



## Diagnóstico geofísico da percolação de drenagem ácida de mina em aquífero fraturado

Fernanda Miranda de Siqueira Buchi<sup>1\*</sup>; César Augusto Moreira<sup>2</sup>, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, São Paulo, Brasil

Copyright 2023, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 18<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 October 2023.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 18<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Resumo

Uma análise hidrogeológica foi realizada para compreender a geração e transporte de drenagem ácida de mina (DAM) em sistemas aquíferos constituídos por uma pilha de rejeito de antiga mineração de urânio rica em minerais sulfetados e pelo embasamento cristalino subjacente. O estudo envolveu a integração de dados geofísicos e hidroquímicos. Foram realizadas 9 linhas de tomografia elétrica, em arranjo Schlumberger e Dipolo-Dipolo, e análises de dados hidroquímicos para compreensão do ambiente hidrogeológico local. Os resultados foram apresentados em seções 2D e 3D de resistividade e mostram o contraste de zonas saturadas livres de contaminação e zonas afetadas pela DAM, além da conectividade hidrogeológica entre a pilha de estereis e o leito rochoso fraturado sotoposto, o que promove a infiltração das águas ácidas para o aquífero regional e dispersão dos efluentes para além das dependências da mina. Os dados hidroquímicos corroboraram as interpretações geofísicas e enfatizaram a necessidade de medidas para tornar a geração de DAM restrita e permitir o descomissionamento do empreendimento mineiro.

### Introdução

As atividades mineiras são conhecidas pelas profundas mudanças que provocam no meio ambiente, uma vez que estão atreladas a grandes movimentações de massa. O material estéril, proveniente das atividades de lavra e considerado inferior ao teor de corte estabelecido, é disposto em pilhas, que podem atuar como aquíferos porosos artificiais (Chamas, 1989). Tanto a disposição dessas pilhas quanto sua interação com o meio consistem em um dos maiores problemas ambientais relacionados à indústria mineira (Simate & Ndlovu, 2014). A mina de urânio Osamu Utsumi, localizada no município de Caldas – MG, está em fase de descomissionamento desde a década de 1990. O empreendimento enfrenta sérias dificuldades relacionadas à geração de DAM, tanto nas pilhas de estereis quanto na cava da mina (Franklin, 2007). As pilhas de estereis, chamadas de bota-foras (BF), apresentam características semelhantes a aquíferos porosos artificiais, e estão sobrepostas ao sistema de aquífero fraturado regional, formado pelo embasamento cristalino. A drenagem ácida de mina é ocasionada pela exposição de minerais sulfetados, outrora inseridos em um contexto redutor, a condições oxidantes com presença de água (Blowes, 1997). Como resultado, há produção de águas com baixos valores de

pH, que favorecem a dissolução de elementos químicos tóxicos associados às matrizes rochosas (Akciil & Koldas, 2006). Esses efluentes são enriquecidos, principalmente, em metais pesados, cuja mobilidade é favorecida em ambientes oxidantes (Nordstrom *et al.*, 2015). Consequentemente, pode ocorrer a lixiviação desses elementos e de outros constituintes das rochas e rejeitos para as águas subterrâneas (Simate & Ndlovu, 2014). No caso de uma mina de urânio, a mobilização de elementos radioativos pode contribuir para a deterioração da qualidade da água local. Apesar de corriqueira, os mecanismos de geração da DAM não são totalmente compreendidos, o que torna a remediação desse passivo extremamente complexa e com medidas de mitigação dispendiosas, além de ser considerado irreversível em muitos casos (Akciil & Koldas, 2006). Nas últimas décadas, a aplicação de métodos geofísicos no estudo de passivos ambientais tem sido uma alternativa bastante eficaz, tanto na gestão da água subterrânea como na caracterização, monitoramento e remediação de áreas contaminadas, incluindo zonas afetadas por DAM. O método da Eletrorresistividade possui grande cobertura espacial e pode ser empregado na detecção de contaminantes inorgânicos no solo e na água subterrânea. A modelagem geofísica 2D dos dados geoeletricos permite a identificação de maneira confiável de plumas ácidas, além de possibilitar a determinação de suas extensões lateral e vertical (Anterrieu *et al.*, 2010; Epov *et al.*, 2017; Casagrande *et al.*, 2018; Targa *et al.*, 2019; Moreira *et al.*, 2020). As técnicas apresentam a vantagem de investigações em áreas amplas, de forma rápida e com custos relativamente baixos quando comparados às técnicas diretas convencionais (Reynolds, 2011). Nesse contexto, o presente trabalho avaliou o fluxo subterrâneo de DAM no interior de uma pilha de estereis (BF-04) de uma antiga mineração de urânio, bem como no aquífero fraturado subjacente, a partir do método da Eletrorresistividade.

