



UNIVERSIDADE ESTADUAL
PAULISTA “JÚLIO DE
MESQUITA FILHO” INSTITUTO
DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS
EXATAS



Trabalho de Conclusão de Curso

Graduação em Geologia

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

Fernanda Miranda de Siqueira Büchi

Prof. Dr. César Augusto Morerira

Rio Claro (SP)

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

FERNANDA MIRANDA DE SIQUEIRA BÜCHI

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

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geóloga.

Rio Claro (SP)
2019

B919i Büchi, Fernanda Miranda de Siqueira
Investigação geofísica em pilha de estêreis afetada por processo de drenagem ácida, mina Osamu Utsumi, Poços de Caldas (MG) /
Fernanda Miranda de Siqueira Büchi. -- Rio Claro, 2019
60 f. : il. + 1 CD-ROM

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) -
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e
Ciências Exatas, Rio Claro

Orientadora: César Augusto Moreira

1. Geofísica. 2. Mineração a céu aberto. 3. Monitoramento
ambiental. I. Título.

FERNANDA MIRANDA DE SIQUEIRA BÜCHI

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

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geóloga.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Msc. Matheus Stanfoca Casagrande

Msc. Fernanda Telles Gomes Rosa

Rio Claro, 29 de novembro de 2019.

Assinatura da aluna

assinatura do orientador

À minha avó, Moema, que sempre me inspirou e incentivou a escrever. Ao meu avô, Phila (*in memoriam*), por ter me mostrado a importância da educação e por ser eterna fonte de aprendizado e admiração. Ao meu avô, James (*in memoriam*), por ter me mostrado a Geologia na sua forma mais bela

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. César Augusto Moreira, primeiramente pela paciência, dedicação a seus orientandos e por todos os conselhos tão inspiradores durante a elaboração deste trabalho. Também demonstro minha gratidão pela confiança e admiração pelo profissional que é.

Às Indústrias Nucleares do Brasil – INB/Caldas pelo interesse no tema, permissão e acesso à área de estudo, bem como por todo o apoio que foi concedido durante os trabalhos de campo.

À Débora Targa e Matheus Casagrande, pela ajuda durante os trabalhos de campo, pela paciência e ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, por todo o apoio durante esse ano e por ter me mostrado que sempre vale à pena continuar, mesmo que a caminhada pareça árdua demais. Agradeço principalmente a meu avô, que sempre realçou a importância da educação e sempre foi fonte de inspiração.

Aos meus amigos, moradores (sejam eles seres humanos ou animais) e agregados da República Marte, a qual tive a sorte de poder chamar de lar, e República Toca do Tiranossauro, por serem as melhores pessoas que eu poderia ter encontrado em Rio Claro, por todos os momentos e lembranças que vocês me proporcionaram. Com certeza levarei vocês para sempre comigo por onde for.

A todos meus animais, que sempre foram fonte inesgotável de amor e alegria.

A todos vocês, meu muito obrigada!

RESUMO

As atividades mineiras são conhecidas pelas profundas mudanças que provocam no meio ambiente e envolvem a geração de uma enorme quantidade de rejeitos, material sem interesse econômico. O material estéril, proveniente das atividades de lavra, é disposto em bota-foras, que podem funcionar como aquíferos porosos artificiais. Tanto a disposição dessas pilhas como sua interação com o meio consistem um dos maiores problemas ambientais relacionados à indústria mineira. Um frequente passivo ambiental gerado nesses empreendimentos é a drenagem ácida de mina (DAM), devido à exposição de materiais que contêm sulfetos, principalmente pirita, a condições oxidantes. Como resultado, há produção de águas com baixos valores de pH e que favorecem a mobilização de elementos químicos tóxicos, como metais pesados, associados às matrizes rochosas. Nesse contexto, está inserida a mina de urânio Osamu Utsumi, localizada no município de Caldas – MG. Geologicamente, a região faz parte do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, considerado o maior complexo alcalino da América Latina e composto principalmente por rochas nefelína-sieníticas. Desde a década de 1990, a mina está em fase de descomissionamento, e enfrenta sérias dificuldades relacionadas à geração de DAM, tanto nos bota-foras quanto na cava. Nas últimas décadas, a geofísica tem sido utilizada como uma importante ferramenta na avaliação de impactos ambientais, devido a sua eficácia e custos relativamente baixos. Com o objetivo de entender a dinâmica hidrogeológica na pilha de estéreis denominada BF-8 da mina, o presente trabalho aplicou o método da Eletorresistividade para diagnóstico do fluxo subterrâneo presente no local. Foram definidas 7 linhas de aquisição geofísica em arranjo Schlumberger, através da técnica de tomografia elétrica. Os resultados mostraram que mesmo no período de estiagem da região de estudos ocorre geração de DAM, produto da interação de zonas de acúmulo existentes no interior da pilha com regiões em que há concentração de pirita, que ocorre de maneira disseminada no bota-fora. A análise das seções 2D permitiu a diferenciação de zonas de acúmulo de águas naturais de zonas de acúmulo de águas de alta salinidade ($<40 \Omega.m$), consideradas águas ácidas. Também foi possível a constatação de que há constante contribuição do aquífero poroso, constituído pelo material que compõe o BF-8, para o aquífero fraturado, formado pelo embasamento cristalino.

Palavras-chave: Eletorresistividade; Passivo Ambiental; Mina de Urânio; Bota-fora; Aquífero.

ABSTRACT

Mining activities are known for the deep changes they cause in the environment, and involve the generation of a huge amount of tailings, material without economic interest, to the detriment of a few grams of ore. The sterile material from the mining activities is disposed of in piles, which can function as an artificial porous aquifer. Both the disposal of these piles and their interaction with the environment constitute one of the biggest environmental problems related to the mining industry. A frequent environmental liability generated in these enterprises is acid mine drainage (DAM), due to the exposure of sulfide-containing materials, mainly pyrite, to oxidizing conditions. As a result, there is production of water with low pH values, which favors the dissolution of toxic chemical elements, such as heavy metals, associated with rocky matrices. In this context, the Osamu Utsumi uranium mine, located in the city of Caldas - MG, is inserted. Geologically, the region is part of the Poços de Caldas Alkaline Massif, considered the largest alkaline complex in Latin America and composed mainly of nepheline-syenitic rocks. Since the 1990s, the mine has been decommissioning and faces serious difficulties related to the generation of DAM, both in the tailings piles and pit. In recent decades, geophysics has been used as an important tool in environmental impact assessment due to its effectiveness and relatively low costs. In order to understand the hydrogeological dynamics in the BF-8 sterile pile of the mine, the present work applied the DC Resistivity method to diagnose the underground flow present at the site. Seven lines of geophysical acquisition in the Schlumberger arrangement were defined using the electric tomography technique. The results showed that even during the drought period of the study region, there is a generation of DAM, a product of the interaction of accumulation zones existing inside the pile with regions where there is a concentration of pyrite, which occurs in a scattered manner in the BF-8. The analysis of the 2D sections allowed the differentiation of natural water accumulation zones from high salinity water accumulation zones ($<40 \Omega.m$), considered acid waters. It was also possible to find that there is a constant contribution of the porous aquifer, constituted by the material that composes the BF-8, to the fractured aquifer, formed by the crystalline basement.

Keywords: DC Resistivity; Environmental liability; Uranium mine; Tailing Pile; Aquifer.

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema de aquíferos encontrado na Mina Osamu Utsumi.	12
Figura 2 - Localização da mina de urânio Osamu Utsumi, no Campo do Cercado, com ênfase na região avaliada neste projeto.	14
Figura 3 - Visão geral do complexo industrial da Mina Osamu Utsumi, no Campo do Cercado.	16
Figura 4 - Distribuição anual da taxa de precipitação, baseada nas médias mensais.	19
Figura 5 - Mapa geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, com detalhe para a área de estudos.	23
Figura 6 - Esquema geológico da mina Osamu Utsumi.	26
Figura 7 - Desenho esquemático da construção por ponta de aterro.	27
Figura 8 - Patamares superior e inferior da pilha de estéreis BF-8.	28
Figura 9 - Esquema de aquífero poroso e aquífero fraturado.	32
Figura 10 - Princípio do método da Eletorresistividade.	37
Figura 11 - Esquema do perfil de dados obtidos em um levantamento de tomografia elétrica.	39
Figura 12 - Disposição dos pares eletrodos em arranjo Schlumberger.	40
Figura 13 - Vista geral da disposição das linhas aquisição dos dados geoeletricos.	40
Figura 14 - Mapa de localização da área de estudo, com disposição do traçado das linhas geofísicas. À esquerda, esquema em perfil da profundidade abrangida por cada linha.	41
Figura 15 - A) Eletrodos de cerâmica não-polarizável, utilizados durante a etapa de aquisição de dados; B) Cabo de aquisição; C) Sulfato de cobre em estado sólido; D) Detalhe da montagem dos eletrodos de cerâmica, já preenchidos com a solução de CuSO_4 , conectados ao cabo de aquisição através das garras; E) Resistivímetro Terrameter LS da ABEM, conectado à bateria, efetuando as leituras em campo.	42
Figura 16 - Seção geofísica referente à linha 1.	45
Figura 17 - Modelo de inversão 2D referente à linha de aquisição 2.	46
Figura 18 - Seção referente à linha de aquisição 3.	47
Figura 19 - Modelo de inversão 2D referente à linha de aquisição 4.	48
Figura 20 - Seção referente à linha de aquisição 5.	49
Figura 21 - Modelo de inversão 2D referente à linha de aquisição 6.	49
Figura 22 - Seção referente à linha de aquisição 7.	51
Figura 23 - Modelos de inversão 2D para as linhas de 1 a 7, com destaque para as direções preferenciais do fluxo no interior do bota-fora 8.	52
Figura 24 - (A) Visão em perfil da pilha de estéreis BF-8, sem indícios de surgência; (B) Visão da frente da pilha de estéreis BF-8, também sem indícios de surgência.	53

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	14
3.1. Localização e Histórico da Mina Osamu Utsumi	14
3.2. Clima e fisiografia	18
3.3. Hidrogeologia Local	20
3.4. Geologia Regional	21
3.5. Geologia local e metalogênese	25
3.6. O bota-fora 8	27
4. CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	29
4.1. Drenagem ácida de mina.....	29
4.2. Sistemas Aquíferos	31
4.2.1. Aquífero Poroso.....	32
4.2.2. Aquífero Fraturado.....	32
5. EMBASAMENTO DO ESTUDO	34
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
6.1. Fundamentação do método	36
6.1.1. Método da Eletrorresistividade.....	36
6.2. Técnica de aquisição.....	38
6.2.1. Arranjo	39
6.3. Aquisição de dados	40
6.4. Processamento dos dados.....	43
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
8. CONCLUSÕES	54
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

A mineração, como um conjunto de atividades que têm como finalidade a exploração econômica de bens minerais, provoca profundas transformações no meio ambiente. Como resultado, há a geração de grande volume de resíduos, que constituem um dos maiores problemas ambientais da atividade mineira, tanto quanto a sua disposição como a sua interação com o meio.

Os rejeitos da mineração, considerados como estéreis ainda na fase de lavra, são dispostos em pilhas ou bota-foras. Os materiais depositados apresentam grande variabilidade granulométrica, o que compõe um meio heterogêneo e muitas vezes anisotrópico (CHAMMAS, 1989). Sendo assim, a características desse tipo de ambiente podem remeter às condições encontradas em um aquífero poroso.

Essas pilhas de estéreis, por serem altamente permeáveis, conferem condições propícias para a formação do fenômeno de drenagem ácida de mina (DAM), uma vez que expõem os minerais sulfetados, antes inseridos em um contexto redutor, a condições oxidantes com presença de água. Como resultado deste fenômeno, há a formação de ácido sulfúrico, responsável pela elevação da acidez no meio e, conseqüentemente, pela dissolução de metais pesados associados às matrizes rochosas.

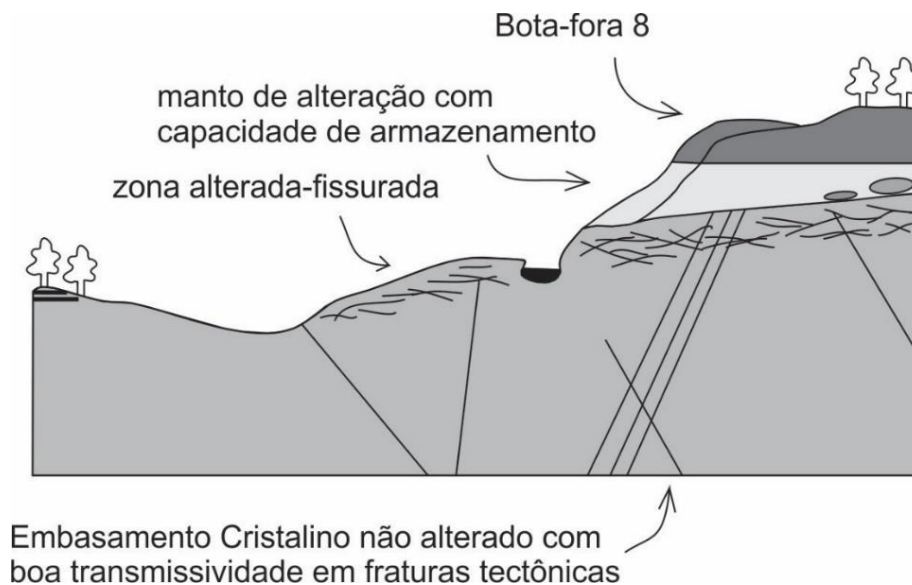
A implantação da Mina Osamu Utsumi, nas proximidades do município de Poços de Caldas (MG), intensificou a alteração do padrão natural dos fluxos hidrológicos tanto em superfície quanto em subsuperfície, assim como a conformação de suas encostas naturais (HOLMES *et al.* 1992).

A exploração da mina consistia na extração e beneficiamento do minério de urânio, e apresentava minerais de sulfeto associados. Dessa forma, o principal passivo ambiental enfrentado pela mina Osamu Utsumi é a drenagem ácida, além da solubilização de metais pesados encontrados tanto nos maciços rochosos quanto nas pilhas de estéril, como Cu, Ni, Cd, U, Mn e Zn.

As águas subterrâneas da mina estão contidas em um sistema de aquífero poroso, formado pelo solo de alteração das pilhas de estéril. Esse sistema de aquífero poroso está sobreposto a um aquífero fraturado (Figura 1), constituído por rochas alcalinas (FRANKLIN, 2007). O avanço das escavações e retirada de material do solo provocou alívio de tensões, o que contribuiu para o aumento das discontinuidades no meio, a partir do desconfinamento dos maciços rochosos (CURI, 2014). Nesse ambiente, a profundidade de infiltração da água é controlada pelo escoamento superficial, pela

espessura do manto de alteração da rocha e pelo padrão de faturamento e conectividade das fraturas.

Figura 1 - Sistema de aquíferos encontrado na Mina Osamu Utsumi.



Fonte: Adaptado de Lachassagne *et al.*, 2001.

Ainda, há o incremento da mobilidade e risco de carreamento para as drenagens da região, com impactos diretos nos mananciais superficiais e subterrâneos (CARVALHO E FERREIRA, 2000). A bacia de rejeitos, a cava da mina e as pilhas de estéril representam as principais fontes de contaminação (FRANKLIN, 2007).

A perspectiva é de que as drenagens ácidas perdurem por séculos, com custos de manutenção exorbitantes (MURTA *et al.*, 2008), devido ao grande volume de água a ser tratado.

Assim, o presente trabalho consiste na compreensão da dinâmica hidrogeológica da pilha de estéreis chamada bota-fora 8 da mina Osamu Utsumi, com vistas ao reconhecimento de zonas de percolação de drenagens ácidas no interior da pilha, além da avaliação da conexão entre os aquíferos granular e fraturado presentes no local.

2. OBJETIVOS

Este trabalho visa reconhecer zonas preferenciais de infiltração em uma pilha de estéreis de antiga mineração de urânio afetada por processo de geração de drenagem ácida de mina, bem como detectar o sentido do fluxo d'água subterrâneo existente no interior da pilha, com vistas à compreensão da dinâmica hidrogeológica, a fim de promover a atenuação do processo de drenagem ácida *in situ*.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

3.1. Localização e Histórico da Mina Osamu Utsumi

A mina de urânio Osamu Utsumi, inserida na porção centro-sul do Planalto Poços de Caldas, no município de Caldas, faz parte do Complexo Alcalino de Poços de Caldas (CAPC), localizado numa região da divisa SW do Estado de Minas Gerais com São Paulo (Figura 2).

