,52
29/nov	34	38,77	34,06	0,99	5,67	1,94	0	0,00	<3	217,20	1,72
10/dez	35	10,11	9,21	0,19	0,39	7,92	0	0,00	<3	53,18	0,22
22/nov	37	0,30	2,47	0,25	0,22	0,75	0	0,95	<3	0,88	0,83
28/nov	38	82,20	10,61	5,47	0,55	4,42	0	41,84	<3	248,31	0,40
07/jan	39	41,30	12,24	0,50	4,78	21,88	0	0,00	<3	192,37	0,21
07/jan	40	152,49	61,44	2,38	7,32	4,18	0	10,94	<3	499,00	0,13
10/dez	Cava	510,40	13,15	0,75	16,05	8,13	0	0,00	<3	1394,92	0,14

2014 Campanha 2		Ca	K	Na	Mg	F	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>
Data	Poço	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
14/ago	10	8.94	3.70	0.33	0.47	0.63	0	0.00	<3	34.32	2.60
05/ago	16	3.40	3.60	0.04	0.30	0.50	0	1.00	<3	19.07	0.90
22/jul	19	0.95	10.30	0.09	0.12	0.50	0	12.10	<3	0.50	6.20
13/ago	30	4.93	7.20	0.04	0.22	0.55	0	0.00	<3	33.05	2.10
15/jul	33	344.40	80.00	3.70	28.04	0.50	0	0.00	<3	7796.61	0.10
31/jul	34	38.35	34.80	0.04	4.42	0.76	0	0.00	<3	163.56	2.20
04/ago	35	9.42	8.40	0.05	0.34	2.94	0	0.00	<3	53.18	0.20
27/ago	37	0.31	1.90	0.05	0.21	0.50	0	2.90	<3	0.50	1.10
07/ago	38	96.45	11.80	1.84	0.96	4.89	0	61.40	<3	222.63	0.20
17/jul	39	40.39	12.10	0.09	3.76	5.69	0	0.00	<3	264.83	0.30
28/ago	40	137.90	58.60	2.80	6.81	3.50	0	0.00	<3	401.20	0.10
28/ago	Cava	583.80	13.60	0.07	10.77	2.06	0	0.00	<3	1253.53	0.10

2015 Campanha 3		Ca	K	Na	Mg	F	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>
Data	Poço	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
27/abr	10	5.13	3.66	0.39	0.54	0.80	0	0.00	<3	48.10	0.40
23/abr	16	2.39	4.93	0.22	0.20	2.06	0	0.73	<3	20.68	0.70
02/jun	19	0.35	10.70	0.59	0.17	0.87	0	0.36	<3	0.00	5.80
23/abr	30	3.88	7.94	0.38	0.80	2.28	0	0.00	<3	38.10	2.30
14/abr	33	258.10	66.00	1.73	31.20	0.94	0	0.00	<3	8424.00	0.80
17/abr	34	36.20	30.70	0.95	6.70	3.12	0	0.00	<3	130.80	1.10
19/mai	35	10.40	9.66	0.33	0.42	12.90	0	0.00	<3	58.20	0.20
09/jun	37	0.29	2.74	0.44	0.23	0.75	0	2.97	<3	0.03	0.80
16/jun	38	67.20	8.03	8.39	0.11	3.96	0	12.80	<3	220.00	0.50
26/mai	39	40.60	11.90	0.90	5.60	31.40	0	0.00	<3	245.70	0.10
18/jun	40	158.20	60.70	1.82	7.54	4.86	0	1.82	<3	474.70	0.10
26/mai	Cava	437.00	12.70	1.42	16.70	14.20	0	0.00	<3	1198.30	0.20

