

Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

ANÁLISE DE EMANAÇÕES RADIOATIVAS EM PILHAS DE  
REJEITOS DE MINERAÇÃO DE URÂNIO E SUAS RELAÇÕES COM  
A GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

Anna Carolina Gastmaier Marques

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro - SP

2021

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

ANNA CAROLINA GASTMAIER MARQUES

ANÁLISE DE EMANAÇÕES RADIOATIVAS EM PILHAS DE REJEITOS DE  
MINERAÇÃO DE URÂNIO E SUAS RELAÇÕES COM A GERAÇÃO DE  
DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

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

2021

M357a      Marques, Anna Carolina Gastmaier

    Análise de emanações radioativas em pilhas de rejeitos de mineração de urânio e suas relações com a geração de drenagem ácida de mina / Anna Carolina Gastmaier Marques. -- Rio Claro, 2021

    86 p. : il., tabs., fotos

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

    Orientador: César Augusto Moreira

    1. Geofísica. 2. Urânio. 3. Gamaespectrometria. 4. Drenagem ácida de minas. 5. Meio Ambiente. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

ANNA CAROLINA GASTMAIER MARQUES

ANÁLISE DE EMANAÇÕES RADIOATIVAS EM PILHAS DE  
REJEITOS DE MINERAÇÃO DE URÂNIO E SUAS RELAÇÕES  
COM A GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

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 – Orientador  
Departamento de Geologia/ Instituto de Geociências e Ciências Exatas –  
UNESP, Campus de Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Fábio Braz Machado  
Setor de Ciências da Terra –  
UFPR, Curitiba (PR)

Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto  
Departamento de Geologia/ Instituto de Geociências e Ciências Exatas –  
UNESP, Campus de Rio Claro (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro/SP, 10 de setembro de 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao Prof. Dr. César Augusto Moreira por acima de tudo ter me incentivado e me motivado ao longo desse processo de conhecimento e desenvolvimento profissional. O mestrado é uma trajetória única e tive a oportunidade de ser orientada por um excelente profissional.

Aos meus pais, Anna Maria e Manuel, que sempre colocaram a educação de seus filhos em primeiro lugar. Aos meus irmãos, Irina e Jorge, por todo o amor e força, que nos fazem presentes em todos os momentos importantes. Ao Victor, agradeço por caminharmos juntos em busca dos meus, dos teus e dos nossos sonhos. E, com todo o amor, agradeço aos meus avós, George e Maria, por me ensinarem a admirar o mundo e a viver intensamente as fases da vida. Sem a força de cada um de vocês, eu jamais enfrentaria desafios.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento dos projetos intitulados: “Descomissionamento Sustentável: análise do comportamento hidrogeológico de maciços rochosos e sua influência na estabilidade geotécnica de encostas de mina a céu aberto e a geração de drenagem ácida de mina” (nº 2020/14647-0) e “Estudo da geração de drenagem ácida em pilhas de rejeitos em mineração de Urânio” (Processo nº 2019/14565-3). E, as Indústrias Nucleares do Brasil pela colaboração e permissão de desenvolvimento deste trabalho, pelo suporte técnico, acesso à informação e a área de estudos.

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

## RESUMO

A mineração modifica profundamente o ambiente e produz consideráveis volumes de rejeito e material estéril, que geram impactos principalmente no solo, na água e no ecossistema. A caracterização do ambiente geológico antes da lavra é fundamental para que o plano de descomissionamento da mina seja traçado de maneira a reduzir gastos e gerar o menor impacto local. No entanto, existe a necessidade de considerar as alterações causadas pela lavra e processamento mineral nas rochas exploradas, uma vez que a exposição de óxidos e sulfetos são os principais responsáveis pela geração de drenagem ácida, ao entrarem em contato com o oxigênio e a água. Desta forma, pilhas de estéril e rejeito podem desencadear impactos ambientais de remediação dispendiosa e complexa. As operações na Mina Osamu Utsumi (MOU), localizada em Caldas (MG), pioneira na extração de urânio no Brasil, resultaram a geração de drenagem ácida de mina principalmente nos bota-foras e na cava da mina. O presente estudo busca avaliar as emissões radioativas e a geração de drenagem ácida de mina da pilha de estéril do Bota-Fora 04 (BF-04) da MOU, a partir do método geofísico da Gamaespectrometria. O processamento dos dados gamaespectrométricos espacializou as concentrações dos radioelementos potássio, urânio e tório na área de estudos. As concentrações de potássio permitiram compreender principalmente zonas de depleção das rochas e a sedimentação do radioelemento em zonas alagáveis. A análise dos dados de radioatividade em conjunto com estudos anteriores indica que zonas de maior concentração de radiação de urânio e tório estão associados a zonas de acúmulo de sulfetos. A oxidação dos minerais sulfetados geram a drenagem ácida que é responsável pela destruição dos minerais radioativos, motivo pelo qual são reconhecidas altas concentrações de urânio e tório na água ácida em estudos hidroquímicos realizados anteriormente. Os dados de radioatividade, junto a dados geofísicos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida apresentados em estudo anterior no BF-04, permite subsidiar a elaboração de alternativas de remediação para a área e a tomada de decisão por parte das Indústrias Nucleares do Brasil.

**Palavras-chave:** gamaespectrometria, urânio, radiação, drenagem ácida, pilha de estéril.

## **ABSTRACT**

Metal mining deeply modifies local environment and produces large volumes of waste rock and residues, which are expected to be carefully disposed to prevent soil, water, and environment degradation. Geologic foundation identification and specific chemical compositions characterization are fundamental to establish a mine decommissioning plan, with the purpose to avoid tremendous amounts of time, effort, and money investments. Operational and processing methods should also be considered, due to the affinity of certain metals to combine with sulfur to form minerals called sulfides. The extraction of ore associated with sulfides minerals represents historically environment contamination as a result of mineral leaching and the generation of acid mine drainage. The pioneer uranium ore exploitation site in Brazil was the Osamu Utsumi Mine in 1982, located in the State of Minas Gerais. Under controversial interests, the open pit and the high concentration of sulfide in waste rock piles are nowadays a dispendious concern to the Brazilian governmental nuclear company (Indústrias Nucleares do Brasil - INB), due to sulfide oxidation and the resultant acid mine drainage (AMD). The objective of this research was to analyze gamma-ray spectrometry data and the generation of AMD in a waste rock pile, BF-04, in the Osamu Utsumi Mine. The processing data mapped uranium, thorium and potassium concentrations in the study area. Potassium concentrations distinguishes zones of rock depletion, lowest concentrations, and radioelement sedimentation. The radiometric data acquisition combined with previous studies indicates that high uranium and thorium concentrations are associated with high sulfide zones. The oxidation of sulfide minerals is responsible for acid mine drainage, which acidity chemically leaches radioactive minerals, elevating uranium and thorium concentration in acid water recognized in previous hydro chemical analyses. The gamma-ray spectrometry results can subsidize the local and low-cost remediation.