### A Mina Osamu Utsumi

A mina Osamu Utsumi (MOU) foi a primeira mineração de urânio explorada comercialmente no Brasil e, atualmente, a jazida pertence a Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB) (Souza *et al.*, 2013). O empreendimento esteve em atividade entre os anos 1982 a 1995, quando houve o esgotamento do minério de urânio, e, desde então, está em processo de descomissionamento (Franklin, 2007). As reservas foram estimadas em aproximadamente 17.200 t de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, com lavra do minério a céu aberto (Fraenkel *et al.*, 1985). O processo operacional da MOU era dividido em três frentes: mineração, processamento físico e processamento químico. 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 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), era encaminhado para locais definidos como bota-foras (Cipriani, 2002). Cerca

de  $2,39 \times 10^6 \text{ m}^3$  de estéréis foram produzidos durante os anos de operação da mina (Franklin, 2007). O objeto de estudo consiste na interface entre a pilha de rejeito Bota-fora 04 (BF-04) e bacia de captação de drenagem ácida de mina (BNF) da referida mina (Figura 1).

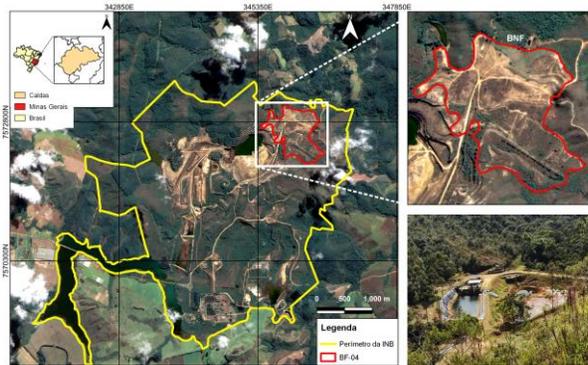


Figura 1 - Localização da área de estudo.

O BF-04 ocupa uma área de 56,9 ha e contém 12,4 milhões de  $\text{m}^3$  de material estéril, disposto em dois patamares, superior e inferior. Possui cerca de 90 m de talude, com inclinação de  $70^\circ$  (Cipriani, 2002). O material utilizado na construção da pilha é proveniente da decapagem e da exploração do corpo de minério B (Cipriani, 2002), cuja litologia é composta por brecha vulcânica e fonólito (Magno Júnior, 1985; Franklin, 2007; Pelisam, 2020). Segundo Alberti (2017), o material proveniente da decapagem foi depositado no patamar superior da pilha, ao passo que os estéréis relacionados à triagem do corpo B foram dispostos no patamar inferior do bota-fora. Os estéréis foram dispostos à céu aberto, através do preenchimento do antigo vale do Córrego da Consulta, cujo leito foi desviado para a lateral do BF-04 com o intuito de canalizar as águas para jusante da pilha (Cipriani, 2002). A construção da pilha foi efetuada pelo método descendente ou de “avanço de ponta de aterro”, de modo que material mais fino é concentrado no topo da pilha e as partículas mais grosseiras são comumente dispostas na base (Franklin, 2007). Na base do talude principal do BF-04, a água subterrânea afetada pelo processo de DAM aflora em meio a matacões. Uma bacia de captação de água, denominada BNF, foi instalada a jusante da pilha, para receber os efluentes ácidos gerados no interior do bota-fora (Figura 2A e 2B). Inicialmente a bacia não apresentava impermeabilização (Figura 2C). Posteriormente, foi construída a atual bacia com manta impermeável, que foi deslocada para a lateral da antiga lagoa, a fim de conter a infiltração das águas ácidas para o solo e aquífero. No entanto, ainda há o acúmulo de água na antiga bacia, que apresenta contribuições provenientes do BF-04 por meio de fraturas e águas pluviais. O tratamento das águas ácidas consiste no bombeamento dos resíduos para a estação de tratamento de efluentes, onde ocorre a adição de hidróxido de cálcio (Cipriani, 2002).