## Anexo IV: Principais metais amostrados nas três campanhas.

2013-2014		P	Si	Al	Fe	Mn	Cd	Zn	Ba	Ti	Pb	V	Sr	Mo	Zr	As	Y	Cu	Ni	Cr	Co	Hg	
Data	Poço	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
27/nov	10	<0,1	7.02	2.87	0.48	2.99	<0,001	0.39	0.08	<0,05	<0,01	<0,09	0.29	<0,005	<0,05	<2,5	0.87	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
14/jan	16	<0,1	6.70	1.12	0.13	0.46	<0,001	0.15	0.13	<0,05	<0,01	<0,09	0.06	<0,005	<0,05	<2,5	0.05	<0,01	<0,01	<0,04	0.02	<0,0002	
17/jan	19	<0,1	9.13	0.01	0.04	0.03	<0,001	0.06	0.23	<0,05	<0,01	<0,09	0.05	<0,005	<0,05	<2,5	<0,002	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
08/jan	30	<0,1	9.10	2.67	0.05	1.09	<0,001	0.21	0.07	<0,05	<0,01	<0,09	0.15	<0,005	<0,05	<2,5	0.05	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
29/nov	33	<0,1	71.71	1019.20	1148.0	105.75	0.08	70.25	0.04	0.06	0.63	0.63	8.78	0.62	0.56	0.11	13.72	<0,01	0.02	0.05	0.41	<0,0002	
09/dez	34	<0,1	17.83	3.82	0.58	8.38	0.01	3.60	0.05	<0,05	<0,01	<0,09	1.80	0.05	0.29	<2,5	1.10	<0,01	0.02	<0,04	0.02	<0,0002	
10/dez	35	<0,1	16.16	5.74	0.14	0.96	<0,001	2.10	0.05	<0,05	<0,01	<0,09	0.18	<0,005	<0,05	<2,5	<0,002	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
22/nov	37	<0,1	5.39	0.29	0.38	0.11	<0,001	0.04	0.02	<0,05	<0,01	<0,09	0.02	0.01	<0,05	<2,5	<0,002	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
28/nov	38	<0,1	8.50	1.47	2.91	0.13	<0,001	0.02	0.04	<0,05	0.02	<0,09	6.64	0.51	<0,05	<2,5	<0,002	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
07/jan	39	<0,1	14.35	16.73	13.80	11.13	0.01	2.70	0.03	<0,05	<0,01	<0,09	0.98	0.01	0.12	<2,5	0.65	<0,01	<0,01	<0,04	0.02	<0,0002	
07/jan	40	<0,1	15.37	2.27	13.77	21.99	<0,001	1.15	0.04	<0,05	<0,01	<0,09	1.84	0.02	<0,05	<2,5	0.20	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
10/dez	Cava	<0,1	9.08	21.15	1.23	43.25	0.02	3.35	0.03	<0,05	<0,01	<0,09	3.82	0.01	0.15	<2,5	0.50	<0,01	<0,01	<0,04	0.03	<0,0002	

2014		P	Si	Al	Fe	Mn	Cd	Zn	Ba	Ti	Pb	V	Sr	Mo	Zr	As	Y	Cu	Ni	Cr	Co	Hg	
Data	Poço	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
14/ago	10	<0,1	6.11	2.25	0.80	3.07	<0,001	0.33	0.06	<0,05	0.15	<0,05	0.21	<0,05	<0,05	<2,5	0.78	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
05/ago	16	<0,1	6.40	0.94	0.14	0.42	<0,001	0.13	0.14	<0,05	<0,01	<0,05	0.07	<0,05	<0,05	<2,5	0.05	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
22/jul	19	<0,1	7.98	0.10	0.04	0.01	<0,001	0.05	0.22	<0,05	<0,01	<0,05	<0,2	<0,05	<0,05	<2,5	<0,002	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
13/ago	30	<0,1	8.50	2.80	0.05	0.91	<0,001	0.18	0.07	<0,05	<0,01	<0,05	0.15	<0,05	0.15	<2,5	0.03	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
15/jul	33	<0,1	59.26	1010.00	1160.00	28.04	0.14	90.70	0.03	0.06	1.11	0.46	9.50	0.14	0.80	0.01	11.20	<0,01	0.02	0.04	0.37	<0,0002	
31/jul	34	<0,1	15.99	2.33	0.64	4.42	0.01	3.43	0.04	<0,05	<0,01	<0,05	1.75	0.05	<0,05	<2,5	<0,002	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
04/ago	35	<0,1	14.39	4.89	0.14	1.78	<0,001	1.06	0.04	<0,05	<0,01	<0,05	0.18	<0,05	<0,05	<2,5	<0,002	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
10/jul	37	<0,1	4.10	0.05	0.37	0.20	<0,001	0.03	0.02	<0,05	<0,01	<0,05	0.02	<0,05	<0,05	<2,5	<0,002	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
07/ago	38	<0,1	7.68	0.41	0.16	0.17	<0,001	0.02	0.03	<0,05	<0,01	<0,05	5.17	0.19	<0,05	<2,5	<0,002	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
17/jul	39	<0,1	12.53	31.70	20.10	17.28	0.01	2.82	0.02	<0,05	<0,01	<0,05	0.93	<0,05	0.11	<2,5	0.59	<0,01	<0,01	<0,04	0.02	<0,0002	
28/ago	40	<0,1	13.94	2.19	5.53	22.40	<0,001	1.13	0.04	<0,05	<0,01	<0,05	1.65	<0,05	<0,05	<2,5	0.11	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
28/ago	Cava	<0,1	7.56	19.30	1.72	49.90	0.02	3.79	0.04	<0,05	<0,01	<0,05	3.42	<0,05	0.15	<2,5	0.51	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	