Figura 2 - Localização da mina de urânio Osamu Utsumi, no Campo do Cercado, com ênfase na região avaliada neste projeto.



Fonte: Google Earth.

A descoberta da ocorrência de urânio no Planalto de Poços de Caldas ocorreu em 1948, por técnicos do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), com o propósito de atendimento à demanda pela fabricação de armas nucleares. As novas tecnologias criadas nos Estados Unidos da América, na década de 1950, objetivavam o uso de substâncias radioativas como fonte de energia elétrica e nuclear (PRADO, 1994).

Na década de 1960, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), juntamente com a Eletrobrás, começou a analisar as possíveis vantagens da geração de energia elétrica por meio de combustível radioativo, com vistas à necessidade do aumento da geração elétrica frente à crescente demanda ocasionada pelo desenvolvimento econômico. Os primeiros trabalhos de pesquisa foram realizados em 1964 (PRADO, 1994).

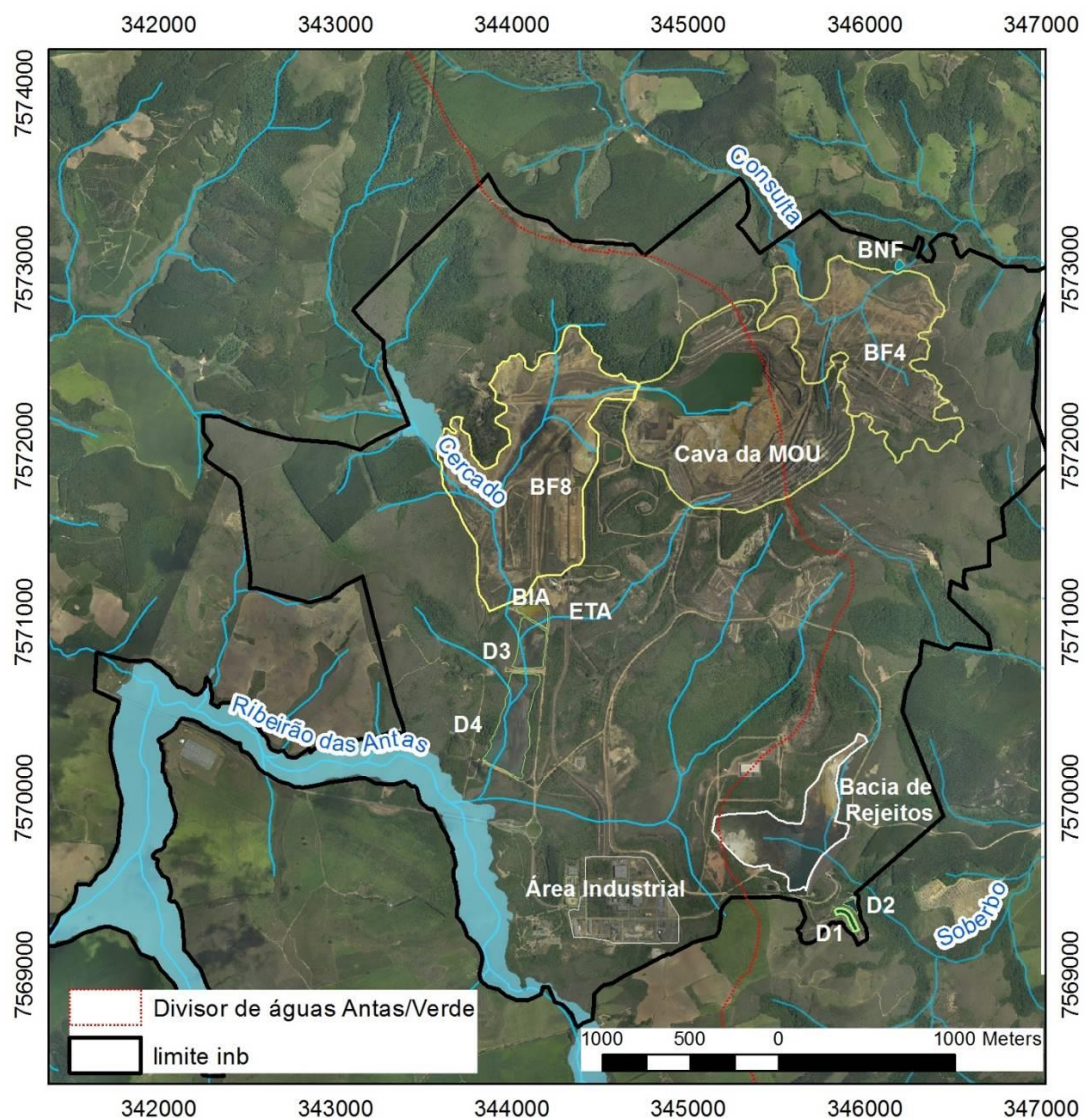
Na década de 1970, foi tomada a decisão de construção de usinas nucleares voltadas para a geração de energia elétrica por parte do governo, com os projetos Angra I e II. A criação destas usinas no Estado do Rio de Janeiro demandava combustíveis nucleares, o que estimulou a prospecção de jazidas de urânio no Brasil.

Inicialmente de propriedade da empresa estatal Nuclebrás, a mina Osamu Utsumi foi a primeira mineração de urânio explorada comercialmente no Brasil, em atividades desde a década de 1970. Atualmente, a jazida existente no local conhecido como Campo do Cercado pertence a Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB) (SIQUEIRA, 2013). A exploração de urânio foi iniciada em 1982, com lavra a céu aberto, e o fechamento do empreendimento ocorreu em 1995 (SOUZA *et al.*, 2013).

A área de estudo foi denominada CIPC (Complexo Industrial de Poços de Caldas) e consiste no primeiro centro de produção de urânio do Brasil, que abrange uma área de aproximadamente 3193 ha, constituído de uma mina a céu aberto e seus bota-foras (pilhas de estéreis), instalações de tratamento físico de minério, pátio de estocagem de minério, usina de tratamento químico para extração do urânio, estação de tratamento de águas da cava da mina (ETA), tratamento de rejeitos sólidos e líquidos do beneficiamento, barragem de rejeitos, estocagem de insumos, tratamento de água potável e água de processo, fábrica de ácido sulfúrico e barragem de captação de águas, além de instalações administrativas (CIPRIANI, 2002; Figura 3).

A reserva contida na área foi calculada em aproximadamente 17.200 toneladas de U_3O_8 (SOUZA *et al.*, 2013). Em 1977, foram iniciadas as operações de lavra, com a decapagem da rocha e a remoção de 5 milhões m^3 de material. Em 1979, tiveram início as obras civis e a montagem da instalação do complexo minero-industrial, que começaram a operar comercialmente em fevereiro de 1982 (PRADO, 1994). O processo operacional era dividido em três frentes: mineração, processamento físico e processamento químico (SOUZA *et al.*, 2013). O teor de corte definido foi de 170 ppm de urânio solúvel. O material gerado na decapagem da mina, caracterizado como estéril (valores abaixo de 170 ppm de urânio solúvel), era encaminhado para locais definidos como bota-foras (CIPRIANI, 2002).

Figura 3 - Visão geral do complexo industrial da Mina Osamu Utsumi, no Campo do Cercado.



Fonte: Alberti (2017).

O beneficiamento físico consistia na britagem e moagem (a fim de reduzir a granulometria do material lavrado) e espessamento do minério proveniente da mina (ROM – *room of mine*), que depois era transportado e separado em pilhas construídas em função do grau de solubilidade do U_3O_8 . Em seguida, o beneficiamento químico do material era efetuado, e consistia na concentração do urânio, feita por solventes em baterias de misturadores-decantadores, com posterior de precipitação de um concentrado sob a forma de diuranato de amônia, conhecido como “*yellow cake*” (CIPRIANI, 2002).

A partir de 1983 foram reduzidos os investimentos da Nuclebrás e, conseqüentemente, o ritmo de produção do CIPC. Em 1988 a Nuclebrás foi extinta e foram criadas as Indústrias Nucleares Brasileiras S.A. (INB), órgão responsável pelas

atividades do Ciclo do Combustível Nuclear (com controle acionário da CNEN), e a Urânio do Brasil S.A., subsidiária da INB, responsável pela produção de concentrado de urânio (PRADO, 1994). Neste período o complexo industrial passa a ser denominado Unidade de Tratamento de Minérios (UTM).

As restrições financeiras sofridas pelo CIPC, a crise econômica brasileira configurada na década de 1980 e as incertezas do programa nuclear brasileiro resultaram na paralisação das operações do CIPC no final do ano de 1988. O investimento feito foi de US\$ 300 milhões, sendo que até 1988 a produção de concentrado de urânio foi de 957 toneladas (119,6 tU/ano), inferior à capacidade nominal da usina (500 tU/ano) (PRADO, 1994).

Inicialmente prevista para produzir 425 tU/ano durante 10 anos, a instalação funcionou de modo descontínuo devido a uma série de dificuldades atribuídas ao pouco conhecimento do minério. Em outubro de 1995 houve a paralisação definitiva das atividades de lavra. Em dezembro do mesmo ano, foram paralisadas as atividades de tratamento químico de minério de urânio (CIPRIANI, 2002).

Desde 1997, a empresa está em fase de descomissionamento e recuperação ambiental (SIQUEIRA, 2013). Desde então, a INB busca obter licenciamento para produção de terras raras a partir da monazita, por meio da utilização de ácido sulfúrico, com vistas ao aproveitamento das instalações do CIPC. Contudo, o IBAMA condicionou o licenciamento destas novas atividades industriais ao início da remediação das áreas da mina, bota-foras e usina do CIPC. Somado a isso, a CNEN exigiu a construção de um novo sistema de gerenciamento de rejeitos como condicionante para a licença de novas atividades no local, cujo processo de licenciamento foi iniciado em 2002.

Em fevereiro de 2004, o IBAMA, juntamente com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), firmou um Termo de Referência para Elaboração e Apresentação do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) com a INB (FLÔRES, 2006), formulado a partir de estudos nas áreas de hidrologia, geoquímica, hidroquímica e radioproteção, realizados com o objetivo de definir as obras a serem efetuadas e as ações de recuperação ambiental que devem ser desenvolvidas na unidade (INB, 2018).

Atualmente, a mina conta com um sistema de represas e lagos para tratamento dos efluentes gerados durante a operação e das águas de infiltração das pilhas de rejeitos atuais (MURTA *et al.* 2008).

Existem oito pilhas de rejeitos (BF), sendo as BF-4 e BF-8 o resultado da exploração do minério de urânio (FERNANDES, 1997). Essas pilhas foram dispostas no divisor de

drenagem das duas bacias hidrográficas principais, rio Verde e rio das Antas, e então removidas, respectivamente, sobre o vale e leito dos córregos da Consulta e Cercado (SOUZA *et al.*, 2013).

O principal passivo ambiental existente na mina Osamu Utsumi é a drenagem ácida de mina (DAM). A exposição de minerais sulfetados a condições oxidantes com presença de água e oxigênio faz com que esses íons em contato com a água formem ácido sulfúrico.

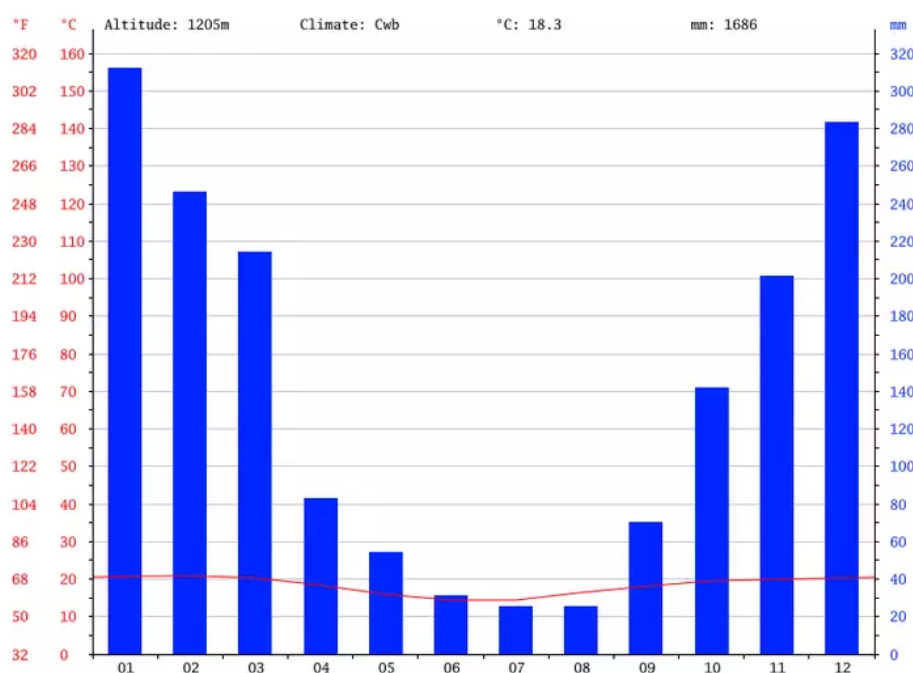
O efluente resultante possui baixo pH, altas concentrações de sulfato e cátions metálicos em concentrações superiores àquelas normalmente encontradas em ambientes naturais, uma vez que a presença de ácido sulfúrico favorece a dissolução desses compostos (DE MELLO *et al.*, 2014). A pirita (FeS_2) é um mineral abundante e associado a mineralização de urânio na área de estudos. Lançado como material estéril nos botaforas, este mineral é o principal agente formador de drenagem ácida (FERNANDES *et al.*, 1998).

Este efluente atualmente é coletado em tanques por fluxo gravitacional e bombeado para a cava da mina, seguido do redirecionamento dos fluídos para uma estação de tratamento de água. O tratamento consiste na adição de cal hidratada para elevação do pH e floculante para precipitação de radionuclídeos e metais pesados. Após o tratamento, as águas são lançadas no ambiente e o resíduo é estocado na cava da mina, que hoje representa um grande reservatório de água ácida (MURTA *et al.*, 2008).

3.2. Clima e fisiografia

O CIPC está instalado em uma região de clima tropical de altitude, com temperatura média anual de 18°C. A mínima pode chegar abaixo de 0°C e a máxima em torno de 30°C. A estação chuvosa ocorre no período compreendido de novembro a março (Figura 4). Os meses de abril a outubro são caracterizados por forte estiagem e baixas temperaturas relativas. A precipitação anual média é de 1700mm, e 82% deste total ocorre durante a primeira estação (FAGUNDES, 2005).

Figura 4 - Distribuição anual da taxa de precipitação, baseada nas médias mensais.



Fonte: Franklin (2007).

Quanto à geomorfologia, o maciço alcalino de Poços de Caldas está inserido no contexto do Planalto Atlântico. A altitude média em seu interior é de 1300m, enquanto que na região circundante é de até 800m (CHRISTOFOLETTI, 1973).

O Planalto de Poços de Caldas é limitado a SE e ENE pela Serra da Mantiqueira e, a Oeste, pela depressão da Bacia do Paraná. Morfologicamente, é apresentado como unidade individualizada, delimitado por um anel quase completo devido à ascensão do magma nefelítico na periferia do maciço ao longo de fendas circulares (ELLERT, 1959; CHRISTOFOLETTI, 1973).

O dique anelar que circunda o planalto é saliente na topografia em três quadrantes: norte, oeste e sul, sendo que no quadrante leste não há expressão morfológica do anel de tinguaito (CHRISTOFOLETTI, 1973).

A área de estudos está situada no divisor de águas de duas bacias hidrográficas: a bacia do ribeirão das Antas e a bacia do rio Verde, responsáveis por cerca de 70% e 20% da drenagem da região, respectivamente (FAGUNDES, 2005). Entre os principais rios da região estão o rio Pardo, tendo como afluentes o ribeirão das Antas, o rio Verde e o rio Taquari, no contexto da bacia hidrográfica do rio Grande (IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das águas).