**Keywords:** gamma-ray spectrometry, uranium, radiation; acid mine drainage; waste rock pile; uranium mine.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|                |                                                                          |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>BNF</b>     | Bacia Nestor Figueiredo                                                  |
| <b>BF-04</b>   | Bota Fora 04                                                             |
| <b>BF-08</b>   | Bota Fora 08                                                             |
| <b>CIPC</b>    | Complexo Mínero-Industrial do Planalto de Poços de Caldas                |
| <b>CNEN</b>    | Comissão Nacional de Energia Nuclear                                     |
| <b>CODEMIG</b> | Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais                   |
| <b>CPRM</b>    | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais                               |
| <b>DAM</b>     | Drenagem Ácida de Mina                                                   |
| <b>DBO</b>     | Demanda Bioquímica de Oxigênio                                           |
| <b>DNPM</b>    | Departamento Nacional de Produção Mineral                                |
| <b>DUCA</b>    | Diuranato de Cálcio                                                      |
| <b>IBAMA</b>   | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| <b>IBM</b>     | Instituto Brasileiro de Mineração                                        |
| <b>ICMM</b>    | <i>International Council on Mining and Metals</i>                        |
| <b>INB</b>     | Indústrias Nucleares do Brasil                                           |
| <b>K</b>       | Potássio                                                                 |
| <b>MOU</b>     | Mina Osamu Utsumi                                                        |
| <b>NORM</b>    | <i>Naturally Occuring Radioactive Materials</i>                          |
| <b>PIB</b>     | Produto Interno Bruto                                                    |
| <b>REE</b>     | <i>Rare Earth Elements</i>                                               |
| <b>SIG</b>     | Sistema de Informação Geográfica                                         |
| <b>Th</b>      | Tório                                                                    |
| <b>U</b>       | Urânio                                                                   |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Localização da INB Caldas.....                                                                                         | 12 |
| Figura 2. Aspecto geral da porção nordeste do CIPC .....                                                                         | 14 |
| Figura 3. Esquema dos tipos de minérios existentes na mina Osamu Utsumi, pipes e diques de fluidização. ....                     | 16 |
| Figura 4. Localização da área de estudos. ....                                                                                   | 20 |
| Figura 5. Localização das principais estruturas de disposição e tratamento de rejeitos. ....                                     | 21 |
| Figura 6. Mapa geológico simplificado do Maciço Alcalino de Poços de Caldas .....                                                | 23 |
| Figura 7. Modelo esquemático da evolução do Complexo Alcalino de Poços de Caldas .....                                           | 24 |
| Figura 8. Pluviosidade mensal e média anual Andradas e Poços de Caldas .....                                                     | 25 |
| Figura 9. Pluviosidade mensal da INB-Caldas.....                                                                                 | 26 |
| Figura 10. Bacias hidrográficas principais no Complexo Alcalino de Poços de Caldas .....                                         | 28 |
| Figura 11. Mapa de localização dos pontos monitorados.....                                                                       | 31 |
| Figura 12. Elementos do plano de descomissionamento .....                                                                        | 33 |
| Figura 13. Etapas do diagnóstico.....                                                                                            | 43 |
| Figura 14. O espectro eletromagnético.....                                                                                       | 46 |
| Figura 15. Exemplo de atenuação de raios gama com diferentes energias iniciais por materiais geológicos .....                    | 49 |
| Figura 16. Espectro natural de raios gama .....                                                                                  | 53 |
| Figura 17. Gamaespectrômetro RS-332 durante coleta de dados na área de estudos ....                                              | 55 |
| Figura 18. Mapa de localização da Área de Estudos e Pontos Coletados .....                                                       | 57 |
| Figura 19. Medidas e interpolação de dados radiométricos para visualização em planta .....                                       | 58 |
| Figura 20. Mapa 2D de interpolação da concentração do radioelemento potássio .....                                               | 60 |
| Figura 21. Mapa 2D de interpolação da concentração do radioelemento urânio .....                                                 | 61 |
| Figura 22. Mapa 2D de interpolação da concentração do radioelemento tório .....                                                  | 61 |
| Figura 23. Canal de desvio do Córrego da Consulta associado a formação de drenagem ácida de mina e alta concentração de eU ..... | 63 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Características dos bota-foras e principais rejeitos dispostos.....                             | 17 |
| Tabela 2. Pluviosidade histórica INB-Caldas 2013 a 2019 .....                                             | 26 |
| Tabela 3. Amostragem de água subterrânea e DAM.....                                                       | 30 |
| Tabela 4. Padrão de qualidade de água relacionado a contaminantes provindos de processos minerários ..... | 36 |
| Tabela 5. Decaimento radioativo natural de $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ e $^{40}\text{K}$ .....   | 48 |
| Tabela 6. Minerais de urânio e tório.....                                                                 | 51 |
| Tabela 7. Canais de raios gama monitorados por pesquisa radiométrica.....                                 | 52 |
| Tabela 8. Dados coletados em função da variação do tempo de aquisição .....                               | 55 |
| Tabela 9. Desvio padrão e coeficiente de variação dos dados coletados .....                               | 56 |

## Sumário

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                                  | 9  |
| 2. OBJETIVOS.....                                                                                    | 11 |
| 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS .....                                                           | 12 |
| 3.1. Localização.....                                                                                | 12 |
| 3.2. Histórico da área de estudos .....                                                              | 13 |
| 3.3. Gênese do depósito de urânio.....                                                               | 15 |
| 3.4. Bota foras.....                                                                                 | 17 |
| 3.5. Geologia regional .....                                                                         | 22 |
| 3.6. Clima e vegetação.....                                                                          | 24 |
| 3.7. Hidrologia e hidrogeologia.....                                                                 | 27 |
| 3.8. Hidroquímica.....                                                                               | 29 |
| 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....                                                                       | 32 |
| 4.1. Planejamento e descomissionamento de mina.....                                                  | 32 |
| 4.2. Impacto minerário em recursos hídricos .....                                                    | 33 |
| 4.3. Drenagem ácida de mina .....                                                                    | 39 |
| 4.4. Disposição de rejeito radioativo .....                                                          | 40 |
| 5. MATERIAIS E MÉTODO.....                                                                           | 43 |
| 5.1. Radioatividade e decaimento radioativo .....                                                    | 44 |
| 5.1.1. Fontes naturais de radiação e mobilidade de elementos radioativos no ambiente geológico ..... | 49 |
| 5.2. Gamaespectrometria .....                                                                        | 52 |
| 6. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS .....                                                         | 55 |
| 6.1. Calibração e aquisição de dados.....                                                            | 55 |
| 6.2. Processamento dos dados radiométricos .....                                                     | 58 |
| 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                                      | 60 |
| 8. CONCLUSÕES.....                                                                                   | 64 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                                                   | 65 |

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração possui grande relevância para o desenvolvimento de uma nação e papel fundamental na economia global, é essencial para o crescimento econômico, produção de energia e competitividade em escala internacional. Empreendimentos mineiros são infraestruturas absolutamente necessárias para sociedades industriais, com o encargo de realizar o tratamento e descarte adequado para os resíduos gerados pelas atividades (GILMORE, 2008; JAIN, CUI e DOMEN, 2016).

O Instituto Brasileiro de Mineração aponta que as substâncias minerais corresponderam a 14,5% das exportações totais do Brasil, representam 52% do saldo comercial de exportações e aponta a participação do setor extrativista mineral em 3,7% do PIB Brasil (IBM, 2019).

A extração e processamento mineral são as principais atividades geradoras de rejeito na mineração e acarretam diversos impactos ambientais a depender do planejamento e gestão de mina (HUDSON, FOX e PLUMLEE, 1999). O potencial de geração de impactos ambientais é decorrente de alterações da paisagem pela abertura de cavas ou túneis, transporte e processamento, disposição do rejeito em bota-fora e/ou barragens e instalação de infraestrutura de apoio. Decorrente destas atividades é fundamental a caracterização e estudo dos meios físico e biótico, para que seja traçada a capacidade de resiliência do ambiente. A exemplo de impactos decorrentes da mineração há a acidificação do solo, contaminação e degradação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, devido a dissolução e oxidação de metais e o aumento de material particulado e emissão de gases poluentes na atmosfera.

