



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

Análise de fluxo subterrâneo em interface mina a céu aberto e pilhas de rejeito em mineração de urânio por meio de investigação geofísica

ANA JÚLIA TRAIBA DA SILVEIRA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP
2025

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

ANA JÚLIA TRAIBA DA SILVEIRA

**ANÁLISE DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM INTERFACE
MINA A CÉU ABERTO E PILHAS DE REJEITO EM
MINERAÇÃO DE URÂNIO POR MEIO DE
INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA**

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

Orientador: Prof. Dr. César Augusto
Moreira

Rio Claro - SP
2025

S587a

Silveira, Ana Júlia Traiba da

Análise de fluxo subterrâneo em interface mina a céu aberto e pilhas de rejeito em mineração de urânio por meio de investigação geofísica / Ana Júlia Traiba da Silveira. -- Rio Claro, 2025

77 f. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientadora: César Augusto Moreira

1. Drenagem ácida de minas. 2. Aquíferos. 3. Geofísica. 4. Contaminação. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Passivos ambientais são recorrentes nas atividades de mineração e, portanto, requerem atenção principalmente quando estas estão passando pela fase de descomissionamento. No entanto, é importante destacar que nem todos os passivos ambientais são visíveis e, portanto, requerem ferramentas específicas de avaliação, diagnóstico e monitoramento. É nesse contexto que a Tomografia por Resistividade Elétrica possui diversas aplicações, trata-se de uma ferramenta de aquisição de dados de alta velocidade e baixo custo, capaz de compreender os fluxos subterrâneos de contaminantes e fluidos através da diferença de valores de resistividade, a qual pode contribuir para tomada de decisões relacionadas a medidas de prevenção, monitoramento e mitigação. Embora esta ferramenta seja conhecida, ela não é usualmente utilizada no descomissionamento de operações de mineração, e, portanto, essa pesquisa pode ser utilizada de base para empresas de mineração que estejam passando por situações semelhantes relacionadas a passivos ambientais e descomissionamento de mina. Além disso, essa pesquisa se enquadra sobretudo em 5 objetivos sustentáveis da Organização das Nações Unidas. O objetivo 3 – Saúde e Bem-Estar, que discorre sobre reduzir substancialmente o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos, contaminação e poluição do ar e água do solo; O objetivo 6 – Água Potável e Saneamento que discorre sobre melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzir à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentar substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente; O objetivo 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, que discorre sobre fortalecer a pesquisa científica e melhorar as capacidades tecnológicas de setores industriais em todos os países; O objetivo 12 – Consumo e Produção Responsáveis, que discorre sobre alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o seu ciclo de vida; E o objetivo 15 – Vida Terrestre que discorre sobre assegurar a conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce interiores e seus serviços, além da necessidade de tomar medidas urgentes e significativas para reduzir a degradação de habitat naturais.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Environmental liabilities are recurrent in mining activities and therefore require attention, especially when they are going through the decommissioning phase. However, it is important to highlight that not all environmental liabilities are visible and therefore require specific assessment, diagnosis and monitoring tools. It is in this context that Electrical Resistivity Tomography has several applications. It is a high-speed, low-cost data acquisition tool capable of understanding the underground flows of contaminants and fluids through the difference in resistivity values, which can contribute to decision-making related to prevention, monitoring and mitigation measures. Although this tool is known, it is not usually used in the decommissioning of mining operations, and therefore this research can be used as a basis for mining companies that are going through similar situations related to environmental liabilities and mine decommissioning. In addition, this research fits mainly into 5 sustainable goals of the United Nations. Goal 3 – Good Health and Well-Being, which addresses substantially reducing the number of deaths and illnesses from hazardous chemicals, air and water pollution and contamination; Goal 6 – Clean Water and Sanitation, which addresses improving water quality by reducing pollution, eliminating dumping and minimizing releases of hazardous chemicals and materials, halving the proportion of untreated wastewater and substantially increasing recycling and safe reuse globally; Goal 9 – Industry, Innovation and Infrastructure, which addresses strengthening scientific research and improving the technological capabilities of industrial sectors in all countries; Goal 12 – Responsible Consumption and Production, which addresses achieving environmentally sound management of chemicals and all wastes throughout their life cycle; and Goal 15 – Life on Land, which addresses ensuring the conservation, restoration and sustainable use of terrestrial and inland freshwater ecosystems and their services, in addition to the need to take urgent and significant measures to reduce the degradation of natural habitats.

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

ANA JÚLIA TRAIBA DA SILVEIRA

ANÁLISE DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM
INTERFACE MINA A CÉU ABERTO E PILHAS DE
REJEITO EM MINERAÇÃO DE URÂNIO POR MEIO
DE INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA

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

Comissão Examinadora

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

Prof. Dr. LENON MELO ILHA
UNIPAMPA/Caçapava do Sul (RS)

Prof. Dr. LEONIDES GUIRELI NETTO
FIPT/São Paulo (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 11 de Abril de 2025.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por todas as portas abertas que tem colocado em minha vida e principalmente por mais esse ciclo que tem abençoado.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. César Augusto Moreira, pela oportunidade, paciência, por toda motivação e principalmente por acreditar no meu potencial. Admiro o profissionalismo, inteligência e paixão pela profissão que exerce, e sou grata por toda a orientação no decorrer de mais esta etapa.

Às Indústrias Nucleares do Brasil – INB/Caldas agradeço pelo interesse, apoio ao trabalho desenvolvido e por nos permitir acessar a área de estudo sempre nos tratando muito bem.

Aos demais orientandos do Prof. Dr. César Augusto Moreira pela ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho em campo.

À minha família, meus pais Luciano e Keila, por apoiarem todas as minhas decisões, meu irmão João Victor, meu avô Clodoaldo, meus tios, minhas primas, e ao meu companheiro de vida Carlos, por todo apoio, incentivo, fé e amor.

Em especial à minha avó Antônia, um dos maiores amores da minha vida, que infelizmente eu perdi nesse meio tempo, mas que sempre teve muito orgulho de mim assim como eu tinha e tenho dela.

Sou grata também aos meus amigos e por aqueles que não estão mais aqui há algum tempo, como a minha avó Dina, mas que permanecem em meu coração e que sei que estariam vibrando por mais essa vitória.

A todos vocês, meu muito obrigada e que Deus os abençoe!

RESUMO

A mineração é uma das principais fontes de recursos naturais e desenvolvimento econômico, mas também responsável pela geração de diversos passivos ambientais que implicam diretamente na qualidade do meio biótico e abiótico. A Unidade de Descomissionamento Caldas (UDC) das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), localizada no Complexo Alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais, foi a primeira unidade de extração e beneficiamento de minério para geração de concentrado de urânio, suas atividades foram iniciadas em 1982 e encerradas permanentemente em 1995, uma vez que a INB concluiu ser economicamente inviável. Desde então, a mina está em fase de descomissionamento, um procedimento moroso devido as dimensões do empreendimento mineiro e volume de material mobilizado. A Drenagem Ácida de Mina (DAM) é o principal passivo ambiental, produzido de forma constante e em volume que supera os 200m³/h em períodos chuvosos, devidamente captado e tratado quando surge em superfície. O resíduo desse processo é o Diuranato de Cálcio, conhecido como DUCA, composto por hidróxidos de metais e que é depositado na cava da mina a céu aberto, que também hospeda drenagem ácida de mina. Diante do exposto, este estudo objetiva um diagnóstico hidrogeológico na interface da cava da mina e da pilha de rejeito por meio do uso do método geofísico da Eletrorresistividade, para avaliar a eventual percolação de DAM e DUCA para o interior do aquífero fraturado. As seções geofísicas em 2D mostram o contraste entre as zonas de fluxo e zonas de rocha seca no aquífero poroso e fraturado, que combinados com os resultados de análise estrutural corroboram com a identificação dos principais caminhos preferencias no aquífero. Os modelos pseudo-3D mostram que as baixas resistividades elétricas medidas até aproximadamente 20m de profundidade são decorrentes da infiltração por DUCA e que a partir de aproximadamente 40m de profundidade esses valores são resultantes da infiltração por DAM. Os resultados sugerem a migração de DAM e DUCA para o interior do aquífero fraturado, condição que implica da formação de um passivo ambiental furtivo mas com impactos de longo prazo.

Palavras-chave: passivo ambiental; aquífero; drenagem ácida de mina; diuranato de cálcio; tomografia elétrica.

ABSTRACT

Mining is one of the main sources of natural resources and economic development, however, it is responsible for the generation of several environmental liabilities that directly affect the quality of the biotic and abiotic environment. The Decommissioning Unit in Caldas (UDC) of Indústrias Nucleares do Brasil (INB), located in the Poços de Caldas Alkaline Complex, Minas Gerais, was the first ore extraction and processing unit to generate uranium concentrate, its activities began in 1982 and were permanently closed in 1995 as INB concluded it was economically unviable. Since then, the mine has been in the decommissioning phase, however, in the years in which the mine was in operation, several environmental liabilities were generated in the area, including Acid Mine Drainage (AMD), the environmental liability that most important for closure purposes, this environmental liability is capable of contaminating surface and underground water resources and has a high treatment cost. Therefore, with the aim of alleviating this problem, the Osamu Utsumi Mine implemented a Marginal Water Treatment Unit to treat this acid diversion. This process generates a residue called Calcium Diuranate, composed of metal hydroxides and which is destined for the open pit mine. So, this project aims to understand and diagnose the dense flows of these contaminants (AMD and Calcium Diuranate), at the interface of the uranium mine pit and the Bota Fora-08 (BF-08) tailings pile through the use of geophysics by the Electroresistivity method. To carry out and discuss this work, data obtained in the field were processed to produce 2D geophysical materials and 3D modeling, which were related to existing structural analysis data from the area. The 2D geophysical photos show the contrast between the flow zones and dry rock zones in the porous and fractured aquifer, which combined with the structural results corroborate the identification of the main preferential paths in the rock aquifer. The pseudo-3D models show that the low resistivities up to approximately 20m deep are the result of infiltration by DUCA and that from approximately 40m deep these values are the result of infiltration by DAM.

Key words: Uranium; acid drainage; calcium diuranate, environmental liability; aquifer; contamination; electrical tomography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da Unidade de Descomissionamento Caldas.	15
Figura 2. Visão oblíqua e frontal da cava da mina e da pilha de rejeito - BF-08.	16
Figura 3. Drenagem ácida de mina e Diuranato de Cálcio na cava da mina à céu aberto.	17
Figura 4. Visão geral da área de estudos, com destaque na interface entre cava da mina e BF-08.	18
Figura 5. Rocha fraturada na interface Cava da Mina – BF-08.	18
Figura 6. Produção de yellow-cake para a conformação de combustível nuclear.	22
Figura 7. Etapas da geração de DAM até o descarte de lama (DUCA) na cava da mina à céu aberto da Unidade de Descomissionamento Caldas proveniente do tratamento químico de efluentes.	23
Figura 8. Exemplos de passivos ambientais na mina.	25
Figura 9. Distribuição anual da taxa de precipitação, baseada nas médias mensais medidas no período de 1977 a 1988. Taxa média em vermelho.	26
Figura 10. Indicação dos corpos hídricos e do divisor de bacias hidrográficas do complexo industrial da INB/Caldas.	27
Figura 11. Mapa geológico da área da cava da mina.	29
Figura 12. Esquema de passagem de corrente elétrica.	32
Figura 13. Princípio do método da Eletrorresistividade.	33
Figura 14. Procedimento de aquisição de dados pela técnica de tomografia elétrica.	35
Figura 15. Arranjo Schlumberger.	35
Figura 16. Principais evidências de percolação de água nas quatro frentes, representadas por cordões de água e manchas esbranquiçadas de caulinita.	38
Figura 17. Principais sistemas de fratura regionais identificados ao longo do complexo alcalino e sua correlação com o padrão de drenagem da bacia hidrográfica.	39
Figura 18. Análise estrutural das frentes da Unidade de Descomissionamento Caldas, com destaque para as orientações das principais descontinuidades e linhas geofísicas.	41
Figura 19. Principais feições geológicas que apresentam boa correlação com os modelos de inversão geofísica.	42
Figura 20. Vista geral da disposição de linhas de aquisição dos dados geoelétricos. A área de estudo está delimitada em vermelho no mapa de delimitação da área da mina.	43
Figura 21. Aquisição Geofísica.	44
Figura 22. Localização linha 01.	47
Figura 23. Modelo de inversão referente a linha 1.	48
Figura 24. Localização linha 02.	49
Figura 25. Modelo de inversão referente a linha 2.	49
Figura 26. Localização linha 03.	50
Figura 27. Modelo de inversão referente a linha 3.	50
Figura 28. Localização linha 04.	51
Figura 29. Modelo de inversão referente a linha 4.	52
Figura 30. Localização linha 05.	53
Figura 31. Modelo de inversão referente a linha 5.	53
Figura 32. Localização linha 06.	54
Figura 33. Modelo de inversão referente a linha 6.	54
Figura 34. Proximidade da DAM e DUCA da interface estudada.	55
Figura 35. Modelo de visualização 3D de resistividade.	56
Figura 36. Mapa de resistividade para 5m de profundidade.	57
Figura 37. Mapa de resistividade para 10m de profundidade.	58
Figura 38. Mapa de resistividade para 20m de profundidade.	59
Figura 39. Mapa de resistividade para 30m de profundidade.	60
Figura 40. Mapa de resistividade 40m de profundidade.	61
Figura 41. Mapa de resistividade para 50m de profundidade.	62
Figura 42. Mapa de resistividade para 60m de profundidade.	63

Figura 43. Comparação dos mapas 4, 5, 6 e 7.....	64
Figura 44. Demonstração de infiltração de DAM e DUCA.....	65
Figura 45. Situação da cava da mina com disposição do DUCA nos anos de 2013, 2019, 2021 e 2023.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Extensão e profundidade dos modelos de inversão de resistividade	44
--	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS.....	14
2.1.	Objetivos específicos.....	14
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	15
3.1.	Localização da área de estudo.....	15
3.2.	Principais passivos ambientais na área de estudo	15
3.3.	Histórico da Unidade de Descomissionamento Caldas.....	18
3.4.	Operações	20
3.5.	Consequências ambientais da atividade mineradora.....	24
3.6.	Clima e Vegetação	26
3.7.	Contexto hidrológico e hidrogeológico.....	26
3.8.	Contexto geológico Regional e Local	28
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1.	Método de Eletrorresistividade	31
4.1.1.	Técnica de aquisição dos dados	34
4.1.2.	Arranjo de eletrodos	34
4.2.	Estudos geofísicos desenvolvidos na UDC-INB.....	36
4.3.	Análise Estrutural.....	37
4.4.	Aquisição e processamento de dados	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1.	Modelagem Geofísica 2D.....	46
5.2.	Modelagem Geofísica 3D.....	56
6.	CONCLUSÕES.....	67
7.	REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

A descoberta do ouro no século XVIII foi um marco que influenciou a expansão das atividades mineradoras no mundo, a qual contribuiu para a consolidação do setor minerário no Brasil. Por possuir grande diversidade mineral, o país tem destaque no mercado internacional, fato que o coloca entre os 10 países com os maiores recursos naturais do mundo (BRASILMINING, 2022).

A mineração é uma das principais fontes de recursos naturais e desenvolvimento econômico, esse setor variou de 2,5% a 4% do PIB brasileiro entre os anos 2000 e 2019 (BRASIL, 2023). Porém, os impactos adversos decorrentes dessa atividade são significativos e podem afetar diretamente os ecossistemas, a saúde humana, além das áreas de interesse, isto é, áreas de exploração, uma vez que a mineração é uma atividade que consiste na exploração de recursos naturais, na qual ocorre o uso intensivo do solo, da água e resulta em alterações nas dinâmicas dos ecossistemas e na geração de resíduos (MILANEZ; et al., 2013; ARAÚJO, OLIVIERI E FERNANDES, 2014).

Os resíduos resultantes dessa atividade nas fases de lavra e beneficiamento são os estéreis e rejeitos, que devem ser manejados de forma correta para evitar acidentes e contaminações. O estéril é o material que é descartado na etapa de lavra e não é encaminhado para a usina de beneficiamento, enquanto o rejeito é o material associado ao minério descartado no momento ou após o processo de beneficiamento. Ambos podem ser dispostos em pilhas, barragens, ou em cavas de minas a céu aberto (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2020), no caso de depósitos de óxidos e sulfetos a razão minério-estéril é da ordem de gramas por tonelada (g/t), isto é, para obtenção de gramas do minério são geradas toneladas de estéreis (BRODA et al., 2014).

A Unidade de Descomissionamento Caldas, a primeira jazida de urânio explorada no Brasil localizada no Complexo Alcalino de Poços de Caldas, estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil, possui quantidades significativas de rejeitos sólidos na área da mina divididas em oito pilhas de rejeitos denominadas Bota-Fora (BF) e, com isso, apresenta grande potencial de contaminação ambiental (SOUZA, et al., 2013). As águas subterrâneas desse local são contidas em um sistema aquífero poroso, formado pela alteração dos materiais presentes nessas pilhas de rejeito, sobreposto a um aquífero fraturado formado por rochas cristalinas (FRANKLIN, 2007).

A mina esteve em operação de 1982 a 1995 e possui diversos passivos ambientais, porém, o mais relevante para fins de encerramento das atividades é a drenagem ácida de

mina (DAM) (NÓBREGA, 2008). Os sulfetos são minerais reativos comumente presentes em locais de mineração como pilhas de rejeitos e estéreis, que, quando oxidados, geram a DAM, uma solução ácida, cuja geração sofre influência direta da presença de microrganismos, temperatura, água e oxigênio. Além disso, por ser caracterizada por um baixo pH sua percolação entre as pilhas de rejeitos faz com que metais pesados e outros elementos sejam dissolvidos e incorporados em sua composição (SIMATE e NDLOVU, 2014).

Dentre os efeitos adversos causados pela geração da DAM, a contaminação das matrizes ambientais é uma das maiores preocupações (CETEM, 2001), principalmente a contaminação hídrica, uma vez que danifica os habitats naturais, afeta os solos, os sedimentos, e torna a qualidade das águas superficiais e subterrâneas inapropriadas tanto para contato humano, quanto para a manutenção da vida (FARFAN, et al., 2004; CAMPANER E LUIZ-SILVA, 2009).

As áreas afetadas podem sofrer com esses efeitos por longos anos, até mesmo séculos depois de sua geração (MACHADO E SCHNEIDER, 2008).

Uma alternativa de mitigação para esse passivo foi a implantação de um sistema de coleta, bombeamento e tratamento ativo com o objetivo de neutralizar a acidez, precipitar radionuclídeos e metais pesados, além de decantar os sólidos em suspensão (CIPRIANI, 2002; FAGUNDES, 2005). Ainda que ocorra o tratamento da DAM, nesse processo também é gerado um resíduo sólido denominado Diuranato de Cálcio (DUCA), constituído basicamente por hidróxidos metálicos em uma matriz de sulfato de cálcio, com teores de aproximadamente 0,25% de octóxido de triurânio (U_3O_8) e 2,5% de óxidos de terras raras (Tr_2O_3) (LIMA, 2014), o qual é destinado à cava da mina.

A geofísica pode ser uma alternativa para investigação subterrânea em sistemas aquíferos complexos, com possibilidade de discriminação de zonas saturadas e de fluxo, seja de água em estado natural ou carregada de sais, como no caso de soluções de DAM ou DUCA (CAMARERO E MOREIRA, 2017; CASAGRANDE E MOREIRA, 2019; TARGA et al., 2019; CAMARERO et al., 2021; TARGA et al., 2021; BUCHI et al., 2022; DO NASCIMENTO et al., 2022; DUZ et al., 2024; MOREIRA et al., 2024).

Para este estudo, foi utilizado o método da Eletroressistividade, por meio de linhas de tomografia elétrica posicionadas em campo a partir de análise prévia de fraturas e falhas, para compreensão de padrões de fluxo hidrogeológico e eventual percolação dos efluentes lançados na cava da mina para o interior do aquífero fraturado.

2. OBJETIVOS

Diagnóstico geofísico em interface de cava de mina de urânio e pilhas de rejeito, para compreensão de fluxo em sistema aquífero poroso (solo) e fraturado (rocha), de águas de chuva, drenagem ácida de mina (DAM) e Diuranato de Cálcio (DUCA) armazenados na cava da mina.

2.1. Objetivos específicos

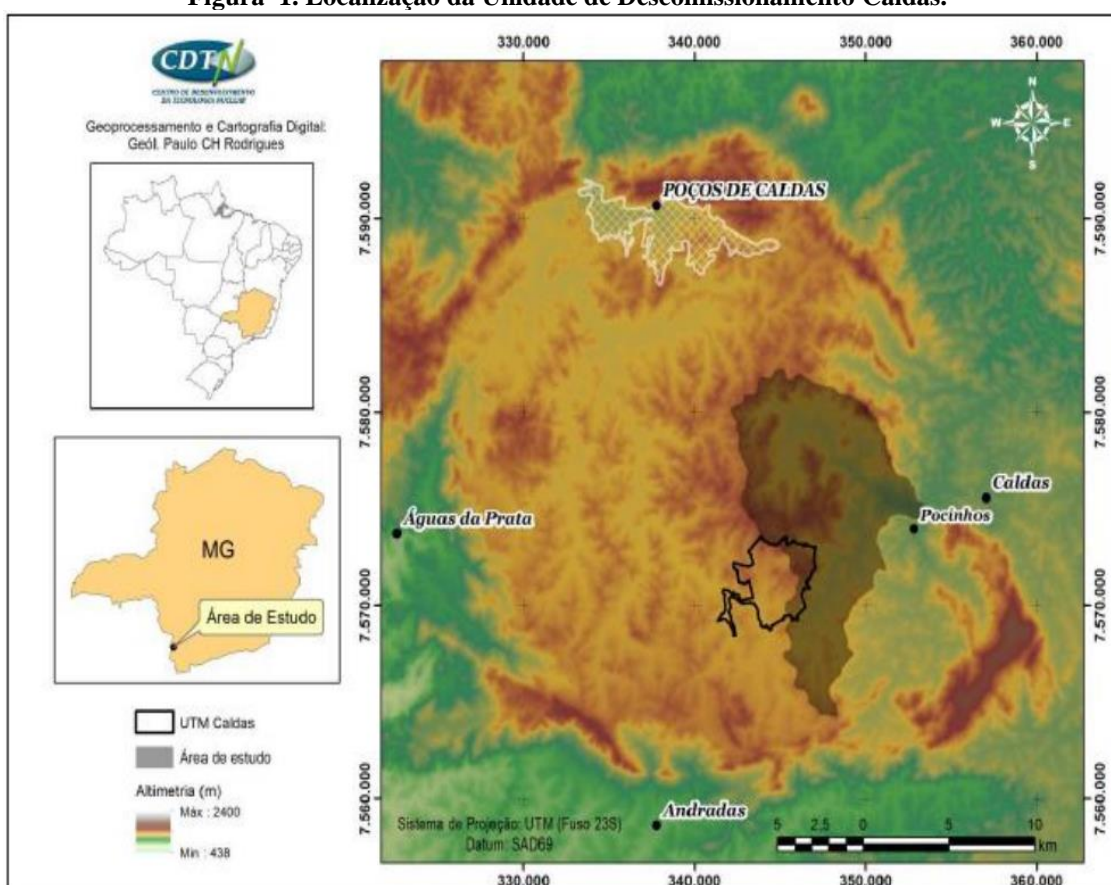
- Avaliar de forma conjunta dados geofísicos e estruturais para reconhecimento dos principais caminhos de fluxo subterrâneo;
- Avaliar as consequências do lançamento de DUCA na área da cava da mina.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização da área de estudo

A Unidade de Descomissionamento Caldas (UDC) das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), localizada no Campo do Cercado, no município de Caldas – MG, está situada a aproximadamente 180 km da capital de São Paulo. A unidade encontra-se na região centro-sul do planalto de Poços de Caldas, a sudoeste de Minas Gerais, e abrange uma área de aproximadamente 247 km². A UDC está inserida dentro de um polígono delimitado pelas coordenadas (23S WGS 84): 7.563.000 - 7.582.000 m N e 342.000 – 355.000 m E (Figura 1) (CARVALHO FILHO, 2014).