3.3. Hidrogeologia Local

A área de estudo está inserida em um contexto de aquífero cristalino fraturado, uma vez que não existem aquíferos granulares naturais de importância na região (CRUZ E PEIXOTO, 1989). Os mesmos autores classificam as águas subterrâneas em três grupos, a partir de suas origens: zona aquífera rasa, zona aquífera intermediária e zona aquífera de circulação profunda. As duas primeiras são referentes a águas exploradas por poços tubulares, e atingem até 200 m de profundidade. Já a última zona, corresponde a águas termais associadas a três famílias de falhas abertas de direções N14 E, N50 E e E-W.

O pH médio dos canais fluviais na área do complexo é de 6,5 (CRUZ e PEIXOTO, 1991). Dentro das dependências da mina, os valores de pH apresentaram uma média de 3,7 e caracterizam, com a alta concentração de metais, o processo de drenagem ácida (FERNANDES E FRANKLIN, 2001).

O trabalho de Holmes *et al.* (1992) caracteriza as zonas de acordo com suas características físico-químicas, como visto a seguir.

Na zona aquífera rasa, a percolação das águas em um manto de alteração proveniente do intemperismo das rochas basais produz uma interação química entre os minerais ali presentes, principalmente pirita, o que faz com que o ambiente se torne cada vez mais redutor, caracterizando uma frente redox. As águas subterrâneas dessa zona são classificadas como bicarbonatadas, com baixas concentrações de Cl^- e $(\text{SO}_4)^{2-}$, além de teores significativos de K^+ , Na^+ , Ca^{2+} e ^{222}Rn . O pH da zona é ligeiramente ácido, da ordem de 5,4 a 6,9.

A zona intermediária apresenta pH neutro a levemente alcalino, da ordem de 6,2 a 8,4. Também apresenta águas bicarbonatadas, com teores significativos de álcalis dissolvidos.

Já a zona aquífera de circulação profunda apresenta águas hipertermais, alcalinas, bicarbonatadas sódicas e sulfurosas, com pH alcalino, entre 9,6 e 9,8. Possui concentrações maiores de carbonatos, sódio, sulfetos e fluoretos dissolvidos, em detrimento da concentração de sulfato, que é muito baixa, devido à ausência de oxigênio em decorrência da maior profundidade, o que impede a oxidação dos sulfetos.

Os mesmos autores afirmam, ainda, que as atividades mineiras ocasionaram acentuadas mudanças na dinâmica subterrânea local, como alteração dos fluxos de águas subterrâneas mais antigas e drenagem superficial, além de alteração na topografia circunscrita, através da remoção de vales e interflúvios e consequente rebaixamento do

lençol freático, o que favoreceu a interceptação de águas subterrâneas na área da cava da mina.

O material removido da cava foi depositado em pilhas de estéreis (bota-foras), localizados nos vales e encostas adjacentes, bem como na cava da mina (CIPRIANI, 2002). Essas pilhas se assemelham a aquíferos porosos, nos quais a granulometria grosseira dos estéreis resulta em uma alta porcentagem de macroporos e, por conseguinte, em uma baixa porcentagem de poros pequenos, o que provê uma alta permeabilidade.

Uma vez que a pilha de estéril é construída, passa a ser parte do sistema hidrológico local e está sujeita à infiltração de águas pluviométricas ou influência de algum corpo hídrico local, além de escoamento superficial (*“run-off”*) sazonal (FRANKLIN, 2007).

A heterogeneidade provocada pela ampla variação granulométrica pode fazer com que dentro da pilha existam áreas com diferentes conteúdos de água, o que possibilita a existência de caminhos de fluxo preferenciais.

O sistema de aquífero poroso da mina também é constituído pelo manto de intemperismo decorrente da alteração da matriz rochosa aflorante na área, favorecida principalmente pelo clima úmido da região.

Na Mina Osamu Utsumi, o aquífero fraturado local ocorre sotoposto ao aquífero poroso formado pelas pilhas de estéreis, e é constituído por rochas potássicas existentes na área.

3.4. Geologia Regional

O Complexo Alcalino de Poços de Caldas (CAPC), situado nos limites dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, ocupa uma área de 800 quilômetros quadrados, e é considerado o maior complexo alcalino da América Latina e um dos maiores do mundo. Abrange parte dos municípios de Poços de Caldas, Caldas, Andradas e Águas da Prata. Possui forma ligeiramente elítica, com o eixo maior, de 35 quilômetros, no sentido NE-SW e o menor, com 30 quilômetros, no sentido NW-SE (ELLERT, 1959). Geologicamente, está inserido no contexto do Maciço de Guaxupé (ALMEIDA *et al.*, 1976), nos limites da Bacia Sedimentar do Paraná e das adjacências da Serra da Mantiqueira (ELLERT, 1959), na porção centro-oeste do lineamento magmático Cabo Frio (LOUREIRO E SANTOS, 1988).

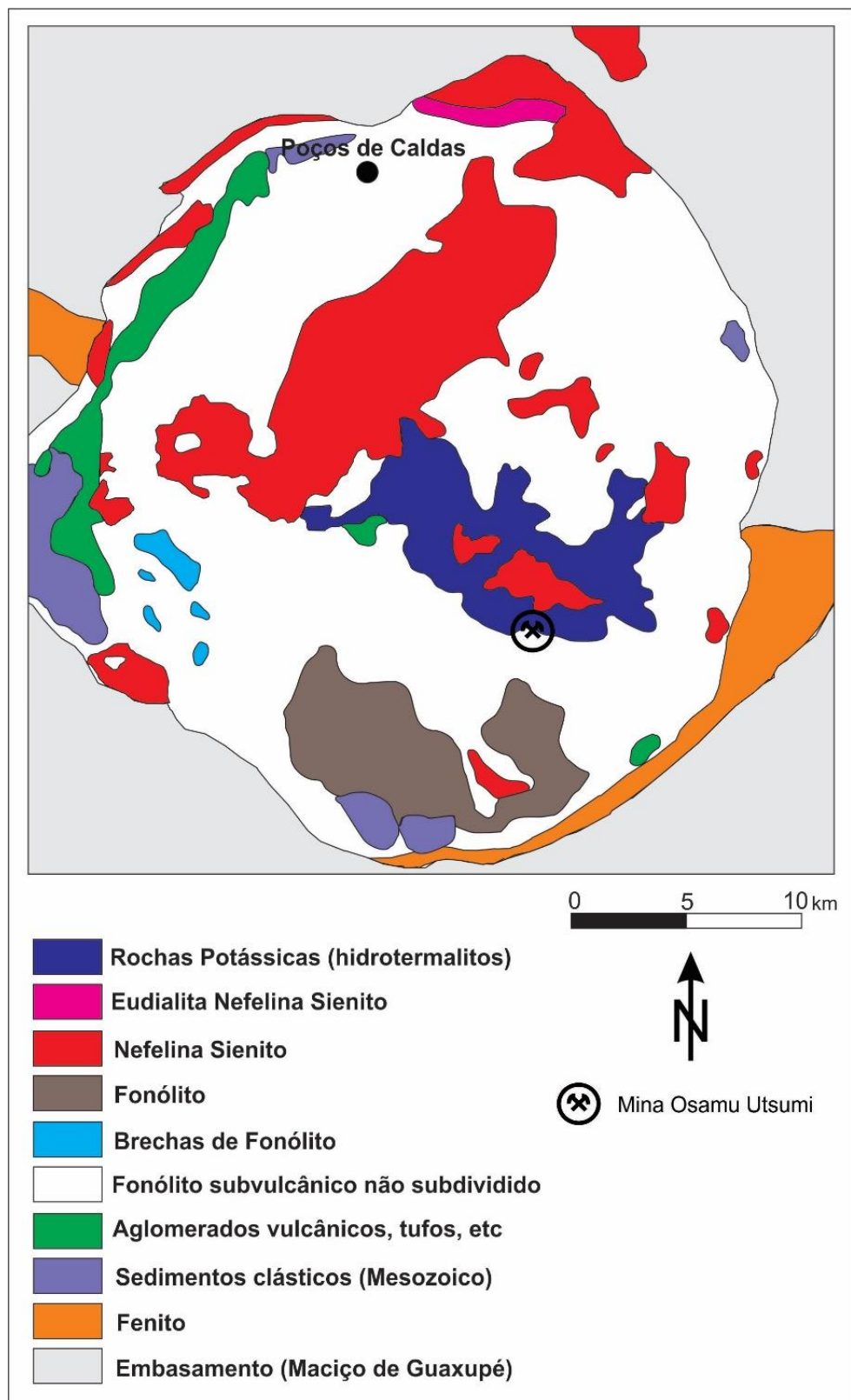
O trabalho de Ellert (1959) descreve que as rochas que compõem o Complexo Alcalino de Poços de Caldas (CAPC) são predominantemente efusivas e hipoabissais

(ankaratritos, lava fonolítica, tinguaíto e fonolito, brecha de tinguaíto e nefelina sienitos), rochas plutônicas (foiaíto, lujaurito e chibinito), além de rochas vulcanoclásticas (brechas e tufos). Adicionalmente, granitóides, gnáisses e os sienitos do Maciço Pedra Branca precambrianos complementam o conjunto de litotipos encontrados na região (ALVES, 2003). Diabásio e rochas sedimentares areníticas e arenito-carbonáticas de posição estratigráfica indefinida, atribuídas à Formação Botucatu também afloram na área (ELLERT, 1959).

O CAPC está inserido numa complexa evolução geológica, registrado pela série de eventos tectônicos e magmáticos que resultaram da abertura do Oceano Atlântico (ZANLÁN E OLIVEIRA, 2005). As intrusões alcalinas estão relacionadas a ativações da Plataforma Sul-Americana que, de acordo com o trabalho de Almeida *et al.* (1976), são associadas à fragmentação do supercontinente Gondwana e ruptura dos continentes sul-americano e africano.

Ainda, segundo Loureiro e Santos (1988), o complexo apresenta uma relação genética com o *trend* de falhas profundas do Arqueano, mascaradas no Ciclo Brasileiro (Neoproterozoico) e reativadas durante o Mesozoico. Fraenkel *et al.* (1985) mapeou dois sistemas principais de falhamentos no CAPC, o primeiro (N60W) relacionado à tectônica regional, reativado, em parte, durante o soerguimento do maciço, e o segundo (N40E), resultante da formação da caldeira (Figura 5).

Figura 5 - Mapa geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, com detalhe para a área de estudos.



Fonte: Capovilla (2001) modificado de Ellert (1957) e Fraenkel *et al.* (1985), modificado por Casagrande (2019).

A evolução do Complexo segue o modelo de caldeira vulcânica, proposto por Ellert (1959), com base em um modelo de 6 estágios, descritos a seguir:

1. Levantamentos, provavelmente escalonados por falhas, de blocos de embasamento cristalino após a sedimentação do arenito Botucatu;
2. Atividade vulcânica, com formação de brechas, tufos e derrames de lavas.
3. Subsidência da parte central;
4. Ascensão do magma nefelínico por fendas radiais e circulares e formação de fonólitos, tinguaítos e por diferenciação foiaítos;
5. Formação do dique anelar;
6. Intrusão de chibinito, lujauro e foiaíto.

Em resumo, Ellert (1959) interpretou o Complexo como expressões de um dique anelar, originado pelo soerguimento do embasamento por meio de falhas escalonadas, seguida de um longo período de atividade vulcânica-piroclástica.

No interior no Complexo existem duas formas de relevo. A primeira, em fase adiantada de peneplanização e, a segunda, limitada pelas duas maiores falhas do maciço, demonstrando o rejuvenescimento do relevo. É nesta segunda forma de relevo, com topografia mais acidentada, que ocorrem as principais mineralizações de urânio, molibdênio, tório e terras raras (FRAENKEL *et al.*, 1985).

O trabalho de Ellert (1959) descreve processos pós-magmáticos, associados à evolução do complexo, sendo eles:

1. Hidrotermais/autohidrotermais associados ao magmatismo akaratrítico;
2. Pegmatíticos a hidrotermais nos nefelina sienitos e hidrotermais nos fonólitos, em geral;
3. Hidrotermais específicos locais, potássicos e piritizantes, que deram origem às mineralizações de U-Th-ETR-Zr-F-Mo e pirita, em rochas nefelínicas e suas brechas;
4. Fenitização das rochas granito-gnaissicas pré-cambrianas regionais.

A alteração hidrotermal afeta um quarto do complexo, e está associada às mineralizações de Zr, U e Mo do planalto, predominantemente localizadas na porção centro-sul, na chamada “estrutura circular centro-leste”. A coloração típica da rocha alterada e do solo, regionalmente denominados de “rocha potássica”, é bege esbranquiçada a creme clara (GARDA, 1990).

3.5. Geologia local e metalogênese

Segundo o trabalho de Garda (1990), as alterações hidrotermais são consideradas manifestações tardias, e afetaram os litotipos do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, com evidente concentração na estrutura circular centro-leste, salientada pela geomorfologia da região.

A gênese dos depósitos é associada à intrusão de um corpo sienítico em rochas tinguaíticas (hospedeiras), com sucessivos processos de alteração hidrotermal, o que ocasionou intensa concentração de minérios metálicos (sulfetos), minerais de urânio e molibdênio, além de forte enriquecimento potássico nas rochas da região. Esses processos resultaram, também, em atividades explosivas que afetaram substancialmente as rochas hospedeiras, o que deu origem a grandes pacotes de brechas de caráter essencialmente vulcânico (CIPRIANI, 2002). Processos supergênicos posteriores favoreceram o enriquecimento de urânio secundário e ETR em camada oxidadas, consequência do avanço gradativo da frente redox, o que gerou dois estilos de mineralizações com características físicas e mineralógicas diferentes. O urânio formado é precipitado sob a forma de UO_2 e UO_3 (GARDA, 1990).

A mesma autora define que a mina Osamu Utsumi é caracterizada por mineralizações de zircônio, tório, urânio, molibdênio e elementos terras raras, dispostas em um corpo vulcânico brechado, de cerca de 80m de diâmetro, encaixado em nefelina sienitos e vulcânicas e sub-vulcânicas de composição fonolítica, marcadas por forte alteração potássica.

A jazida de urânio da mina pode ser descrita como resultado de processos superimpostos magmáticos, de alteração hidrotermal e supérgena (FRAENKEL *et al.*, 1985), ocorridos em fase de reativação vulcânica e que originaram as brechas vulcânicas, rochas hospedeiras dos minerais de minério (uraninita, pichblenda, brannerita, monazita) e dos minerais de alteração hidrotermal (ilita, caulinita, sericita e pirita) (FRANKLIN, 2007).

A mineralização de urânio foi dividida em três corpos distintos, denominados operacionalmente como corpos A, B e E (Figura 6 - GARDA, 1990).

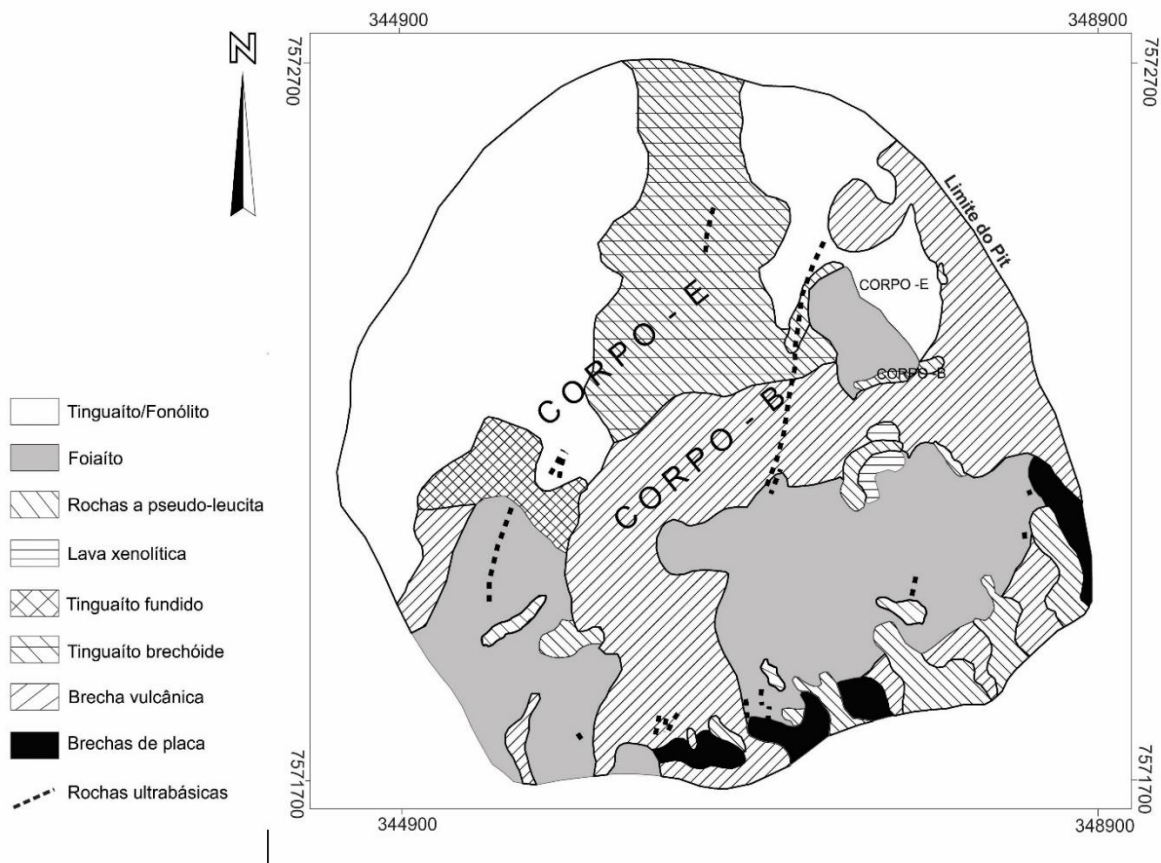
O corpo A apresenta teor médio de 600ppm, e é constituído por uma brecha vulcânica, composta por fragmentos da rocha encaixante tinguaítica. A matriz apresenta feldspato potássico e sericita como minerais dominantes, provenientes de massas

tinguaíticas/fenolíticas, além impregnações de pirita, fluorita, minerais de urânio, molibdênio e zircônio.