Bota foras ou áreas de lançamento de rejeitos de mineração com sulfetos associados resultam na exposição de um conjunto de minerais altamente reativos em condições ambientais. Minerais sulfetados quando dispostos em superfície ou subsuperfície reagem na presença de água e oxigênio atmosférico e produzem efluentes de baixo pH e alta concentração de metais e metalóides, processo conhecido como drenagem ácida de mina (AKCIL e KOLDAS, 2006). A alcalinização da drenagem ácida captada reduz a mobilidade dos metais, inclusive do urânio, e é a principal forma de evitar impactos ao meio ambiente (IAEA, 2004).

No Brasil, a mineração de urânio e elementos radioativos é exclusiva do monopólio das INB (Indústrias Nucleares do Brasil), empresa estatal mista com

exploração regulamentada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

A INB é responsável desde 1995 pelas áreas exploradas pela Nuclebrás, estatal antecessora. Unidades industriais e de estocagem localizadas em Caldas (MG), São Paulo (SP), Itu (SP) e São Francisco de Itabapoana (RJ) são geridas pela INB. No entanto, é alta a dificuldade quanto ao manejo ambiental destas áreas, principalmente da Unidade Caldas. O Relato Integrado 2020 da empresa apresenta como principal risco da unidade a insuficiência de informações para realização de um estudo de viabilidade adequado para o descomissionamento (INB, 2021).

A exploração de urânio no país foi iniciada em 1982 pela lavra da jazida do Campo do Cercado, em Caldas (MG). O Complexo Mínero-Industrial de Poços de Caldas (CIPC) compreende o primeiro sistema de lavra, beneficiamento e tratamento químico de minério de urânio no Brasil, a partir da exploração da Mina Osamu Utsumi (MOU). Em 1995 devido a inviabilidade econômica a exploração no local foi encerrada e hoje a MOU está em fase de descomissionamento. A descontinuidade operacional ocorreu devido à grande dificuldade atribuída ao limitado conhecimento do depósito de minério, após a produção total de 1.030 toneladas de urânio que corresponde a 24% do potencial dimensionado para a instalação (CIPRIANI, 2002).

A minimização dos danos ambientais causados pela mineração é um grande desafio e de responsabilidade da indústria e da gestão pública. A planta de exploração, beneficiamento e tratamento de minério ocupa área de 15 km<sup>2</sup>, que, no caso da MOU, além da indústria, contempla bota-foras e barragem de rejeitos.

O principal desafio deste trabalho é reconhecer as zonas enriquecidas de radioelementos na pilha de rejeito e associar o decaimento e radioatividade à lixiviação do metal devido a geração de drenagem ácida. O diagnóstico gerado a partir da compreensão do fluxo e infiltração da drenagem superficial na pilha de rejeito e do reconhecimento dos principais pontos de radioatividade permite elaborar um plano de manejo adequado para a área. O desenvolvimento de novas técnicas de investigação, que identificam as zonas de geração de drenagem ácida, contribuem para a resolução do problema global em minerações e proporcionam soluções mitigatórias *in situ*.

## 2. OBJETIVOS

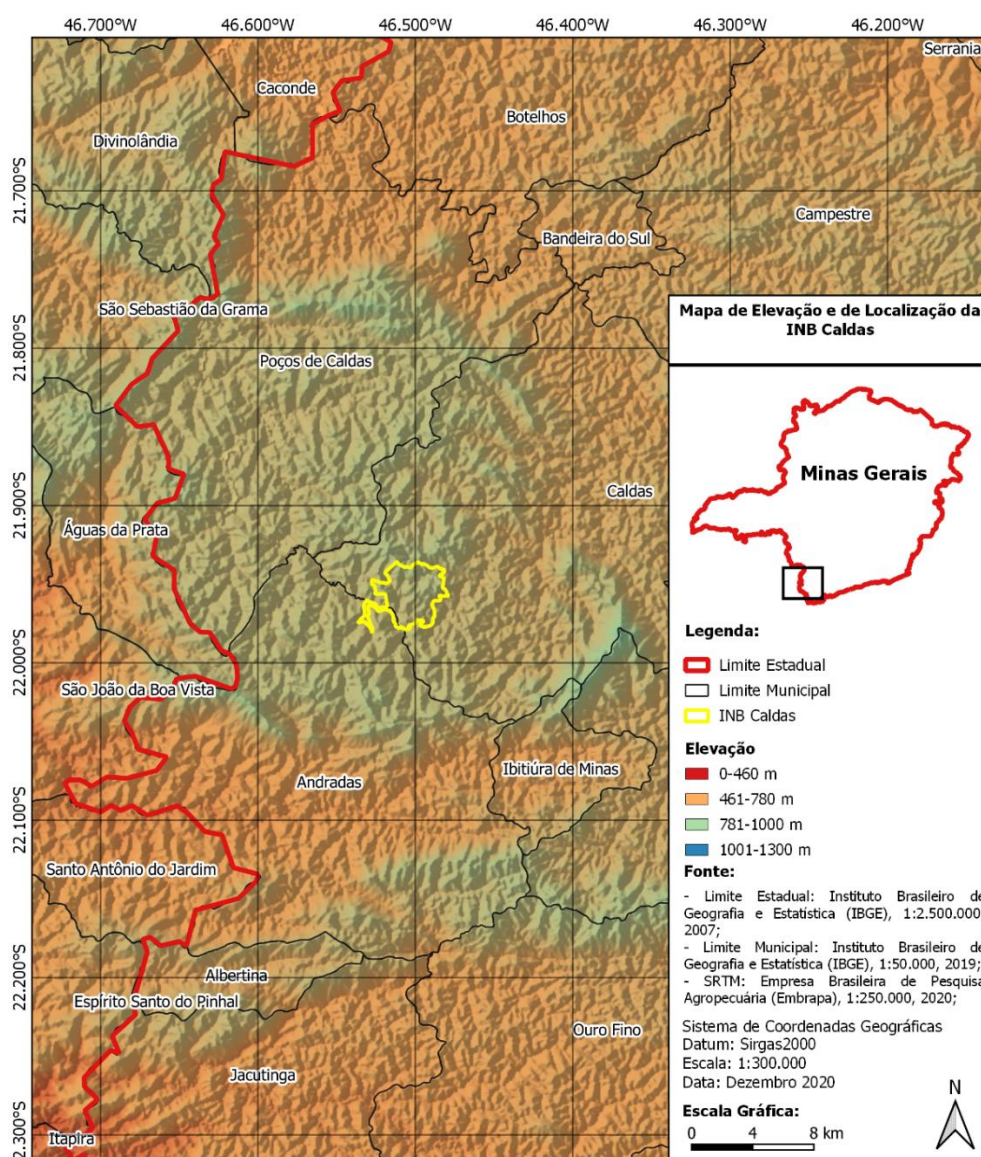
Avaliar emissões radioativas provenientes de pilha de rejeito de mineração de urânio e suas relações com a geração de drenagem ácida de mina a partir das medidas gamaespectrométricas.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

#### 3.1. Localização

A área de estudos está localizada na mina Osamu Utsumi, Unidade de Tratamento de Minérios (UTM), administrada pelas Indústrias Nucleares Brasileiras S.A. A unidade está localizada no município de Caldas, região sudoeste do Estado de Minas Gerais, na porção centro-sul do Planalto de Poços de Caldas. O acesso principal às instalações da unidade industrial é a BR-146, sentido Andradas-Poços de Caldas. A mina Osamu Utsumi faz parte do Complexo Mínero-Industrial do Planalto de Poços de Caldas, propriedade de 1.800 ha da INB (Figura 1).