Figura 1. Localização da Unidade de Descomissionamento Caldas.



Fonte: Carvalho Filho, (2014).

3.2. Principais passivos ambientais na área de estudo

As instalações de maior complexidade em termos de impactos ambientais no âmbito do processo de descomissionamento são a cava da mina e os Bota-Foras (BF) (Figura 2).

Figura 2. Visão oblíqua e frontal da cava da mina e da pilha de rejeito - BF-08.



Os Bota-Foras foram planejados e construídos com o intuito de acondicionamento final de materiais de decapeamento gerados durante a abertura da cava, materiais estéreis resultantes da operação de lavra e rejeitos produzidos ao longo do processo de concentração de urânio.

Esses locais consistem em encostas de vertentes ou mesmo vales fluviais que foram aterrados a partir de critérios técnicos essencialmente baseados em questões geotécnicas, como estabilidade e atenuação de processos erosivos. Entretanto, não foram consideradas questões relativas a impactos ambientais como a geração e fluxo de drenagem ácida, seja por impermeabilização basal ou sistema de coleta de efluentes.

O Bota-Fora 08 (BF-08) é uma das maiores pilhas de rejeito presente na Unidade de Descomissionamento Caldas, possui uma área de 64,4 ha e volume igual a 15 milhões de m³ (CIPRIANI, 2002). A pilha foi construída mediante o preenchimento da vertente do córrego do Cercado, porém, vale destacar que por esse motivo o córrego teve seu trajeto alterado para impedir que infiltrações ocorressem no interior do BF-08.

Devido à grande variação granulométrica, a pilha apresenta altas taxas de permeabilidade e infiltração (MURTA, 2006), as quais favorecem a geração de drenagem ácida no local. Ainda, segundo pesquisa desenvolvida por Souza e Sánchez (1996), a reatividade química na área é intermediária, uma vez que a pirita (mineral gerador de DAM) está espalhada com porcentagens menores que 0,2 em relação ao total da rocha.

A cava da mina é uma das principais instalações da UDC-INB, foi planejada com

o intuito de retirar o minério bruto para posterior processamento e extração do urânio, ela possui aproximadamente 1.200 m de diâmetro, área superficial de 2,0 km² e profundidade aproximada de 150 m.

Após a paralisação das atividades, a cava da mina passou a ser utilizada como um reservatório de DAM e posteriormente também como destinação final do DUCA, o que persiste até os dias de hoje além do aporte de água da chuva (Figura 3).

Figura 3. Drenagem ácida de mina e Diuranato de Cálcio na cava da mina à céu aberto.



Fonte: Arquivo pessoal.

A drenagem ácida de mina (DAM) é uma solução ácida resultante da oxidação de minerais sulfetados presentes em rejeito ou estéril pela água. Essa solução gerada atua como um agente lixiviador durante o fluxo em rochas fraturadas, ou porosas, onde ocorre dissolução de minerais e incorporações de outros elementos (BORMA E SOARES, 2002), como metais pesados e elementos radioativos. Sua oxidação pode ser catalisada pela bactéria *Thiobacillus Ferrooxidans* (KLEINMANN et al., 1981; BORMA E SOARES, 2002), condição que acelera a geração de drenagem ácida em 5 a 20 vezes (SENGUPTA, 1993).

O DUCA ou Diuranato de Cálcio é um resíduo alcalino, rico em metais e que possui coloração escura devido a elevada presença de manganês, que é gerado pela unidade de tratamento da mina responsável pelo tratamento de DAM.

Diante do exposto, a área de estudo é a interface entre a cava de mina e a pilha de rejeito denominada Bota-Fora-08 (BF-08) (Figura 4). A interface foi escolhida por

possuir contato com duas frentes potenciais de impacto ambiental: o BF-08 por ser uma fonte de geração de DAM e a cava por possuir grande volume de efluentes (DAM, DUCA e água da chuva) em seu interior, além de apresentar em seu limite com a cava, fraturas expandidas decorrentes das detonações realizadas nos anos de atividade da mina, o que proporciona a infiltração de fluidos e contaminantes nos sistemas de aquíferos existentes na área (Figura 5).

Figura 4. Visão geral da área de estudos, com destaque na interface entre cava da mina e BF-08.



Figura 5. Rocha fraturada na interface Cava da Mina – BF-08.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.3. Histórico da Unidade de Descomissionamento Caldas

Em 1948 níveis radioativos em minerais de zircônio foram detectados no Planalto de Poços de Caldas por técnicos do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (FAGUNDES, 2005), que constataram a presença de urânio no caldasito, rocha rica em badeleíta (ZrO_2) e zircão ($ZrSiO_4$). Posteriormente em 1959, foi iniciada a

construção de uma usina em Poços de Caldas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) com objetivo de produzir concentrado de urânio por meio do tratamento físico-químico do caldasito, porém devido à escassez de recursos e dificuldades no sistema de tratamento em 1961 essas obras foram interrompidas (GOLDER ASSOCIATES, 2012; CARVALHO FILHO, 2014).

Logo em 1970, pesquisas a respeito de anomalias radioativas no município de Caldas foram desenvolvidas e resultaram na jazida de urânio do Campo do Cercado, que originou o Complexo Industrial de Poços de Caldas – CIPC (atual UDC-INB Caldas). Após quatro anos foi iniciada a abertura de recursos de pesquisa e serviços de decapagem na cava de mineração dessa jazida, onde foi retirado cerca de cinco milhões de metros cúbicos de material. Porém, foi apenas em 1982 que o Complexo Industrial de Poços de Caldas (CIPC) foi oficialmente aberto e passou a produzir comercialmente o concentrado de urânio e o ácido sulfúrico concentrado (98,5%). Devido ao andamento das atividades, medidas de engenharia passaram a ser incorporadas, como (CARVALHO FILHO 2014):

- Tratamento das águas ácidas e lançamento dos resíduos sólidos gerados na bacia de rejeitos (1983);
- Construção da Bacia Nestor Figueiredo (BNF) (1989), e ampliação da capacidade de suporte da bacia de rejeitos por meio da elevação da altura do vertedouro da barragem (1995).

Ainda em 1995 as atividades de lavra e beneficiamento foram permanentemente encerradas, uma vez que a INB concluiu que continuar com essas atividades seria economicamente inviável (CARVALHO FILHO, 2014).

Em 1996 as unidades do Complexo Industrial de Poços de Caldas foram adaptadas para o beneficiamento de um resíduo radioativo denominado de Torta II oriundo do tratamento químico do minério da monazita, e considerado um material pouco radioativo (BRASIL, 2010). Além disso, um minério com baixo teor de urânio também foi incorporado e armazenado no pátio do CIPC para reaproveitamento (CARVALHO FILHO, 2014).

Em 1997, medidas mitigadoras foram realizadas para atenuação dos impactos ambientais, vale destacar a impermeabilização do topo do Bota-Fora 04 (BF-04) e o redirecionamento do córrego da Consulta para fora da área da mina. Assim como, em 1998, em que o lançamento da parte sólida do tratamento das águas marginais (Diuranato de Cálcio – DUCA) que antes era destinado as bacias de rejeitos passou a ser armazenado na cava da mina (CARVALHO FILHO, 2014).

Logo em 2002 foi solicitado pelo IBAMA à INB, que a UDC-Caldas apresentasse um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) em até 24 (vinte e quatro) meses. Dessa maneira, com vistas ao descomissionamento da UDC, em 2005 todas as atividades da Unidade foram encerradas e também foi iniciado o processo de descontaminação das instalações e dos terrenos da área.

Além disso, em 2010 os efluentes advindos da Bacia Nestor Figueiredo (BNF) que antes eram bombeados para a cava da mina passaram a ser bombeados para unidade de tratamento de águas ácidas, e no ano seguinte essa bacia foi impermeabilizada (CARVALHO FILHO, 2014).

Foi apenas no ano de 2012 que o PRAD foi apresentado para o fechamento da mina, o qual propõe a recuperação da área, da cava da mina, barragem, locais das pilhas de rejeitos e as instalações da mineradora (BRASIL, 2020). Em maio do mesmo ano, após a realização da análise do PRAD, a INB publicou um documento a respeito da audiência pública efetuada na cidade de Poços de Caldas, a respeito do projeto executivo e do cronograma de implantação das atividades descritas no plano.

Feito isso, em 2014 a INB, o IBAMA e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) providenciaram um memorando de entendimento com o intuito de determinar um fórum oficial para discussão, orientação e recomendações de ações com vistas à remediação ambiental e o descomissionamento da UDC-INB Caldas (CARVALHO FILHO, 2014).

Importante destacar que as medidas a serem realizadas são de larga escala e ocorrerão em um grande período de tempo, por isso é necessário o monitoramento constante pela INB para garantir a segurança da unidade, das pessoas e do meio ambiente (BRASIL, 2020).

3.4. Operações

As principais atividades do Complexo Industrial de Poços de Caldas eram a de lavra, beneficiamento do urânio e geração do “yellow-cake”, conhecido também como concentrado de urânio, utilizado para produção de combustível das usinas nucleares Angra I e II (Figura 6). Os processos operacionais ocorriam em três etapas: mineração, processamento físico e processamento químico (CASAGRANDE, 2019; TARGA, 2020).

A usina de beneficiamento mineral e de extração do urânio foi planejada para tratar cerca de 750 mil t/ano. Nos anos de atividade da mineração foram lavrados

aproximadamente 2,3 Mt de minério e 108,1 Mt de estéril (relação estéril-minério 47:1) (FILHO, 2014). A massa final de minério beneficiado em 20 anos foi equivalente a 3 anos de beneficiamento relativo a capacidade de instalação do projeto, com produtividade próxima de 14% (CIPRIANI, 2002).

Em 1981, foi iniciada a atividade de lavra, que foi desenvolvida a céu aberto na configuração de bancadas com 4m de altura e bermas com aproximadamente 5 e 6m de largura posicionadas entre taludes de 16m (TARGA, 2020).

Para que ocorresse a extração do urânio era necessário a remoção de solos, argilas e materiais de fácil degradação por meio de escavação direta (“moto-scrapers”) ou trator de esteiras e carregadeiras (caminhões). Para o desmonte de rochas, era necessário o uso de explosivos seguido de transporte em carregadeiras, feito o desmonte, os minérios de urânio eram levados por caminhões até a usina, onde passavam por etapas de britagem (ALMEIDA NETO, 2000). A britagem ocorria na etapa de beneficiamento físico, e era seguido pela moagem e espessamento, para que fosse possível reduzir sua granulometria e então ser transportado para a unidade de beneficiamento químico (TARGA, 2020).

Quando o minério passava pelo britador primário ele era reduzido a um tamanho inferior a 25 cm, e era empilhado por máquinas (“stacker”) em um pátio destinado para o material britado, com 8 pilhas e capacidade de 200 mil toneladas de minério, conforme seu teor de urânio. A composição do “blend” possuía um teor médio de 680 ppm de urânio solúvel (CIPRIANI, 2002).

Esse material passava também por uma segunda britagem (britagem secundária) e por uma etapa de moagem por meio de moinhos de barra, com redução do minério a uma granulometria inferior a 1,168 mm (TARGA, 2020).

Na britagem secundária era adicionado o mineral pirolusita (MnO_2), com o intuito de promover a oxidação do U^{+4} para U^{+6} , e o ácido fosfórico com objetivo de contribuir na precipitação de zircônio e na redução do teor de metais no produto final, o “yellow cake” (Figura 6).

Figura 6. Produção de yellow-cake para a conformação de combustível nuclear.



Fonte:Rangel Junior e Costa, 2009.

Na etapa de moagem e de espessamento, era adicionado água tratada com cal, cujo resultado era uma polpa neutra com 55% de sólidos que posteriormente era bombeada para a usina de beneficiamento químico (TARGA, 2020).

No beneficiamento químico, última etapa do processo, a polpa de minério era sujeita a um tratamento químico, onde o concentrado de urânio era configurado em diuranato de amônia (DUA), conhecido também como “yellow-cake”, e o molibdênio era recuperado na forma de molibdato de cálcio (CaMoO_4) (FRANKLIN, 2007).

O processo de tratamento químico ocorria por meio da lixiviação em 4 baterias com 10 tanques de agitação cada uma, era utilizado ácido sulfúrico como solvente (com relação de 70 a 150kg para cada tonelada de minério) e temperatura controlada de 70°C no decorrer de um período de 6 horas (CIPRIANI, 2002).

Após lixiviação, as partes sólida e líquida eram separadas por meio de filtros tipo esteira a vácuo. Para melhor aproveitamento do urânio dissolvido o resíduo era lavado com água e levado para ser tratado. O material lixiviado era direcionado ao processo de clarificação para que as partículas finas (lama) ainda existentes fossem retiradas e para que ocorresse perda de elétrons através do clorato de sódio. Essa lama fina também era direcionada ao processo de clarificação e levada para estação de tratamento de rejeitos

sólidos (CIPRIANI, 2002).

A produção do “yellow-cake” resultava em efluentes líquidos que eram transferidos para a Unidade de Tratamento de Efluentes Líquidos, para que ocorresse a neutralização do ácido sulfúrico por meio da adição de calcário moído até um pH final entre 9 e 10, e para precipitação dos cátions metálicos (Al, Mg, Mn) na forma de hidróxidos. A produção do “yellow-cake” também era responsável pela geração de efluentes sólidos, constituído em 98% por minério original empobrecido em urânio, estes eram transferidos para a Unidade de Tratamento de Sólidos, onde era utilizado cal (CaO) para a neutralização da acidez. Ainda, os resíduos gerados a partir desse tratamento eram encaminhados para a bacia de rejeitos (CIPRIANI, 2002; FILHO, 2014).

A lama gerada a partir do tratamento químico de efluentes ácidos era composta por hidróxidos de metais, como o Ferro (Fe), Alumínio (Al), Manganês (Mn), e elementos radioativos, e estava inserida em uma matriz de sulfato de cálcio. Esse material foi nomeado de maneira local como “DUCA”, mas é conhecido também como Diuranato de Cálcio e compreende tanto as lamas geradas no tratamento de água da chuva, quanto as geradas na cava da mina e nas drenagens ácidas dos Bota-Foras (Figura 7) (CIPRIANI, 2002; NÓBREGA, 2008).

Figura 7. Etapas da geração de DAM até o descarte de lama (DUCA) na cava da mina à céu aberto da Unidade de Descomissionamento Caldas proveniente do tratamento químico de efluentes.



A) Cava da mina explorada. B) Pilha de rejeito-fonte geradora de DAM. C) Bacia Nestor Figueiredo-receptora de DAM. D) Cava da mina-reservatório de DAM; E) Estação de Tratamento de DAM; F) DUCA-resíduo gerado a partir do tratamento de DAM. Fonte: Arquivo pessoal.

3.5. Consequências ambientais da atividade mineradora

Segundo Fernandes, Franklin e Gomiero (2008) os resíduos resultantes da atividade mineradora e moagem refletem de maneira significativa no meio ambiente por meio de:

- Propriedades físicas;
- Propriedades químicas e mineralógicas;
- Volume e local ocupado;
- Modo de disposição dos resíduos.

A drenagem ácida de mina (DAM), um dos principais passivos gerados, afeta de modo direto a qualidade das águas receptoras e pode resultar em doses inadmissíveis de alguns constituintes nas águas disponibilizadas para a população. Até mesmo as águas subterrâneas podem ter sua qualidade comprometida devido a infiltração de efluentes contaminados (FERNANDES, et al., 2008).

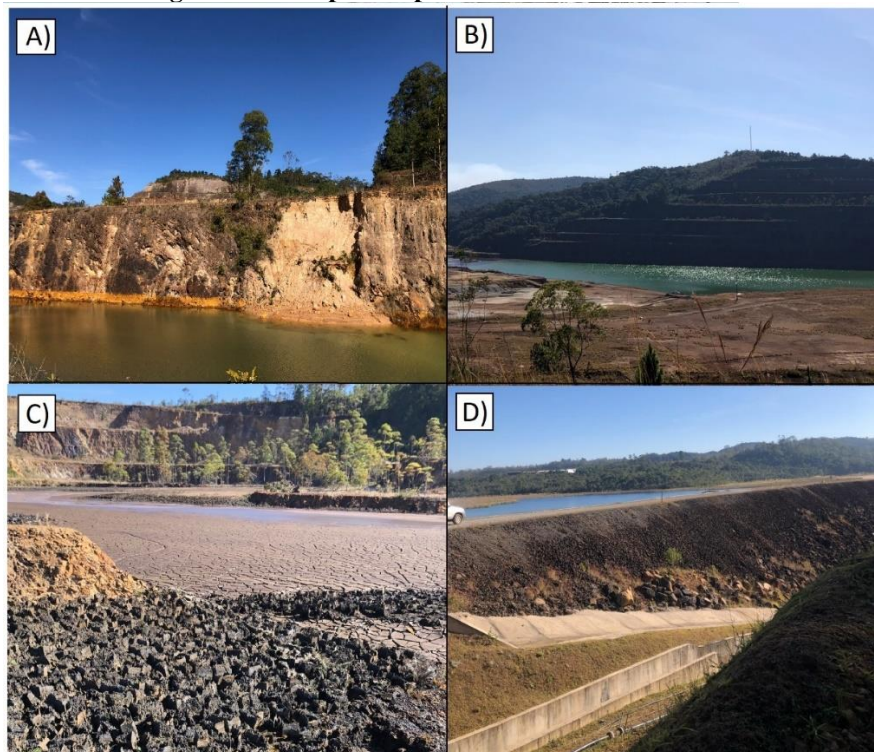
Os solos também acabam contaminados devido à presença de metais pesados e pH desbalanceado que impactam de maneira indireta no meio ecológico, destroem tecidos vegetais, e influenciam na disponibilidade de macro e micronutrientes, fatores importantes para desenvolvimento das plantas (COELHO, 2019). Além disso, o pH ácido faz com que o nitrogênio, fósforo e potássio fiquem na forma solúvel, enquanto que o cálcio e magnésio fiquem ausentes ou em pouca quantidade, e os elementos tóxicos (como Al, Fe e Mn) acabam hidrolisados e encontrados em altas concentrações, propriedades que contribuem para uma produção deficiente de matéria orgânica e aeração do solo, e o torna improdutivo (SCHROCK et al., 2001; HALCOMB e FARE, 2002; SIMATE e NDLOVU, 2014).

Além disso, o acúmulo de metais pesados (Cd, Cu, Pb e Zn) e isótopos radioativos também afetam organismos aquáticos, ou de maneira direta por meio de corpos d'água contaminados ou de maneira indireta por meio da cadeia alimentar. A influência do pH nas águas também pode alterar as funções fisiológicas dos organismos aquáticos e impossibilitar as trocas catiônicas durante sua respiração (JIWAN e KALAMDHAD, 2011). Portanto, de forma geral, os danos causados em meio subsuperficial podem ser divididos entre químicos, físicos, biológicos e ecológicos.

De 1994 à 2001 o volume de DAM que chegou a ser tratado foi de 18 milhões m³, e seu custo chegou a US\$ 1,2 milhão (CIPRIANI, 2002). Foram os impactos gerados a partir da DAM que incentivaram as aplicações de medidas preventivas e de remediação, com principal objetivo em controlar sua geração diretamente na fonte e seu processo de migração (JOHNSON e HALLBERG, 2005; SKOUSEN et al., 2018). A construção da Estação de Tratamento foi uma das medidas que visou atenuar os impactos gerados por esse efluente, porém o ponto negativo desse tratamento é a geração do DUCA (Diuranato de Cálcio), o qual é destinado a cava da mina.

Vale destacar que a grande problemática é que estudos estimam que a geração da DAM em bacias de rejeitos é de no mínimo 200 anos e em pilhas de estéril é de 600 anos, dados que mostram a necessidade e urgência de técnicas novas e permanentes de remedição para o tratamento dessas drenagens (FERNANDES e FRANKLIN, 2001). Na figura abaixo é possível observar alguns dos passivos ambientais presentes na área atualmente (Figura 8).

Figura 8. Exemplos de passivos ambientais na mina.

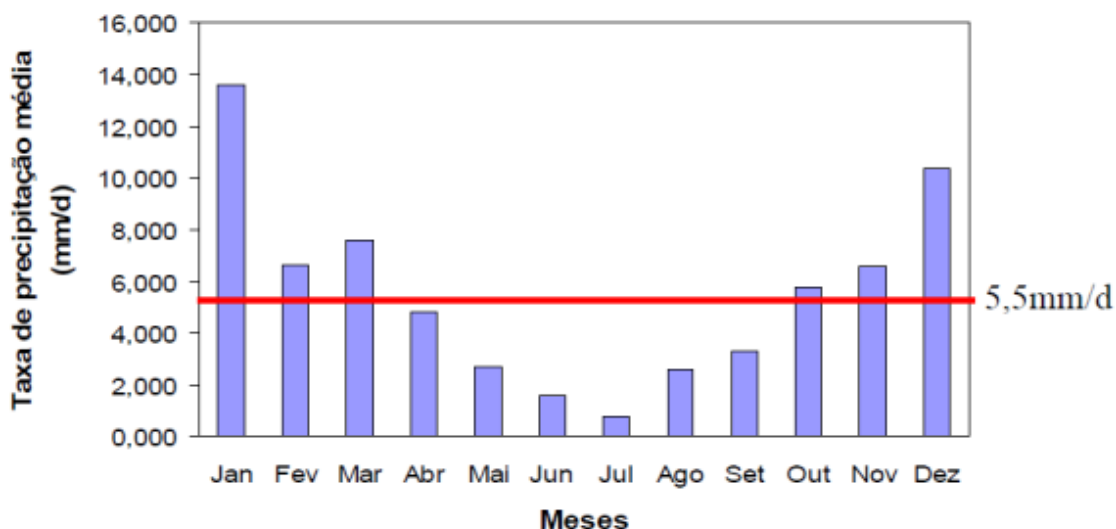


A) Movimentação de solo e rocha devido as fraturas resultantes de explosões realizadas para extração do minério. B) Represamento de água na área da cava da mina. C) Disposição de lama de rejeito. D) Barragem de rejeitos. Fonte: Arquivo pessoal.