O corpo B, com teor médio de 680ppm, é caracterizado por mineralizações de óxidos negros de urânio associados a fluorita, pirita e minerais de molibdênio, geneticamente relacionadas à superposição de fenômenos hidrotermais, metóricos e tectônicos e dispostas de forma subhorizontal, na parte superior. Já na parte inferior, limitada por intrusão foiaítica, a mineralização primária possui origem hidrotermal. O corpo apresenta, também, pipes de brechas mineralizadas que cortam todo o seu comprimento.

Por fim, o corpo E, o qual possui teor médio de 1.000ppm, também apresenta gênese relacionada à superposição de fenômenos hidrotermais, meteóricos e tectônicos, cuja mineralização é distribuída subhorizontalmente.

Figura 6 - Esquema geológico da mina Osamu Utsumi.



Fonte: Magno Júnior (1985), adaptado por Casagrande (2019).

3.6. O bota-fora 8

A pilha de estéréis BF-8, localizada na porção noroeste do complexo da Mina Osamu Utsumi, ocupa uma área de 64,4 ha e contém 14,8 milhões m³ de estéril (CIPRIANI, 2002), e é subdividida em dois patamares: superior e inferior (Figura 8). A construção da pilha ocorreu por avanço de ponta de aterro (Figura 7), que consiste da deposição do material estéril proveniente da lavra diretamente sobre a crista da face do depósito, a partir do descarregamento de caminhões, sem o controle e compactação dos estéréis lançados (SOUZA, 1995).

Figura 7 - Desenho esquemático da construção por ponta de aterro.



Fonte: Nunes (2014).

A variação granulométrica no interior da pilha é extremamente alta, com a existência de frações desde argila até matacões.

A construção da pilha foi feita através do preenchimento da vertente do córrego do Cercado, que deságua na cabeceira do rio das Antas. A fim de evitar infiltrações pelo interior do BF-8, o canal do referido córrego foi desviado.

O trabalho de Murta (2006) infere que a pilha como um todo é bastante permeável, uma vez que há a existência de matacões métricos misturados a uma matriz bastante heterogênea, além de fissuras macroscópicas formadas por alívio de tensões, relacionado aos ciclos de secagem e umedecimento. Somado a isso ainda há ausência de feições erosivas significativas, principalmente no período chuvoso. Estudos feitos por Fagundes (2005) no bota-fora 8 corroboram essa informação, através de dados de altas taxas de infiltração, o que contribui para formação de drenagem ácida no local.

O estéril utilizado na construção do BF-8 é proveniente da exploração dos corpos A e E, cuja litologia é composta por fonolitos e tinguaitos (SOUZA, *et al.*, 2013).

As análises mineralógicas por difratometria de Raios X evidenciam principalmente a presença de ortoclásio, muscovita e, em menor proporção a caulinita, como componentes majoritários da pilha (SOUZA, *et al.*, 2013). A pirita, mineral responsável pela geração de drenagem ácida, não foi detectada pelo método em questão. Porém, segundo o trabalho de Souza e Sánchez (1996), o mineral ocorre no local de forme disseminada, em porcentagens menores que 0,2 do total da rocha e com tamanho aproximado de 8mm, o que confere reatividade química intermediária ao mesmo.

Figura 8 - Patamares superior e inferior da pilha de estéreis BF-8.



Fonte: autoria própria

4. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

4.1. Drenagem ácida de mina

As operações mineiras, principalmente aquelas que compreendem minerais sulfetados, constituem um ambiente propício para a geração de DAM, uma vez que envolvem movimentação de grande quantidade de massa. As atividades de decapeamento, escavação, desmonte e disposição de rochas, comum nesses empreendimentos, alteram a permeabilidade do maciço. Por conseguinte, há o favorecimento da percolação de água no meio, além do aumento da área superficial e exposição do material reativo ao oxigênio, antes inserido em contexto redutor. Outro fator comum em minerações que contribui para a geração de DAM é o rebaixamento do lençol freático, uma vez que também expõe a área ao oxigênio.

Assim, em termos gerais, o processo de geração de DAM ocorre com a oxidação de minerais sulfetados na presença de água e bactérias (*T. Ferrooxidans*) que funcionam como catalisadoras do fenômeno, decorrente da exposição desses minerais a condições atmosféricas. Como resultado, há a formação de ácido sulfúrico e elevadas concentrações de metais dissolvidos (CARVALHO E FERREIRA, 2000).

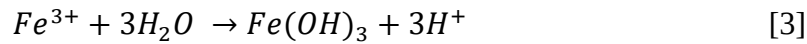
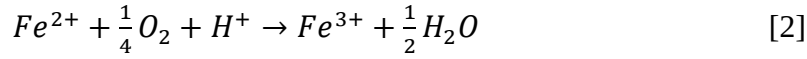
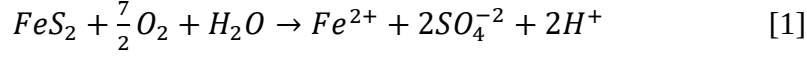
A DAM, em ambientes de mineração, é caracterizada por baixos valores de pH, altas concentrações de sulfato e cátions metálicos em concentrações superiores àquelas normalmente encontradas em ambientes naturais (DE MELLO *et al.*, 2014).

A pirita (FeS_2), devido a sua abundância na crosta terrestre, é comumente o agente propulsor de drenagens ácidas (FRANKLIN, 2007). As definições utilizadas no processo de mineração caracterizam como estéril o resíduo descartado durante a fase de lavra, geralmente disposto em pilhas ou bota-foras (CHAMMAS, 1989).

No contexto da mina de urânio Osamu Utsumi, a pilha de estéril BF-8 é tida como fonte de DAM, visto que seu interior possui quantidades significativas de pirita. O bota-fora atua como um aquífero poroso granular, o que, além de favorecer, acelera o processo de geração de DAM, através da percolação de água em seu interior.

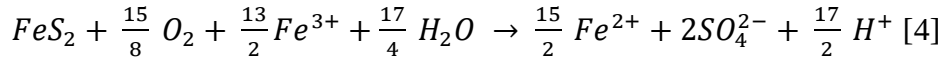
O ácido sulfúrico gerado no processo solubiliza metais pesados através do rebaixamento do pH, como o urânio, presente nas rochas e solos locais. A drenagem promove então o transporte desses metais, que podem atingir mananciais superficiais e até superfícies freáticas (CARVALHO E FERREIRA., 2000).

Segundo o trabalho de Kleinmann *et al.* (1981), existem basicamente duas hipóteses para explicar a oxidação da pirita. A primeira leva em consideração que o processo tem início com a oxidação do mineral (equação [1]):



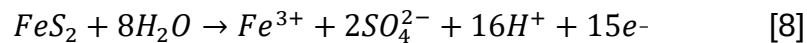
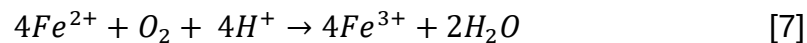
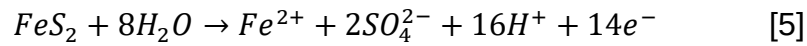
A etapa de oxidação do ferro (equação [2]) é considerada limitante do processo, pois ocorre lentamente em meio abiótico. A equação [3] mostra a formação de hidróxidos de ferro que favorecem ainda mais a acidez das águas.

Em valores de pH próximos ou inferiores a 3, a hidrólise (equação [3]) praticamente não ocorre. Assim, aumenta a concentração de Fe^{3+} no meio, que oxida a pirita residual do sistema de acordo com a seguinte equação (equação [4]):



Dessa forma, o Fe^{3+} é reduzido a Fe^{2+} , e pode entrar novamente no ciclo de geração ácida. Esse processo torna-se então um ciclo contínuo capaz de acelerar as reações e gerar grandes quantidades de acidez.

Outra proposta sugere a oxidação de pirita na ausência de O_2 :



A reação inicial (equação [5]) ocorre na ausência de O_2 , sendo que as equações de [6] a [8] representam as semirreações de oxidação da pirita pelo processo conhecido como eletroquímico.

A equação [4] indica que Fe^{3+} pode ser o principal oxidante da pirita. Assim, embora a concentração de O_2 no meio possa controlar a semirreação de redução (equação [7]), os principais passos determinantes da velocidade de reação não precisam necessariamente envolver O_2 .

A geração de DAM na Mina Osamu Utsumi está alinhada aos processos descritos acima, e possui como principais fontes de geração as pilhas de rejeitos bota-fora 4 (BF-4) e bota-fora 8 (BF-8), além da própria área da cava da mina.

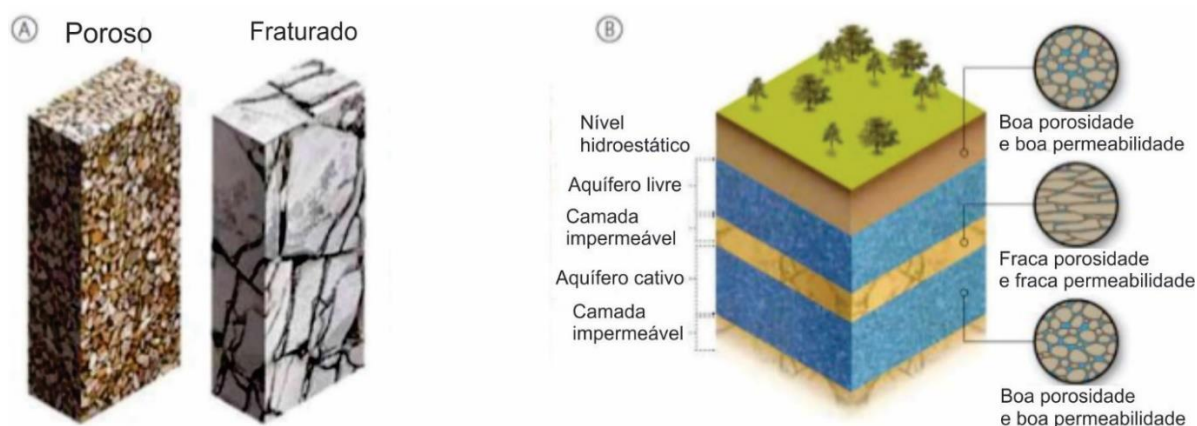
O tratamento e manutenção das águas consiste no bombeamento para a estação de tratamento de águas (ETA) da mina, onde é adicionada cal hidratada para elevar o nível de pH, e floculantes, que auxiliam na etapa de separação sólido-líquido (MURTA *et al.*, 2008). Esse procedimento possui um elevado custo e, no período entre 1994 a 2001, a INB gastou aproximadamente US\$ 1,2 milhões somente em insumos (CIPRIANI, 2002). É estimado que o processo de geração de DAM ainda perdure por séculos, o que torna a manutenção desses custos proibitiva.

4.2. Sistemas Aquíferos

Em hidrogeologia, aquífero é considerado uma unidade geológica capaz de armazenar e transmitir água, além de fornecê-la em quantidade economicamente significativa, ou seja, como fonte de abastecimento (FERRIS *et al.*, 1962). Dessa forma, é necessário que haja porosidade e permeabilidade suficientes para o armazenamento de água, bem como espaços vazios de dimensões propícias capazes de garantir a propagação da mesma, a partir da ação de um diferencial de pressão hidrostática.

A classificação dos aquíferos é fundamentada nas propriedades geológicas destes sistemas, e levam em consideração a posição geológica do aquífero e a porosidade das rochas que compõem o mesmo. Dessa forma, os aquíferos podem ser classificados como porosos, fraturados e cársticos. Serão abordados, neste estudo, os aquíferos porosos e fraturados (Figura 9).

Figura 9 - Esquema de aquífero poroso e aquífero fraturado.



4.2.1. Aquífero Poroso

Ocorre em rochas sedimentares consolidadas, sedimentos não consolidados e solos arenosos, decompostos *in situ*, nos quais a água fica retida nos espaços entre os grãos constituintes (porosidade intergranular). O fluxo nesse meio pode ser explicado através do princípio dos vasos intercomunicantes e pela Lei de Darcy, que elucidam o movimento de fluidos em meios porosos, em função do potencial hidráulico do sistema (FEITOSA E MANOEL FILHO, 2000).

4.2.2. Aquífero Fraturado

Ocorrem em formações geológicas que apresentam fraturas mais ou menos contínuas, como rochas ígneas e metamórficas. As rochas cristalinas são caracterizadas por apresentarem porosidade primária muito baixa, porém podem adquirir permeabilidade secundária de acordo com o grau de intemperismo ou faturamento. São denominadas “rochas fraturadas” ou “rochas duras” (NEVES, 2005).

As fraturas são os condutos através dos quais o fluxo de água subterrânea percola através do maciço rochoso, uma vez que a matriz da rocha é considerada praticamente impermeável. O fraturamento é considerado o fator mais decisivo para a circulação de água em rochas de baixa porosidade primária, em que o fluxo é influenciado pela densidade, conectividade e abertura das fraturas (FERNANDES, 1997), além da direção e mergulho dos planos de descontinuidade. As fraturas são geradas em resposta à deformação rúptil e dependem do comportamento geomecânico das rochas submetidas a esforços mecânicos impostos por eventos tectônicos, alívio de pressão, compressão, entre outros mecanismos (FANTI, 2015).

Uma rocha fraturada é heterogênea e anisotrópica por natureza. Mas, dependendo da escala de trabalho, o meio fraturado pode ser considerado como um meio contínuo ou como um meio descontínuo (CUSTODIO E LLAMAS, 1996). A abordagem de meio descontínuo, na qual é analisada a hidráulica do fluxo de fraturas individuais, é considerada a mais adequada, pois é constatado que algumas fraturas individuais ou zonas de fraturas estreitas são muito mais condutoras e fornecem os caminhos preferenciais para a circulação e transporte de contaminantes (NOVAKOWSKI, 1995).

Segundo o trabalho de Fernandes *et al.* (2008), a condutividade hidráulica pode ser calculada para um grupo de fraturas planares e lisas pela equação (equação [1]) desenvolvida por Snow (1968) e denominada de lei cúbica:

$$K = \frac{\rho \cdot g}{12\mu} \cdot Nb^3 \quad [1]$$

onde ρ e μ são a densidade e viscosidade da água, g , a aceleração da gravidade, N , o número de fraturas por unidade de distância e b , a sua abertura. A equação acima não leva em consideração a rugosidade presente em fraturas encontradas na natureza e aplica-se aos casos nos quais a Lei de Darcy é válida (fluxo linear e laminar).

5. EMBASAMENTO DO ESTUDO

O emprego de técnicas geofísicas no contexto ambiental é bastante promissor, uma vez que possibilita investigações de grandes áreas de maneira indireta, com rapidez e a custos baixos. Essas técnicas são baseadas na caracterização de contrastes de propriedades físicas do ambiente geológico em relação à presença de substâncias poluentes, e atuam tanto na detecção de um quadro de contaminação como na determinação do contexto estrutural do meio investigado.