Figura 1. Localização da INB Caldas



Fonte: Elaborado pela autora, 2021

### 3.2. Histórico da área de estudos

De acordo com o portal de Sensoriamento Remoto e Geofísica – SIG da CPRM, levantamentos aerogeofísicos realizados no Planalto de Poços de Caldas foram iniciados em 1953. O primeiro, pertencente a Série 1000, teve como principal objetivo o levantamento, processamento e interpretação de dados cintilométricos e magnéticos, em área de cobertura total de 1.330 km pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). O segundo projeto realizado, em 1973, pertence a Série 2000, sob responsabilidade do DNPM e objetivou o levantamento, processamento e interpretação de dados magnéticos e radiométricos em uma área de cobertura de 468 km<sup>2</sup>. Na Série 3000 consta o levantamento magnetométrico e de gamaespectrometria no ano de 2010 sob responsabilidade da Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG) e o levantamento de 22.735 km<sup>2</sup>.

A partir de uma parceria entre os governos Brasil-Alemanha na década de 70, foi possível mapear e realizar levantamentos aerogeofísicos que subsidiaram a exploração da jazida de urânio na região do CIPIC. De acordo com Cipriani (2002), o projeto básico da mina e da usina do CIPIC foi dimensionado para a produção de 425 tU/ano, durante 10 anos, e a operação comercial foi iniciada em fevereiro de 1982, com a instalação da mina e de uma usina de tratamento químico. A descontinuidade operacional devido à grande dificuldade atribuída ao pouco conhecimento do minério, resultou na paralização definitiva das atividades de lavra em 1995, com produção total de 1.030 tU.

O estudo de Holmes *et al.* (1990) aborda que a exploração do minério na mina Osamu Utsumi teria sido iniciada, em 1974, por meio de galerias subterrâneas, acessadas por uma espécie de poço, posteriormente modificada para o método de extração de mina a céu aberto (Figura 2).

O início das operações é anterior a legislação ambiental federal e a decretos estaduais de conservação do meio ambiente. Portanto, houve um planejamento focado na produção e tratamento do minério e pequena atenção aos resíduos gerados e ao desencadeamento de impactos ambientais. Como consequência, a mitigação dos impactos ambientais decorrente da atividade de exploração de minério depende de complexos projetos de engenharia e custos exorbitantes, principalmente relacionados as regiões de bota-fora, barragem de rejeitos e ao tratamento do lodo proveniente do tratamento da drenagem ácida de mina.

Figura 2. Aspecto geral da porção nordeste do CIPC



Fonte: Casagrande, 2019.

O descomissionamento do empreendimento mineiro consome anualmente 4 milhões de reais oriundos dos cofres públicos, essencialmente aplicados na captação e tratamento dos efluentes ácidos e contaminados por metais pesados, por meio de soluções dispendiosas, com rotinas operacionais constantes e de curto prazo. Em resumo, a alcalinização dos efluentes ácidos captados é responsável pela geração de lodo radioativo e constituído por metais pesados, que atualmente não recebe tratamento e é descartado na cava da mina. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de novas técnicas de investigação, que atuem na identificação das zonas de geração de drenagem ácida, de forma a contribuir para a resolução do problema global em minerações e a proporcionar soluções mitigatórias *in situ*.

O processamento de diferentes minérios era de grande interesse por conter espécies radioativas, tais como a columbita, a zirconita e outros concentrados com terras raras, além da produção de terras raras a partir da monazita com aplicação de ácido sulfúrico. No entanto, o Ibama condicionou o licenciamento de novas atividades ao início da remediação das áreas da mina, bota-foras e usina do CIPC e a CNEN exigiu a construção de um novo sistema de gerenciamento de rejeitos. Em 2012, foi aprovado pelo Ibama o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) da Mina Osamu Utsumi, elaborado a partir de estudos nas áreas de hidrologia, geoquímica, hidroquímica e

radioproteção, com o objetivo de definir as obras a serem realizadas e as ações de recuperação ambiental que devem ser desenvolvidas na unidade (INB, 2021).

Devido ao alto grau de complexidade para a recuperação das áreas degradadas da Mina Osamu Utsumi são desenvolvidos estudos e pesquisas que objetivam subsidiar a tomada de decisão da INB frente ao desafio existente. Com o intuito de reconhecer zonas condicionantes no processo de geração de DAM e compreender o fluxo hidrogeológico no BF-04, o estudo de Casagrande (2019) integrou dados de resistividade elétrica e cargabilidade e apresentou a correlação entre anomalias geolétricas de baixa resistividade (até  $10 \Omega.m$ ) e água subterrânea de alta salinidade proveniente do processo de DAM, além de reconhecer zonas de alta cargabilidade ( $> 10,1 \text{ mV/V}$ ) compostas por sulfetos residuais e reativos. A análise integrada constatou padrões e linhas de fluxos no interior do BF-04, provavelmente associados a infiltração do Córrego da Consulta para a pilha de estéril e a delimitação de regiões de reação dos sulfetos residuais e a geração de DAM.

### 3.3. Gênese do depósito de urânio

O complexo alcalino sofreu alteração hidrotermal incipiente imediatamente após a consolidação do magma, estágio onde não houve mobilização ou concentração de urânio, tório e de elementos de terras raras (SCHORSCHER e SHEA, 1992). Nesta etapa hidrotermal deutérica, as reações que ocorrerem no mineral primário durante o processo de cristalização magmática são decorrentes dos componentes voláteis dissolvidos no magma, a depender do nível de resfriamento, da disponibilidade de residual fundido e de sua composição. Como resultado, houve a difusão metassomática de potássio e zeolitização, junto a pequena concentração de argilas oxidativas, caulinita, ilita e K-feldspato, relacionados a hematitização e formação de mineral óxidos de ferro hidratado.

Os corpos mineralizados da MOU foram formados dentro de uma grande chaminé de brecha. A alteração hidrotermal fluido-rocha foi responsável pela modificação do evento primário de mineralização e possui como principal tipo de alteração a argilização pervasiva, seguida de piritização. Em consequência houve o desenvolvimento da pirita em rochas solidificadas, forte metassomatismo potássico e a formação de diversas anomalias radioativas (SCHORSCHER e SHEA, 1992; BIONDI, 2015).

Estágios subsequentes de evolução foram responsáveis pelo segundo evento de mineralização, que produziu de baixa a média concentração de urânio, tório, zircônio,

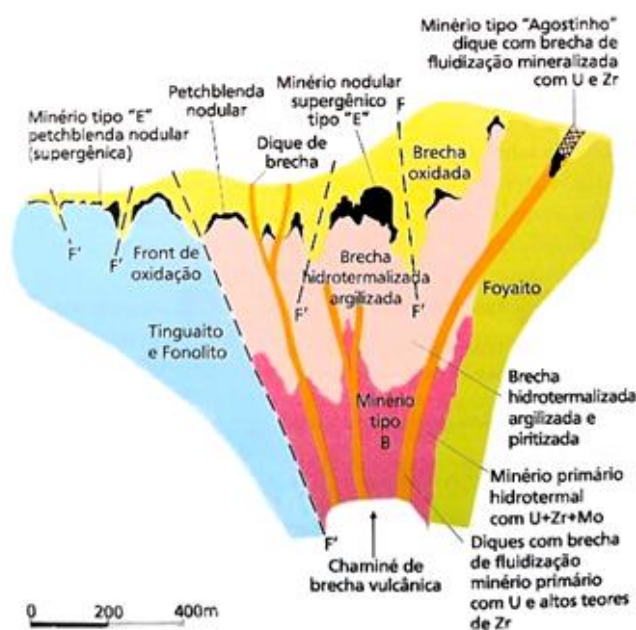
molibdênio e pirita, decorrente do intemperismo intensivo relacionado a alteração hidrotermal e a água meteórica.