3.6. Clima e Vegetação

A região é caracterizada por um clima tropical de altitude e possui duas estações bem definidas. A primeira tem início no mês de abril e permanece até o mês de setembro, onde predominam a estiagem e as baixas temperaturas. A segunda iniciada em outubro e permanece até o mês de março, onde predominam as elevadas temperaturas e precipitações (CIPRIANI, 2002; FAGUNDES, 2005). No gráfico abaixo é possível verificar as variações da precipitação na mina durante 12 meses, com destaque na taxa média de precipitação da mina entre os anos de monitoramento (Figura 9) (FRANKLIN, 2007).

Figura 9. Distribuição anual da taxa de precipitação, baseada nas médias mensais medidas no período de 1977 a 1988. Taxa média em vermelho.



Fonte: Franklin (2007).

A temperatura média anual é de 18°C, onde a mínima pode chegar a valores inferiores a 0°C e a máxima, de maneira rara, a 30° (FAGUNDES, 2005).

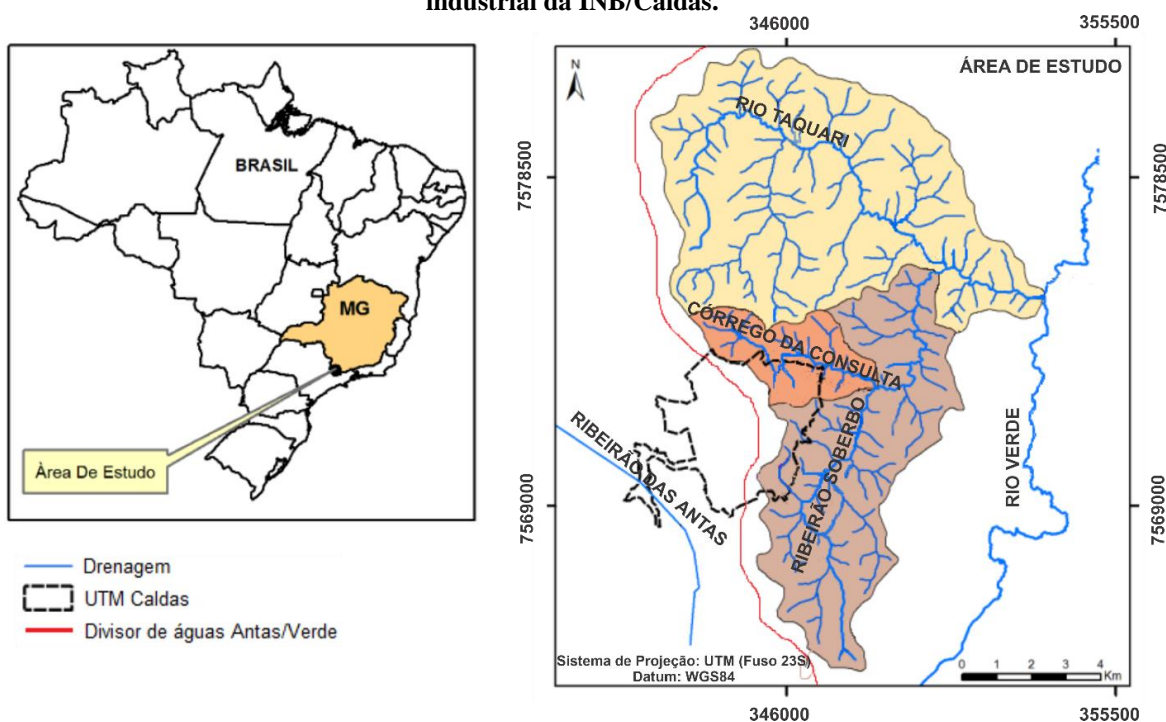
A vegetação predominante na região é o cerrado, gramíneas rústicas (localizadas em colinas e superfícies planas) e matas (localizadas no entorno dos rios e encostas de montanhas) (NUCLEBRAS, 1977, citado por PRADO, 1994), ampliada ainda mais durante os meses com elevadas precipitações (FRAENKEL et al., 1985).

3.7. Contexto hidrológico e hidrogeológico

A INB - Caldas está situada sobre o divisor de águas de dois sistemas de drenagem (Figura 10) (GARDA, 1990).

O primeiro sistema de drenagem é o do Ribeirão das Antas, onde as águas seguem dos reservatórios da mina até a represa Bortolan na cidade de Poços de Caldas, essa represa além de ser utilizada para recreação abastece uma usina hidrelétrica de pequeno porte. E o segundo é o do Rio Verde, nessa bacia existem o Ribeirão Soberbo e o Córrego da Consulta, corpos hídricos que circulam pelas áreas da mina. Ainda, o Ribeirão Soberbo desagua no rio Taquari, que posteriormente desagua no Rio Verde, essas águas são majoritariamente utilizadas para atividades de irrigação, pecuária e pesca (CIPRIANI, 2002).

Figura 10. Indicação dos corpos hídricos e do divisor de bacias hidrográficas do complexo industrial da INB/Caldas.



Fonte: Modificado de Oliveira et al. (2018)

Ainda na figura acima é possível verificar o Córrego da Consulta, que deságua no Ribeirão Soberbo e cujo curso foi desviado devido à existência de uma grande pilha de rejeitos (BF-04) em seu caminho. Além disso, é possível verificar também o Córrego do Cercado, que flui próximo ao BF-08 e deságua no Ribeirão das Antas (CARVALHO FILHO, 2014).

As águas dessa região são conhecidas devido ao seu potencial atrativo turístico relacionado a presença de fontes termais (CASAGRANDE, 2019).

Do ponto de vista hidrogeológico a área de estudo está inserida em um sistema aquífero poroso e fraturado. Este aquífero é dividido em três principais zonas, a rasa, a

intermediária (até 200m de profundidade) e a de circulação profunda (aproximadamente 2000m de profundidade) (CRUZ e PEIXOTO, 1989). As propriedades físico-químicas e composições químicas das águas subterrâneas de cada uma dessas zonas são diferentes devido as diferentes profundidades.

O aquífero poroso passa a existir a partir do momento em que pilhas de rejeito e estéril são construídas, e a partir do intemperismo de rochas mãe na superfície. Dessa maneira, as pilhas presentes na área fazem parte do sistema hidrogeológico local, uma vez que influenciam nas dinâmicas e nos caminhos de fluxo dos fluidos (FRANKLIN, 2007).

Além disso, o Maciço Alcalino de Poços de Caldas é constituído por um sistema de fraturas e falhas que também atuam como caminhos preferenciais para a água, que permite a infiltração em grandes níveis de profundidade. As águas superficiais possuem um pH com um caráter mais ácido (pH 3 - 4), enquanto que as águas de fluxos subterrâneos possuem um pH menos ácido (pH de 5 a 6) (MIEKELEY et al., 1992).

A atividade mineradora na UDC-INB provocou mudanças tanto nas dinâmicas das águas subterrâneas da região, quanto na topografia da cava da mina com conseqüente diminuição do nível lençol freático (HOLMES et al., 1992). Essas alterações nos fluxos das águas subterrâneas e nas drenagens superficiais, modificaram os cursos das águas oxidantes e redutoras, e fizeram com que estas águas redutoras fluíssem para níveis superficiais e contribuíssem para a oxidação de íons, como os sulfetos (CIPRIANI, 2002).

3.8. Contexto geológico Regional e Local

A área está inserida no Maciço Alcalino de Poços de Caldas, uma estrutura de caldeira vulcânica de forma circular com cerca de 35 km de diâmetro e delimitada por escarpas de falha (ALBERTI, 2008). Possui relevo circular e seu interior é caracterizado pela presença de uma depressão.

Ainda, o maciço alcalino é reconhecido pela grande presença de discontinuidades, falhas e fraturas resultantes do episódio de reativação tectonomagmática da plataforma Sul-Americana durante o Mesozoico, assim como, pela presença de estruturas circulares em razão da existência de cones vulcânicos (ALMEIDA, 1976).

Os episódios vulcânicos que ocorreram na área foram responsáveis pelo aumento da temperatura nas águas e conseqüente ocorrências de processos hidrotermais, que contribuíram para a formação de jazidas minerais na área mina. Esses processos

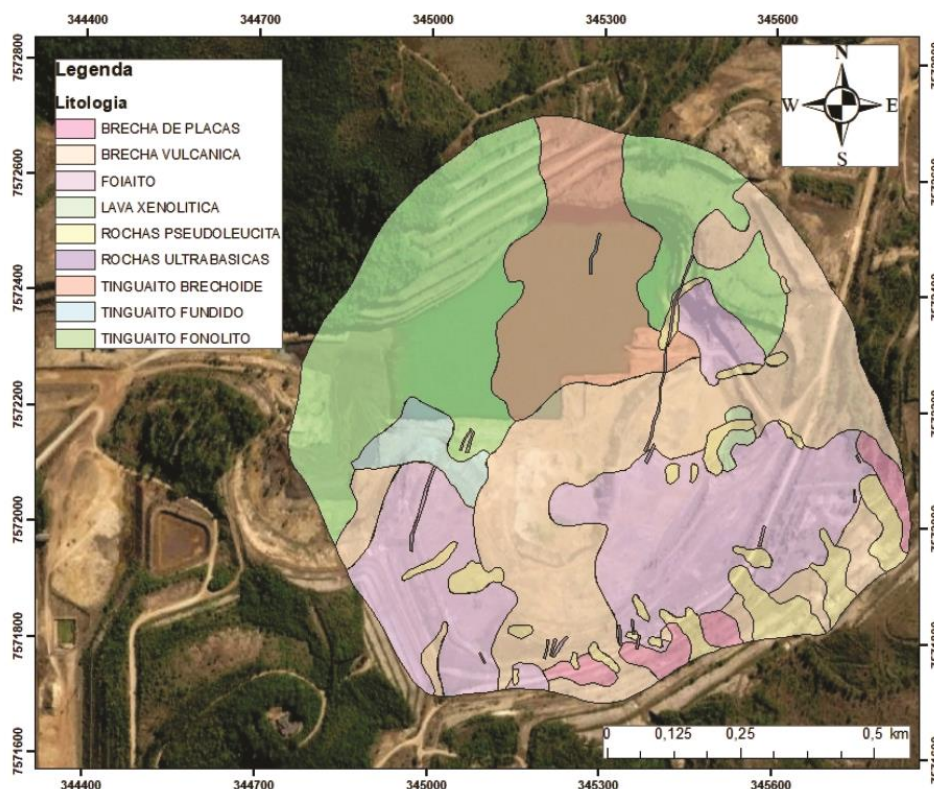
hidrotermais resultaram em um aumento significativo na concentração de minérios metálicos, como os sulfetos, além de minerais de urânio, molibdênio e enriquecimento potássico (CIPRIANI, 2002).

Devido as mudanças de pressões e temperaturas, as rochas da mina ficavam expostas as soluções hidrotermais que carregavam urânio e outros elementos, que percolavam e infiltravam nos corpos de brechas, e então as impregnavam com urânio, molibdênio e outros elementos (CIPRIANI, 2002).

As principais litologias nesse planalto são os tinguaitos/fonólitos, foiaítos, brechas vulcânicas e de placa, rochas ultrabásicas e em menor quantidade rochas pseudo-leucita (Figura 11) (MAGNO JÚNIOR, 1985). Ainda, os minerais de pirita e fluorita estão presentes nas rochas na forma de cristais muito pequenos e de maneira espalhada, seja no preenchimento de cavidades ou vesículas ou ainda dispersadas na matriz das brechas.

Vale destacar que estas rochas estão estabelecidas acima do embasamento Pré Cambriano (FAGUNDES, 2005).

Figura 11. Mapa geológico da área da cava da mina.



Fonte: Adaptado de Magno (1985).

Dentre as litologias citadas, os tinguaitos e fonólitos são os mais recorrentes no local (MAGNO JÚNIOR, 1985).

Além dos processos hidrotermais, eventos meteóricos e tectônicos também foram responsáveis pela mineralização do urânio (FRAENKEL et al., 2000).

A proximidade entre as rochas alcalinas e a superfície faz com que a infiltração e percolação das águas na subsuperfície seja favorável, esta realidade foi responsável pela geração das denominadas 'frentes redox', e pelas mineralizações secundárias do urânio (CAPOVILLA, 2001).

Estudos anteriormente desenvolvidos na cava da mina, mostraram que as fraturas e descontinuidades possuem uma atitude preferencial de N25E 55NW e outras de menor projeção N83W 55NE, N25E 40SE e N81E 85NW (MIYASAKI, 2014).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A Geofísica é a ciência que envolve estudos rasos e profundos no interior do Planeta Terra por meio da análise de variações de propagação de ondas, dos campos magnéticos, gravitacionais e elétricos. A muitas décadas ocorrem estudos geofísicos em alvos rasos, seja em exploração mineral, hidrogeologia, geotecnia e recentemente em estudos de passivos ambientais. Vale ressaltar que dentre suas aplicações, as mais relevantes são diagnóstico de depósitos de petróleo, corpos mineralizados e mananciais de água subterrânea (LUIZ e SILVA 1995). Ainda, possui destaque por possuir baixo custo e rápida aquisição de dados (REYNOLDS, 2011).

4.1. Método de Eletrorresistividade

Esse método é fundamentado na Lei de Ohm, que determina que a diferença de potencial entre dois pontos de um resistor é proporcional à corrente elétrica que é estabelecida nele. Porém, ainda que seja mantida a mesma diferença de potencial e as mesmas dimensões, mas com alteração do material resistor, o resultado será outro, e isso devido a resistência elétrica, uma propriedade específica de cada material. Essa relação pode ser representada pela equação (1).

$$R(\Omega) = \frac{V(V)}{I(A)} \quad (1)$$

Onde,

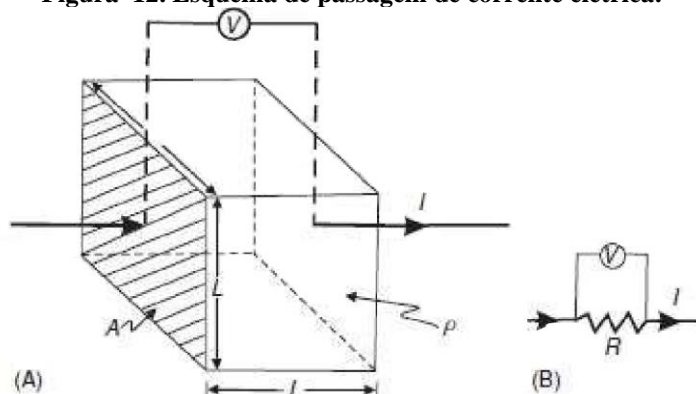
R - resistividade elétrica (Ω);

V - diferença de potencial (V);

I - corrente elétrica (A).

A resistência elétrica varia tanto de acordo com o material quanto com as suas dimensões e forma geométrica, cujo valor é proporcional ao comprimento do material (L) e inversamente proporcional a sua área (A). Já a resistividade elétrica verdadeira, constante de proporcionalidade da equação, é a propriedade física que vai permitir que a passagem da corrente elétrica propague com facilidade ou não (Figura 12). Essa relação pode ser expressa pela Equação 2.

Figura 12. Esquema de passagem de corrente elétrica.



Fonte: Kearey et al. (2002)

$$R (\Omega) = \frac{\rho L (m)}{A (m^2)} \quad (2)$$

Onde,

R - resistividade elétrica (Ω);

L – comprimento do material (m);

A - área (m^2);

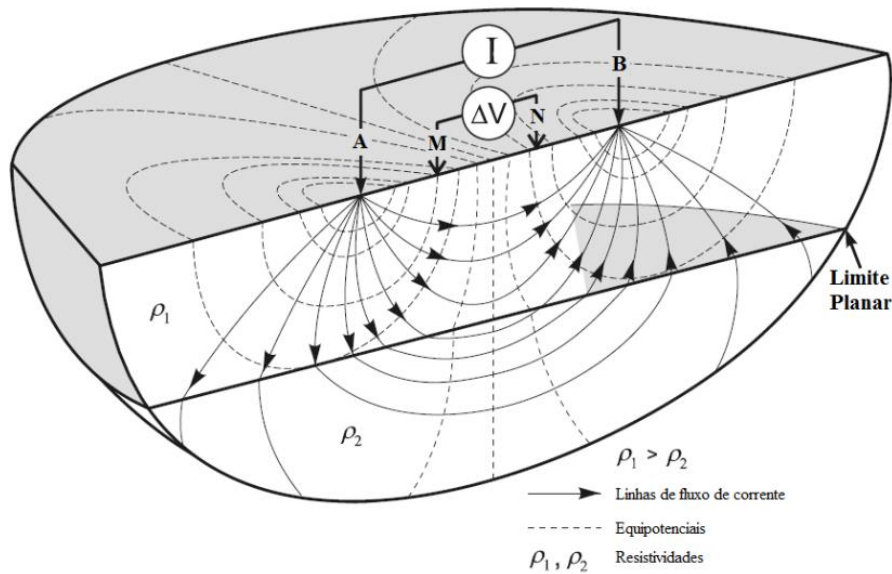
ρ - resistividade elétrica verdadeira (ohm.m)

Com a combinação das Equações 1 e 2 é possível isolar a resistividade elétrica, e sua equação pode ser verificada abaixo (Equação 3).

$$\rho (\Omega.m) = \frac{V (V) A (m^2)}{I (A) L (m)} \quad (3)$$

Nos ensaios de resistividade é determinado a resistividade elétrica aparente do solo e das rochas em diferentes níveis de profundidades. Para que isso ocorra, dois pares de eletrodos são dispostos no solo, um par para inserção de corrente elétrica na superfície por meio de um arranjo geométrico pré-definido e o outro para medir a diferença de potencial resultante da passagem do campo elétrico (Figura 13).

Figura 13. Princípio do método da Eletrorresistividade.



Fonte: Adaptado de Knödel et al (2007).

Para o cálculo da resistividade aparente (ρ_a) é considerado:

- Coeficiente geométrico (K) entre os eletrodos de corrente (A e B);
- Coeficiente geométrico (K) entre os eletrodos de potencial (M e N);
- Diferença de potencial (ΔV);
- Intensidade da corrente elétrica propagada (I).

É importante ressaltar que, em meios heterogêneos a resistividade não é constante, ela depende da posição, distância e localização dos eletrodos, portanto, o valor de resistividade é diferente para cada medida. Além disso, a distância entre os eletrodos influencia diretamente na profundidade de investigação, quanto mais distantes estiverem os eletrodos maior será a profundidade a ser alcançada (KEAREY et al., 2002).

É possível calcular o potencial entre os eletrodos MN pela Equação 4.

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right\} \quad (4)$$

E, portanto, a resistividade pode ser calculada pela Equação 5.

$$\rho_a = \frac{2\pi \Delta V}{I \left\{ \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right\}} \quad (5)$$

O método é indicado em estudos ambientais por ser sensível às variações de resistividade elétrica dos diferentes componentes do meio, assim, a resistividade elétrica pode indicar corpos muito condutores, quando apresenta baixa resistividade, ou então isolantes, quando apresenta resistividade elevada, nesses casos a propagação de corrente elétrica ocorre através de íons presentes em fluidos contidos em fraturas ou poros. Ainda, o processamento desses dados permite a geração de modelos de inversão bidimensionais e tridimensionais para melhor compreensão dos resultados.

4.1.1. Técnica de aquisição dos dados

A técnica utilizada para este trabalho foi a de Tomografia Elétrica, a qual realiza medidas de variações laterais e verticais dos parâmetros físicos em subsuperfície e é indicada para estudos geofísicos rasos, fatos que justificam a escolha para este trabalho.

Seu uso permite o alcance e análises das alterações laterais assim como em diversos níveis de profundidades. Por isso é comumente utilizada em estudos ambientais, com vistas à um diagnóstico espacial.

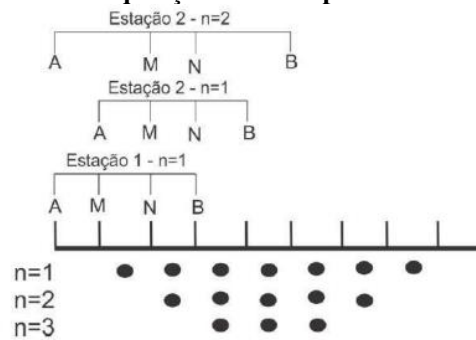
Essa técnica é baseada na disposição de uma linha geofísica na área de interesse conectada a eletrodos e um resistímetro. A partir dessa configuração, medidas são adquiridas de acordo com as configurações previstas para os eletrodos, que geralmente são dispostos em grades regulares com o intuito de cobrir toda a área de estudo (KAUFMAN e ANDERSON, 2010).

4.1.2. Arranjo de eletrodos

Dentro da técnica de aquisição é possível selecionar arranjos de eletrodos de acordo com a necessidade do trabalho, com objetivo de propiciar um maior alcance e eficiência de análise em profundidade (KEAREY et al., 2002).

Esses arranjos servem para investigar a subsuperfície por meio da disposição dos eletrodos na superfície, com diferenças de resolução e profundidade de investigação (Figura 14) (REYNOLDS, 1997).

Figura 14. Procedimento de aquisição de dados pela técnica de tomografia elétrica.



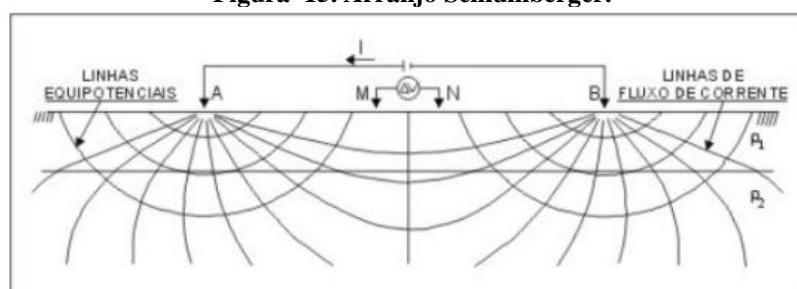
Fonte: Reynolds (1997)

Os arranjos mais utilizados são Schlumberger, Wenner e dipolo-dipolo, os quais possuem relações geométricas e distâncias pré-definidas. Porém vale destacar que existem outras configurações na bibliografia.