O trabalho de Targa *et al.* (2019) apresenta estudos acerca do padrão de fraturamento na cava da mina, e apontam duas zonas preferenciais de fraturas, com

atitudes principais de N20E/80NW e N55W/75NE, ou seja, com intersecção quase ortogonal entre si. Também de acordo com os autores, há intensa percolação de água através das fraturas do maciço (Figura 2D).

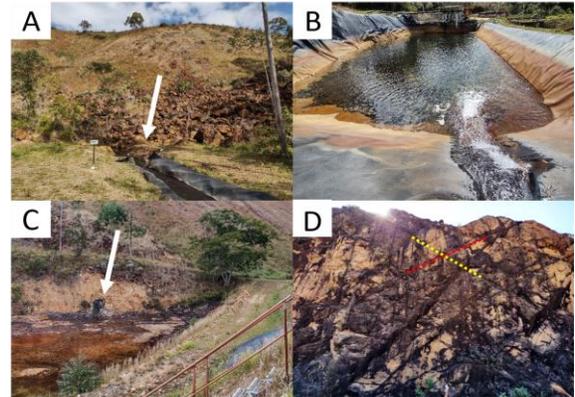


Figura 2 - (A) Água subterrânea aflorante em meio a matacões na base do BF-04; (B) Atual bacia BNF; (C) Antiga bacia BNF, com detalhe para água subterrânea aflorante em fratura; (D) Sistema de fraturas existentes na mina.

**Metodologia**

As investigações geofísicas foram realizadas ao longo de nove linhas de aquisição, além de uma linha para referência dos valores obtidos (Figura 3). As linhas geofísicas foram posicionadas no patamar inferior do BF-4, na região da bacia de captação BNF e a jusante da mesma, com espaçamento entre eletrodos de 3 a 5 metros a depender da linha. O comprimento máximo das linhas foi de 600 metros (linha 1) e mínimo de 100 metros (linha 8), de forma que os ensaios geofísicos fossem profundos o suficiente para permitir a análise do aquífero fraturado sotoposto à pilha.

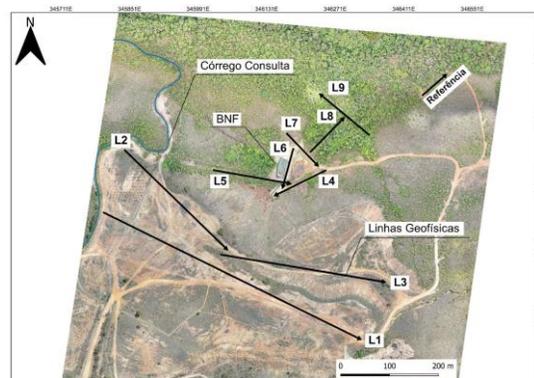


Figura 3 - Localização das linhas de aquisição (1 a 9) e referência.

O equipamento utilizado em campo foi um medidor de resistividade Terrameter LS da ABEM (84 canais, 250W, com resolução de  $1 \mu\text{V}$  e corrente máxima de 2.5A; ABEM, 2012), conectado a uma bateria. Os eletrodos utilizados foram de metal em arranjo Schlumberger (linhas 1 a 3), a fim de destacar o contato do BF-04 e o embasamento rochoso fraturado subjacente, e Dipolo-