Três tipos principais de minério foram lavrados, denominados A (ou brecha de fluidização), B e E, esquematizados por Biondi (2015), Figura 3. O corpo “A” possui sua localização atrelada a *pipes* e diques de fluidização, formado por uma sequência de implosões freáticas seguidas pela percolação de gases sob alta pressão, que deram origem a corpos mineralizados com uraninita, zircão uranífero, baddeleyita, molibdenita, pirita, esfalerita, galena e fluorita.

O minério tipo “B” foi formado pela alteração hidrotermal de brechas e lavas tinguaíticas e fonolíticas, e possui os minerais de minério uraninita, zircão e molibdenita, associados à argilominerais, como a caulinita, pirita e minerais remanescentes das rochas hidrotermalizadas.

O minério tipo “E” é associado a uma frente de oxidação formado por água meteórica, percolada por rochas permeáveis. A oxidação da pirita das rochas, acidificou o meio pela geração de sulfatos e hidróxidos de ferro. A água ácida lixiviou o urânio disseminado nas brechas e lavas e o concentrou na superfície limítrofe entre as rochas oxidadas e não oxidadas, fortemente enriquecido em pitchblenda (MAGNO JÚNIOR, 1985; BIONDI, 2015).

Figura 3. Esquema dos tipos de minérios existentes na mina Osamu Utsumi, pipes e diques de fluidização.



Fonte: Biondi, 2015

A zona mineralizada “B” é a mais expressiva, com cerca de 60% das reservas de urânio. Em decorrência de seu grande volume minerado e o teor de corte da mina a 170 ppm de urânio solúvel, a BF-04 recebeu o material de triagem do corpo “B” como rejeito estéril, com rochas como a caulinita e a pirita.

### 3.4. Bota foras

A MOU estava prevista para ocupar uma área de 200 ha no início das atividades minerárias, área total de cava de 100 ha com escavação na ordem de 85 milhões m<sup>3</sup> e produção de 5.100 tU (CIPRIANI, 2002). O teor de corte da mina foi definido em 170 ppm de urânio solúvel na usina e todo material lavrado, com teor inferior é considerado estéril e constitui o rejeito sólido da mina. Cipriani (2002) aponta que o teor de corte foi definido após o início da operação, devido à grande parte do urânio dos corpos de maior teor (A e B) ser encontrado no retículo cristalino do mineral portador de zircônio e não era acessível ao ácido usado para sua solubilização e tratamento na usina. Este fato desencadeou a disposição de quantidades de urânio maiores que a prevista em projeto nas pilhas de rejeito ou bota foras e na bacia de rejeitos. Os principais bota-foras identificados na MOU estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos bota-foras e principais rejeitos dispostos

| <b>Bota-fora</b>                    | <b>Volume<br/>(1.000 m<sup>3</sup>)</b> | <b>Massa<br/>(1.000 t)</b> | <b>Área (ha)</b> | <b>Composição<br/>predominante</b>         |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------------------------|
| BF 01                               | 4.400                                   | 8.800                      | 25,5             | Decapagem                                  |
| BF 03                               | 9.800                                   | 19.600                     | 20,5             | Decapagem                                  |
| BF 04                               | 12.400                                  | 24.800                     | 56,9             | Decapagem e<br>Triagem do Corpo<br>B       |
| BF 07                               | 2.400                                   | 4800                       | 5,3              | Decapagem                                  |
| BF 08                               | 15.000                                  | 30.000                     | 64,4             | Decapagem e<br>Triagem dos<br>Corpos A e E |
| BF - Cava da<br>mina <sup>(1)</sup> | 560                                     | 1.120                      | ...              | Triagem do Corpo<br>E                      |
| <b>Total</b>                        | 44.560                                  | 89.120                     | 172,6            | -                                          |

<sup>(1)</sup>A cava da mina recebe o lodo provindo da estação de tratamento de resíduos.

O estudo de Cipriani (2002) contabilizou aproximadamente 89 milhões de toneladas, correspondente a 44,5 milhões de metros cúbicos de rejeito estéril produzido durante a implantação e operação da atividade minerária no local, proveniente da decapagem do complexo, a incluir a cava da mina e da triagem dos corpos rochosos minerados. Os bota-foras foram as principais estruturas de recebimento do rejeito da MOU e são divididas em 6 regiões dentro do complexo, a incluir a cava da mina.

De acordo o estudo de Campos *et al.* (2011) é estimado que,  $94,5 \times 10^6$  toneladas de rochas foram removidas em decorrência da operação da mina, no entanto, apenas 2% foram submetidas a processos físicos e químicos para tratamento do minério, o restante foi direcionado a dois principais bota-foras e apenas 3 áreas, BF-04, BF-08 e a cava da mina, receberam o material proveniente dos corpos rochosos A, B e E.

Os bota-foras 04 e 08 apresentam a maior área e volume de rejeito estéril e foram construídos sem qualquer preparação do terreno ou impermeabilização. O rejeito que compõe o BF-04 foi disposto sobre o vale e leito do Córrego da Consulta e o do BF-08 sobre o vale e leito do Córrego do Cercado (AMARAL *et al.*, 1988; FERNANDES *et al.*, 1995; CIPRIANI, 2002). Ambos os córregos recebiam o efluente líquido da mina e a drenagem ácida dos bota-foras sem nenhum tratamento. Os córregos da Consulta e do Cercado foram desviados em 1982 e 1985, respectivamente.