Para determinação do arranjo a ser utilizado em determinado caso é necessário avaliar o foco do estudo, a escolha depende da profundidade de investigação necessária, sensibilidade aos materiais superficiais e subsuperficiais, topografia e questões operacionais.

Para desenvolvimento deste trabalho o arranjo selecionado foi o Schlumberger, caracterizado por utilizar quatro eletrodos, onde dois são de corrente (AB) e dois são de potencial (MN) (Figura 15). Os eletrodos AB possuem uma distância pré-definida e, entre eles, com uma distância menor, são colocados os eletrodos MN, todos são posicionados linearmente e simetricamente em relação ao ponto central do arranjo, e quanto maior for a distância dos eletrodos maior a profundidade a ser alcançada. Vale destacar que esse arranjo foi escolhido principalmente devido a sua ótima relação sinal-ruído, sendo assim quase toda a energia elétrica que é inserida no solo retorna em resultados com boa resolução, atenua ruídos, irregularidades da superfície e variações laterais. Portanto, os resultados apresentam elevada precisão (MOREIRA et al., 2016).

Figura 15. Arranjo Schlumberger.



Fonte: Telford et al. 1990.

4.2. Estudos geofísicos desenvolvidos na UDC-INB

Existem diversos estudos de aplicação do método de Eletroresistividade pela técnica de tomografia elétrica com o arranjo Schumberger na área da UDC-INB. Dentre estes podem ser destacado os seguintes estudos:

Casagrande et al. (2020), utilizou o método acima para estudar o Bota-Fora – 04, com o intuito de reconhecer as zonas de sulfeto ao longo de diversas profundidades, os resultados revelaram uma infiltração substancial de água do riacho Consulta, e identificaram zonas mais críticas para a geração DAM em níveis rasos onde o material está mais exposto a O₂ atmosférico e infiltração de água meteórica. Desta forma, os resultados geofísicos foram satisfatórios, e contribuíram para a gestão da remediação ambiental e também para demonstrar a potencial de aplicabilidade de métodos geofísicos em resíduos de mineração.

No trabalho de Targa et al. (2021), foi realizada uma análise hidrogeológica no Bota-Fora - 08, para entender a geração e transporte de DAM. Foi utilizada a investigação geofísica pela tomografia elétrica e arranjo Wenner-Schlumberger. Os resultados foram usados, como entrada para modelos 2D e pseudo-3D de parâmetros de resistividade e cargabilidade, os quais constataram zonas saturadas não afetadas e zonas impactadas pela drenagem ácida, além de três áreas no interior dos rejeitos com alto teor de sulfetos. O estudo geofísico proporcionou uma boa compreensão da dinâmica hidrogeológica do fluxo de DAM no BF-08, bem como identificou zonas de sulfeto, os quais favoreceram uma melhor compreensão das medidas de mitigação in situ que poderiam ser usadas para minimizar e controlar com mais sucesso os passivos durante o descomissionamento e fechamento da mineração.

No estudo de Nascimento et al. (2022), os métodos aplicados foram o de Polarização Induzida e o de Eletroresistividade, pela técnica do caminhamento elétrico com arranjo Schlumberger, com objetivo de caracterizar os fluxos de água em meios porosos e identificar condições ácidas e salinas em subsolo relacionado à geração da DAM. O método demonstrou ótimos resultados, que por meio da elaboração de plantas 2D e 3D, permitiram a identificação de caminhos preferenciais condutoras de fluido dentro da pilha de rejeito, além de indicar a possibilidade de geração de DAM no local.

No estudo de Camarero (2022) foi empregada a técnica de tomografia elétrica a partir dos arranjos Dipolo-dipolo e Schulumberger com o objetivo de entender e diagnosticar as zonas preferenciais de geração e fluxo de DAM para estabelecer medidas

de mitigação para sustentabilidade ambiental de longo prazo. Dados estruturais e hidroquímicos também foram utilizados e a compilação desses dados proporcionou condições para distinguir áreas onde a água flui por fraturas no maciço e áreas com maior contribuição de águas ácidas. Foram identificadas também contribuições de drenagem ácida em todas as frentes de exploração da cava, associada a zonas mineralizadas remanescentes. O método geofísico da Eletrorresistividade se mostrou adequado a proposta do estudo, e os resultados obtidos a partir dele permitiram levantar propostas de mitigação.

No trabalho de Buchi (2019) também foi utilizada a técnica de tomografia elétrica a partir do arranjo Schumberger. O objetivo foi entender a dinâmica hidrogeológica na pilha de estereis denominada BF-8 da mina para diagnóstico do fluxo subterrâneo presente no local, os resultados foram satisfatórios e mostraram que mesmo no período de estiagem da região de estudos ocorre geração de DAM, e a análise das seções 2D permitiu a diferenciação de zonas de acúmulo de águas naturais de zonas de acúmulo de águas de alta salinidade, além de constatar que há constante contribuição do aquífero poroso, constituído pelo material que compõe o BF-8, para o aquífero fraturado, formado pelo embasamento cristalino. Conforme pontuado acima, este método, técnica e arranjo são usualmente utilizados em trabalhos de contaminação em subsuperfície, principalmente por apresentar alto grau de fidelidade a realidade geológica e por possuir ótima relação sinal/ruído, fatores que influenciam na qualidade da resposta.

4.3. Análise Estrutural

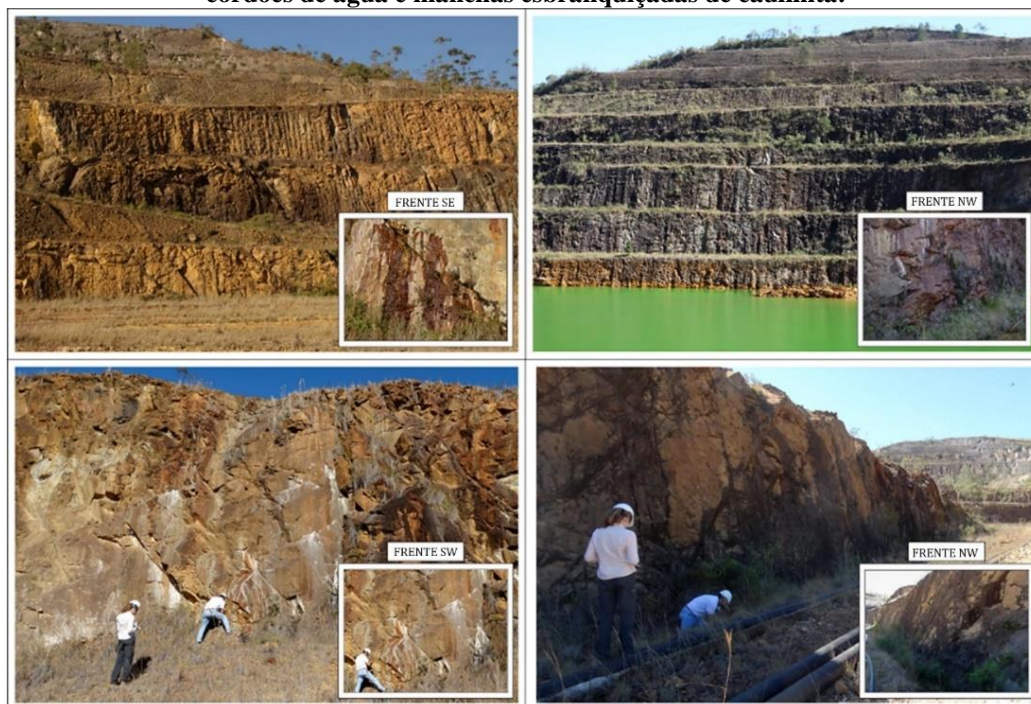
Os dados de análise e interpretações estruturais utilizados nesse trabalho foram extraídos do trabalho de Targa et al., 2019 e são apresentados abaixo.

O trabalho foi realizado na cava da mina, próximo a interface cava da mina - BF-08, e a análise estrutural foi realizada em duas etapas:

- Extração das características estruturais em escala regional, retiradas por meio de imagens aéreas fornecidas pelo Google Earth Pro e digitalizadas pelo software ArcGis 10.3;
- Levantamento estrutural de planos de fratura em maciço rochoso ao longo de quatro frentes de lavra que constituem a cava da mina (cada frente foi nomeada a partir de sua posição cardinal (NE, SE, SW e NW)).

Vale destacar que para este trabalho em desenvolvimento as frentes de interesse estudadas no trabalho anteriormente desenvolvido são as frentes NW e SW, por estarem próximas e terem influência na interface objeto deste estudo. A obtenção de dados ocorreu durante a estação seca por meio de uma bússola Brunton e notação Clar (direção/mergulho). Foram levantadas 755 medidas de fraturas ao longo das quatro frentes e foi documentado também a presença de fluxo de água nas discontinuidades existentes (Figura 16).

Figura 16. Principais evidências de percolação de água nas quatro frentes, representadas por cordões de água e manchas esbranquiçadas de caulinita.



Fonte: Modificado de Targa et al., 2019.

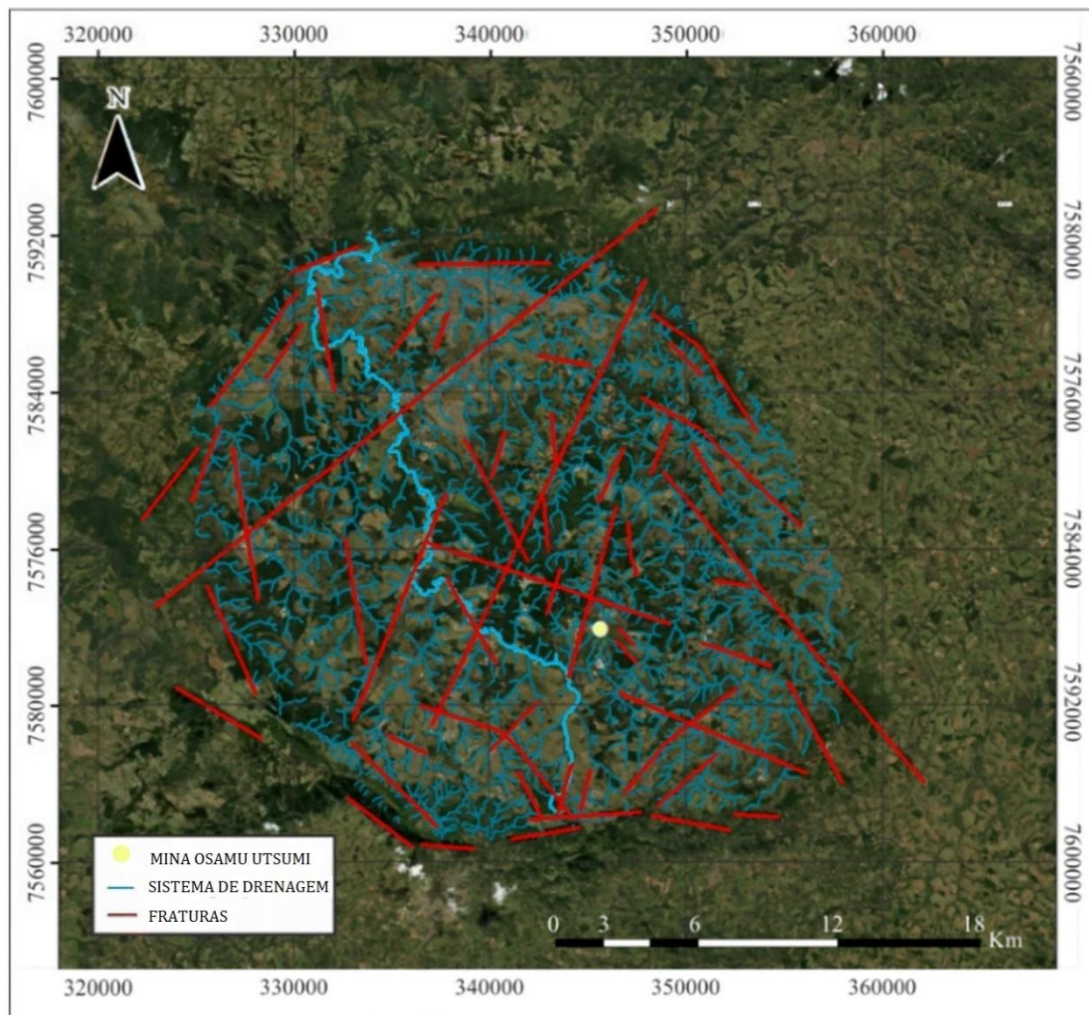
Os dados foram organizados em arquivos txt. para compor diagramas de frequência por meio do Software Openstereo.

O trabalho apresentou a integração entre levantamento estrutural e dados geofísicos, com intuito de possibilitar um diagnóstico hidrogeológico da mina e identificar as zonas de fratura que favorecem a percolação da água e contribuem para o processo de drenagem ácida da mina.

Os resultados obtidos verificaram dois sistemas de fraturas principais no cenário estrutural regional, presentes nas direções NE-SW e NW-SE (Figura 17). Ainda, foi avaliado que as fraturas tendem a seguir as bordas circulares do complexo alcalino de

Poços de Caldas, uma evidência das fissuras circulares e radiais que permitiram a ascensão do magma nefelínico e a formação de um dique anelar quase completo.

Figura 17. Principais sistemas de fratura regionais identificados ao longo do complexo alcalino e sua correlação com o padrão de drenagem da bacia hidrográfica.



Fonte: Modificado de Targa, 2019.

Na porção noroeste do complexo alcalino, próximo à cidade de Poços de Caldas, as fraturas regionais tendem para NE–SW. Na porção sudeste, é possível notar uma intersecção entre dois sistemas de fraturas, com tendência para NE e NW, quase ortogonais entre si, padrão também observado próximo à Unidade de Descomissionamento Caldas. Outra feição que destaca o sistema de fraturas regional é o padrão de drenagem do Rio das Antas, onde o rio flui de sudeste para noroeste com riachos em ângulos quase retos para NE e depois para NW.

Há evidência de fluxos de água devido a manchas esbranquiçadas de caulinita e pequeno crescimento de vegetação, identificadas nas frentes NE, SW e NW, e de água provenientes de nascentes na base das encostas.

As frentes SE e NW apresentam correntes de água que fluem continuamente em direção à cava da mina e depois são bombeadas para estações de tratamento. Os fluxos surgem principalmente em áreas onde os sistemas de fraturas estão em arranjo ortogonal. Embora a frente SE receba alta incidência de luz solar durante a maior parte do dia, fator que provavelmente contribuiria para aumentar a evaporação da água nas superfícies das encostas, o volume de água proveniente das encostas é significativamente maior em comparação com a frente NW, onde quase não existe incidência de luz solar.

O levantamento estrutural local apresentam fratura com atitudes principalmente em N20E/80NW e N55W/75NE, com intersecções entre elas. A inclinação da frente SE apresenta direção NE-SW com direção de mergulho para NW e ângulo superior a 80°. A atitude média das fraturas é N25E/75NW. O declive da frente NW tende para NE-SW e possui direção de mergulho para SE.

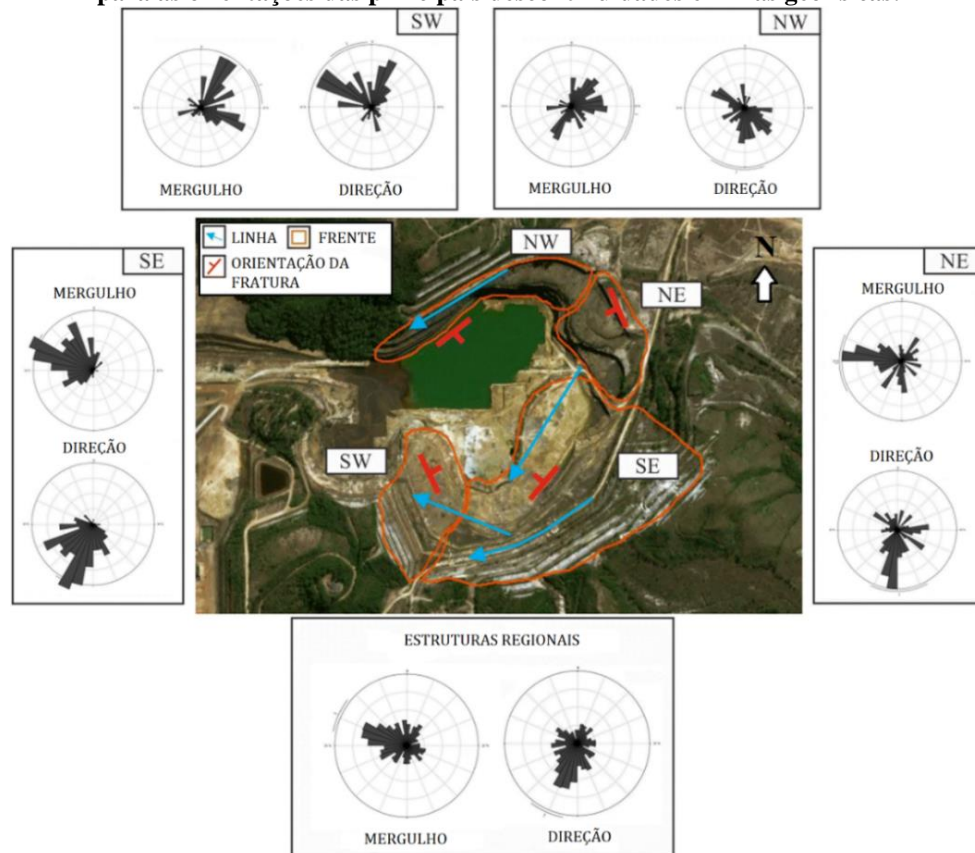
As principais estruturas são representadas por planos de fratura com duas atitudes preferenciais: N85E/75SE e N35E/75NW.

As encostas na frente SW têm direção NW-SE com direção de mergulho para NE. Esta frente apresenta dois sistemas de fratura principais, com atitude média de N55W/85NE e N25E/65SE. Nestas três frentes, as discontinuidades são paralelas às encostas com mergulhos concordantes com a face das encostas, cujo enquadramento estrutural favorece o caminho dos fluxos de água em direção à área a céu aberto.

As encostas de frente NE apresentam direção NW-SE com direção de mergulho para SW. A atitude média dos planos de fratura é N5E/85NW, a configuração estrutural desta frente indica que a atitude da discontinuidade e a direção da encosta não são paralelas, o que implica na redução do direcionamento dos fluxos de água em direção à superfície.

O padrão de fratura local determinou uma orientação preferencial de N55-60W/90 e N30-45E/90 para o enquadramento estrutural regional do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, cuja tendência NW estaria relacionada com o embasamento geológico e tendência NE com o sistema vulcânico. A Figura 18 ilustra a principal tendência estrutural das frentes e as linhas geofísicas que foram estabelecidas pelos autores no trabalho de análise estrutural, cujo final é indicado pelas setas azuis.

Figura 18. Análise estrutural das frentes da Unidade de Descomissionamento Caldas, com destaque para as orientações das principais descontinuidades e linhas geofísicas.



Fonte: Modificado de Targa et al., 2019.

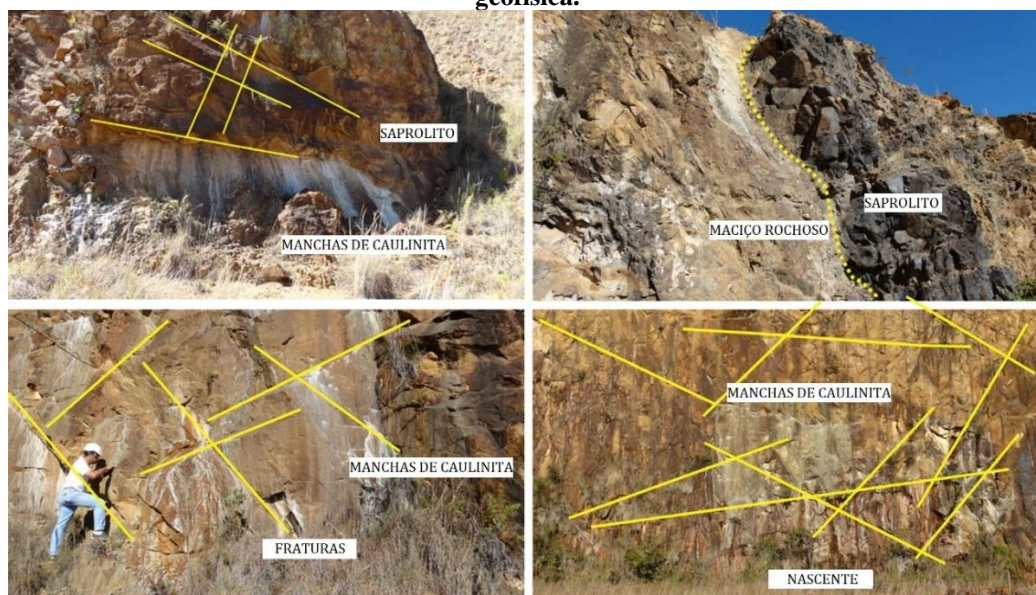
A correlação entre fraturamento local e regional padrão permite afirmar que essas descontinuidades na mina são derivadas de substâncias das atividades vulcânicas. Ainda, a abertura da cava da mina e sua operação envolveu o desmantelamento do maciço rochoso com a utilização de explosivos, essa energia liberada durante as detonações amplificaram o arranjo estrutural existente em termos de continuidade e conectividade de fraturas e criaram novas, que contribuíram para o fluxo subterrâneo.

Ao correlacionar as zonas de fraturas regionais e o alinhamento da drenagem, foi sugerido que estas estruturas possuem capacidade de direcionar os fluxos de água próximos à área da cava da mina a céu aberto. As descontinuidades locais são fundamentais na difusão do fluxo subterrâneo. Esta configuração estrutural é consistente com os dados obtidos pelo levantamento de planos de fratura no Osamu Mina Utsumi, com direção NE-SW e direção de mergulho para NW. Então, isso permite afirmar que a água que flui através das fraturas são direcionadas preferencialmente para NW e são transportadas pela bacia hidrográfica do rio Antas em direção aos municípios de Poços de Caldas e Águas da Prata. Em escala local, o padrão de fraturamento indicou que em

todas as frentes a maior parte dos planos de fratura foram projetadas para a área da cava da mina a céu aberto, o que favorece o caminho da água para o centro da mina como bacia de captação. Os sistemas de fraturas cruzados proporcionam canais que mergulham em direção à cava da mina, onde é possível observar as nascentes de água. As discontinuidades com tendência NW são essenciais para a circulação da água no interior dos maciços rochosos, pois são responsáveis pelo abastecimento constante da bacia hidrográfica do rio Antas. As fraturas ao longo da Unidade de Descomissionamento Caldas apresentam grande continuidade vertical e horizontal. Os planos de fratura foram facilmente identificados como estruturas lineares associadas a zonas de baixa resistividade elétrica. A Figura 19 ilustra as principais feições geológicas e hidrogeológicas que possuem boa correlação com as principais feições geofísicas apresentadas nos modelos de resistividade, especialmente as nascentes superficiais e zona de baixa resistividade.