Dipolo (linhas 4 a 9), com o intuito de realçar as fraturas do leito rochoso e eventuais caminhos de fluxo. 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. Os dados de tomografia elétrica foram tabelados utilizando o *software* Excel (2016 – Microsoft), juntamente com as coordenadas geográficas e altitude de cada ponto. O processamento dos dados adquiridos em campo foi efetuado por meio do *software* Res2Dinv, versão 3.53 (Geotomo Software), para gerar seções bidimensionais com valores de resistividade de acordo com a distância da origem da linha e profundidade de aquisição. O *software* executa a interpolação e inversão dos dados de campo a partir do método dos Mínimos Quadrados. Essa técnica suaviza os valores extremos, a fim de obter uma melhor compatibilidade entre o modelo teórico e os dados coletados em campo (Reynolds, 2011). Os modelos de inversão de resistividade exigiram de 5 a 7 iterações para que fossem obtidos resultados confiáveis, conforme indicado em cada seção 2D. 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*). O elemento “topografia” também é inserido na tabela, para configuração do relevo (Loke 2006). 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. As representações cromáticas adotadas no presente trabalho para os dados de resistividade são tonalidades quentes para altos índices e tonalidades frias para menores índices. Os modelos de visualização 3D foram gerados a partir da interpolação das seções 2D, através da plataforma Oasis Montaj Software Geosoft. O modelo tridimensional foi criado a partir de dados das coordenadas (X, Y e Z) das seções 2D (Geotomo, 2014). A topografia local também foi considerada em todos os modelos para evitar distorções, por meio do sistema de posicionamento global diferencial (DGPS). A modelagem 3D e as superfícies de isovalores promoveram um melhor reconhecimento e caracterização do fluxo de águas subterrâneas e do transporte da DAM.

A análise hidroquímica da região avaliada foi efetuada conforme os dados compilados no trabalho de Alberti (2017). As amostras de água subterrânea foram coletadas segundo o método de bombeamento de baixa vazão, em conformidade com a NBR 15.847. As análises químicas foram conduzidas pela equipe da INB em parceria com a CNEN, no Laboratório de Poços de Caldas – LAPOC/CNEN, e datam de 2014 e 2015.

As amostras foram analisadas para os parâmetros físico-químicos de pH, condutividade elétrica, potencial redox, oxigênio dissolvido e turbidez, além de elementos e compostos estáveis (cátions e ânions). Entretanto, a ausência de análises mais recentes pode ser

considerada uma limitação do estudo, uma vez que dificulta uma melhor concepção do cenário atual de contaminação, bem como associação com o modelo geofísico estabelecido para a área avaliada. Infelizmente, dados hidroquímicos atuais inexistem.

A área de estudo conta com cinco poços de monitoramento: PM-01, PM-36, PM-41, PM-42 e PM-43, com os dois primeiros instalados na região da bacia de captação BNF, na base da pilha BF-04 e em região a jusante dela, respectivamente, e os três últimos localizados nos patamares inferior e superior do BF-04 (Figura 4).

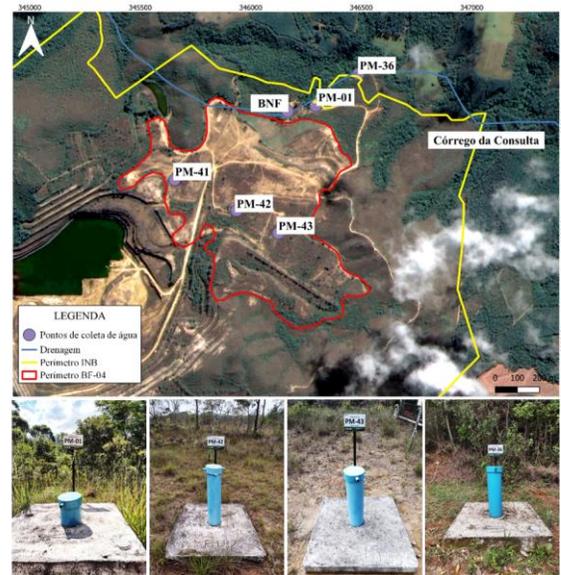


Figura 4 - Localização dos poços de monitoramento existentes na área de estudo.

**Resultados e Discussões**

Os modelos de inversão de resistividade representativos da área de estudo são apresentados em escala logarítmica de valores, que variam de 20 Ω.m a 2000 Ω.m. Os valores de 20 Ω.m a 80 Ω.m indicam presença de água com uma quantidade variável de íons dissolvidos, objeto de interesse desse trabalho. Os valores mais próximos de 20 Ω.m apontam maior quantidade de sais dissolvidos, enquanto valores mais próximos de 80 Ω.m denotam menor concentração desses elementos, análogo aos valores de resistividade esperados para águas subterrâneas naturais. Valores entre 80 Ω.m e 150 Ω.m são referentes a locais que apresentam moderado grau de saturação. Intervalos acima de 150 Ω.m indicam tanto o maciço rochoso composto por rochas alcalinas, quanto os estereis que compõem a pilha de rejeito, ambos com umidade decrescente de acordo com o aumento da resistividade. As linhas de aquisição 1 a 3 estão localizadas no patamar superior do BF-4, enquanto as linhas 4 a 9 foram posicionadas a jusante dele, em contato direto com o embasamento rochoso, na região da bacia de captação BNF (linhas 4 a 7) e em área rebaixada a jusante com vegetação nativa (linhas 8 e 9). De maneira geral, todas