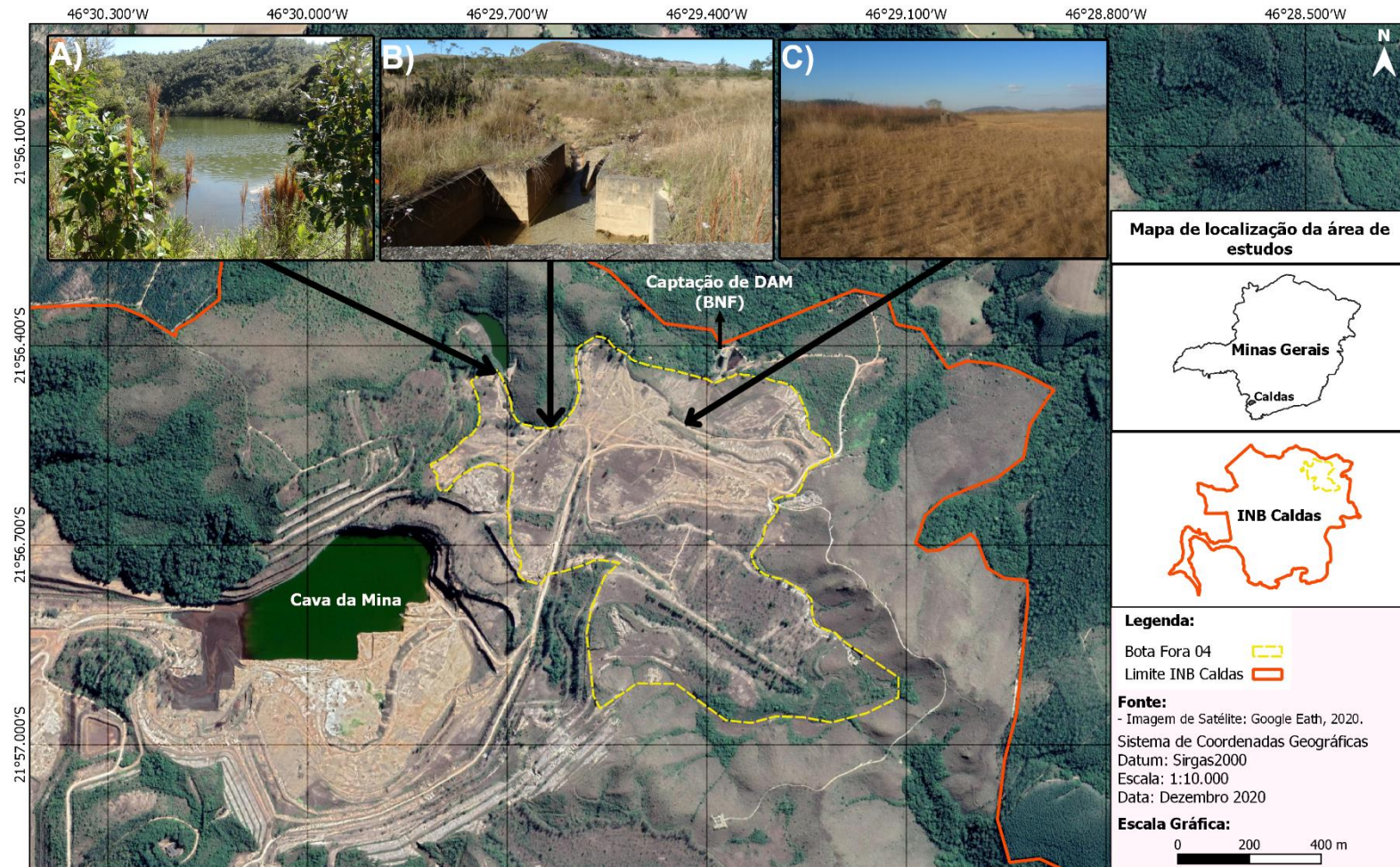
O BF-04 compreende em uma pilha de material estéril misturado com rejeito da unidade de tratamento, com superfície de 56,9 ha e um volume aproximado de 12,4 milhões m<sup>3</sup>. O método construtivo do bota fora “ponta de aterro”, é responsável pelo favorecimento da geração de drenagem ácida, por permitir a segregação granulométrica do material depositado e concentração de partículas maiores na base, enquanto as menores são encontradas na parte superior da pilha. Essa configuração das partículas possibilita a percolação e armazenamento de água na base do bota-fora e propicia a interação dos fluídos com sulfetos, devido a porosidade do material mais grosso, o que contribui para a formação de DAM (NÓBREGA, LIMA e LEITE, 2008).

A produção da drenagem ácida também pode estar relacionada ao método construtivo e ao desvio do Córrego da Consulta estar localizado em cota superior ao patamar inferior da pilha de rejeito sem impermeabilização. Desta forma, é possível a ocorrência de infiltração de parte do volume de água ao longo da margem do bota fora. A drenagem superficial da pilha é direcionada ao Córrego da Consulta por canaletas de concreto. O canal de desvio não é impermeabilizado.

Próxima ao BF-04 está localizada a bacia de captação de drenagem ácida proveniente do fluxo de água interno a pilha. Construída em 1989 a bacia de captação da DAM proveniente do BF-04 é denominada Bacia Nestor Figueiredo (BNF) e é responsável pelo bombeamento de efluente a Estação de Tratamento de Efluente. A Figura 4 apresenta a localização do BF-04, área foco deste estudo.

Figura 4. Localização da área de estudos.

A) Córrego da Consulta; B) Canaleta de drenagem de água superficial do BF-04 ao córrego da Consulta; C) Bota-fora 04: vista interna

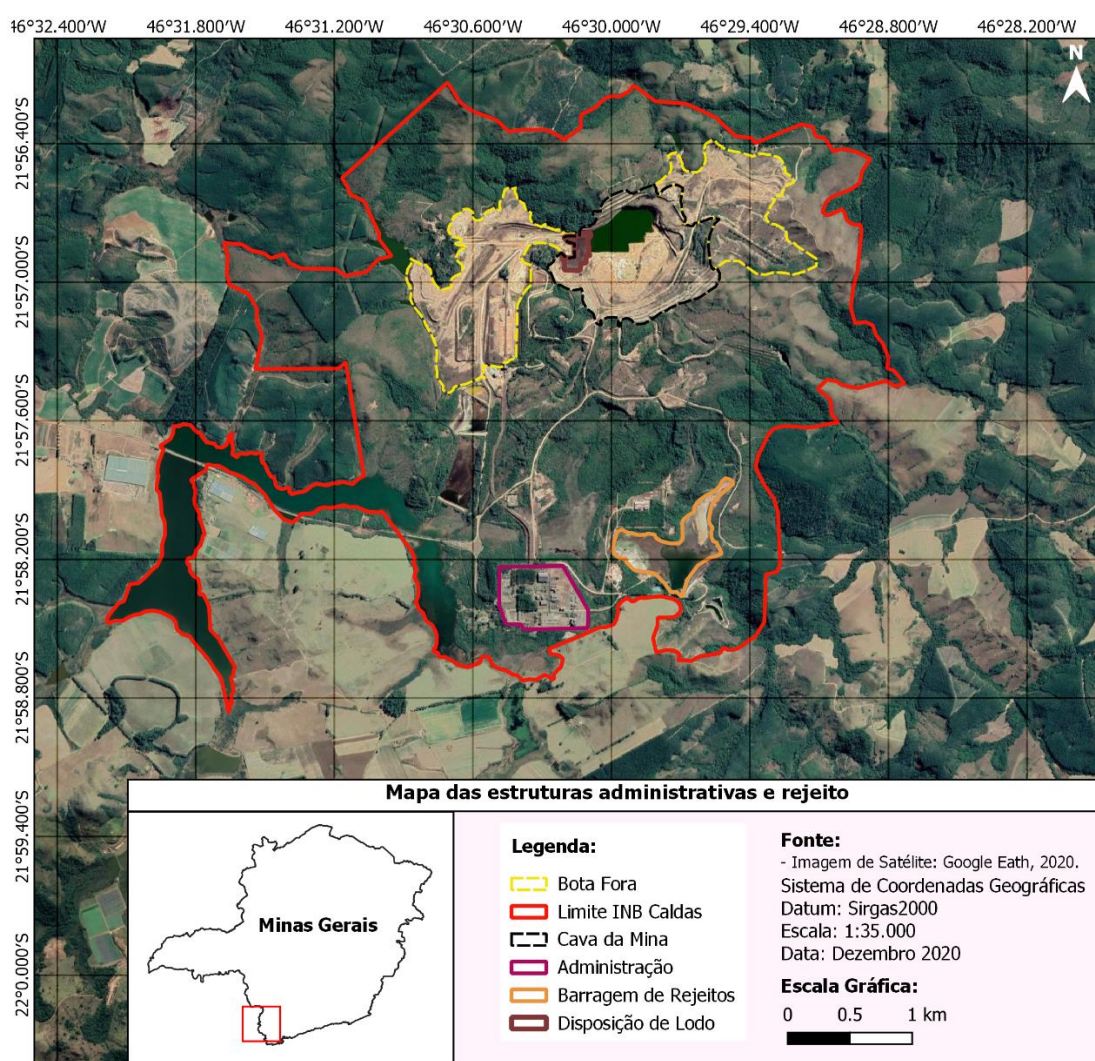


Fonte: Elaborado pela autora, 2021

O bombeamento do efluente até a estação permite o tratamento da água previamente a disposição nos corpos hídricos. Contudo, o processo de tratamento por alcalinização da água acarreta a produção de lodo conhecido como Diuranato de Cálcio (DUCA), resíduo alcalino com alta concentração de metais. O lodo produzido a princípio foi destinado a bacia de rejeitos e após seu completo enchimento foi autorizada a disposição na cava da mina pela CNEN.