A seção de resistividade da frente NW indica a presença de uma zona de baixa resistividade em sua porção leste próxima à superfície, possivelmente associada ao fluxo de água que migra da frente NE para frente NW e infiltra para profundidades de 40 m a 70 m. Foi verificado que a origem da drenagem ácida de mina está ligada ao processo de intemperismo no interior do maciço rochoso e acidificação das águas subterrâneas por percolação constante de água e oxidação de sulfetos.

Figura 19. Principais feições geológicas que apresentam boa correlação com os modelos de inversão geofísica.



Fonte: Modificado de Targa et al., 2020.

4.4. Aquisição e processamento de dados

Para a aquisição dos dados, trabalhos de campo foram realizados nos meses de novembro de 2022 e junho de 2023, onde um total de 06 linhas geofísicas foram estabelecidas de modo a abranger a interface entre a cava da mina e o BF-08 (Figura 20).

Figura 20. Vista geral da disposição de linhas de aquisição dos dados geoeletricos. A área de estudo está delimitada em vermelho no mapa de delimitação da área da mina.



A escolha do posicionamento das linhas foram condicionadas aos acessos livres da interface, desta forma foram priorizados os acessos planos e por isso a extensão das linhas são variáveis, segue abaixo tabela que apresenta o comprimento e a profundidade de cada linha (Tabela 01).

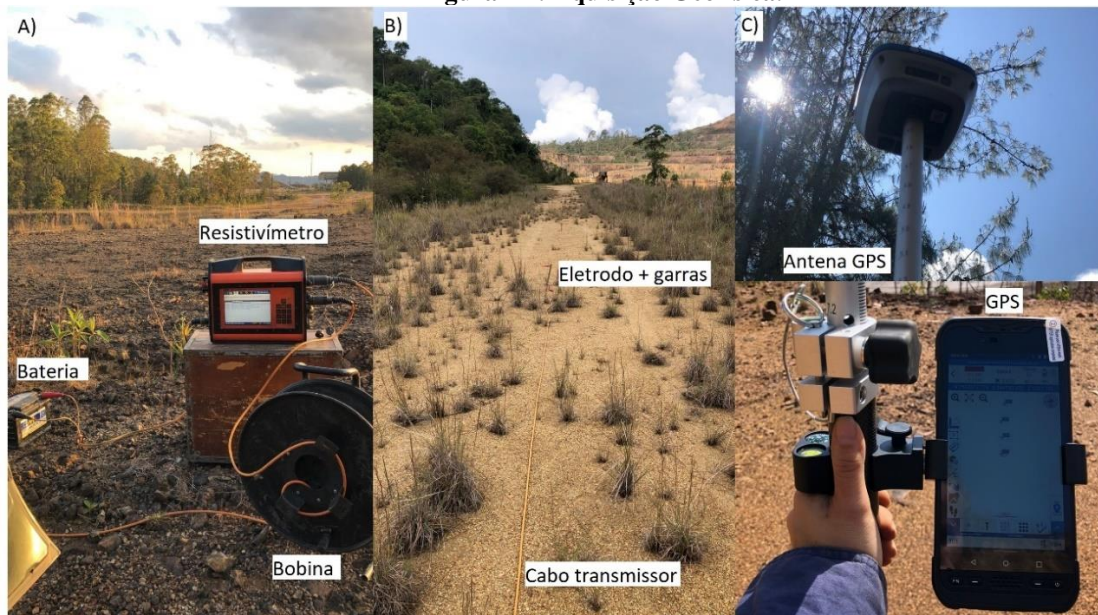
Para montagem das linhas geofísicas, os cabos transmissores foram posicionados nos locais de interesse e então eletrodos metálicos foram inseridos no solo com espaçamentos de 10m entre um e outro, esses foram conectados ao cabo por meio de

conectores. Feito isso, o cabo foi conectado no resistivímetro, e este conectado a uma bateria para funcionamento (Figura 21).

Tabela 1. Extensão e profundidade dos modelos de inversão de resistividade.

Linha geofísica	Extensão(m)	Profundidade alcançada(m)
1	230	55
2	370	80
3	270	70
4	160	37,5
5	270	65
6	370	90

Figura 21. Aquisição Geofísica.



A) Resistivímetro, bobina e bateria utilizada. B) Cabo esticado conectado aos eletrodos por meio das garras. C) GPS. Fonte: Arquivo pessoal.

O resistivímetro utilizado foi Terrameter LS da ABEM, equipamento que possui 250 W de potência, corrente máxima de 2,5 A, resolução de 1 μV e suas aquisições ocorrem de maneira automática por meio de configurações preliminares. Os parâmetros de configuração, foram: corrente 1A, tempo de aquisição de 1,5 seg, tempo de leitura após o corte de corrente (delay time) de 0,3 seg e leituras em duas janelas de tempo com 0,1 seg cada. Além disso, foi utilizado o GPS Stonex S830 com precisão de 1m para aquisição das coordenadas e elevação entre cada um dos eletrodos, para que no processamento dos dados fosse inserida a topografia do terreno.

Para processamento dos dados foram utilizados dois programas. O primeiro é o Res2dinv (2D) versão 3.53 (Geotomo Software), responsável pela geração de Modelos de Inversão em 2D, o qual é expresso nas variáveis distância e profundidade.

Para geração desse modelo de inversão a distribuição dos dados é ajustada por meio de parâmetros geométricos, como o espaçamento entre eletrodos e o tipo de arranjo. Este modelo é suavizado devido ao modelo matemático dos mínimos quadrados, que faz com que as discrepâncias entre os valores obtidos pelo software e dos medidos em campo sejam reduzidas. O software é responsável por criar automaticamente um modelo bidimensional teórico pela divisão da subsuperfície em blocos retangulares. Esses blocos tem sua distribuição e tamanho gerados automaticamente pelo programa por meio da distribuição dos pontos de dados (LOKE, 2001).

A resistividade aparente que é utilizada para os ensaios de resistividade é calculada pelo programa por meio do modelo de blocos, o qual compara os valores medidos dos modelados e são ajustados até possuir os valores aparentes calculados próximos aos valores medidos em campo.

O erro resultante desses ajustes é verificado como um valor do erro medido quadrático – RMS Root-mean-squared (GEOMOTO 2003; CHULÈS e DELFINER, 2012). Para os modelos-2D o menor valor de erro RMS pode representar alterações distantes da realidade e de grande escala nos valores de modelo de resistividade (LOKE, 2010).

O produto final são as pseudo-seções das linhas processadas. A interpolação lateral das linhas de tomografia elétrica a partir dos modelos de inversão 2D são utilizadas para a realização da modelagem 3D. Essa interpolação é realizada por meio do software Oasis Montaj, plataforma Geosoft, que utiliza informações das coordenadas X, Y e Z do dados 2D (volume dos pixels) para criação dessa modelagem (GEOMOTOSOFT, 2003). Ainda, é necessário a inserção da topografia local ao modelo para que não ocorra deformações nas seções geradas. O valor de resistividade elétrica foi expresso por meio de uma escala cromática e foram obtidos mapas de profundidade em diferentes níveis.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Modelagem Geofísica 2D

A partir do processamento dos dados geofísicos foram gerados modelos de inversão com o intuito de verificar possíveis anomalias geolétricas e entender o que ocorre na subsuperfície da área de estudo. Para obtenção desses dados foram estabelecidas 6 linhas geofísicas na interface entre a pilha de rejeitos (BF-08) e a cava da mina.

Os valores resultantes do processamento variaram de aproximadamente $10\Omega.m$ a $12000\Omega.m$ e as profundidades de investigação atingidas são variadas devido aos diferentes comprimentos das linhas geofísicas.

Em um mesmo modelo de inversão existe grande variação da resistividade, essa variação ocorre uma vez que a corrente injetada passa por diferentes tipos de materiais no subsolo, assim, visto que cada material possui características específicas distintas, os valores medidos de resistividade também são diferentes. Existem corpos rochosos que possuem propriedades isolantes, como, por exemplo, o sienito (constituído por quartzo e feldspato, isolantes elétricos naturais), e que, portanto, devem naturalmente apresentar respostas resistentes a passagem da corrente elétrica, isto é, valores elevados de resistividade. Os materiais que apresentam boa condutividade elétrica, como, por exemplo, os solos saturados por fluidos com sais, são menos resistentes a passagem de corrente elétrica, e então resultam em valores baixos de resistividade.

Diante deste fato e de acordo com trabalhos previamente desenvolvidos na mina com o mesmo método, os valores de resistividade entre $10\Omega.m$ e $80\Omega.m$ representam áreas com presença de água e íons dissolvidos, o que resulta em uma boa condutividade elétrica e baixa resistência a passagem de corrente elétrica. Quando os valores estão mais próximos de $10\Omega.m$ significa que a quantidade de sais dissolvidos é ainda mais expressiva, enquanto os valores mais próximos de $80\Omega.m$, a presença desses sais ocorrem em menores proporções. Quando os valores estão entre $80\Omega.m$ e $500\Omega.m$ significa que o local investigado possui moderado grau de saturação. E quando os valores ultrapassam $500\Omega.m$ significa que os locais investigados são pouco úmidos, isto é, possui pouca ou nenhuma presença de fluido em seu interior, ou seja, quanto menor for a presença de fluido, maior é o valor de resistividade medido (Casagrande et al. 2020; Targa et al. 2021; Nascimento et al. 2022).

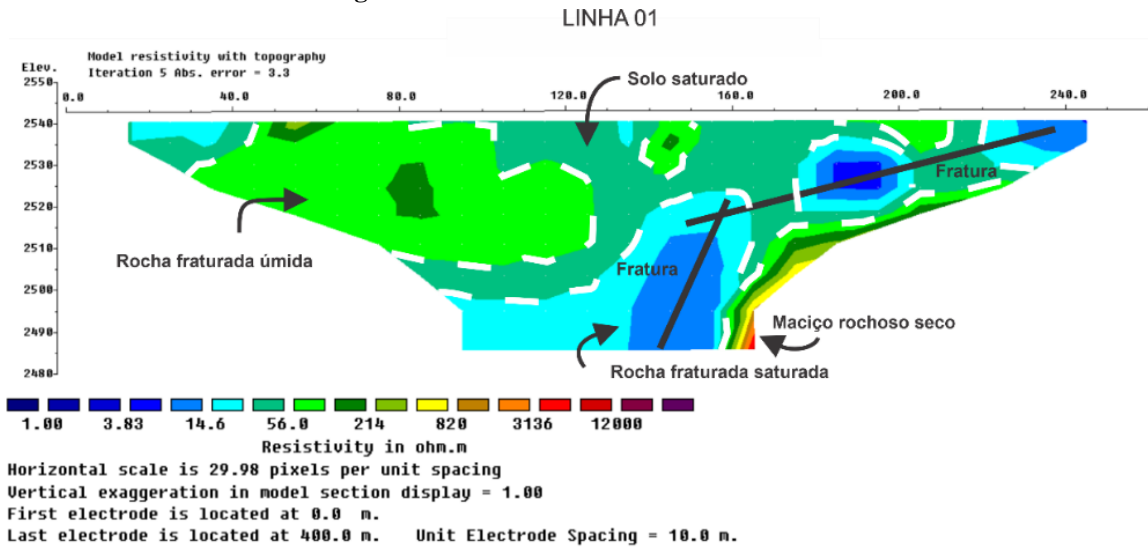
O modelo de inversão 1 referente a linha 1 está localizada de maneira paralela da borda entre a cava da mina à céu aberto e o BF-08, possui uma extensão de 230m e uma profundidade de 60m aproximadamente (Figura 22).

Se trata de um local não explorado nos anos em que a mina esteve em atividade e que recebe infiltração de águas superficiais. É possível verificar nessa seção a presença de um solo saturado ($75,8\Omega.m$ a $209\Omega.m$) por aproximadamente 40 m a partir da superfície no decorrer de toda a sua extensão, em meio a esse solo e a 30 m da origem é possível visualizar também a presença de rochas úmidas ($209\Omega.m$ a $575\Omega.m$) com extensão aproximada de 100m e espessura de 20m, assim como presença de zonas de fluxo marcadas pelas baixas resistividades ($10,0\Omega.m$ a $75,8\Omega.m$), isso acontece devido a presença de fraturas que criam caminhos preferenciais e permitem a passagem e preenchimento destas com fluidos. Ainda, a aproximadamente 160m da origem, no final da seção, é observada uma pequena borda de maciço rochoso seco ($575\Omega.m$ a $4358\Omega.m$) e também um indicativo de presença de fraturas (Figura 23).

Figura 22. Localização linha 01



Figura 23. Modelo de inversão referente a linha 1.



Fonte: Gerado pelo autor.

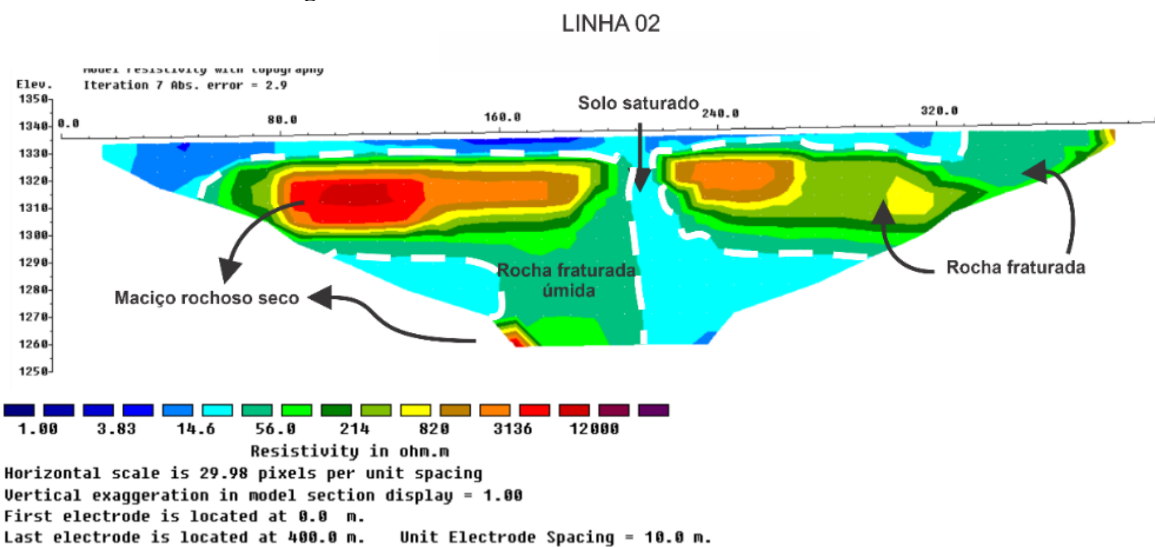
O modelo de inversão 2 referente a linha geofísica 2 está localizada perpendicularmente a borda da cava da mina e paralelamente a pilha de rejeito (BF-08), possui uma extensão de 370m e uma profundidade de 80m, sua superfície é coberta por solo e também recebe infiltração de águas superficiais (Figura 24).

Esse fato é confirmado devido ao solo saturado ($27,5\Omega.m$ a $75,8\Omega.m$) por aproximadamente 10m a partir da superfície no decorrer de toda a sua extensão, abaixo dessa camada de solo saturado existem rochas fraturadas secas, isto é, sem presença de fluido ($575\Omega.m$ a $4358\Omega.m$), uma no início da seção e a outra a 210m da origem com 170m e 150m de extensão, respectivamente. Abaixo dessas rochas fraturadas secas é possível observar resistividade com valores baixos, de $75,8\Omega.m$ a $209\Omega.m$, o que indica a presença de fluido no interior dessas rochas. Além disso, é possível observar no final da linha próxima da superfície a 150m da origem no início da linha em profundidade uma resistividade bastante elevada de $1583\Omega.m$ (Figura 25).

Figura 24. Localização linha 02



Figura 25. Modelo de inversão referente a linha 2.



Fonte: Gerado pelo autor.

O modelo de inversão 3 referente a linha 3 está localizada com o início na borda da cava da mina e cruza a interface por uma estrada, possui extensão de 270m e uma profundidade de 70m (Figura 26).

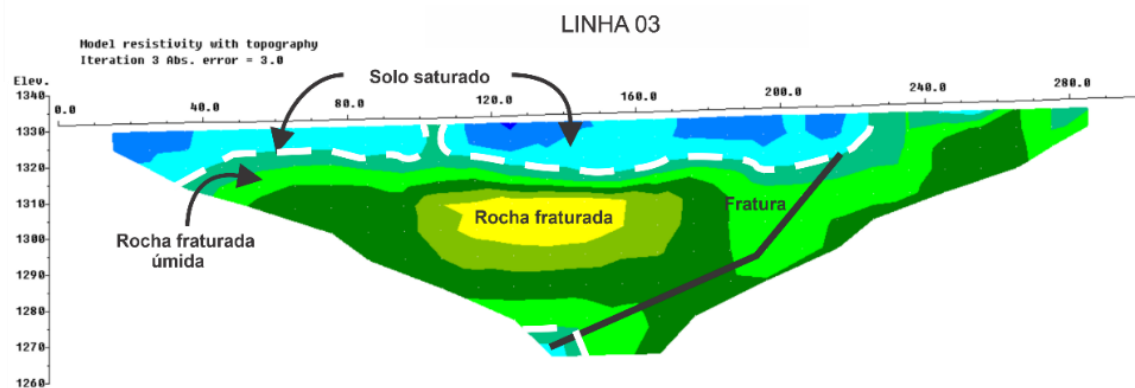
No seu primeiro terço a partir da origem, a sua superfície é coberta por saprólito, visto ser uma área modificada, enquanto que seus últimos dois terços são cobertos por

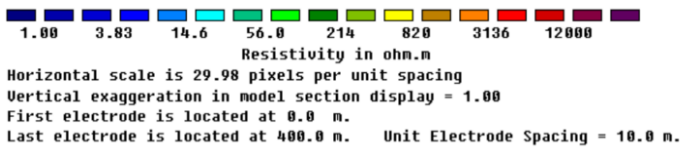
solo. É possível verificar um comportamento semelhante as seções anteriores, a aproximadamente 15m a partir da superfície no decorrer de quase toda a sua extensão a seção é constituída por um solo saturado ($27,5\Omega.m$ a $75,8\Omega.m$), com exceção dos 50m finais. Abaixo dessa camada existem rochas fraturadas úmidas ($209\Omega.m$) e uma porção com rocha fraturada seca com uma extensão aproximada de 80m a 120m da origem e com 20m de altura, além disso nessa seção há também indícios da existência de caminho preferencial de fluido por meio de fraturas ($209\Omega.m$) (Figura 27).

Figura 26. Localização linha 03



Figura 27. Modelo de inversão referente a linha 3.





Fonte: Gerado pelo autor.

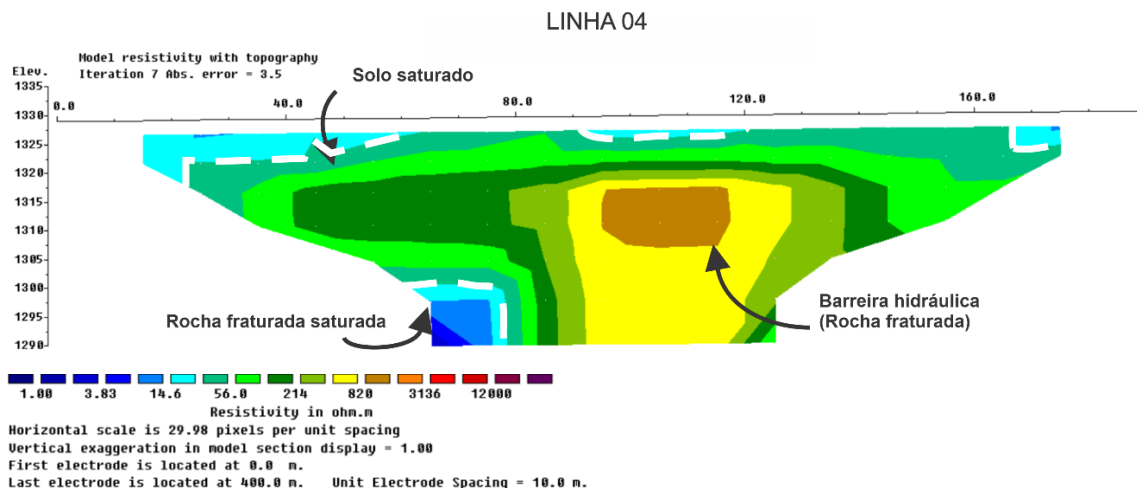
O modelo de inversão 4 referente a linha 4 também está localizado na borda da cava da mina à céu aberto, possui uma extensão de 160m e uma profundidade de 37,5m, sua superfície é coberta por saprolito (Figura 28).

Essa seção é bastante semelhante a seção 3, onde é possível verificar um solo saturado por aproximadamente 5m a partir da superfície no decorrer de toda a sua extensão ($75,8\Omega.m$). Abaixo dessa camada é possível visualizar o aumento da resistividade conforme segue em direção ao centro da seção, o que pode indicar a presença de uma barreira hidráulica natural, devido a presença de rocha maciça seca ($575\Omega.m$ a $1583\Omega.m$), a qual impede a passagem de fluido e, portanto, de corrente elétrica. Porém ainda no início da linha em profundidade (lado da cava da mina) existe a presença de um zona saturada ($27,5\Omega.m$ a $75,8\Omega.m$) (Figura 29).