Em Anterrieu *et al.* (2010), os autores utilizaram o método da Eletrorresistividade em conjunto com métodos de análises químicas e condutividade eletromagnética em profundidades diferentes da pilha de estéreis de uma mina polimetálica. Os resultados mostraram que as regiões de baixa resistividade exibidas nos modelos 2D eram justamente as zonas em que havia concentração de pirita, relacionadas à geração de DAM.

Outro trabalho relacionado à dinâmica hidrogeológica e geração de DAM em pilha de estéreis é o de Casagrande *et al.* (2018). Os métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida foram aplicados em conjunto como ferramenta para a detecção de zonas de geração de drenagem ácida de mina na pilha de estéreis BF-8 da Mina Osamu Utsumi. O artigo reafirma a eficiência do emprego de técnicas geoeletricas em pilhas de estéreis de mineração na detecção de zonas saturadas, devido à existência de águas subterrâneas altamente condutivas, o que ocasiona alto contraste do meio. Do mesmo modo, os autores ressaltam a eficácia do método de polarização induzida na determinação de corpos sulfetados nesse tipo de ambiente, tidos como área fonte da geração de DAM. A interpolação dos dados obtidos através dos respectivos métodos permitiu a identificação das zonas geradoras de DAM no interior da pilha de estéreis.

Numa tentativa de entender a dinâmica hidrogeológica das bancadas da cava da mesma mina, Targa *et al.* (2019) integraram dados de levantamentos estruturais e geofísicos. Os autores procuraram identificar os caminhos preferenciais de águas que infiltravam nas frentes de mineração através de fraturas a partir da análise de perfis 2D, gerados pelo método da Eletrorresistividade. Os resultados obtidos pelo método geofísico corroboraram aqueles adquiridos durante o levantamento estrutural, e auxiliaram a identificação de planos de fratura associados a zonas de baixa resistividade (saturadas). Os ensaios geofísicos também mostraram forte contraste entre as zonas saturadas, o que permitiu a diferenciação de zonas de águas naturais e águas ácidas.

Dito isso, a geofísica como ferramenta na detecção e caracterização do ambiente geológico é bastante eficaz, além de auxiliar na tomada de decisões que envolvem a remediação de passivos ambientais.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. Fundamentação do método

Historicamente, a geofísica possui utilização na caracterização do meio físico em subsuperfície por intermédio de aquisição indireta de dados em ambientes relativamente livres de impacto humano. Como exemplo disso, a determinação de alvos de exploração profunda, como mineralizações econômicas, depósitos de petróleo e gás ou novos recursos hídricos subterrâneos, vem sendo feita através de métodos geofísicos ao longo dos anos. Ao mesmo tempo, engenheiros civis, arqueólogos, cientistas do solo e outros têm aplicado os métodos geofísicos tradicionais a fim de detectar, classificar e descrever alvos geológicos ou antropogênicos na subsuperfície rasa (EVERETT, 2013).

Nos últimos anos, a quantidade de área terrestre inalterada pelo impacto humano diminuiu, o que aumentou a importância da administração responsável dos recursos subterrâneos da Terra (EVERETT, 2013). Dessa forma, a aplicação de métodos geofísicos no estudo de passivos ambientais é uma alternativa eficaz, tanto na gestão da água subterrânea como na caracterização, monitoramento e remediação de áreas contaminadas, com a vantagem de realização das investigações em áreas amplas de forma rápida e com custos relativamente baixos quando comparados às técnicas diretas convencionais (REYNOLDS, 2011).

Em ambientes concebidos a partir de pilhas de estéreis e rejeitos de mineração, a aplicação de métodos geoelétricos se mostra promissora, uma vez que o meio, em geral, apresenta águas subterrâneas altamente condutivas (CAMPBELL E FITTERMANN, 2000), o que permite a compreensão dos processos hidrogeológicos atuantes no meio.

À vista disso, a técnica geofísica de eletrorresistividade foi estabelecida na chamada pilha BF-8, da mina Osamu Utsumi, que será tratada como um aquífero poroso sobreposto a um sistema fraturado. Os ensaios visam compreender a dinâmica hidrogeológica local e áreas em que ocorre maior volume de DAM, com base na caracterização de contrastes das propriedades intrínsecas dos materiais (resistividade), em decorrência da alteração das propriedades físicas do meio natural pelos contaminantes.

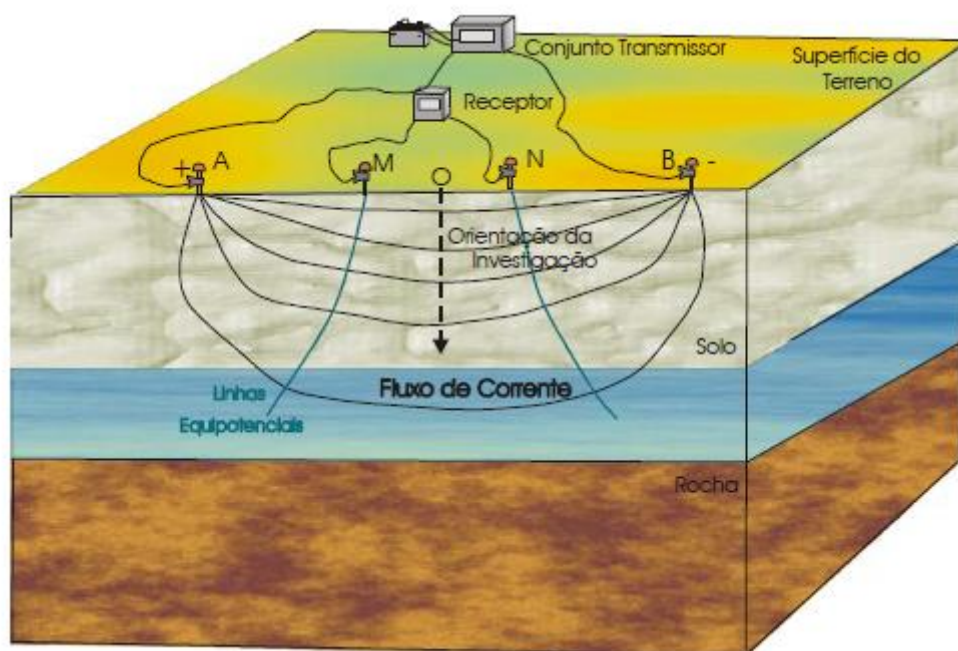
6.1.1. Método da Eletrorresistividade

O método da Eletrorresistividade (ER) é fundamentado na quantificação do parâmetro físico da *resistividade elétrica* (ρ) em subsuperfície, que designa a capacidade que um condutor tem de se opor à passagem de corrente elétrica (KEAREY, 2002). Os

valores de resistividade elétrica possuem ampla variação, uma vez que são intrínsecos a cada tipo de material que compõe o ambiente geológico.

O método consiste na aplicação de corrente elétrica I (amperes, A) diretamente no solo através de um par de eletrodos (A e B). A tensão resultante V (volts, V) é medida entre um segundo par de eletrodos (M e N) (Figura 10).

Figura 10 - Princípio do método da Eletrorresistividade.



Fonte: Oliveira *et al.* (2006).

Em meios homogêneos e isotrópicos, o valor da resistividade obtido corresponde à resistividade verdadeira do meio. Entretanto, os materiais que compõem o ambiente geológico são heterogêneos e anisotrópicos, e a existência de materiais com resistividades contrastantes causam perturbação nas superfícies equipotenciais. Desta forma, o modelo real apresenta superfícies equipotenciais diferentes das sugeridas pelos modelos ideais.

Dito isso, a resistência obtida é denominada de *resistividade aparente* (ρ_a), uma média ponderada das resistividades de cada um dos materiais presentes no pacote rochoso amostrado (KELLER E FRISCHKNECHT, 1966).

Com base na Lei de Ohm, é possível efetuar cálculos de resistividade aparente. A impedância da Terra é a razão entre a voltagem (ddp) aplicada por meio do par de eletrodos para o fluxo de corrente entre estes mesmos eletrodos. A impedância é então transformada em uma resistividade aparente ρ_a (ohm-metros, Ωm) (EVERETT, 2013).

Em resumo, o método da eletrorresistividade é principiado com a passagem de uma corrente elétrica de intensidade I pelo solo, transmitida por um par de eletrodos (A e B), conectado a uma fonte de corrente. É medida a diferença de potencial (ddp) entre dois eletrodos de recepção (M e N). É calculada, então, a resistividade aparente (ρ_a), dada pela equação [1]:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{i} \quad [1]$$

onde K é um fator que depende unicamente das posições de injeção de corrente e de medida do potencial, ou seja, do arranjo geométrico dos eletrodos, (KELLER E FRISCHKNECHT, 1966), dado pela equação [2]:

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

sendo AM, AN, BM e BN as distâncias entre os eletrodos.

Arranjos diferentes dos eletrodos permitem que a resistividade aparente seja determinada em diferentes profundidades e posições laterais (EVERETT, 2013). Um mapa da resistividade aparente plotada nesses locais é denominada seção. A seção é então invertida para obter uma seção de resistividade bidimensional (2D) do solo (subsuperfície rasa). Finalmente, é obtida uma interpretação geológica da seção de resistividade que incorpora, na medida do possível, qualquer conhecimento prévio baseado em afloramentos, suportando dados geofísicos ou de furo, e informações obtidas a partir de estudos de laboratório sobre a resistividade elétrica de materiais (LOKE, *et al.*, 2006).

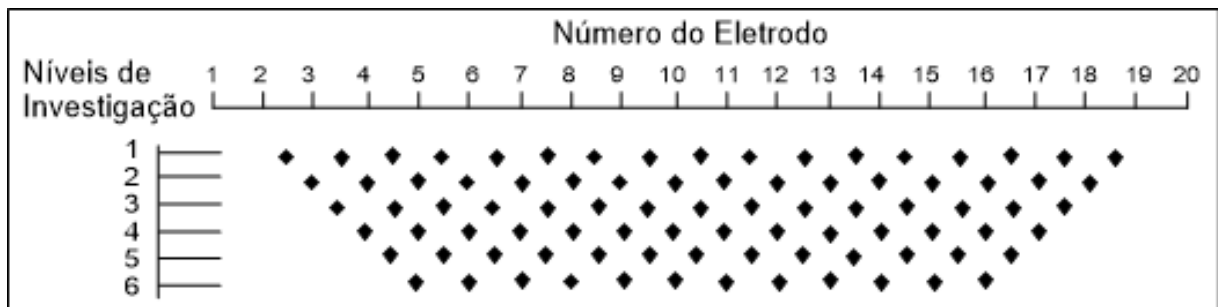
6.2. Técnica de aquisição

Devido à existência de sulfetos disseminados e meios saturados no interior da pilha de estéreis, além de grande contraste das propriedades físicas desses elementos e dos litotipos associados, o método de Eletrorresistividade (ER) foi aplicado. A utilização deste método visa a descoberta de direções de fluxos preferenciais existentes dentro do BF-8, além da compreensão dos sistemas hidrogeológicos atuantes na pilha de estéreis e no embasamento cristalino.

A técnica empregada para a aquisição dos dados foi a tomografia elétrica (TE) (Figura 11), que possui notória aplicabilidade para a investigação de estruturas 2D e

permite uma boa visualização do contraste lateral das medidas obtidas em relação às condições naturais do meio, a partir do parâmetro físico de resistividade. Esta técnica é baseada na utilização de arranjos de eletrodos (de corrente e de potencial), mantidos a uma separação pré-definida e deslocados ao longo do perfil desejado, o que culmina na geração de uma seção horizontal de resistividade por profundidade.

Figura 11 - Esquema do perfil de dados obtidos em um levantamento de tomografia elétrica.



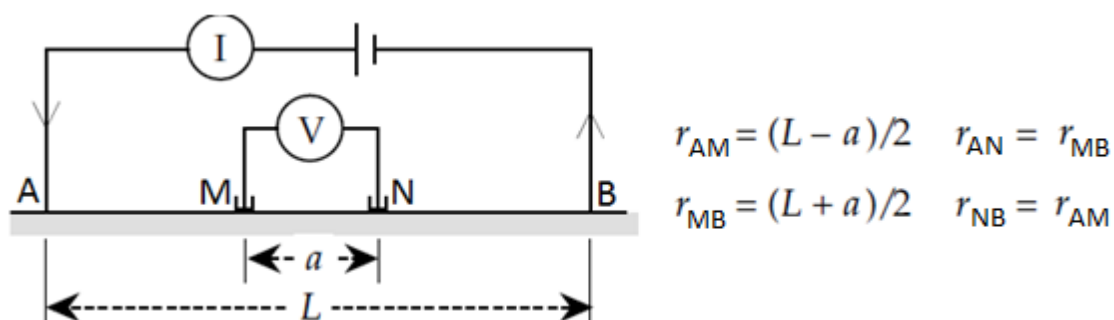
Fonte: Loke, 2003.

6.2.1. Arranjo

O arranjo utilizado foi o Schlumberger (Figura 12), também conhecido como Wenner-Schlumberger, cuja configuração dispõe de quatro eletrodos, dois de corrente (AB), separados por uma distância L e dois de potencial (MN), afastados por um intervalo a . Os eletrodos são dispostos linearmente sobre a superfície do terreno e simetricamente em relação ao centro do arranjo. Para a evolução em profundidade, a distância L é ampliada de forma simétrica em relação ao centro do arranjo, e a distância a é mantida fixa, o que caracteriza uma pequena distância entre os eletrodos MN em relação à separação aplicada aos eletrodos AB.

O arranjo Schlumberger foi empregado com base nas vantagens que apresenta, as quais consistem na movimentação de uma quantidade reduzida de eletrodos e, consequentemente, leituras menos afetadas por variações laterais, uma vez que os eletrodos de potencial são mantidos fixos. Além disso, o arranjo dispõe de uma grande densidade de leituras, que são menos susceptíveis a interferências causadas por ruídos indesejáveis, o que determina uma maior confiança na interpretação dos dados para terrenos não homogêneos (MUSSET & KHAN, 2000).

Figura 12 - Disposição dos pares eletrodos em arranjo Schlumberger.



Fonte: Lowrie (2007).

6.3. Aquisição de dados

Os dados geofísicos foram adquiridos em duas campanhas, efetuadas no mês de agosto de 2019, após a ocorrência chuvas pontuais na região. Foram definidas sete linhas de aquisição (Figura 13), sendo seis paralelas e uma inclinada em relação às demais, com espaçamento de 30 metros entre as mesmas e 5 metros entre eletrodos, localizadas no patamar superior da pilha.

Figura 13 - Vista geral da disposição das linhas aquisição dos dados geoeletricos.

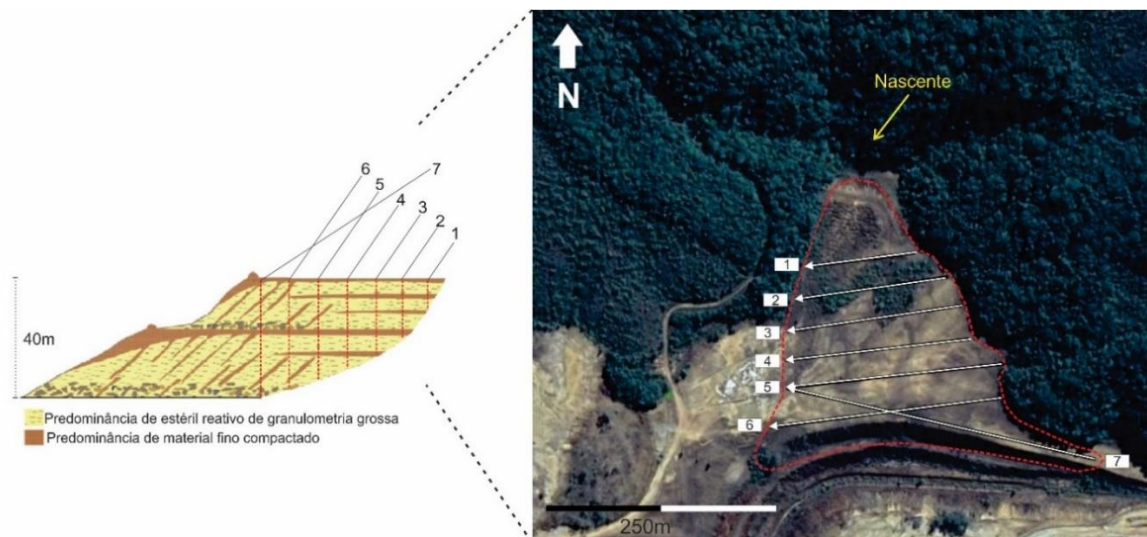


Fonte: autoria própria.