as seções apresentaram regiões com valores de resistividade mais baixos, da ordem de 20 Ω.m, indicando presença de água de elevada salinidade, resultado da interação água-minério. As seções 1 a 3 apresentaram concentração das zonas saturadas na porção rasa da pilha, o que pode ser explicado devido ao processo de deposição do material somado às características físicas do mesmo, o que promoveu determinado grau de segregação granulométrica no interior do bota-fora, devido à ação gravitacional, de modo o material mais fino fique concentrado no topo e granulometrias mais grosseiras perfeçam profundidades maiores, como demonstrado nos trabalhos de Franklin (2007) e Anterrieu *et al.* (2010) (Figura 5). 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 dos modelos 2D avaliados.

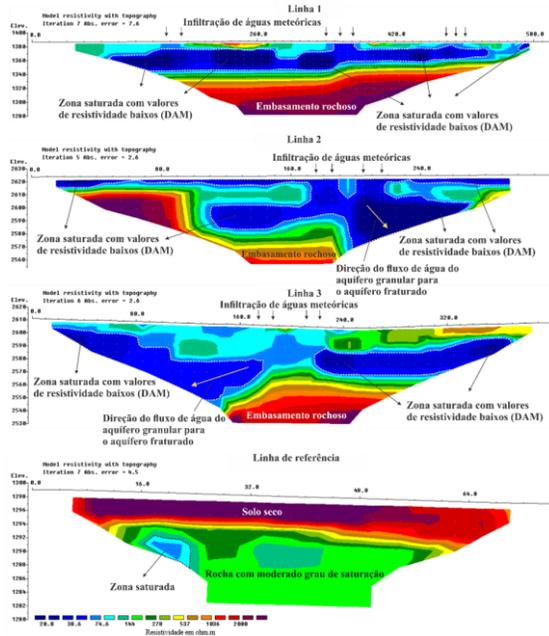


Figura 5 – Modelos de inversão 2D referentes às linhas de aquisição 1 a 3.

Outra característica observada nas seções 1 a 3 é a presença de uma zona saturada por toda a porção central, contida no sistema granular (formado pela pilha de estéréis) e que exibe formato horizontalizado, limitada pela interface do contato entre a base da pilha e o embasamento cristalino, localizado a uma profundidade de aproximadamente 60 m. Em suma, o embasamento cristalino limita a infiltração de água devido à sua baixa porosidade primária e condiciona a suspensão da água subterrânea em maiores profundidades. As seções 2 e 3 exibem zonas saturadas com formato verticalizado e continuidade em níveis mais profundos, provavelmente além da interface do contato com o embasamento cristalino. Conseqüentemente, 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. As linhas 4 a 6 foram posicionadas imediatamente a jusante do BF-04, na região da bacia de captação BNF da mina, que tem como finalidade armazenar as águas que escoam da base da pilha de estéril e bombeá-las para a central de tratamento de efluentes. A análise das Seções 4 a 6 constatou que há percolação de águas ácidas provenientes do BF-04 através do sistema de fraturas do embasamento cristalino (Figura 6). As linhas de aquisição 4 e 5 mostram a continuidade do fluxo de água subterrânea por meio das fraturas do embasamento rochoso indicado nas seções 3 e 2, respectivamente.