Figura 28. Localização linha 04



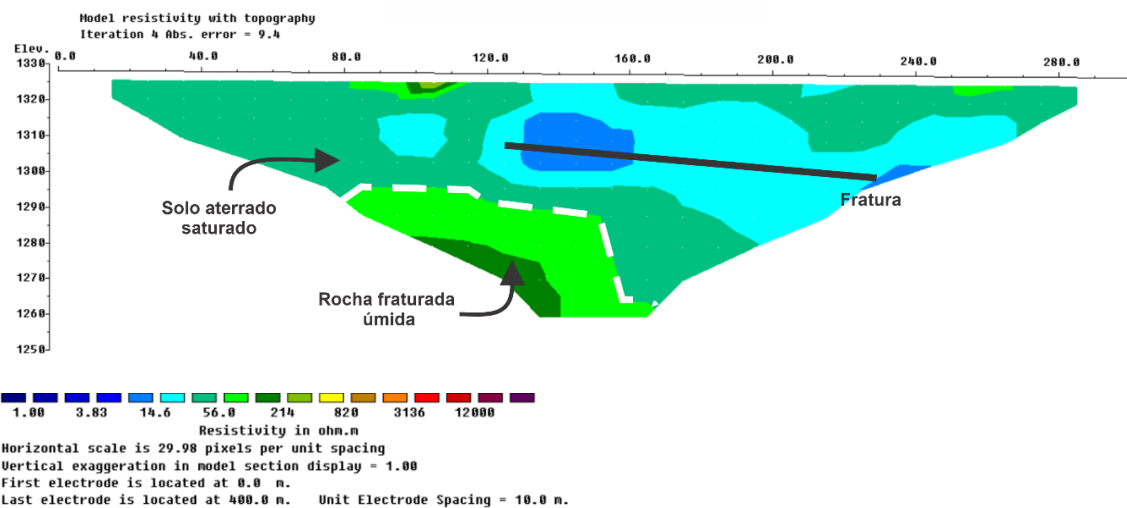
Figura 29. Modelo de inversão referente a linha 4.



Fonte: Gerado pelo autor.

O modelo de inversão 5 referente a linha 5 foi estabelecido dentro de um vale aterrado no interior da interface, possui uma extensão de 270m e uma profundidade de 65m (Figura 30). Por representar um antigo vale fluvial, é possível observar que a seção possui aproximadamente 60m de solo aterrado saturado ($75,8\Omega.m$) desde a sua superfície por toda a sua extensão, há uma pequena exceção no canto inferior esquerdo onde é possível notar um pequeno aumento da resistividade, no caso, a presença de rocha fraturada úmida ($209\Omega.m$ a $575\Omega.m$). Ainda, a partir de 120m da origem é possível notar uma zona de baixa resistividade ($27,5\Omega.m$ a $75,8\Omega.m$), indicativo da presença de fratura (Figura 31).

Figura 30. Localização linha 05

Figura 31. Modelo de inversão referente a linha 5.
LINHA 05

Fonte: Gerado pelo autor.

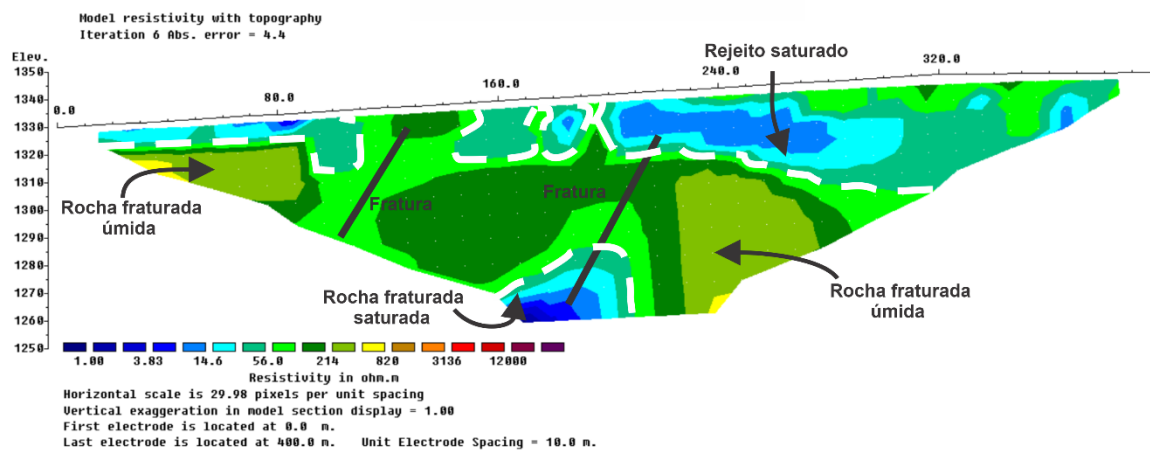
Por fim, o modelo de inversão 6 referente a linha 6 está localizada na cota mais alta da interface estabelecida no BF-08, sua superfície é composta por rejeito, possui uma extensão de 370m e uma profundidade de 90m (Figura 32).

A seção é constituída por rejeito saturado ($75,8\Omega.m$) de aproximadamente 30m a partir da superfície nos primeiros 90m da seção a partir da origem e também a 180m a partir da origem ($75,8\Omega.m$). Abaixo dessa camada há um pequeno aumento da resistividade, indicativo da presença rochas fraturadas umidas ($509\Omega.m$ a $575\Omega.m$). Além disso existe evidência de fraturas, devido a baixa resistividade na superfície e na base da seção ($27,5\Omega.m$ a $75,8\Omega.m$), (Figura 33).

Figura 32. Localização linha 06



Figura 33. Modelo de inversão referente a linha 6.
LINHA 06



Fonte: Gerado pelo autor.

As seções apresentadas permitiram verificar evidências da presença de fluido na subsuperfície que ocorre por infiltração tanto no solo quanto nas fraturas existentes.

Devido ao contexto em que a interface está inserida os fluidos que chegam ao aquífero poroso e fraturado podem ser drenagem ácida de mina e o DUCA.

É possível afirmar que esses dois compostos são ionicamente semelhantes e solúveis em água, porém possuem características químicas e físico-químicas diferentes, a DAM é ácida e o DUCA é alcalino. Abaixo é possível verificar a disposição desses efluentes na cava da mina (Figura 34).

Figura 34. Proximidade da DAM e DUCA da interface estudada.



Fonte: Arquivo pessoal.

A localização da interface favorece para que a mesma retenha boa parte do volume de efluentes da cava em seu interior, isso uma vez que em estações chuvosas o nível de efluentes da cava sobe e infiltra por meio do solo poroso e rochas fraturadas da interface.

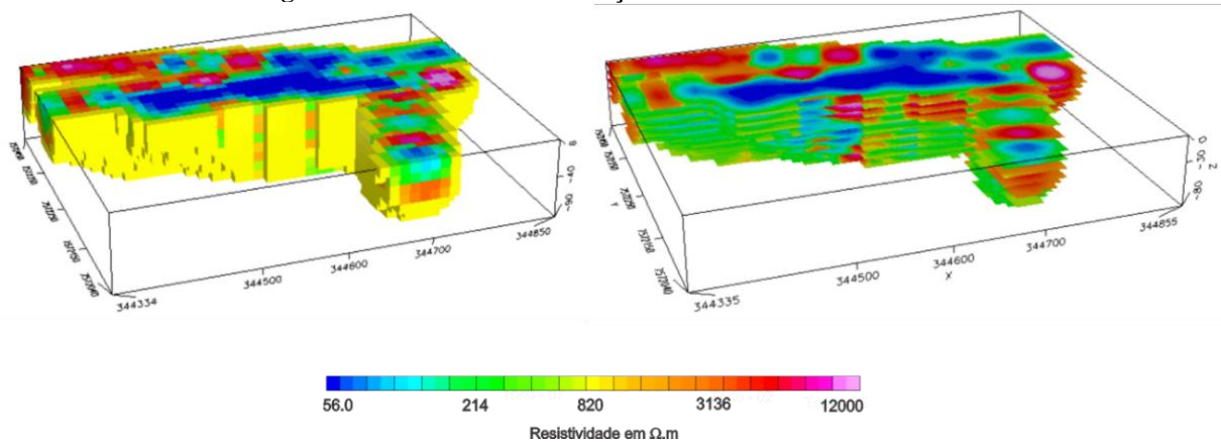
Vale destacar que o tipo de solo e a presença de fraturas são fatores predominantes que influenciam no fluxo e condutividade hidráulica. Os solos saprolíticos e as rochas fraturadas criam caminhos preferenciais para esses efluentes, principalmente devido a proximidade e contato entre eles. Zonas de baixas resistividades com valores próximos $10\Omega.m$ foram detectadas, as quais indicam a presença desses caminhos preferenciais.

Também foi verificada zonas de alta resistividade ($>1583\Omega.m$ a $12000\Omega.m$) localizadas nas bases e no centro de algumas das seções. Essas porções localizadas nos centros e bases dessas seções podem ser interpretadas como o topo do embasamento rochoso pouco fraturado, que resiste a percolação de água no interior do maciço e, portanto, oferece maior resistência à passagem de corrente elétrica na rocha. É válido pontuar que na maioria das seções há um certo contraste, isto é, superfícies mais saturadas e camadas mais próximas as bases úmidas ou secas.

5.2. Modelagem Geofísica 3D

Com o objetivo de detalhar e facilitar a visualização espacial dos fluxos subterrâneos foi realizado o modelo de visualização 3D a partir da interpolação das 6 seções geofísicas (Figura 35).

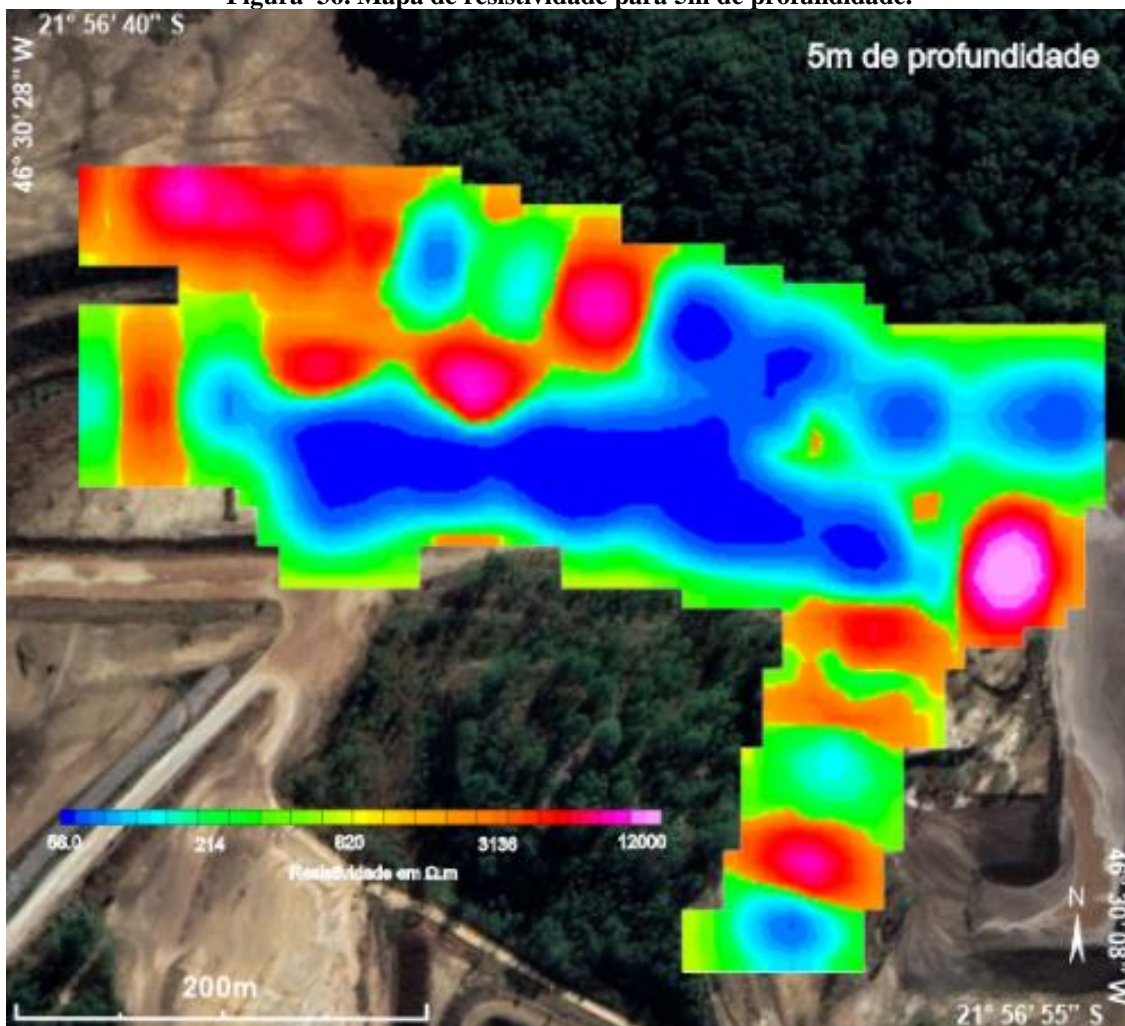
Figura 35. Modelo de visualização 3D de resistividade.



Fonte: Gerado pelo autor.

Após o processamento, as imagens foram suavizadas e definidos 08 níveis de visualização em profundidade. Os níveis em profundidade foram: 5m, 10m, 20m, 30m, 40m, 50m, 60m e 80m. O mapa para profundidade de 5m, onde há solo soprolítico e rejeitos, exibe valores baixos de resistividade ($56\Omega.m$ a $214 \Omega.m$) em toda a porção central do modelo onde fluía o antigo córrego do Cercado, o que indica alta retenção de fluidos com íons dissolvidos nesse nível. Na porção noroeste e leste foram observados valores de resistividade mais elevados ($820\Omega.m$ a $12000 \Omega.m$), relacionados a presença de rochas pouco fraturadas ou secas (Figura 36).

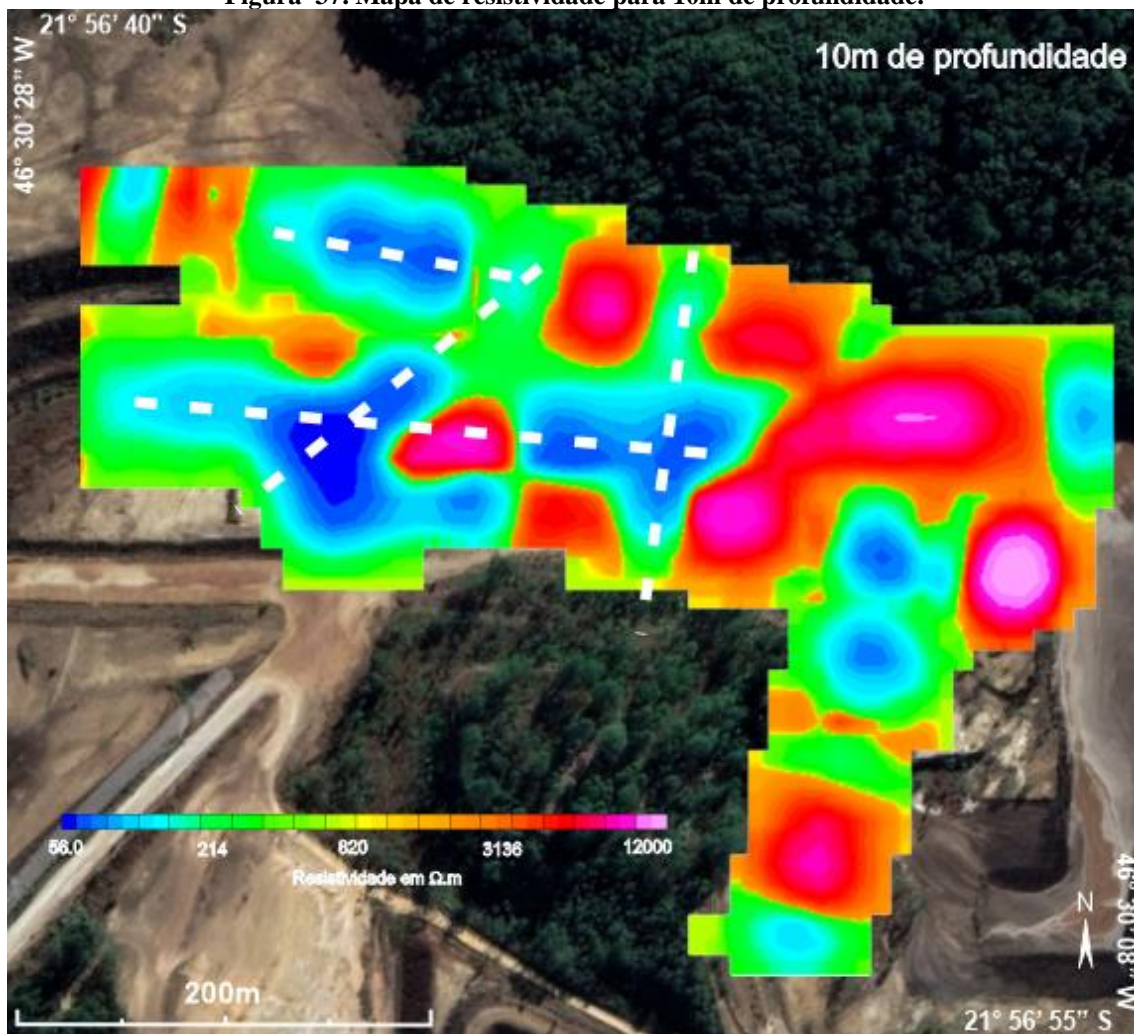
Figura 36. Mapa de resistividade para 5m de profundidade.



Fonte: Gerado pelo autor.

O mapa de resistividade para a profundidade de 10m indica o surgimento de rochas fraturadas, baseado no aumento dos valores de resistividade, principalmente na porção central, isso acontece uma vez que, conforme o aumento da profundidade, maior é a presença de rochas, seja rocha maciça ($820\Omega.m$ a $12000\Omega.m$) ou rocha fraturada saturada ($214\Omega.m$ a $820\Omega.m$). A zona saturada neste mapa ($56\Omega.m$ a $214\Omega.m$) é menos expressiva quando comparada com o mapa anterior, uma vez que os fluidos ficam retidos apenas nas zonas fraturadas (interceptações das fraturas), e infiltram conforme caminhos preferenciais criados por essas fraturas existentes (Figura 37).

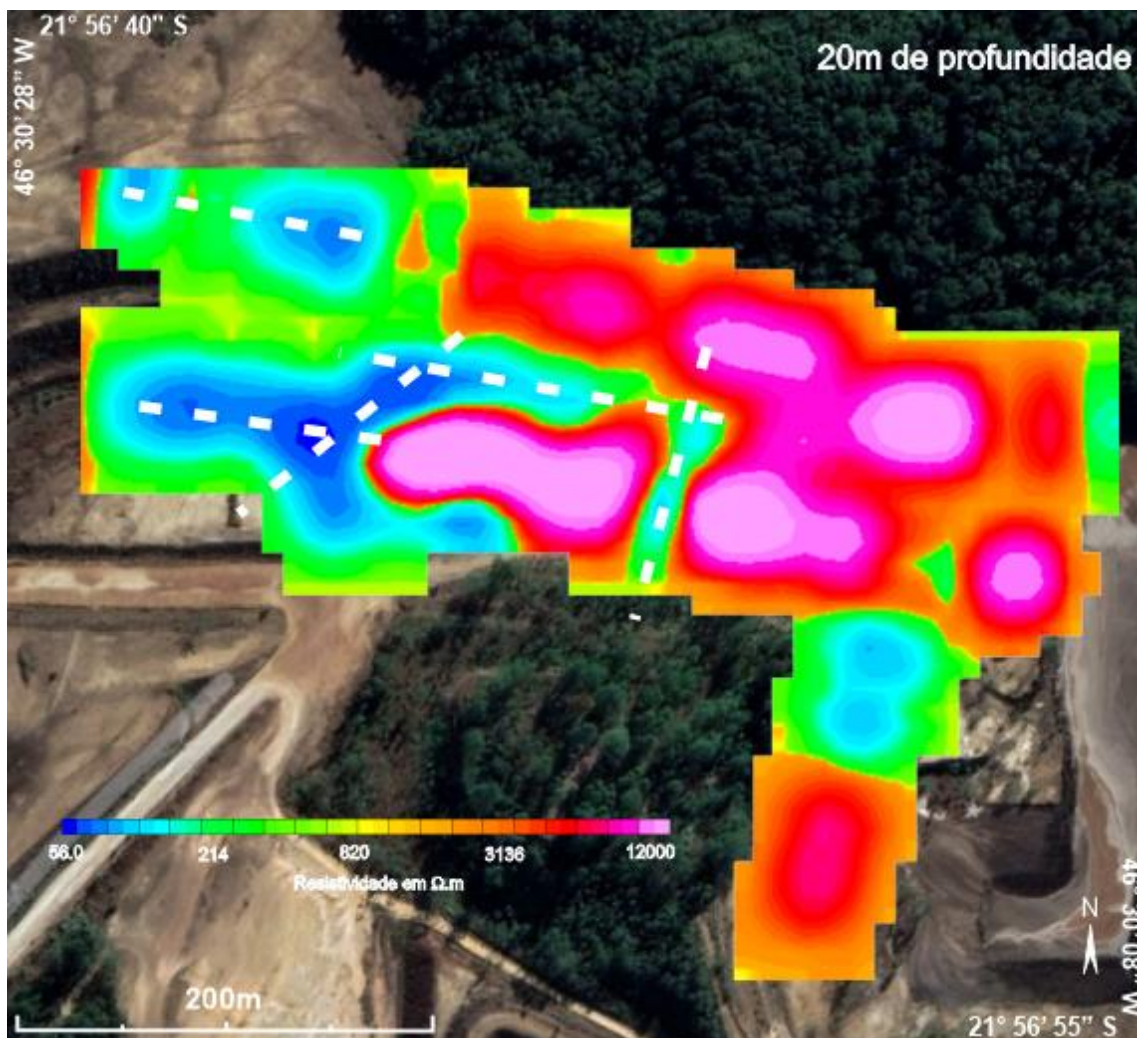
Figura 37. Mapa de resistividade para 10m de profundidade.



Fonte: Gerado pelo autor.

O mapa de resistividade para a profundidade de 20m, exibe valores bastantes elevados de resistividade ($820\Omega.m$ a $12000\Omega.m$) na porção nordeste (NE) e no centro do mapa, resultado da presença de um maciço rochoso seco. Na porção W do mapa é persistente a zona saturada, e isso acontece devido a presença de fraturas verticais que retém esses fluidos e permitem a passagem de corrente elétrica as quais resultam nos valores de baixa resistividade ($56\Omega.m$ a $214\Omega.m$) (Figura 38).

Figura 38. Mapa de resistividade para 20m de profundidade.