A região de abrangência das linhas foi definida com base na proximidade que a área delimitada (Figura 14) apresenta em relação à montante do vale, cuja nascente foi soterrada pelos estêreis durante a construção do bota-fora. Dessa forma, a área foi

estabelecida como provável zona de geração de drenagem ácida de mina, resultado da interação entre a água proveniente da nascente do vale e o interior do BF-8.

Figura 14 - Mapa de localização da área de estudo, com disposição do traçado das linhas geofísicas. À esquerda, esquema em perfil da profundidade abrangida por cada linha.



Fonte: Modificado de Google Earth.

O equipamento utilizado em campo foi um medidor de resistividade Terrameter LS da ABEM, de origem sueca, conectado a uma bateria (Figura 15E). Os eletrodos utilizados foram do tipo cerâmica não-polarizável (Figura 15A) em arranjo Schlumberger, uma vez que os ensaios permitiram a aquisição simultânea de dados de eletrorresistividade e polarização induzida.

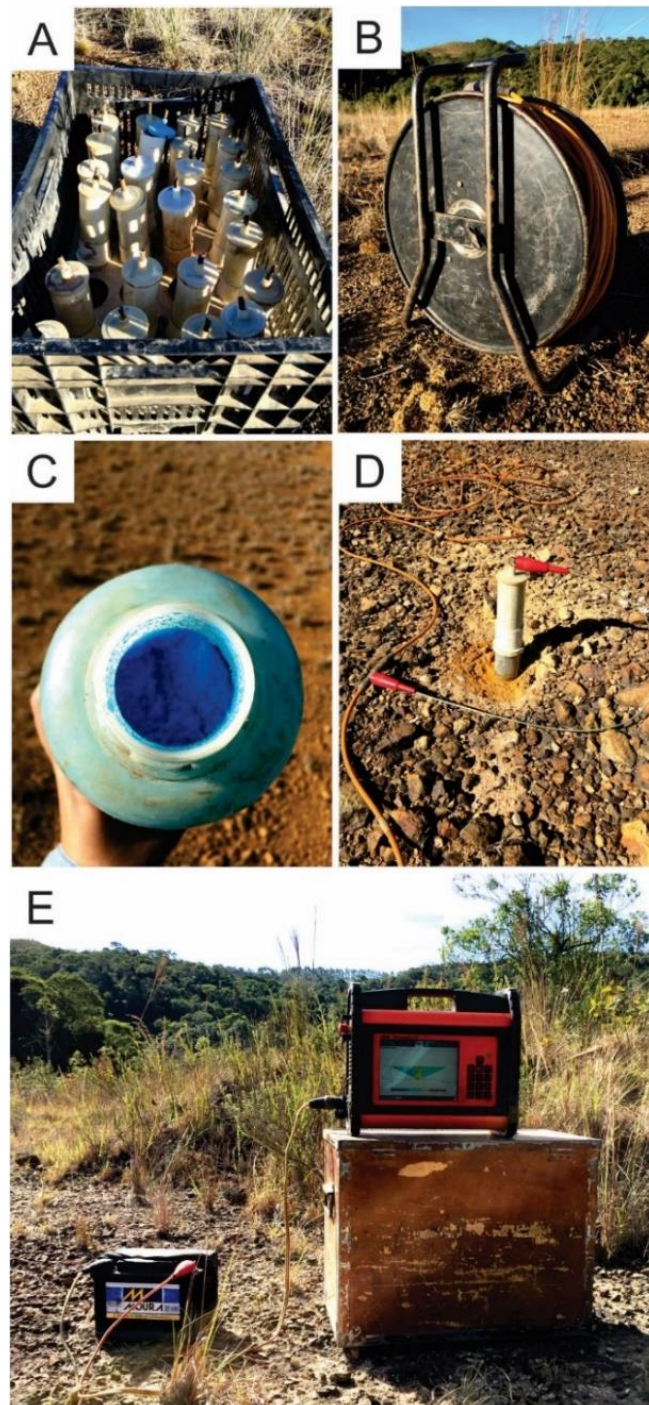
Porém, o presente trabalho irá tratar somente acerca dos dados de eletrorresistividade, uma vez que objetiva o reconhecimento de zonas saturadas em subsuperfície e sentido preferencial de fluxos de água subterrânea.

A organização das linhas teve início com a disposição do cabo transmissor de corrente elétrica (Figura 15B) no sentido pré-definido, seguida de pequenas escavações que possibilitam um melhor contato do eletrodo com o solo.

Os eletrodos foram preenchidos com uma solução aquosa de CuSO_4 (Figura 15C), a fim de inibir a indução de campo eletromagnético parasítico gerado pela passagem de corrente elétrica. Por fim, os eletrodos foram conectados ao cabo transmissor de corrente elétrica por garras (Figura 15D), permitindo o início da leitura pelo Terrameter LS. O equipamento possui 250 W de potência, corrente máxima de 2,5 A e resolução de $1 \mu\text{V}$ e permite aquisições automáticas por meio de configuração preliminar. Os parâmetros de

configuração para este trabalho foram: 1A de corrente, tempo de aquisição de 1,5 segundo, tempo de leitura após o corte de corrente (*delay time*) de 0,3 segundo e leituras em duas janelas de tempo com 0,1 segundo cada.

Figura 15 - A) Eletrodos de cerâmica não-polarizável, utilizados durante a etapa de aquisição de dados; B) Cabo de aquisição; C) Sulfato de cobre em estado sólido; D) Detalhe da montagem dos eletrodos de cerâmica, já preenchidos com a solução de CuSO_4 , conectados ao cabo de aquisição através das garras; E) Resistivímetro Terrameter LS da ABEM, conectado à bateria, efetuando as leituras em campo.



Fonte: autoria própria.

6.4. Processamento dos dados

O processamento dos dados adquiridos em campo foi efetuado por meio do *software* Res2Dinv, versão 3.53 (Geotomo Software). O programa possibilita o tratamento de um grande conjunto de dados em duas dimensões, resultando na geração de modelos de resistividade representativos de subsuperfície, a partir da utilização de técnicas como Modelo de Inversão e das variáveis de distância e profundidade.

O programa em questão utiliza o método de interpolação dos Mínimos Quadrados, a fim de obter uma melhor compatibilidade entre o modelo teórico e os dados coletados em campo, através da redução das diferenças dos valores de resistividade aparente definidos previamente nas pseudoseções, adquiridas por tomografia elétrica.

A subsuperfície terrestre é reconhecida pelo programa como blocos retangulares que possuem valores constantes para o parâmetro investigado, os quais podem ser posteriormente ajustados com base nas medidas de campo. A diferença entre os valores aparentes, calculados e medidos em campo, e os obtidos pelo modelo de blocos é expressa pelo erro RMS (*Root Mean Squared*) (LOKE E BARKER, 1996). O elemento “topografia” também é inserido na tabela, para configuração do relevo.

Em suma, os dados finais são apresentados sob a forma de seções 2D, a partir da conversão dos valores medidos em um modelo sintético do parâmetro. Ademais, as representações cromáticas adotadas no presente trabalho para os dados de resistividade são tonalidades quentes para altos índices e tonalidades frias para menores índices.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os modelos de inversão 2D para resistividade foram gerados com base no processamento dos dados geofísicos, com vistas à identificação de zonas contrastantes de baixa resistividade em subsuperfície e existência de possíveis zonas de acúmulo e direções de fluxos preferenciais. É importante salientar que a aquisição dos dados geofísicos foi efetuada durante o mês de agosto de 2019, considerado período de estiagem para a região de estudos.

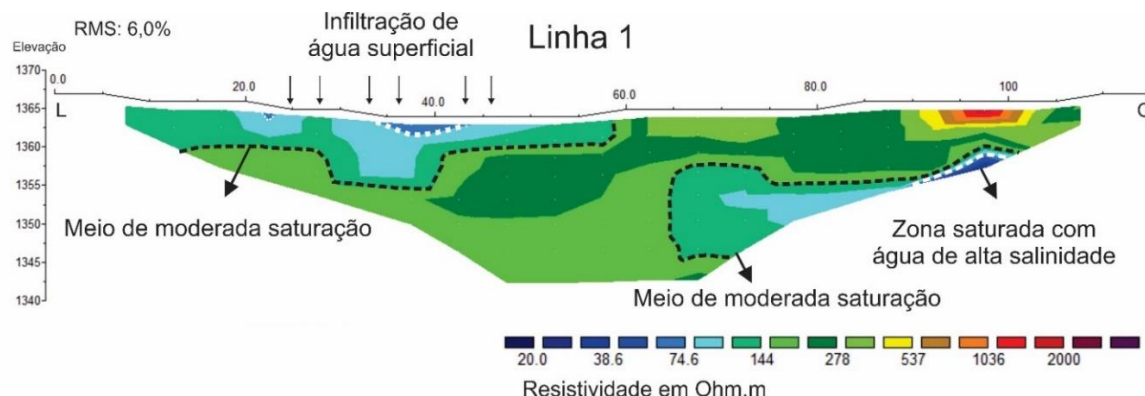
De forma geral, os valores obtidos possuem variação de 20 $\Omega.m$ a 2000 $\Omega.m$. As linhas apresentam extensão e alcance em subsuperfície variáveis, conforme o exposto no esquema da figura 14. A profundidade máxima atingida pelos ensaios foi de 70 metros, de modo que toda a espessura do estéril e topo do embasamento composto por rochas alcalinas fossem abrangidos durante a aquisição dos dados, dado que a altura máxima do BF-8 é de aproximadamente 40 metros na parte frontal.

Os valores de 20 $\Omega.m$ a 80 $\Omega.m$ indicam presença de água com uma quantidade variável de íons dissolvidos, objeto de interesse desse trabalho. Os valores mais próximos de 20 $\Omega.m$ apontam maior quantidade de sais dissolvidos, enquanto valores mais próximos de 80 $\Omega.m$ denotam menor concentração desses elementos, análogo aos valores de resistividade esperados para águas subterrâneas naturais. Valores entre 80 $\Omega.m$ e 150 $\Omega.m$ são referentes a locais que apresentam moderado grau de saturação. Intervalos acima de 150 $\Omega.m$ indicam tanto o maciço rochoso composto por rochas alcalinas, quanto os estéreis que compõem a pilha de rejeito, ambos com umidade decrescente de acordo com o aumento da resistividade.

A linha 1 está localizada na região mais à montante do vale. Consequentemente, cruza a porção mais rasa da pilha de estéreis e os pontos iniciais de infiltração de águas superficiais, devido à proximidade em relação à zona de nascente, segundo o apresentado no esquema da figura 14. Em relação às dimensões, possui comprimento de 100 metros e profundidade máxima de 17,5 metros.

A análise da Seção 1 (Figura16) permitiu a identificação de três zonas saturadas, a uma distância de 20m, 50m e 90m da origem da linha, respectivamente. As duas zonas mais próximas da origem apresentam valores de resistividade da ordem de 75 $\Omega.m$ e profundidade máxima de 7,5m. É provável que essa porção saturada rasa seja uma concentração de águas superficiais, oriunda do fluxo d'água proveniente da nascente. Também é possível que haja contribuição de águas meteóricas, fruto de chuvas recentes na região.

Figura 16 - Seção geofísica referente à linha 1.



Fonte: autoria própria.

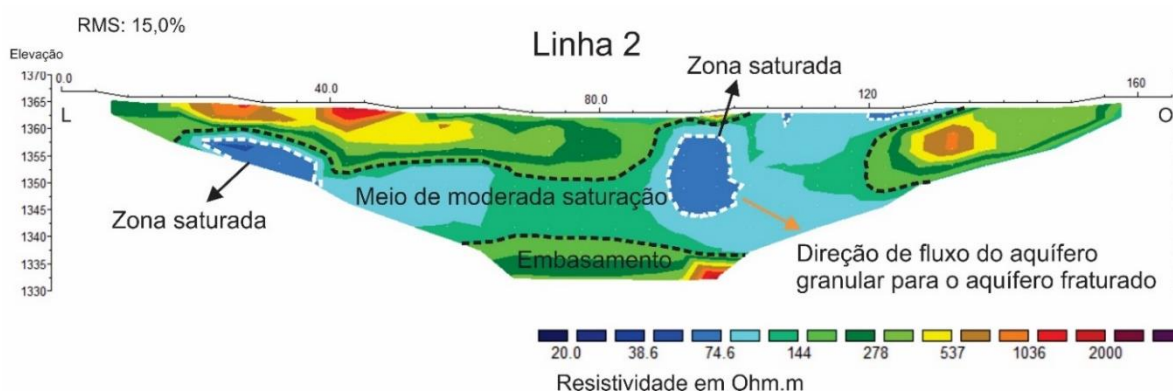
A terceira anomalia atinge profundidade de 10m, e possui valores de resistividade mais baixos, da ordem de 20 Ω .m, considerada água de elevada salinidade, resultado da interação água-minério.

Segundo Souza (1995) a construção da pilha ocorreu por avanço de ponta de aterro e, conseqüentemente, sem o controle e compactação do material lançado. O trabalho de Murta (2008) corrobora a heterogeneidade granulométrica dos estéreis que compõem o bota-fora 8.

A concentração das zonas saturadas na porção rasa da pilha pode ser explicada devido ao processo de deposição do material somado às características físicas do mesmo, o que promoveu determinado grau de segregação granulométrica no interior da pilha, devido à ação gravitacional, de modo o material mais fino fique concentrado no topo e granulometrias mais grosseiras perfaçam profundidades maiores (FRANKLIN, 2007). Diante disso, é esperado que a condutividade hidráulica na parte mais rasa da pilha seja menor em relação à base da mesma, o que gera caminhos de fluxos preferenciais no interior do bota-fora, corroborado através do modelo 2D em questão. Somado a isso, os equipamentos pesados que transitam sobre a pilha, como escavadeiras e tratores, promovem compactação do estéril mais fino, o que resulta em camadas densas e horizontais em meio à níveis mais grosseiros (ANTERRIEU *et al.*, 2006).

A linha 2 possui comprimento aproximado de 160m e profundidade máxima de 27,5m. Na Seção 2 (Figura 17), foi identificada uma zona de baixa resistividade que percorre toda a faixa central, a uma profundidade inicial de aproximadamente 5m e final de 25m, com valores de resistividade da ordem de 80 Ω .m a 144 Ω .m, destacada em preto.

Figura 17 - Modelo de inversão 2D referente à linha de aquisição 2.



Fonte: autoria própria.

Essa porção de moderada saturação pode ser interpretada como uma zona de fluxo preferencial remanescente, visto que os ensaios foram efetuados no período de seca da região de estudos. O caráter sazonal da nascente reflete diretamente no volume de água que infiltra no bota-fora, devido à variabilidade de vazões. No período chuvoso, é esperado que a área destacada na seção apresente maior saturação e, conseqüentemente, valores de resistividade menores.

A análise da Seção 2 também permitiu a constatação de que a zona saturada em questão ocorre tanto em meio poroso, quanto em meio fraturado. As águas subterrâneas que estão contidas no sistema granular exibem um formato horizontalizado e são limitadas pela interface do contato entre a base da pilha e o embasamento cristalino, evidenciado por valores de resistividade da ordem de 170 $\Omega.m$ a 280 $\Omega.m$. Porém, na extremidade esquerda da seção, são observados valores de resistividade da ordem de 80 $\Omega.m$ com uma forma verticalizada, que parecem possuir continuidade em níveis mais profundos, provavelmente uma infiltração para o sistema fraturado a partir do aquífero granular.