2015		P	Si	Al	Fe	Mn	Cd	Zn	Ba	Ti	Pb	V	Sr	Mo	Zr	As	Y	Cu	Ni	Cr	Co	Hg	
Data	Poço	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
27/abr	10	<0,1	7.02	3.11	0.19	2.51	<0,01	0.39	0.08	<0,05	<0,01	<0,09	0.21	<0,005	<0,05	<2,5	0.78	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
23/abr	16	<0,1	6.99	1.30	0.13	0.50	<0,01	0.15	0.13	<0,05	<0,01	<0,09	0.05	<0,005	<0,05	<2,5	0.06	<0,01	<0,01	<0,04	0.02	<0,0002	
03/jun	19	<0,1	9.41	0.00	0.00	0.05	<0,01	0.06	0.23	<0,05	<0,01	<0,09	0.04	<0,005	<0,05	<2,5	<0,02	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
23/abr	30	<0,1	9.35	2.60	0.05	1.22	<0,01	0.21	0.07	<0,05	<0,01	<0,09	0.15	<0,005	<0,05	<2,5	0.03	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
14/abr	33	<0,1	68.80	810.00	890.00	160.80	0.01	70.25	0.04	0.06	0.02	0.67	6.10	0.97	0.21	0.14	13.00	<0,01	0.01	0.05	0.37	<0,0002	
17/abr	34	<0,1	18.30	5.02	0.48	11.70	0.01	3.60	0.05	<0,05	<0,01	<0,09	1.66	<0,005	0.28	<2,5	1.13	<0,01	0.02	<0,04	0.02	<0,0002	
19/mai	35	<0,1	17.30	5.90	0.14	0.11	<0,01	2.10	0.05	<0,05	<0,01	<0,09	0.18	<0,005	<0,05	<2,5	<0,02	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
09/jun	37	<0,1	5.77	0.29	0.04	0.03	<0,01	0.04	0.02	<0,05	<0,01	<0,09	<0,02	<0,005	<0,05	<2,5	<0,02	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
16/jun	38	<0,1	8.21	0.48	0.98	0.08	<0,01	0.02	0.04	<0,05	0.02	<0,09	5.17	0.77	<0,05	<2,5	<0,02	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
26/mai	39	<0,1	15.60	29.60	22.50	19.60	<0,01	2.70	0.03	<0,05	<0,01	<0,09	0.93	0.01	<0,05	<2,5	0.59	<0,01	<0,01	<0,04	0.02	<0,0002	
18/jun	40	<0,1	15.90	2.21	21.20	20.30	<0,01	1.15	0.04	<0,05	<0,01	<0,09	1.65	<0,005	<0,05	<2,5	0.13	<0,01	<0,01	<0,04	<0,02	<0,0002	
26/mai	Cava	<0,1	10.60	23.00	0.74	36.60	<0,01	3.35	0.03	<0,05	<0,01	<0,09	3.42	0.01	0.15	<2,5	0.51	<0,01	<0,01	<0,04	0.03	<0,0002	