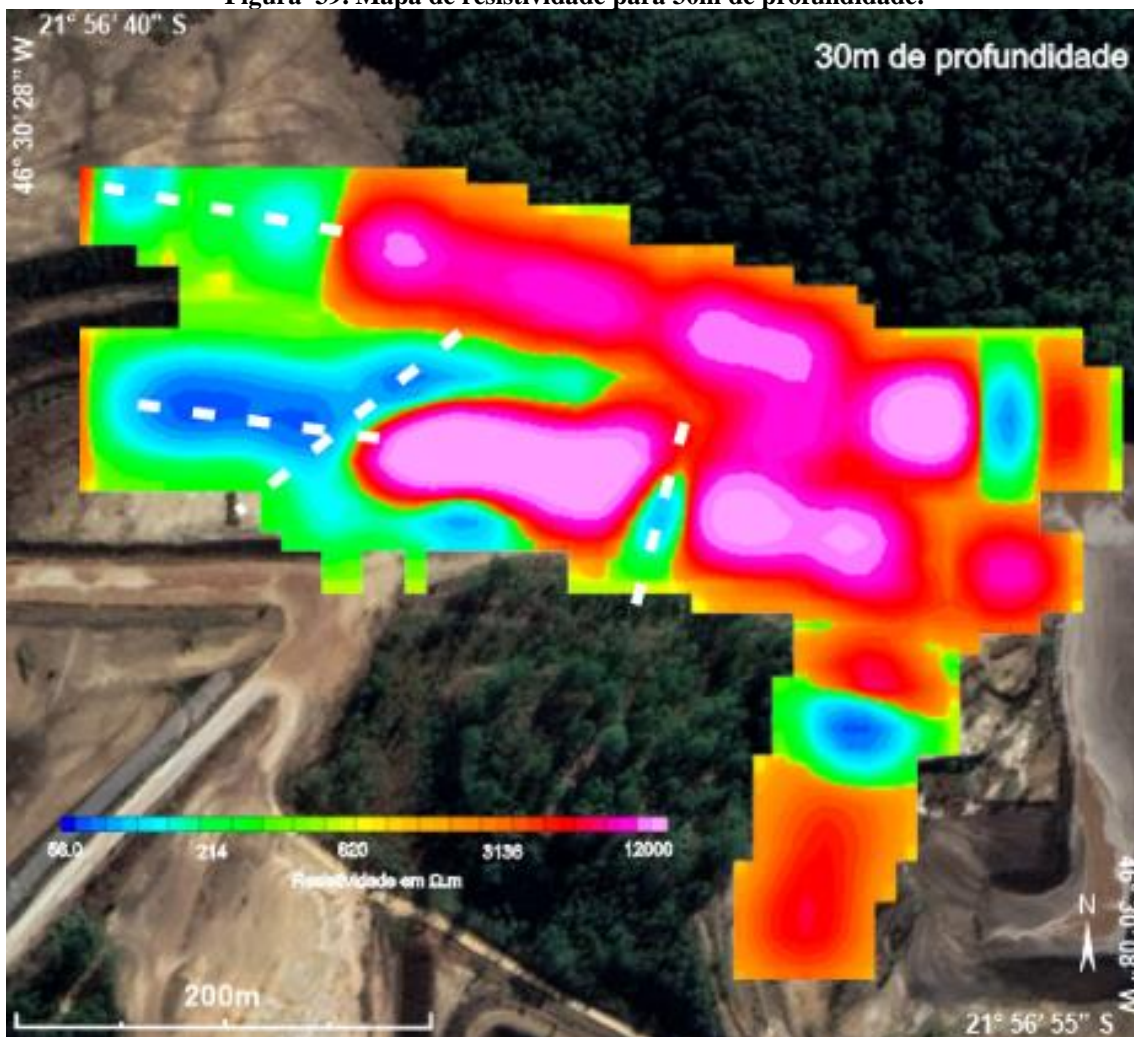


Fonte: Gerado pelo autor.

O mapa de resistividade para a profundidade de 30m possui comportamento semelhante ao mapa de 20m de profundidade, e tem um aumento acentuado dos valores de resistividade (3136Ω.m a 12000 Ω.m). O aumento da resistividade está relacionado a predominância do maciço rochoso seco.

Ainda, vale destacar que na porção esquerda do mapa a baixa resistividade (56Ω.m a 214Ω.m) é persistente, uma vez que a presença de fraturas persiste e os fluidos ficam retidas em seus espaçamentos (Figura 39).

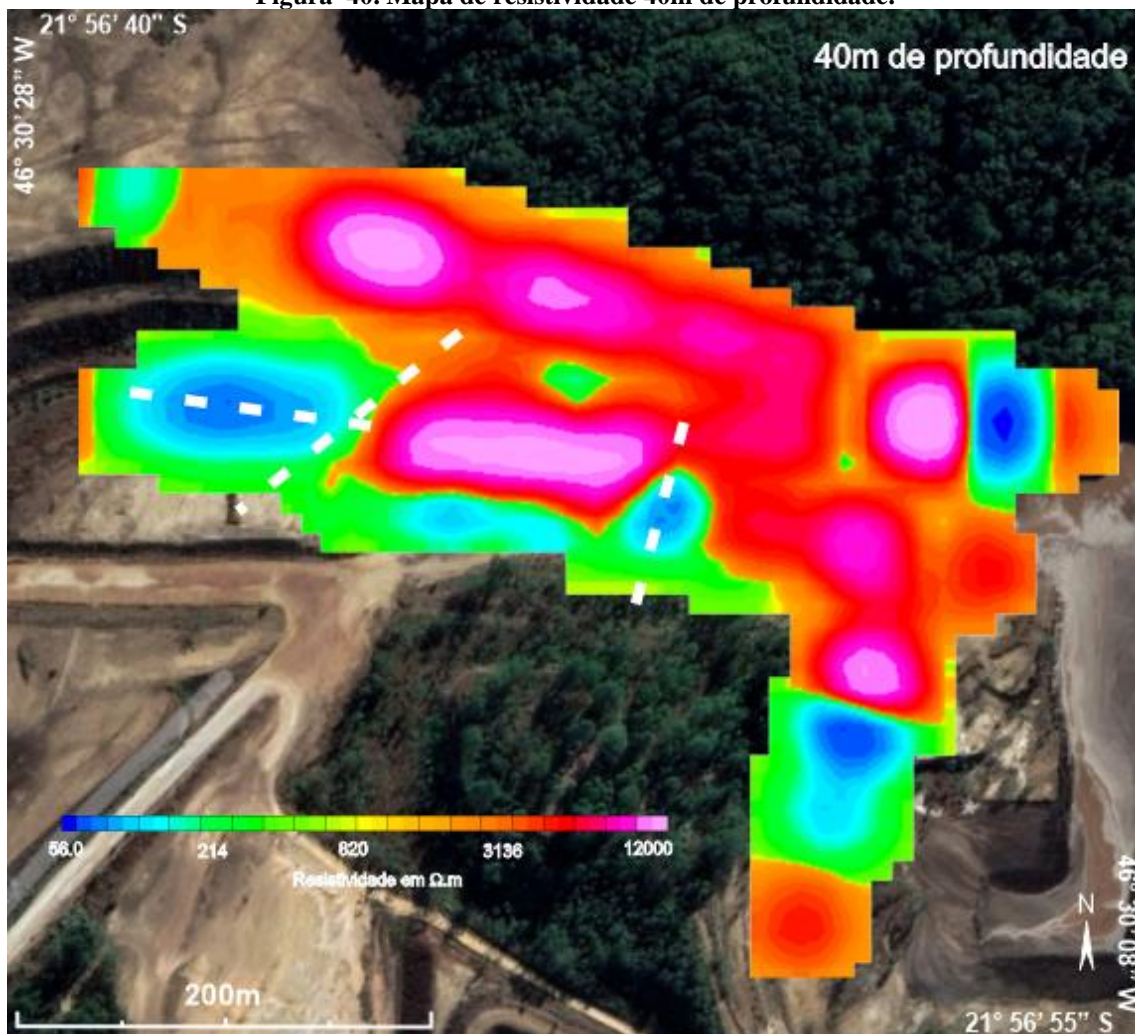
Figura 39. Mapa de resistividade para 30m de profundidade.



Fonte: Gerado pelo autor.

O mapa de resistividade para a profundidade de 40m mantém o mesmo comportamento dos mapas anteriores, e confirma que quanto maior é a profundidade maior é a presença de rochas maciças e, portanto, maior o valor de resistividade. A porção saturada (baixa resistividade - 56 $\Omega.m$ a 214 $\Omega.m$) permanece no extremos oeste do mapa, porém em menor proporção, isso ocorre devido ao estreitamento das fraturas, isto é, o espaçamento das fraturas diminuem e com isso a quantidade de efluentes contidas nela (Figura 40).

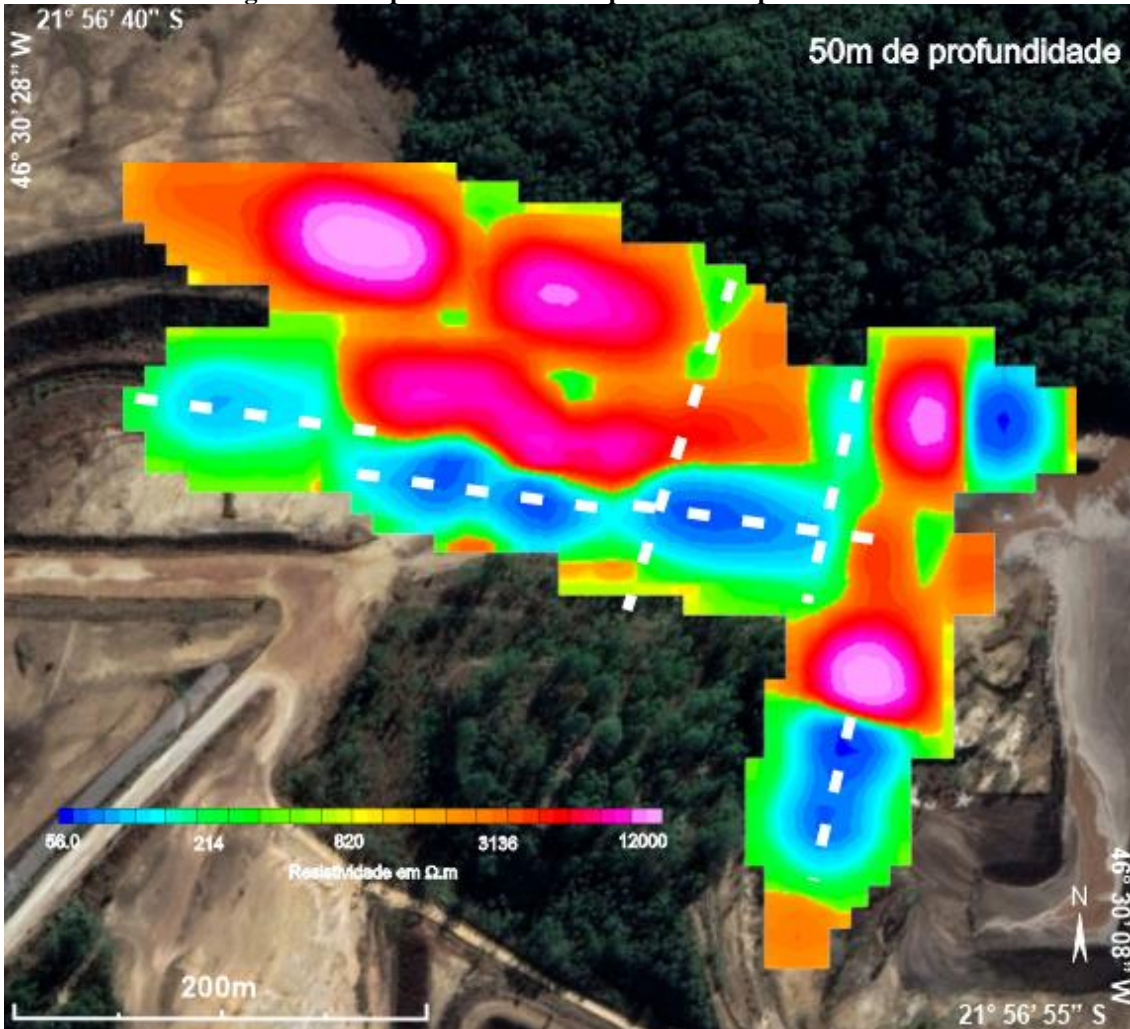
Figura 40. Mapa de resistividade 40m de profundidade.



Fonte: Gerado pelo autor.

O mapa de resistividade para a profundidade de 50m revela um aspecto diferente dos últimos observados, surge novamente uma zona saturada horizontal no antigo vale fluvial, que indica a conexão das faturas em diferentes direções, que resultam na fluxo horizontal dos fluidos e, portanto, facilita a passagem de corrente elétrica, por isso valores de baixa resistividade ($56\Omega.m$ a $214\Omega.m$) (Figura 41).

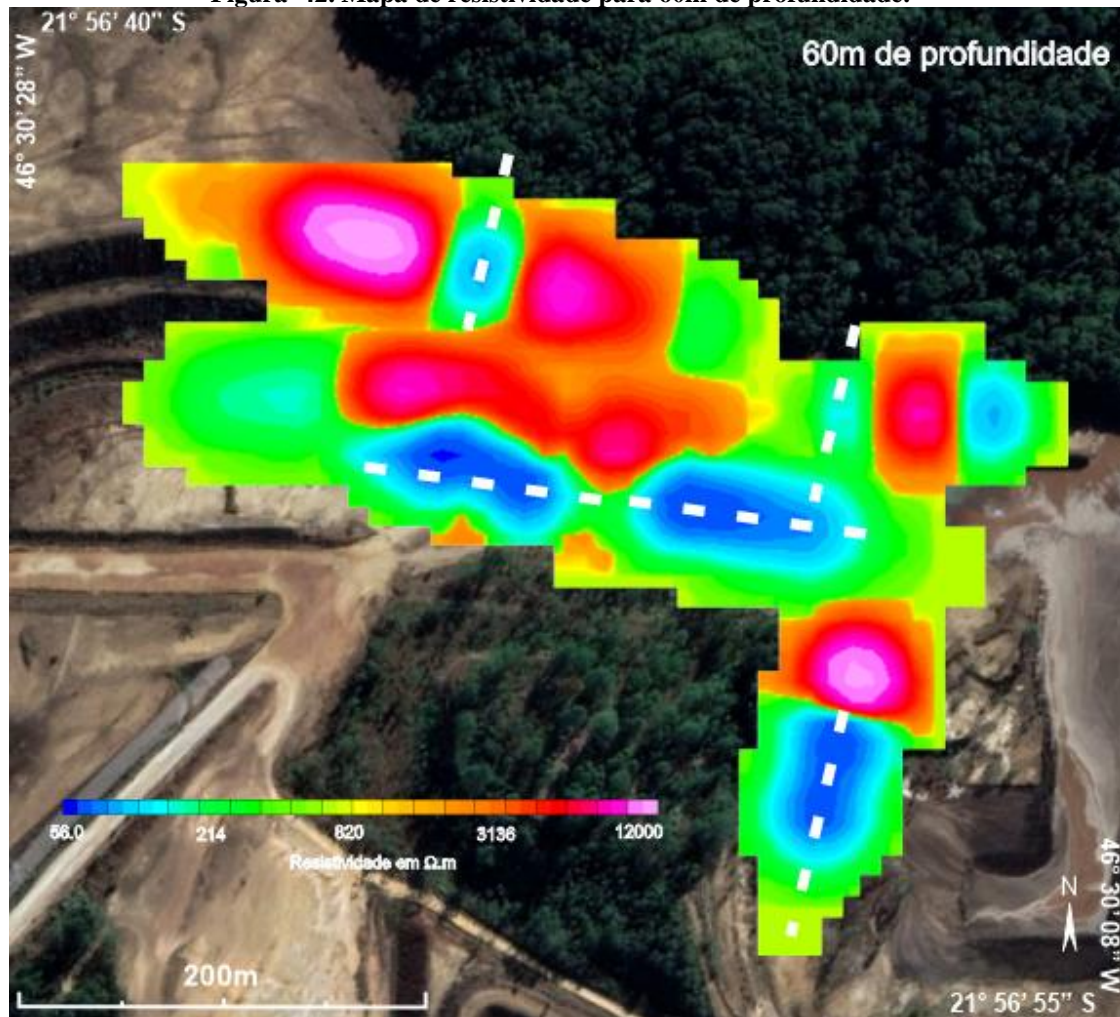
Figura 41. Mapa de resistividade para 50m de profundidade.



Fonte: Gerado pelo autor.

A Figura 42 é referente ao mapa de resistividade com profundidade de 60m e é bastante semelhante ao anterior (mapa com 50m de profundidade), a diferença consiste na redução acentuada dos valores de resistividade (56Ω.m a 214Ω.m). Essa redução está relacionada a predominância de efluentes presentes nas fraturas das rochas.

Figura 42. Mapa de resistividade para 60m de profundidade.



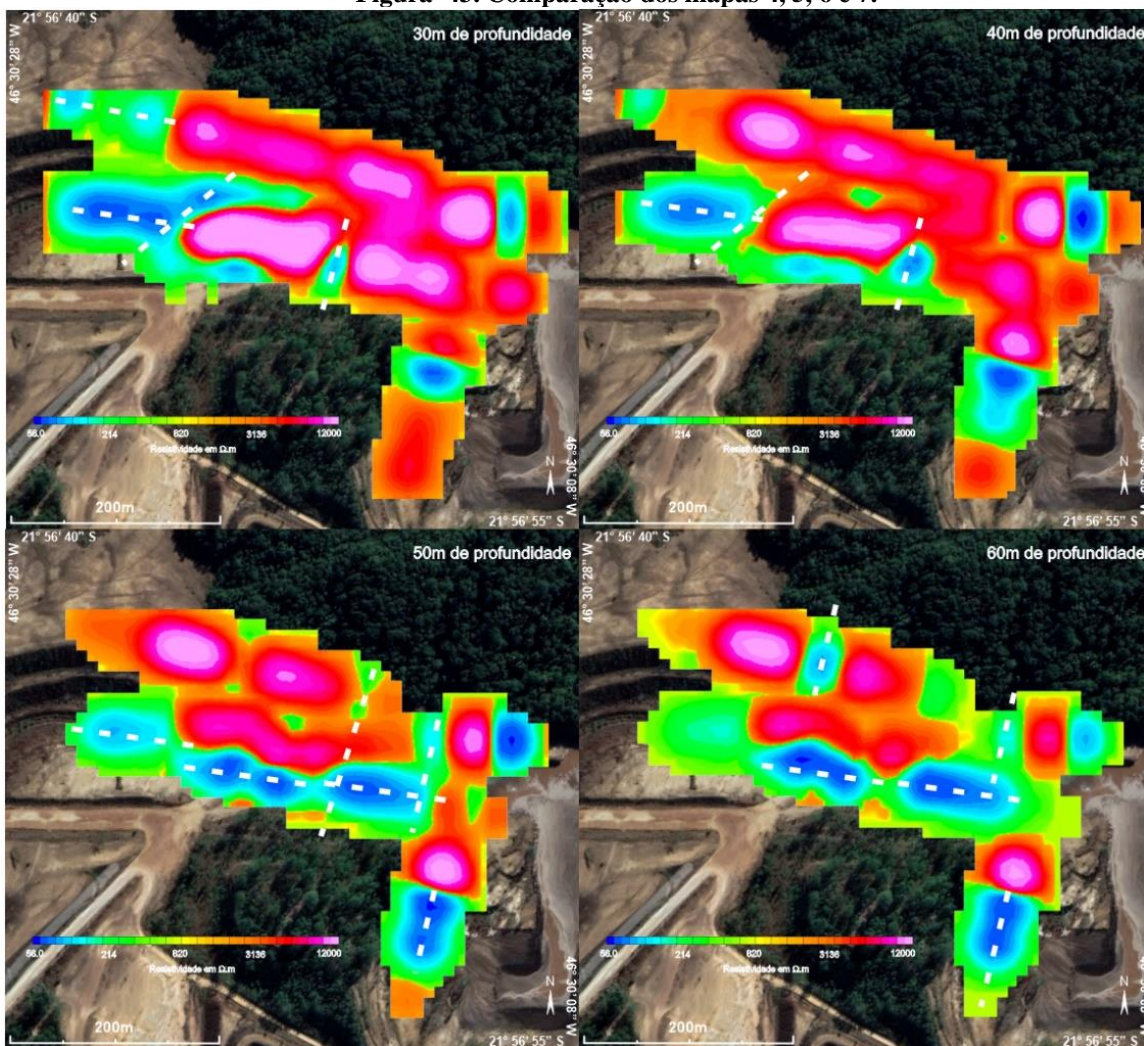
Fonte: Gerado pelo autor.

Na Figura 41 e 42, a zona de baixa resistividade horizontal na direção sudeste, sentido cava da mina – BF-08, é mais um indicativo de conexão hidráulica dos sistemas aquíferos locais, o qual permite o fluxo de efluentes que podem afetar diretamente o sistema poroso e também o fraturado.

Conforme seções e mapas apresentados e assim como no estudo de Targa et al. (2019), é confirmado a existência de fraturas no interior do maciço rochoso, é verificado que elas apresentam conectividade entre si, grandes continuidades verticais e horizontais, e presença de fluxos de fluidos em seus interiores.

Ainda, com o objetivo de facilitar a análise comparativa entre os mapas de 30m, 40m, 50m e 60m de profundidade foi elaborado uma imagem com a integração desses mapas (Figura 43).

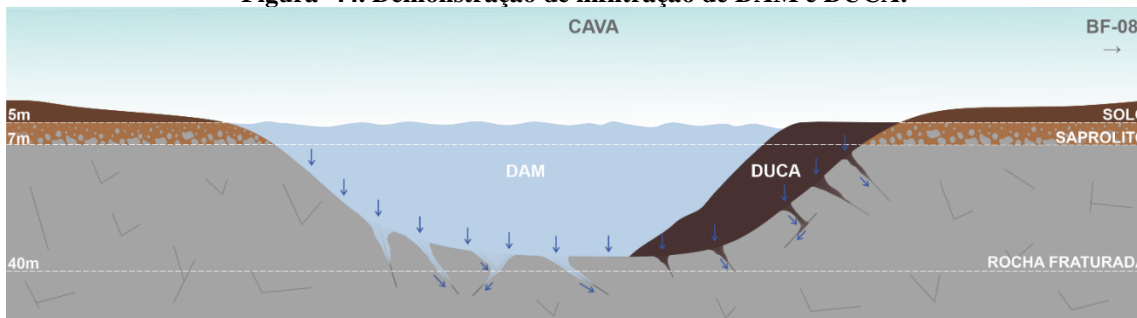
Figura 43. Comparação dos mapas 4, 5, 6 e 7.



Fonte: Gerado pelo autor.

Os mapas de profundidades de 30m e 40m possuem valores de resistividade bastante elevados na porção NE e na porção central devido a presença de rocha maciça, porém com o aumento da profundidade (50m e 60m), nessas mesmas porções é possível visualizar a redução acentuada de resistividade, isso acontece devido a presença de fluidos, sobre tudo DAM em grandes profundidades, que devido ao sistema de fraturas existentes nas rochas do aquífero gera a dispersão desse efluente (Figura 44).

Figura 44. Demonstração de infiltração de DAM e DUCA.