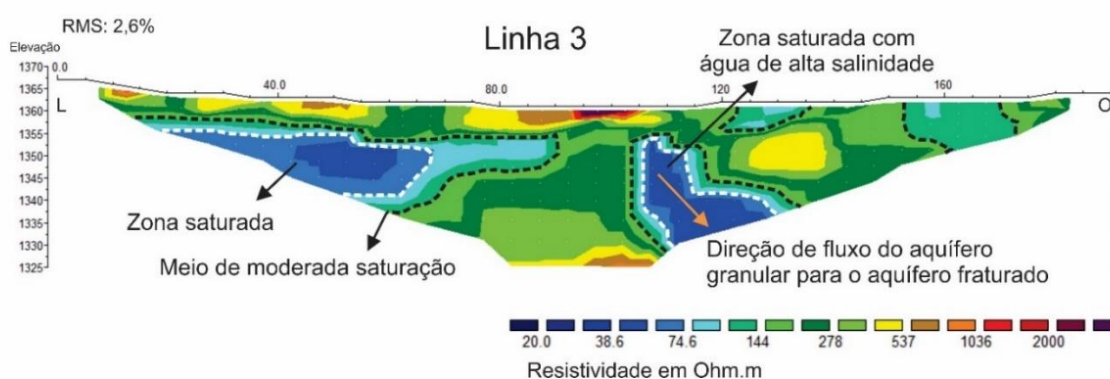
Também foi possível observar a existência de duas zonas de acúmulo no interior da porção de moderada saturação, destacadas em branco, com valores de resistividade mais baixos (70 $\Omega.m$). Essas zonas aparecem a uma profundidade de aproximadamente 5m e estão localizadas na extremidade esquerda, próxima à origem e a uma distância de 90m da mesma. Distanto cerca de 120m da origem, é possível observar, ainda, uma porção saturada rasa, que pode ser interpretada como a área de infiltração superficial originária do fluxo preferencial.

Essa configuração corrobora a hipótese de que, no período chuvoso, a zona de baixa saturação que ocorre na faixa central da seção seja mais proeminente, o que leva à

fusão das zonas de acúmulo acima descritas devido ao aumento da continuidade lateral das mesmas, e culmina na geração de um fluxo preferencial propriamente dito.

A linha 3 apresenta comprimento aproximado de 180m e atinge profundidade máxima da ordem de 37,5m. Na Seção 3 (Figura 18) é nítida a existência de duas zonas saturadas, ambas a uma profundidade inicial de 10m e evidenciadas por valores de resistividade que variam de 40 $\Omega.m$ a 65 $\Omega.m$.

Figura 18 - Seção referente à linha de aquisição 3.



Fonte: autoria própria.

A primeira ocorre na porção esquerda da seção, com início próximo à origem e comprimento final a uma distância de 70m desta. Atinge profundidade de aproximadamente de 25m e apresenta forma horizontalizada, decorrente, provavelmente, da interface entre estéril e maciço rochoso, o qual limita a infiltração de água devido à sua baixa porosidade primária.

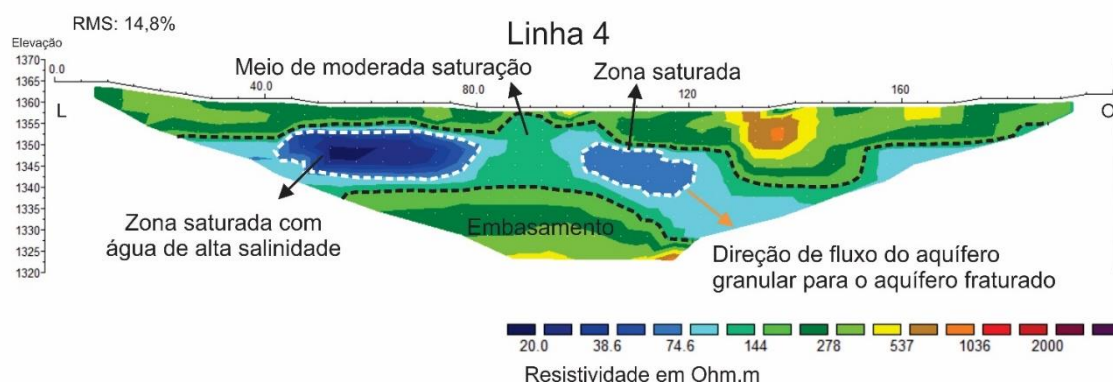
A segunda dista 105m da origem e exibe uma concentração maior de valores de resistividade da ordem de 40 $\Omega.m$ quando comparada à primeira, representando uma zona de alta salinidade. Possui formato verticalizado e continuidade em níveis mais profundos, provavelmente além da interface do contato com o embasamento cristalino. Sendo assim, ocorre propagação da água subterrânea por locais de maior permeabilidade, o que pode estar associado à existência de fraturas. Diante disso, é possível afirmar que há contribuição da água acumulada na base da pilha para o aquífero fraturado.

Entretanto, o contato entre o estéril e o embasamento é de difícil delimitação, em virtude da grande heterogeneidade dos materiais que compõem a pilha e devido à ausência de contraste dos parâmetros físicos.

A linha 4 possui comprimento de aproximadamente 90m e profundidade de 37,5m. A Seção 4 (Figura 19) apresenta similaridade com o exposto no modelo das linhas 2 e 3. É visível a presença do embasamento, o qual condiciona a suspensão da água

subterrânea, que ocorre como uma zona de moderada saturação na parte central da seção a uma profundidade de 7,5m e apresenta duas zonas de acúmulo em seu interior.

Figura 19 - Modelo de inversão 2D referente à linha de aquisição 4.

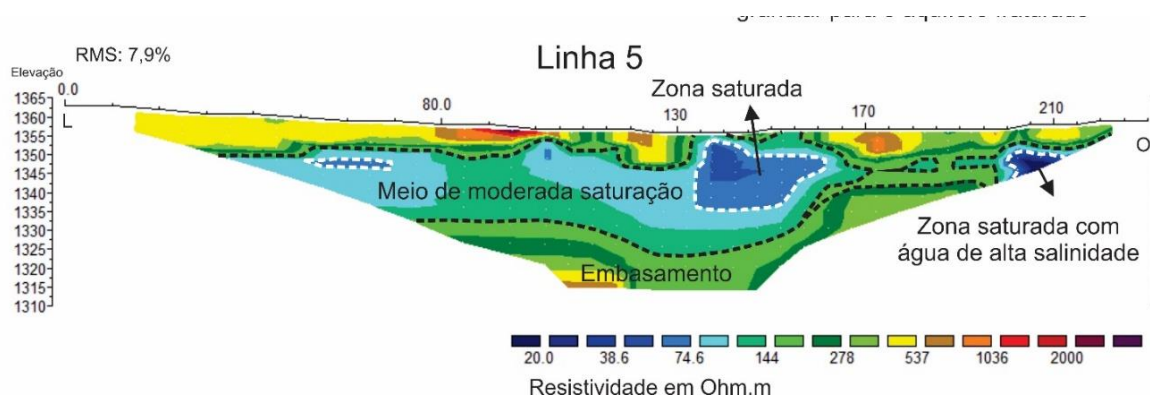


Fonte: autoria própria.

Distando cerca de 45m do início da linha e evidenciada por valores de resistividade entre 20 Ω .m e 30 Ω .m, é observada a primeira zona de acúmulo, com forma horizontalizada e águas de elevada salinidade. A uma distância de 100m da origem é observada a segunda zona de acúmulo, com valores de resistividade da ordem de 70 Ω .m e formato verticalizado. Essa segunda zona saturada parece atingir níveis mais profundos, o que sugere a ocorrência de infiltração para o aquífero fraturado a partir do sistema de aquífero granular por meio de fraturas, como observado nas seções anteriores.

A linha 5 apresenta comprimento de 220m e profundidade de 50m. A configuração da Seção 5 (Figura 20) também é semelhante ao exposto nas seções correspondentes ao modelo das linhas 2 e 3. É evidente a existência de uma zona de baixa saturação por toda faixa central da seção, a uma profundidade inicial de aproximadamente 5m e final de 30m, sustentada pelo embasamento cristalino.

Figura 20 - Seção referente à linha de aquisição 5.



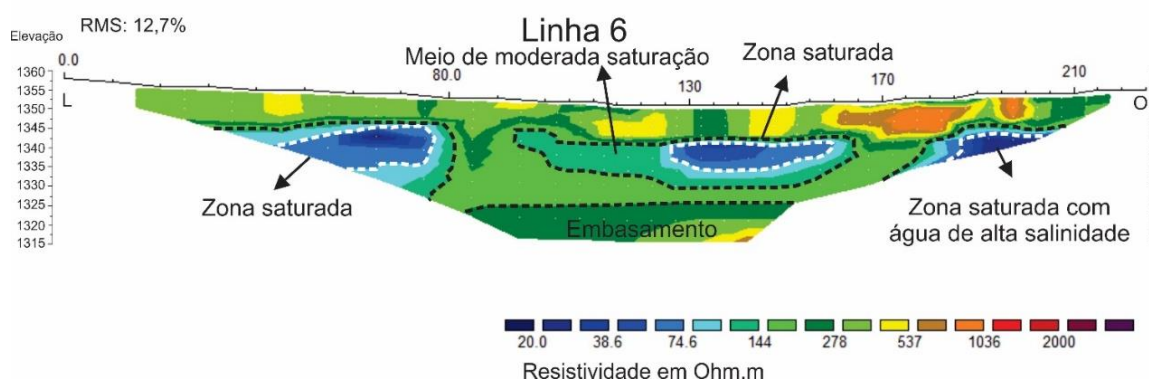
Fonte: autoria própria.

São reconhecidas duas zonas de acúmulo em seu interior, como observado nas seções acima, ambas com formato horizontalizado. A primeira dista cerca de 135m da origem da linha e apresenta valores de resistividade de aproximadamente 40 Ω .m. A segunda ocorre a uma distância de 200m do início da linha e é marcada por valores de resistividade da ordem de 20 Ω .m, perfazendo, assim, uma zona de águas com alta salinidade.

Na seção em questão, a profundidade do estéril é significativamente maior, sobretudo na distância 125m, onde a topografia do antigo vale atinge sua profundidade máxima com a geração de uma superfície côncava.

A linha de aquisição 6 possui 220m de extensão e atinge profundidade de 42,5m. A Seção referente à linha 6 (Figura 21) também exhibe a mesma configuração das seções acima descritas, sendo possível observar, novamente, a existência de uma zona de moderada saturação na faixa central, porém de forma mais segmentada quando comparado às demais seções.

Figura 21 - Modelo de inversão 2D referente à linha de aquisição 6.



Fonte: autoria própria.

São visíveis três zonas de acúmulo bem delimitadas no interior da porção de baixa saturação, com formas achatadas e horizontalmente alinhadas. Todas a uma profundidade inicial de 15m e com espessura de 10m. As duas primeiras zonas apresentam valores de resistividade que variam de 25 $\Omega.m$ a 40 $\Omega.m$ e ocorrem a uma distância de aproximadamente 40m e 125m da origem da linha, respectivamente. A terceira zona saturada ocorre a 185m do início da linha, com valores de resistividade da ordem de 25 $\Omega.m$ a 20 $\Omega.m$, resultando em uma zona com águas de maior salinidade quando comparada às outras duas zonas.

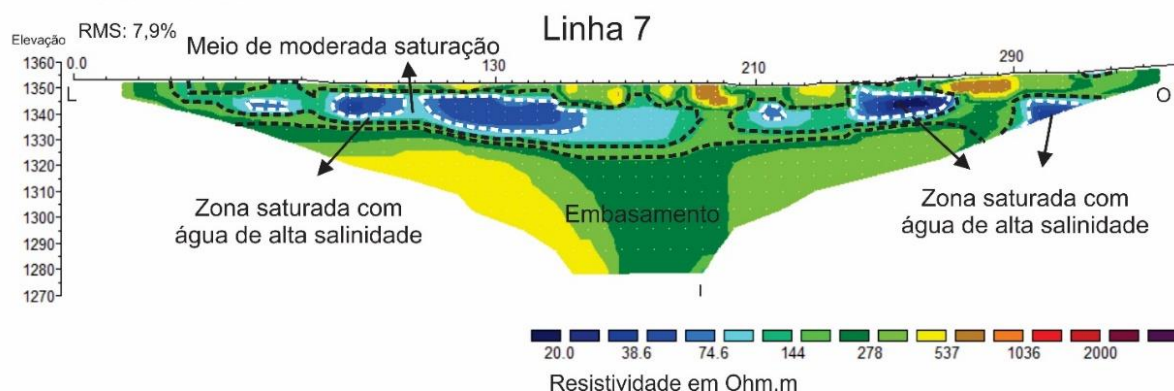
É possível distinguir o embasamento cristalino menos fraturado que, conforme já observado nas seções anteriores, condiciona a suspensão da água subterrânea em meio poroso.

Por fim, a linha de aquisição 7 possui comprimento e profundidade maiores, da ordem de 320m e 80m, respectivamente. A orientação é oblíqua em relação às demais linhas e há a intersecção com as linhas 5 e 6. Na Seção 7 (Figura 22), é possível distinguir com clareza o embasamento composto por rochas alcalinas, pouco fraturado, a uma profundidade de aproximadamente 25m. O embasamento, como supracitado, condiciona a suspensão da água subterrânea.

A Seção 7 retoma, mais uma vez, as mesmas características observadas nos modelos 2D 2 e 3, com um meio de moderada saturação que perfaz toda a faixa central, a uma profundidade inicial de 5m e espessura de até 15m.

São reconhecidas duas zonas de acúmulo de águas de alta salinidade no interior da porção de média saturação. A primeira dista cerca de 80m da origem e possui valores de resistividade da ordem de 40 $\Omega.m$. A segunda ocorre a 240m da origem, representada por valores de resistividade mais baixos, que variam de 20 $\Omega.m$ a 25 $\Omega.m$. A uma distância de 295m da origem, é observada uma terceira zona saturada, com valores de resistividade da ordem de 40 $\Omega.m$. As zonas de acúmulo não possuem conectividade com o sistema fraturado, ocorrendo, portanto, no aquífero granular.

Figura 22 - Seção referente à linha de aquisição 7.

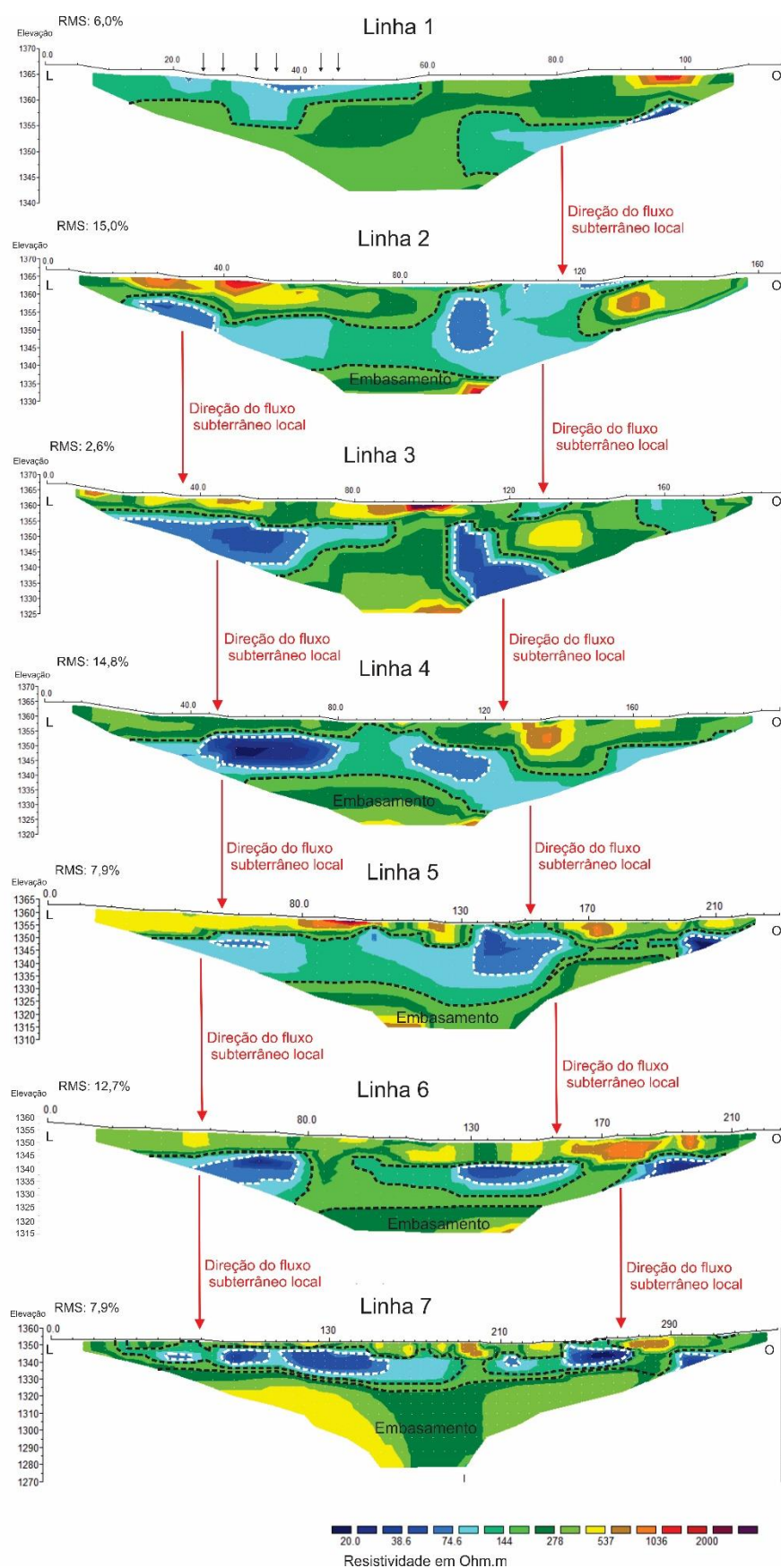


Fonte: autoria própria.