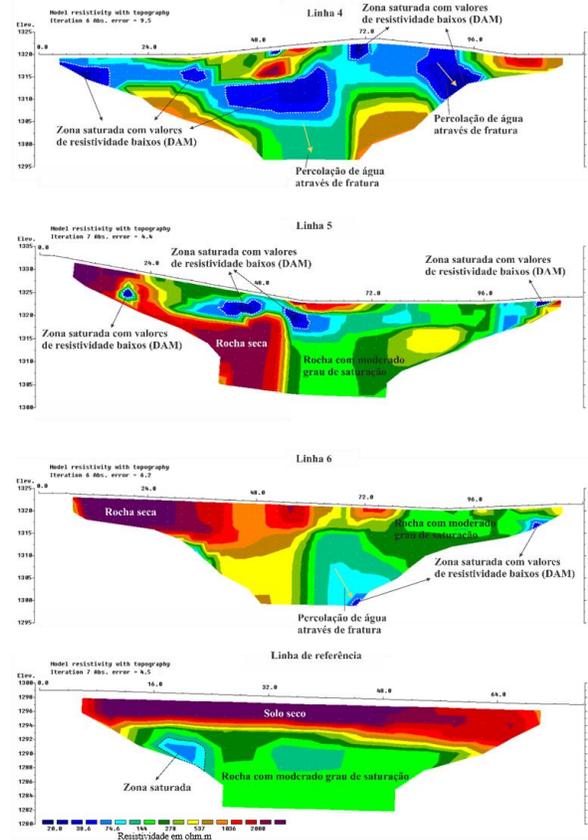


Figura 6 - Modelos de inversão referentes às linhas de aquisição 4 a 6.

A análise da Seção 4 indica que há a migração dos efluentes ácidos através do sistema de fraturas, evidenciada por zonas saturadas de formato verticalizado com valores de resistividade da ordem de 20 Ω.m, com direção de fluxo para NE. A Seção 7, localizada a jusante da BNF, possui correspondência com o exibido nos modelos de inversão das linhas 4 a 6, e também exibe fluxo subterrâneo de águas ácidas que percola através do sistema de fraturas do embasamento cristalino. A seção é indicativa da presença de fluxo d'água subterrâneo que escoam para jusante da bacia (Figura 7). As linhas 8 e 9 foram dispostas em uma região rebaixada de mata fechada, localizada a jusante da área da BNF. É importante ressaltar que a linha de aquisição 8 possui orientação perpendicular às demais aquisições. A análise das Seções 8 e 9 também revela zonas de águas ácidas

(valores de resistividade da ordem de 20 Ω.m) com formato verticalizado, o que indica percolação através de fraturas, com continuidade lateral confirmada pela Seção 8 (Figura 7).

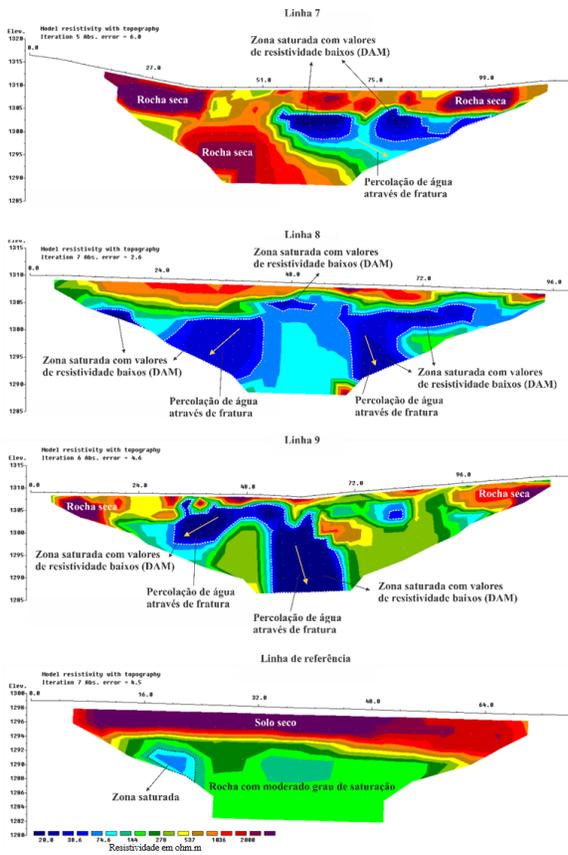


Figura 7 - Modelos de inversão 2D referentes às linhas de aquisição 7 a 9.

Às vistas disso, é possível afirmar que provavelmente há carreamento dessas águas ácidas para além das dependências da mina, através do sistema de fraturas do aquífero formado pelo embasamento rochoso natural local.