As estruturas da estação de tratamento de efluente, bacia de captação e bombeamento, bota-foras e bacia de rejeitos estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5. Localização das principais estruturas de disposição e tratamento de rejeitos



Fonte: Elaborado pela autora, 2021

### 3.5. Geologia regional

Localizado na porção centro-leste do lineamento magmático Cabo Frio, o Maciço Alcalino de Poços de Caldas é o maior complexo alcalino conhecido, com cerca de 800 km<sup>2</sup> (SADOWSKY e DIAS NETO, 1981; SCHORSCHER e SHEA, 1992).

O lineamento Cabo Frio é em uma zona de deflexão da costa associada ao limite norte da bacia de Santos e consiste no alinhamento de rochas alcalinas reconhecidas de Cabo Frio (RJ) a Poços de Caldas (MG), em sentido NE e NW. As rochas alcalinas pertencentes ao lineamento estão associadas à evolução da separação das placas Sul-Americana e Africana, de ocorrência a partir do Jurássico Superior, de aproximadamente 145 a 125 milhões de anos. O magmatismo alcalino continental é datado de 140 a 50 milhões de anos (ULBRICH e GOMES, 1981; SCHORSCHER e SHEA, 1992).

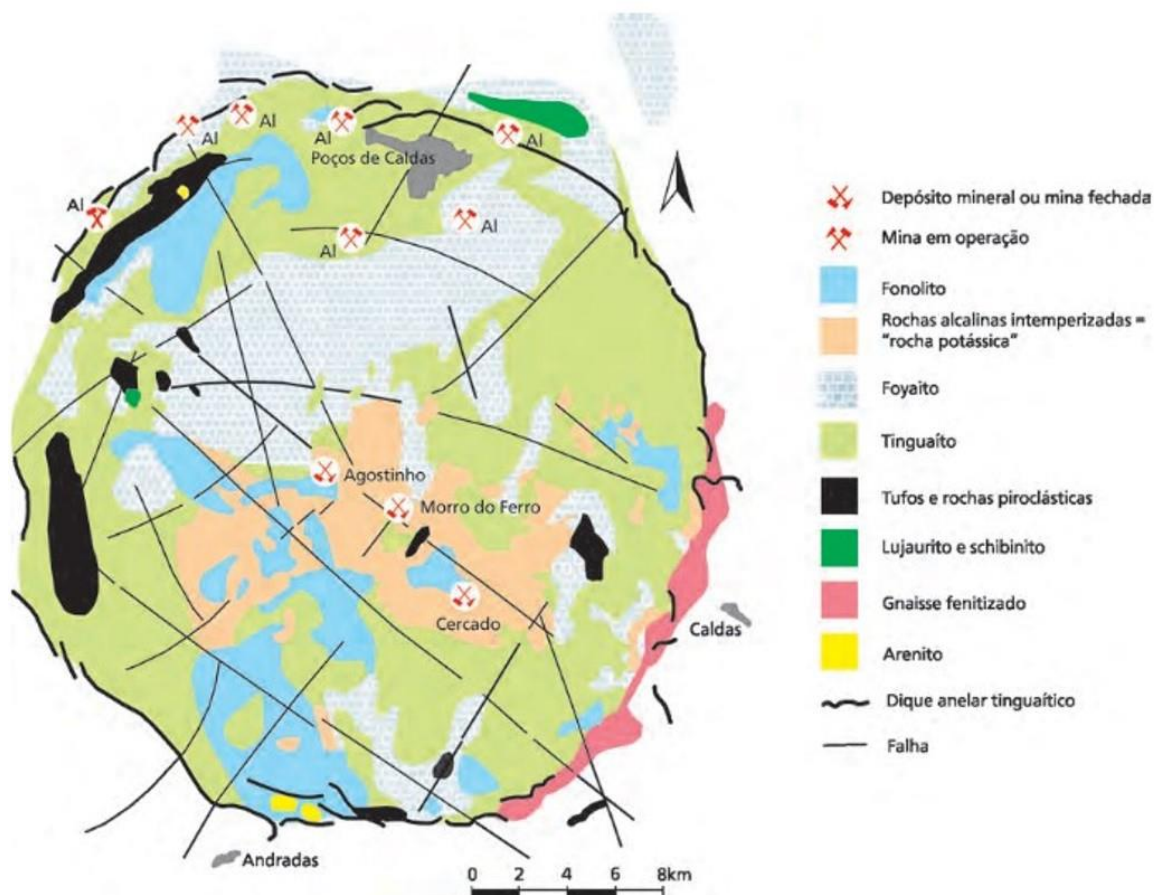
O Maciço Alcalino de Poços de Caldas é um planalto erodido e elevado pertencente à categoria geográfica das rochas alcalinas mesozóicas situadas entre a borda leste da Bacia do Paraná e a sul da Serra da Mantiqueira, na porção sudeste do Brasil, entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo. De formato semi-circular, com cerca de 28 km de diâmetro e de altitude média de 1100 m, cerca de 400 m acima das planícies de entorno, o maciço possui baixa declividade ao centro e taludes nas bordas, onde a elevação chega a 1600 m de altitude (GROHMANN *et al*, 2007; BIONDI, 2015).

O complexo é compreendido por suíte alcalina vulcânica e rochas plutônicas, principalmente fonólitos e nefelina sienitos, com ocorrência de eudialita nefelina sienitos, ankaratritos, carbonatitos, rochas vulcanoclásticas e diques de biotita lamprófitos (SCHORSCHER e SHEA, 1992). A intrusão ocorreu em domínios de embasamento cristalino e a caldeira principal é cercada por granitos, gnaisses e migmatitos pertencentes ao Maciço Guaxupé. No seu interior foram identificadas ao menos 5 estruturas, de 1 a 5 km, remanescentes de antigos vulcões que compõe a estrutura maior (BIONDI, 2015). A região central do complexo é ocupada por rochas alcalinas intensamente transformadas, denominadas rochas potássicas, geradas por alteração hidrotermal seguida de alteração intempérica de tinguaítos (BIONDI, 2015).

Na Figura 6 são destacadas as principais minas, em operação ou fechadas, e depósitos minerais. No complexo estão situados o depósito de háfnio, tório, terras raras e nióbio do Morro do Ferro, a jazida Agostinho, de molibdênio, urânio e zircônio e a mina Osamu Utsumi, ou do Cercado com minério de urânio, molibdênio zircônio e terras raras.

A área centro-sudeste do maciço, onde está localizada a MOU, é formada de tinguaito profundamente alterado e no fundo de vale é encontrado associado a cristais de pirita.