A variação do contorno do embasamento refletida nas seções pode ser relacionada à antiga morfologia do vale, o qual foi aterrado para a construção da pilha de estéreis. A análise conjunta das seções possibilita a identificação dois caminhos preferenciais de fluxo, que ocorrem da linha 1 para a linha 7 (de Norte para Sul – Figura 23). Esses caminhos estão atrelados, provavelmente, a dois interflúvios independentes que existiam no antigo vale. A análise da linha 1 permitiu a identificação de anomalias rasas, prováveis zonas de recarga dos interflúvios.

Ademais, as linhas 1, 2 e 3 estão relacionadas à presença de vegetação, como pode ser observado na imagem de satélite da figura 14, o que reafirma a existência de zonas saturadas nas porções mais rasas da pilha.

Figura 23 - Modelos de inversão 2D para as linhas de 1 a 7, com destaque para as direções preferenciais do fluxo no interior do bota-fora 8.

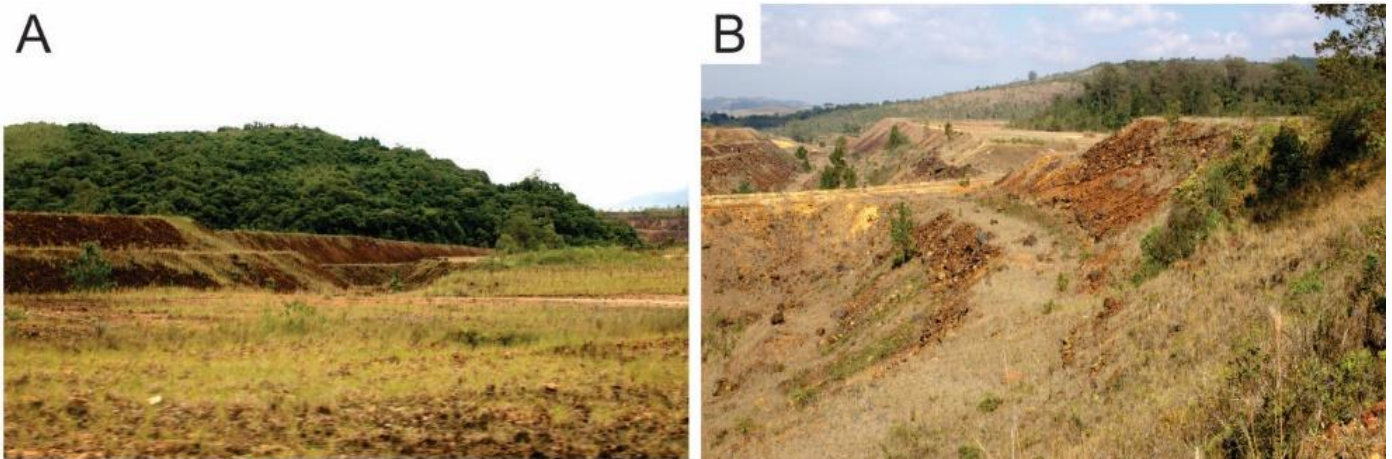


Fonte: autoria própria.

Apesar do reconhecimento de evidências de um fluxo preferencial local da linha 1 para a linha 7, não foram constatados indícios de surgência na frente da pilha (Figura 25), o que reafirma que as regiões de baixa resistividade observadas nas seções são, no período de estiagem, zonas de acúmulo.

Porém, mesmo no período de seca, é notória a contribuição do aquífero granular para o aquífero fraturado, como observado em vários dos modelos 2D. Durante o período de chuvas, é esperado que ocorra um fluxo preferencial propriamente dito, devido ao aumento do aporte de água no interior do BF-8 e fusão das zonas de acúmulo. Assim, a geração de DAM é significativamente maior, bem como o volume de água que infiltra para o sistema fraturado.

Figura 24 - (A) Visão em perfil da pilha de estéreis BF-8, sem indícios de surgência; (B) Visão da frente da pilha de estéreis BF-8, também sem indícios de surgência.



Fonte: autoria própria.

8. CONCLUSÕES

O uso da geofísica como ferramenta indireta no estudo de drenagem ácida de mina em pilha de estéril foi bastante eficaz. Os ensaios geofísicos foram baseados no contraste de propriedades elétricas por meio do método da Eletrorresistividade, o que possibilitou a distinção de zonas com drenagem ácida (abaixo de 40 $\Omega.m$) e águas subterrâneas não contaminadas, além da diferenciação dos sistemas poroso e fraturado ocorrentes no local, cujas correlações permitiram a identificação de caminhos de fluxos preferenciais e zonas de acúmulo existentes no interior do bota-fora.

Os resultados obtidos refletem a complexidade hidrogeológica existente no ambiente de minerações, visto que esse tipo de empreendimento causa impactos significativos na dinâmica da água subterrânea local, através da modificação da topografia natural a partir da remoção de vales e desvio de interflúvios, como no caso da Mina Osamu Utsumi, uma vez que a construção do BF-8 ocupou um antigo vale fluvial.

O bota-fora 8 é tido como um sistema de aquífero granular artificial, de caráter heterogêneo, condicionado pela variabilidade granulométrica, litológica e grau de compactação dos materiais que o compõe, o que propicia a ocorrência de direções preferenciais para o fluxo de água subterrânea. Contudo, a construção da pilha ocorreu sobre embasamento cristalino, que funciona como um aquífero fraturado. A análise de algumas seções evidenciou a existência de um fluxo subvertical, provavelmente relacionado a ocorrência de fraturas pré-existentes no maciço, o que define uma contribuição do sistema granular para o sistema fraturado.

A topografia irregular do antigo vale e a proximidade com canal do Córrego do Cercado, cujo leito original foi desviado para a construção da pilha de estéreis, são fatores que favorecem a infiltração de águas superficiais para o interior do BF-8. Somado a isso, as águas pluviais representam uma significativa fonte de contribuição para o interior da pilha de estéril, evidenciada por zonas de acúmulo rasas nos modelos 2D.

Outro fator a ser considerado é o clima, visto que os ensaios geofísicos foram efetuados no período de seca da região de estudos. Sendo assim, embora haja indicativos da existência de um fluxo no interior do BF-8 com direção preferencial de Norte para Sul, foi constatada ausência de indícios de surgência na frente da pilha, o que define as regiões de baixa resistividade reconhecidas nas seções como sendo zonas de acúmulo. Entretanto, durante o período chuvoso, o aporte de água no interior do bota-fora é maior, o que possibilita o aumento da continuidade lateral e consequente fusão dessas zonas, culminando na ocorrência de um fluxo preferencial propriamente dito.

A existência de zonas saturadas de forma permanente na pilha proporciona a oxidação constante de sulfetos. Dessa forma, o passivo ambiental é contínuo durante todo o ano, e a pirita presente no material que compõe o bota-fora é um foco permanente de geração de DAM, que perdurará ainda por muitas décadas.

Ademais, a ausência de surgência na frente da pilha pode estar relacionada à infiltração para o aquífero fraturado a partir do sistema granular artificial (interior do BF-8). Nesse sentido, são recomendados estudos para avaliação de fluxo no sistema aquífero fraturado da base das pilhas de estéreis, com objetivo de locação de poços nesse sistema para diagnóstico e eventual bombeamento para a estação de tratamento.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. **The upper precambrian of South America.** Boletim IG, v. 7, p. 45-80, 1976.

ALVES, A. D. **Rochas vulcanoclásticas do complexo alcalino de Poços de Caldas-MG/SP.** 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2003.

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

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

CAPOVILLA, M. N. G. M. **Urânio nos hidrotermalitos potássicos (“rocha potássica”) da Mina Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG.** 2001. 227p. Tese de doutorado em Mineralogia e Petrologia. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 2001.

CARVALHO, M. S.; FERREIRA, E. M. **Estudo para eliminar metais radioativos e outros efluentes industriais pode recuperar águas para uso agrícola ou industrial.** Resumo. 2000.

CASAGRANDE, M. F. S. **Investigação geofísica em pilha de estéril afetada por processo de drenagem ácida na mina Osamu Utsumi, Poços de Caldas-MG.** 2019. Tese de Mestrado - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2019.

- CASAGRANDE, M. F. S.; MOREIRA, C. A.; TARGA, D. A.; ALBERTI, H. L. C. Integration of Geophysical Methods in the study of acid drainage in uranium mining waste. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 36, n. 4, p. 1-12, 2018.
- CHAMMAS, R. Barragens de Contenção de Rejeitos. **Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEb)**, UFOP, Ouro Preto, MG, 1989.
- CHRISTOFOLETTI, A. A unidade morfoestrutural do planalto de Poços de Caldas. **Notícias Geomorfológicas**, v. 13, n. 26, p. 77-85, 1973.
- CIPRIANI, M. **Mitigação dos impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio**. 2002. 363p. Tese de doutoramento. Universidade Estadual de Campinas. 2002.
- CRUZ, W. B.; PEIXOTO, C. A. M. As águas termais de Poços de Caldas, MG – Estudo experimental das interações água-rocha. **Revista Brasileira de Geociências**, 19(1), p. 76-86, 1989.
- 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.
- CURI, Adilson. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. Oficina de Textos, 2014.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. Hidrología subterránea. Tomo I y II. **Barcelona**, 2350p, 1996.
- DE MELLO, J. W. V; DUARTE, H. A.; LADEIRA, A. C. Q. Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, v. 8, p. 24-29, 2014.
- ELLERT, Reinholt. Contribuição à geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia**, n. 18, p. 5-60, 1959.
- EVERETT, Mark E. **Near-surface applied geophysics**. Cambridge University Press, 2013.

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

FANTI, Aline Campello. **Investigação de aquífero fraturado para entendimento de fluxo e transporte de contaminantes clorados: estudo de caso em Valinhos, SP**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. Hidrologia: conceitos e aplicações. **Fortaleza: CPRM-REFO, LABHID-UFPE**, 2000.

FERNANDES, A. J. **Tectônica Cenozóica na porção média da Bacia do Rio Piracaia e sua aplicação à hidrogeologia**. 1997. Tese de doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

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**, v. 18, n. 3, p. 169-181, 1998.

FERNANDES, H. M.; FRANKLIN, M. R. Assessment of acid rock drainage pollutants release in the uranium mining site of Poços de Caldas—Brazil. **Journal of Environmental radioactivity**, v. 54, n. 1, p. 5-25, 2001.

FERRIS, J. G.; KNOWLES D.B.; BROWN, R. H.; STALLMAN, R. W. **Theory of aquifer tests**. Denver, Colorado: US Geological Survey, 1962.

FLÔRES, JC do C. Fechamento de mina: aspectos técnicos, jurídicos e sócio-econômicos. **Campinas: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas**, 2006.

FRAENKEL, M. O.; SANTOS, R. C.; LOUREIRO, F. E. V. L.; MUNIZ, W. S. **Jazida de urânio no Planalto de Poços de Caldas – Minas Gerais. Principais depósitos minerais do Brasil**, v. 1, Recursos Minerais Energéticos, MMe, DNPM e CVRD, Brasília, p. 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. 2007. 358p. Tese de doutorado em ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. 2007.

GARDA, G. M. **A alteração hidrotermal no contexto da evolução geológica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP.** 1990. 262p. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 1990.

GERAIS, Minas. Instituto Mineiro de Gestão das Águas–Igam. **Glossário de Termos: gestão de recursos hídricos e meio ambiente. Belo Horizonte: Igam,** 2008.

HOLMES, D. C.; PITTY, A. E.; NOY, D. J. Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera analogue study sites. **Journal of Geochemical Exploration**, 45, p. 215 – 247, 1992.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL S.A. – INB. Disponível em <<http://www.inb.gov.br>>. Acesso em 21 out 2018.

KEAREY, P; BROOKS, M; HILL, I. **An introduction to Geophysical exploration.** Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. 1º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 429 p.

KELLER, G. V.; FRISCHKNECHT, F. C. **Electrical methods in geophysical prospecting.** 1966.

KLEINMANN, R. L. P.; CRERAR, D. A.; PACELLI, R. R. Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. **Min. Eng.(NY);(United States)**, v. 33, n. 3, 1981.

LACHASSAGNE, P.; WYNS, R.; BERARD, P. et al. Exploitation of high-yields in hardrock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. **Ground Water**, Westerville, EUA, v. 39, n. 4, p. 568- 581, 2001.

LOKE, M. H. Rapid 2D Resistivity e IP Inversion using the least-squares method. **Geotomo Software, Manual**, v. 122, 2003.

- LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method 1. **Geophysical prospecting**, v. 44, n. 1, p. 131-152, 1996.
- LOKE, M. H.; CHAMBERS, J. E.; OGILVY, R. D. Inversion of 2D spectral induced polarization imaging data. **Geophysical Prospecting**, v. 54, n. 3, p. 287-301, 2006.
- LOUREIRO, F. V. L.; DOS SANTOS, R. C. The intra-intrusive uranium deposits of Poços de Caldas, Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 3, n. 1-3, p. 227-240, 1988.
- LOWRIE, W. **Fundamentals of geophysics**. Cambridge university press, 2007.
- MAGNO JÚNIOR, L. B. **Osamu Utsumi Mine, Geologic Presentation**. In: Relatório interno NUCLEBRÁS. Rio de Janeiro, RJ, 1985.
- MURTA, F. C. Ensaios de colunas para a avaliação de remediação passiva de drenagem ácida na mina Osamu Utsumi (INB), Caldas/MG. 2006.
- MURTA, F. C.; LEITE, A.L.; LIMA, H. M. Estudos cinéticos de sistemas de coberturas alcalinas em pilha de estéril para a prevenção de drenagem ácida de mina. 2008.
- MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. **Looking into the earth: an introduction to geological geophysics**. Cambridge University Press, 2000.
- NEVES, M. A. Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na bacia do rio Jundiá (SP). 2005.
- NOVAKOWSKI, K. S. Preliminary interpretation of tracer experiments conducted in a discrete rock fracture under conditions of natural flow. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 11, p. 1417-1420, 1995.
- NUNES, D. R. **Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia**. 2014. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- OLIVA, A. *et al.* Utilização do método da eletrorresistividade na caracterização hidrogeológica de área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. **Águas Subterrâneas**, 2006.

PRADO, V. C. S. O Impacto da Produção de Concentrado de urânio sobre a Qualidade da Água dos Rios-Um estudo de caso na área do complexo minero-industrial do planalto de Poços de Caldas. **COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro**, 1994.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. John Wiley e Sons, 2011.

SIQUEIRA, M.M. **Desafios na gestão de riscos de radiação**. CRV, Curitiba., p.109-119, 2013.

SNOW, David T. Rock fracture spacings, openings, and porosities. **Journal of Soil Mechanics & Foundations Div**, 1968.

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

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

SOUZA, V. P.; SÁNCHEZ, L. E. **Drenagens ácidas do estéril piritoso da mina de urânio de Poços de Caldas: interpretação e implicações ambientais**. 1996.

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 Applied Sciences**, v. 1, n. 4, p. 299, 2019.

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. **Boletim de Geociencias da PETROBRAS**, v. 13, n. 2, p. 269-300, 2005.