A interpolação das seções geofísicas 4 a 9 gerou um modelo pseudo-3D para o parâmetro físico de resistividade representativo da área avaliada, a fim de facilitar sua visualização (Figura 8). A escolha das seções a serem utilizadas foi baseada na altitude das linhas de tomografia elétrica, com vista aos desníveis topográficos existentes na região avaliada, e priorizou a caracterização de fluxos hidrogeológicos que ocorrem no embasamento rochoso.

O modelo corrobora as interpretações das seções 2D e indica a presença de fluxo de água subterrânea impactada pela DAM através do sistema de fraturas do embasamento cristalino, evidenciado por valores de resistividade da ordem de 20 Ω.m, com continuidade em níveis mais profundos. O fluxo tem início nas porções mais rasas do BF-04, com continuidade em níveis mais profundos, e possui sentido SW-NE, para além da bacia de captação BNF.

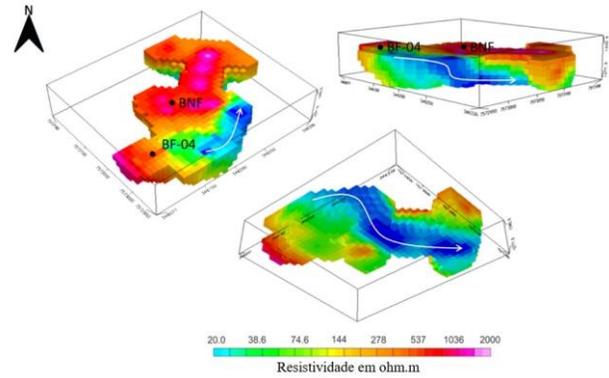


Figura 8 - Modelo pseudo-3D de resistividade.

No que concerne às análises hidroquímicas, os dados dos poços PM-01 e PM-41 refletem as condições químicas predominantes do aquífero fraturado (embasamento rochoso), enquanto o PM-36, PM-42 e PM-43 fornecem características químicas a respeito do aquífero poroso.

Em suma, o PM-41 apresentou águas um pouco mais alteradas em comparação com os poços de monitoramento PM-42 e PM-43, com quantidade significativa de íons dissolvidos e alta concentração de sulfato, o que evidencia a migração da contaminação do aquífero poroso, formado pelo BF-04, para o aquífero fraturado regional.

No que concerne aos poços instalados a jusante da pilha de rejeito, o PM-01 apresentou valores correspondentes à geração de DAM mais acentuada que os demais poços, o que aponta a existência de uma pluma de águas ácidas que percola sob o BF-04, provavelmente em decorrência da contaminação do sistema aquífero fraturado a partir da contribuição proveniente do sistema granular formado pelo bota-fora.

As amostras coletadas no PM-36, instalado próximo à linha de referência, indicaram ausência de influência da DAM (ALBERTI, 2017), em concordância com as interpretações geofísicas.

**Conclusões**

Os resultados do presente estudo permitiram uma boa compreensão acerca da dinâmica hidrogeológica e do fluxo subterrâneo de DAM no interior da pilha de rejeito BF-04 e, principalmente, no aquífero fraturado regional formado pelo embasamento cristalino subjacente. Foi possível distinguir zonas saturadas menos impactadas (~80 Ω.m) daquelas com alto teor de íons, provavelmente relacionadas à DAM (<40 Ω.m). Além disso, as interpretações geofísicas mostram que há conectividade hidráulica entre o bota-fora e o aquífero fraturado sotoposto, por meio de fraturas do embasamento cristalino, o que favorece as trocas químicas entre eles.

Os modelos 2D e 3D indicam a presença de fluxo de água subterrânea impactada pela DAM para jusante da bacia de captação BNF e consequente dispersão dos contaminantes para além das adjacências da mina através do sistema de fraturas do embasamento

cristalino. O fluxo proveniente do BF-04 possui sentido SW-NE e atinge níveis mais profundos.

Os dados hidroquímicos dos poços de monitoramento demonstram que há percolação de efluentes ácidos no sistema fraturado, o que sugere uma possível conectividade hidrogeológica entre o sistema aquífero poroso, formado pela pilha de estêreis, e o sistema aquífero fraturado sotoposto, formado pelas rochas cristalinas, em concordância com as interpretações geofísicas.