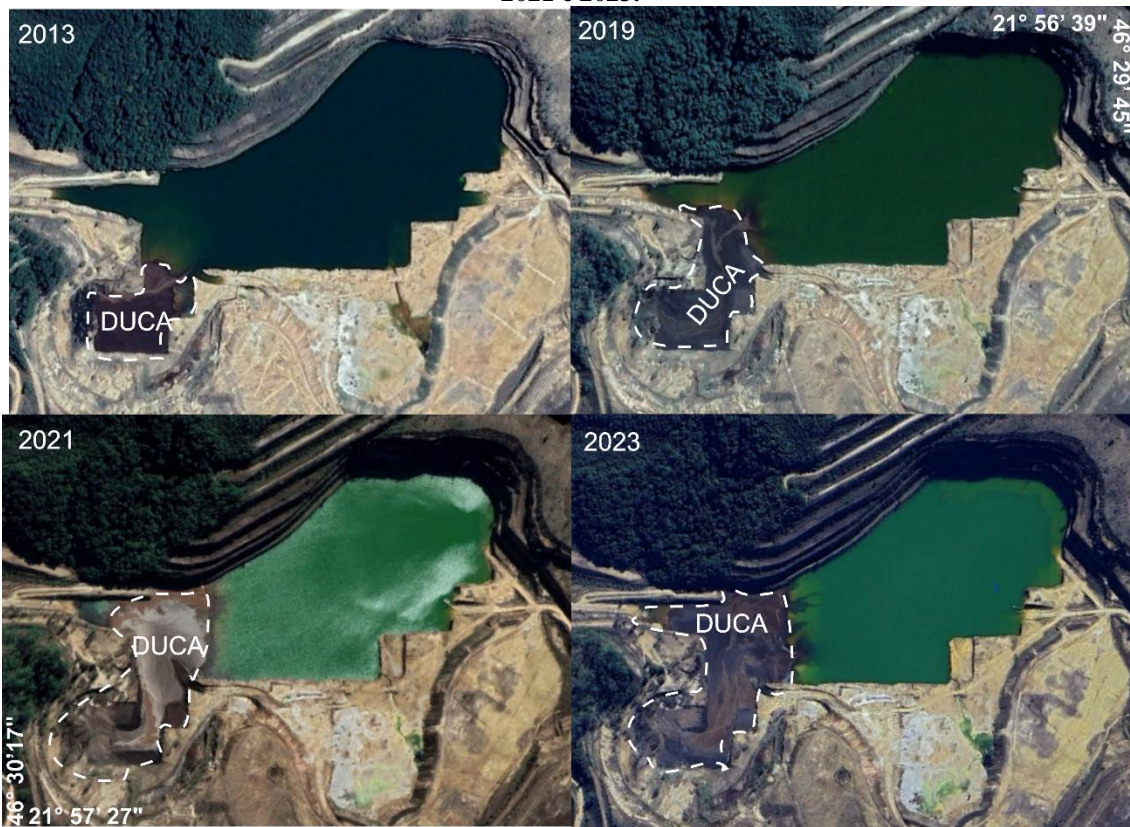


Fonte. Autoria própria.

A DAM é uma solução salina de base aquosa totalmente miscível em água, o que permite alcance de maiores profundidades, enquanto que o DUCA representa um resíduo viscoso e de menor capacidade de fluxo nos aquíferos e infiltração em menores profundidades. Contudo, este também é um efluente de base aquosa e armazenado numa cava em conjunto com a DAM e águas da chuva, pode facilmente ser dissolvido e liberar hidróxidos de metais e espécies radioativas concentradas. A dispersão de DUCA no ambiente subterrâneo, na prática um concentrado de metais e espécies radioativas, pode resultar em impactos severos e de longo prazo.

A coleta e tratamento constantes de DAM resultam na geração concomitante de DUCA, num cenário estimado para 200 anos de geração. Diante do volume produzido de DUCA e dimensões da cava da mina, independente das consequências aos aquíferos, é possível prever que esta alternativa de descarte será fisicamente inviável em poucas décadas (Figura 45).

Figura 45. Situação da cava da mina com disposição do DUCA nos anos de 2013, 2019, 2021 e 2023.



6. CONCLUSÕES

Impactos ambientais infelizmente são inerentes a atividades de mineração basicamente devido a alterações de grande extensão no meio físico. Contudo, o diagnóstico detalhado ambiental prévio, das áreas afetadas e respectivas consequências, podem reduzir drasticamente estes impactos, com vistas a uma tentativa de busca por equilíbrio entre alterações ambientais e retorno sociais e econômicos. A introdução no Brasil a partir da Constituição de 1988 de ações como Estudos de Impacto Ambiental (EIA) para atividades simples ou Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) para atividades complexas, atuam exatamente no sentido deste equilíbrio.

O caso em estudo é uma consequência de escolhas técnicas equivocadas durante o planejamento e execução de atividades de lavra e beneficiamento de minérios, no sentido de desconsiderarem os impactos ambientais de extração e exposição de minerais reativos em condições atmosféricas, particularmente numa região com elevada pluviosidade anual e longos períodos de chuva.

As consequências são um passivo ambiental amplo em área e de elevada complexidade em termos de diagnóstico, compreensão e tratamento, representada pela drenagem ácida de mina. Embora seja algo recorrente em minas de sulfetos (Cu, Pb, Zn, Ni, Au) em diversos países, a área de estudos possui a peculiaridade da presença de Urânio, cuja interação sob condições físico-químicas impostas pela forma de lavra e disposição de estéril, implica da dissolução em água e mobilidade deste e outros radionúclídeos em águas superficiais e subterrâneas.

Ações relacionadas ao enfrentamento do passivo ambiental no âmbito da operação de descomissionamento após 1995 resultaram na instalação de um amplo sistema de coleta e tratamento de DAM, com significativa redução de impactos ambientais. O efeito colateral deste procedimento é a geração constante de efluentes de tratamento de águas ácidas, representado pelo DUCA. A cava da mina surge como uma alternativa de descarte num momento de falta de opções e passa a receber um fluxo constante deste efluente, que passa a ocupar um volume crescente desta estrutura, que também passou a servir como entreposta para armazenamento de DAM em períodos de chuva, quando o volume gerado de efluente ultrapassa a capacidade de tratamento atual. Esta alternativa de descarte talvez tenha sido considerada baseado de sua ampla capacidade de armazenamento e na hipótese de completa estanqueidade, ou seja, uma bacia impermeável.

Os dados de Eletrorresistividade foram altamente satisfatórios na discriminação de caminhos de fluxo devido ao elevado conteúdo salino dos principais efluentes, DAM e DUCA, fisicamente caracterizados como condutores elétricos, cuja presença no ambiente geológico (solo/rocha) implica em baixos valores de resistividade. Em contrapartida, os materiais geológicos locais são representados por sienitos e seus produtos de intemperismo, ricos em quartzo e feldspato, materiais isolantes e altamente resistivos na ausência de água ou umidade.

Este estudo indica também a geofísica como uma alternativa prévia para investigações hidrogeológicas em áreas complexas, diante do potencial de varredura ampla, profunda, detalhada e versátil em termos de densidade amostral, com destaque para locais com fonte potencialmente contaminadora de origem superficial. Baseados nos resultados 2D e 3D e altamente recomendável a instalação de poços de monitoramento em pontos estratégicos, que devidamente planejados pode servir ao diagnóstico geoquímico, monitoramento e ações de remediação.

Os resultados deste estudo revelam que a cava da mina consiste numa bacia posicionada em substrato permeável e híbrido, ou seja, ocorrem sistemas aquífero poroso em solo/saprolito e fraturado em rocha. Análises estruturais prévias em faces rochosas expostas na cava sugeriam este cenário, com fluxo de água de chuvas em fraturas visíveis e um sistema de fraturas com interconexões. Contudo, os resultados geofísicos analisados sob ótica estrutural revelam caminhos de fluxo subterrâneo que alcançam 60m de profundidade, interconectados com a base da cava, e que servem a percolação de DAM e DUCA constantemente aportados na cava.

É possível concluir que a cava da mina consiste tanto em uma área de armazenanto de DAM e DUCA quanto numa área de dispersão destes efluentes para os aquíferos em sua área de influência, ou seja, uma área de geração de passivos ambientais.

Na ausência de alternativas de curto prazo ao tratamento de DAM e necessidade de descarte contínuo de DUCA na cava da mina, é recomendável o planejamento de ações de impermeabilização parcial do substrato na interface cava/BF-08, no sentido de torná-lo estanque e restringir estes efluentes ao interior da cava, uma vez que a cava da mina foi constada permeável. Também é necessário reconhecer a inviabilidade deste procedimento em longo prazo, seja pelo limite de área disponível na cava, seja pelo potencial crescente de percolação de efluentes para os aquíferos. Ações de redução na geração DAM na origem e a busca de alternativas de tratamento com redução no volume

consequente de efluentes são fundamentais para viabilidade do processo de descomissionamento da unidade nas próximas décadas, principalmente devido ao fato de que o DUCA é um resíduo complexo em termos de tratamento e em composição, possui alta concentração de metais pesados e espécies radioativas, o que o torna mais danoso que a DAM.

Vale destacar que o local da cava correspondia a nascente do antigo córrego do Cercado, ainda que o fluxo tenha sido desviado o gradiente hidráulico em subsuperfície se mantém, fato que colabora para que os fluxos de DAM e DUCA fluam em direção ao interior da interface estudada.

Portanto, a locação de poços de monitoramento podem servir como alternativas de atenuação de fluxo de contaminante em subsuperfície, de modo a tornar a cava da mina totalmente estanque. Para isso, a alternativa em questão é injetar produtos seladores nesses poços de modo a impermeabilizar as frentes de fluxos da cava da mina, e uma boa opção dentre as diversas técnicas disponíveis no mercado para selagem dessas fraturas é a injeção de bentonita dissolvida em água, uma vez que é um produto inerte, natural, relativamente de baixo custo e usualmente utilizada na impermeabilização de solo em poços tubulares profundos.

Neste estudo foi avaliada apenas uma face da cava da mina, portanto fica de alerta a necessidade de estudo das demais faces. Além disso, na UDC existe apenas uma cava desativa, porém existem minerações com maiores quantidades de cavas de exploração que quando desativadas são utilizadas como bacias de rejeitos, sabendo disso, esse estudo corrobora a necessidade de avaliação de cavas de mina desativas com o objetivo de verificar possível dispersão de efluentes e/ou contaminantes pelo sistema aquífero local.

7. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Análise de Impacto regulatório – AIR. Aproveitamento de estéril e rejeitos. Área: GEMI. No de controle 01. Versão: 1.0, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/consulta-publica-04-2020-aproveitamento-de-esteril-e-rejeitos-1/air_aproveitamento-de-esterilrejeitos_02-1.pdf/view>.

ALBERTI, H. L. C. Caracterização fisiográfica e avaliação hidrológica na bacia do Ribeirão das Antas, Planalto de Poços de Caldas, MG. 2008. 114p. Dissertação de mestrado em Geociências. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP. 2008.

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

ALMEIDA NETO, J. F. Análise exergética do ciclo do combustível nuclear – etapa da mineração até a obtenção do concentrado de urânio (“yellow cake”). Dissertação de mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares. Curso de Ciências e Técnicas Nucleares, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG. 2020.

ARAÚJO, ELIANE ROCHA; OLIVIERI, RENATA DAMICO E FERNANDES, FRANCISCO REGO CHAVES. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. In: Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos. Francisco Rego Chaves Fernandes, Renata de Carvalho Jimenez Alamino, Eliane Araújo (org.). Rio de Janeiro: CETEM/MCTI (2014) <https://issuu.com/pesquisaunificada/docs/recursos-minerais-e-comunidadeimpa>

BORMA, L. S.; SOARES, P. S. M. Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. In: Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente. Cap.10. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. p.253-276.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Indústria Nucleares do Brasil. Como está o plano de recuperação para a INB Caldas?. [S. l.], 1 out. 2020. <https://www.inb.gov.br/Contato/PerguntasFrequentes/Pergunta/Conteudo/como-esta-o-plano-de-recuperacao-para-a-inbcaldas?Origem=1759>. Acesso em: 28 nov. de 2023.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Indústria Nucleares do Brasil. O que é Torta II?. [S. l.], 1 out. 2020. Disponível em:

<http://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/oque-e-torta-2?Origem=1759>. Acesso em: 16 dez. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. MME e Ipea lançam estudos sobre a extensão da cadeia produtiva da mineração no PIB brasileiro. [S. L.]: Ministério de Minas e Energia, 21 dez. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-e-ipea-lancam-estudos-sobre-a-extensao-da-cadeia-produtiva-da-mineracao-no-pib-brasileiro>. Acesso em: 22 nov. 2023.

BRASILMINING. Os 10 países com os maiores recursos naturais do mundo. Artigo Técnico. Equipe BM, 12 jul. 2022. Disponível em: <https://brasilminingsite.com.br/os-10-paises-com-os-maiores-recursos-naturais-do-mundo/>. Acesso em 20 dez. 2024.

BRODA, S.; AUBERTIN, M.; BLESSENT, D.; HIRTHE, E.; GRAF, T. Improving control of contamination from waste rock piles. *Journal of Environmental Geotechnics*. 2014.

BUCHI, F. M. S. ; MOREIRA, C.A. . Avaliação do fluxo d'água subterrânea em pilha de estéril afetada por processo de drenagem ácida através de diagnóstico geofísico, mina Osamu Utsumi, Caldas (MG). In: IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2022, Curitiba. Anais do IX Simpósio Brasileiro de Geofísica. Rio de Janeiro: SBGf, 2022. v. 1. p. 212.

CAMARERO, P. L. ; MOREIRA, C A . Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity technique. *REM - International Engineering Journal*, v. 70, p. 47-52, 2017.

CAMARERO, PEDRO LEMOS ; MOREIRA, CÉSAR AUGUSTO ; TARGA, DÉBORA ANDRADE ; DUZ, BEATRIZ GUZZO ; PEREIRA, HENRIQUE GARCIA . Analysis of Acid Drainage Flow Zones in a Rocky Massif in a Uranium Mine from Structural and Geophysical Diagnoses, *Mine Water and the Environment*, v. 40, p. 1123, 2021

CAMPANER, Veridiana Polvani; LUIZ-SILVA, Wanilson. Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil. *Quím. Nova*, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 146-152, 2009 . Available from . access on 20 Nov. 2020. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100028>.

CAPOVILLA, M. M. G. M. Urânio nos hidrotermalitos potássicos (“rocha potássica”) da mina Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG. 2001,

149 p. Tese de doutorado –Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, São Paulo, SP, 2001

CARVALHO FILHO, Carlos Alberto de. Avaliação da qualidade das águas superficiais no entorno das instalações minero-industriais de urânio de Caldas, Minas Gerais. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais), Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, Belo Horizonte, Minas Gerais. 2014.

CASAGRANDE, M. F. S. Investigação geofísica em pilha de estéril afetada por processo de drenagem ácida na Unidade de Descomissionamento Caldas, poços de caldas-mg. Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira. 109 p. Dissertação (Mestre em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro – SP. 2019.

CASAGRANDE, M.F.S., MOREIRA, C.A. & TARGA, D.A. Study of Generation and Underground Flow of Acid Mine Drainage in Waste Rock Pile in an Uranium Mine Using Electrical Resistivity Tomography. *Pure Appl. Geophys.* 177, 703–721 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02351-9>

CETEM/MCT, Projeto Conceitual para a Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense, RT33/2000, RT45/200, RT46/200 – Relatório Técnico Elaborado para SIECESC Volume 1, 2 e 3, 2001.

CHULÈS, J. P.; DELFINER, P. *Geostatistics – Modeling Spatial Uncertainty*. Second Edition. John Wiley & Sons. 726 p. 2012.

CIPRIANI, M. Mitigação dos Impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio. 2002. 334p. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. 2002.

COELHO, Ednei da Assunção Antunes. Isolamento de fungos com potencial para biorremediação na mina de urânio Osamu Utsumi. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.42.2019.tde-09122021-104030>

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.

DO NASCIMENTO, M.M.P.F., MOREIRA, C.A., DUZ, B.G. et al. Geophysical Diagnosis of Diversion Channel Infiltration in a Uranium Waste Rock Pile. *Mine Water Environ* 41, 704–720 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10230-022-00878-3>.

DUZ, B. G. ; MOREIRA, C. A. ; HARTWIG, M. E. ; MIANO, F. Q. ; ARAUJO, A. F. S. . Groundwater identification using geophysical tools and its implications for the stability of slopes in an open pit mine. *Geofísica Internacional*, v. 63, p. 1033-1043, 2024.

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

FARFAN, J. R. J. Z.; BARBOSA FILHO, O.; SOUZA, V. P.. Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. (Série Tecnologia Ambiental, 29).

FERNANDES, H.M., FRANKLIN, M.R.. Assessment of acid rock drainage pollutants released at the uranium mining site of Poços de Caldas – Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity* 54:5–25.2001.

FERNANDES, HM, FRANKLIN, MR, E GOMIERO, LA (2008). Análise crítica dos resíduos desempenho de gestão de duas unidades de produção de urânio no Brasil- Parte I: Centro de produção de Poços de Caldas. *Journal of Environmental Management*, 87, 59-72

FILHO, C. A. C. Avaliação da qualidade das águas superficiais no entorno das instalações minero-industriais de urânio de Caldas, Minas Gerais. 2014. 363 p. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais. Centro de desenvolvimento da tecnologia nuclear, Belo Horizonte, MG. 2014.

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.

GOLDER ASSOCIATES, Brasil consultoria e projetos Ltda. Plano de Recuperação de Áreas Degradadas – INB MOU Caldas. Relatório Técnico no RT006_099-515-3023_01-j, março 2012, 561 p + anexos.

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

OLIVEIRA, P. E. S.; CARVALHO FILHO, C. A.; MOREIRA, R. M. M.; RAMOS.; M. E. A. F.; SILVA, N. C. Avaliação da qualidade de sedimentos fluviais no entorno da mina de urânio de caldas. Geonomos, v. 26, n. 2, p. 31-40, 2018. doi:10.18285/geonomos.v26i2.12566.

HALCOMB, M.; FARE, D. Soil pH explained. Agricultural Extension Service, The University of Tennessee, 2002. Disponível em: http://www.utextension.utk.edu/mtnpi/handouts/Fertility/Soil_pH_Explained.pdf. Acesso em: 15 de dez. 2023.

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

JIWAN, S.; KALAMDHAD, A. S. Effects of heavy metals on soil, plants, human health and aquatic life. International Journal of Research in Chemistry and Environment, 1 (2), p. 15-21, 2011.

JOHNSON, D. B.; HALLBERG, K. B. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the Total Environment, 338, p. 3-14. 2005.

KAUFMAN, A. A.; ANDERSON, B. Principles of electric methods in surface and borehole geophysics. Methods in Geochemistry and Geophysics, vol. 44, 2010.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. An introduction to geophysical exploration. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002. 272p.

KLEINMANN, R. L. P.; CREARAR, D. A.; PACELLI, R. R. Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. Mining Engineering, p. 300-305, 1981.

LIMA, P. Recuperação de urânio e de terras raras do resíduo gerado no tratamento de águas ácidas. 2014, 77 p. Dissertação de mestrado - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2014.

LOKE, M. H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Online. 2001.

LOKE, M. H. A. Practical guide 2-D and 3-D surveys. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, 2010. 136 p.

LUIZ, J.G. & SILVA, L.M.C. 1995. Geofísica de Prospecção. Belém: UFPA/CEJUP, v. 1, 311 p.

MACHADO, L. A.; SCHNEIDER, I. A. H. Ensaio estático e cinético para a prevenção da geração de drenagem ácida de minas da mineração de carvão com escória de aciaria: Static and kinetic tests to prevent the generation of acid mine drainage from coal mining with steel slag. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, MG, v. 61, ed. 3, p. 329-335, setembro 2008. DOI <http://hdl.handle.net/10183/21044>. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/21044>. Acesso em: 02 jan. 2024.

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

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

MILANEZ, B., SCOTTO, G., SANT'ANA JÚNIOR, H.A., BOSSI, D., and KATO, K. Injustiça Ambiental, Mineração e Siderurgia. In: PORTO, M.F., PACHECO, T., and LEROY, J.P., comps. Injustiça ambiental e saúde no Brasil: o Mapa de Conflitos [online]. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2013, pp. 175-205. ISBN 978-85-7541-576-4.

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

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

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

MOREIRA, C.A.; NETTO, L. G. ; BUCHI, F. M. S. ; HANSEN, Marco Antonio Fontoura ; MASQUELIN, HENRI ; LIMA, José Pedro Rebes . Usando la Tomografía de Resistividad Eléctrica para Entender el Comportamiento Hidrogeológico de la Percolación de Drenaje Ácido en un Acuífero Fracturado en una mina de Uranio. Mine Water and the Environment, p. 104-118, 2024.

MURTA, F. C. Ensaios de colunas para a avaliação de remediação passiva de drenagem ácida na Unidade de Descomissionamento Caldas (INB), Caldas/MG. 2006.

NÓBREGA, Flávia Andrade; LIMA, Hernani Mota de; LEITE, Adilson do Lago. Análise de múltiplas variáveis no fechamento de mina: estudo de caso da pilha de estéril BF-4, Unidade de Descomissionamento Caldas, INB Caldas, Minas Gerais. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v., n. 2, p. 197-202, June 2008. Available from . access on 18 nov. 2023. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000200014>.

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

REYNOLDS, J. M. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley e Sons, 2011. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990. Applied Geophysics. New York: Cambridge University Press, 1990, Second Edition 770 p.

SCHROCK, S.; VALLAR, A.; WEAVER, J. The effect of acidic conditions on photosynthesis in two aquatic plants. J. Hon. Lab Invest, 1 (1), p. 22-26, 2001.

SENGUPTA, M. Environmental Impacts of Mining – Monitoring, restoration and control, Lewis Publishers, United States of America, 1993, p. 121-166.

SIMATE, G. S.; NDLOVU, S. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2, p. 1786-1803. 2014.

SKOUSEN, J. G.; ZIEMKIEWICZ, P. F.; MCDONALD, L. M. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. The Extractive Industries and Society. 2018.

SOUZA, A. M.; SILVEIRA, C. S.; PEREIRA, R. M. Contribuições dos metais provenientes das pilhas de rejeito da Mina Osami Utsumi em drenagens do Complexo Alcalino de Poços de Caldas. Geochimica Brasiliensis, v. 27, n. 1, p. 63, 30 Sep. 2013.

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. Análise da geração de drenagem ácida de mina em pilha de rejeito sulfetada a partir de levantamento geofísico e dados hidroquímicos. Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira. 107 p. Dissertação (Mestre em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro – SP. 2020.

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

TARGA, D.A., MOREIRA, C.A. & CASAGRANDE, M.F.S. Hydrogeological Analysis of Sulfide Tailings at a Uranium Mine Using Geophysical and Hydrochemical Methods. *Mine Water Environ* 40, 671–689 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00791-1>