Às vistas disso, é imprescindível a implementação de ações que tornem a geração de DAM restrita e com características químicas próximas dos padrões naturais, meta bastante desejável no descomissionamento do empreendimento mineiro.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto “Estudo da geração de drenagem ácida de mina em rejeitos de mina de urânio” (nº 2019/14565-3), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento apoio, e à INB por colaborar e permitir o desenvolvimento do trabalho de campo, com apoio técnico e acesso aos dados e à área de estudo.

### Referências

- ABEM, 2012. Terrameter LS – Instruction manual. ABEM Instrument, Sundbyberg, Suécia.
- Akcil A., Koldas S., 2006. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *J Clean Prod* 14:1139- 1145.
- Alberti H.L., 2017. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio – Osamu Utsumi, Planalto de Poços de Caldas (MG). Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- Anterrieu O., Chouteau M., Aubertin M., 2010. Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine, *Bull Eng Geol Environ* 69:533-548.
- Casagrande, M. F. S.; Moreira, C. A.; Targa, D. A.; Alberti, H. L. C., 2018. Integration of geophysical methods in the study of acid mine drainage in uranium mining waste. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 36, n. 4, p. 1-12, 2018.
- Blowes, D. W., 1997. The environmental effects of mine wastes. In: *Proceedings of exploration*, p. 887-892.
- Chammas, R., 1989. Barragens de Contenção de Rejeitos. Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEB), UFOP, Ouro Preto, MG.
- Cipriani, M., 2002. Mitigação dos impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio. 2002. 363p. Tese de doutoramento. Universidade Estadual de Campinas.
- Epov M.I., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Karin Y.G., Saeva O.P., 2017. Analysis of mine waste by geochemical and geophysical methods (a case study of the mine tailing dump of the Salair ore processing plant) *Russ Geol Geophys*.
- Fraenkel, M. O.; Santos, R. C.; Loureiro, F. E. V. L.; Muniz, W. S., 1985. 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.
- Franklin, M. R., 2007. Modelagem numérica do escoamento hidrológico e dos processos geoquímicos aplicados à previsão da drenagem ácida em uma pilha de estéril da mina de urânio de Poços de Caldas – MG. Tese de doutorado em ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.
- Geomotsoft (2014) Oasis Montaj: How to Guide. [http://updates.geosoft.com/downloads/files/howtoguides/Oasis\\_montaj\\_Gridding.pdf](http://updates.geosoft.com/downloads/files/howtoguides/Oasis_montaj_Gridding.pdf).
- Loke, M. H.; Chambers, J. E.; Ogilvy, R. D., 2006. Inversion of 2D spectral induced polarization imaging data. *Geophysical Prospecting*, v. 54, n. 3, p. 287-301.
- Magno Júnior, L. B., 1985. Osamu Utsumi Mine, Geologic Presentation. In: Relatório interno Nuclebrás. Rio de Janeiro, RJ.
- Mello, J.W.V.; Duarte, H. A.; Ladeira, A. C. Q., 2014. Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina. Cadernos temáticos de Química Nova.
- Moreira, C. A. *et al.*, 2020. Hydrogeological characterization of a waste rock pile and bedrock affected by acid mine drainage from geophysical survey. *SN Applied Sciences*, v. 2, n. 7, p. 1-12.
- Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J., 2015. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Appl Geochem* 57:3-16.
- Pelissam, L. G. T., 2020. Extração de elementos terras raras e urânio da pilha de minério bota-fora 4 da mina de Osamu Utsumi, utilizando água desionizada, drenagem ácida de mina e ácido clorídrico. 2020, 113 p. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Reynolds J. M., 2011. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. 2nd Edition, Wiley-Blackwell, Londres.
- Simate G.S., Ndlovu S., 2014. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *J Environ Chem Eng* 2(3):1786- 1803.
- Souza A.M., Silveira C.S., Pereira R.M., 2013. Contribuições dos metais provenientes das pilhas de rejeito da Mina Osamu Utsumi a drenagens do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais. *Geochim Bras* 27:63- 76.
- Targa, D. A.; Moreira, C. A.; Camarero, P. L.; Casagrande, M. F. S.; Alberti, H. L. C., 2019. Structural analysis and geophysical survey for hydrogeological diagnosis in uranium mine, Poços de Caldas (Brazil). *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 4, p. 299.