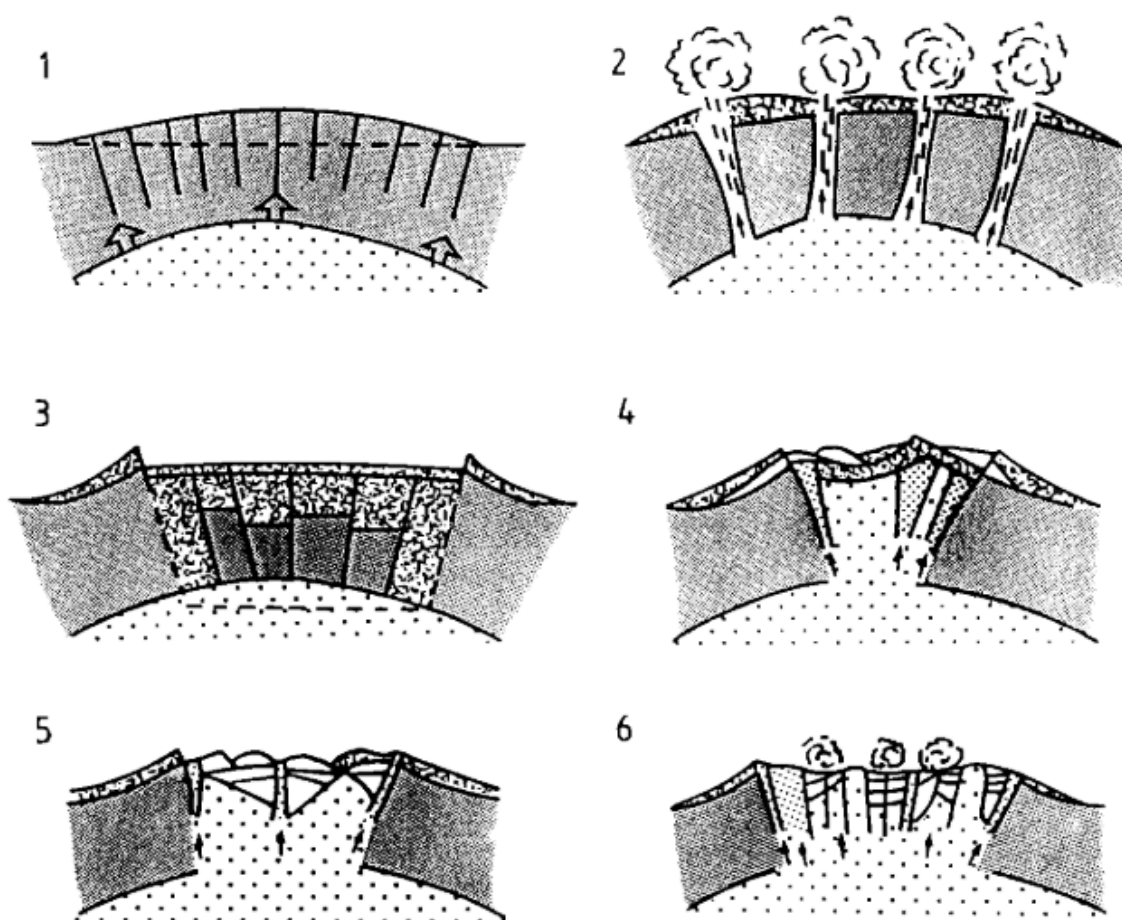
Figura 6. Mapa geológico simplificado do Maciço Alcalino de Poços de Caldas



Fonte: Adaptado Biondi, 2015

O estudo de Schorscher e Shea (1992) esquematizou a evolução do complexo alcalino de Poços de Caldas, Figura 7, a partir de estudos de Ellert (1959), Bushee (1971), Ulbrich (1984) e Schorscher e Shea (1992). De acordo com os autores, a evolução do complexo ocorreu em seis etapas, a partir da elevação de base, distensão, fraturamento e erosão a cerca de 89 milhões de anos do embasamento cristalino. O segundo estágio seria o vulcanismo envolvendo olivina nefelinas, lavas fonolíticas e volcanoclásticas, seguida pelo rebaixamento e formação da caldeira e intrusões de nefelina sienitos responsáveis pela formação de diques circulares e, por último, a intrusão de eudialita nefelina sienitos.

Figura 7. Modelo esquemático da evolução do Complexo Alcalino de Poços de Caldas



Fonte: Schorscher e Shea, 1992 apud Ellert, 1959

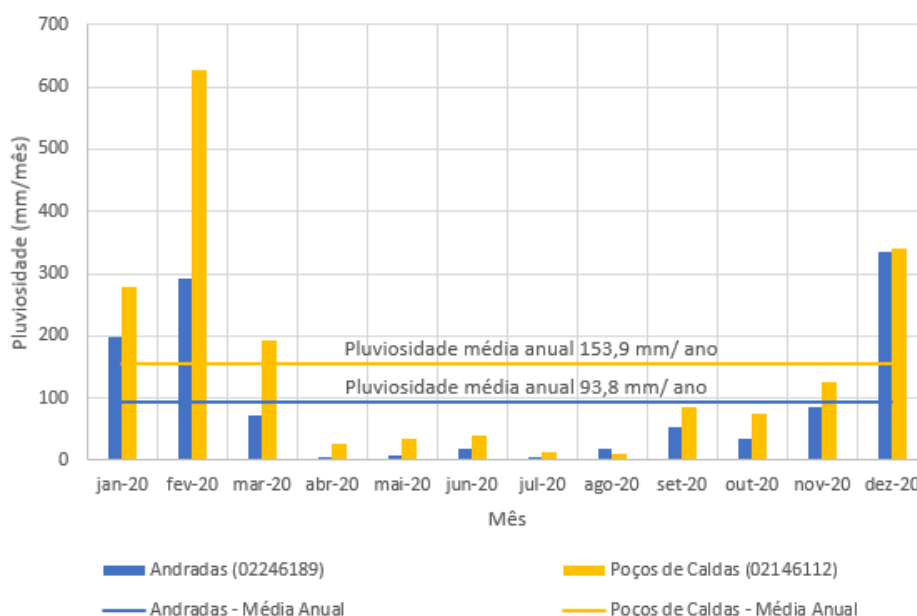
Após a formação do dique anelar, a área foi afetada por eventos tectônicos, o que ocasionou falhamentos em grande extensão, com direções predominantes entre NW-SE e NE-SW (ELLERT, 1959).

### 3.6. Clima e vegetação

O Planalto de Poços de Caldas é caracterizado pelo clima tropical de altitude, com duas estações bem definidas, e altitude que varia entre 1300 m e 1600 m. Com índice de pluviosidade médio de 1700 mm/ano, entre os meses de outubro a março ocorre alta pluviosidade e temperatura mais branda e de abril a setembro há a ocorrência de forte estiagem e baixas temperaturas. Gramíneas rústicas constituem a paisagem junto a pequenas manchas arbóreas nos campos de altitude e arbustivas ao longo das vertentes (CIPRIANI, 2002).

O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas (ANA) disponibilizou dados do ano de 2020 de duas estações pluviométricas localizadas no Planalto de Poços de Caldas, uma no município de Andradas e a segunda em Poços de Caldas. A Figura 8 apresenta a análise gráfica da pluviosidade acumulada mensal e da média anual de ambos os municípios, evidenciando a tendência descrita no estudo de Cipriani (2002) para a região. A precipitação máxima mensal em 2020 para os municípios de Andradas (Estação 02246189) e Poços de Caldas (Estação 02146112) foi de 333,8 mm em dezembro e 626,4 mm em fevereiro, respectivamente. A precipitação acumulada do ano de 2020 em Andradas foi de 1125,6 mm e em Poços de Caldas 1847,2 mm.

Figura 8. Pluviosidade mensal e média anual Andradas e Poços de Caldas

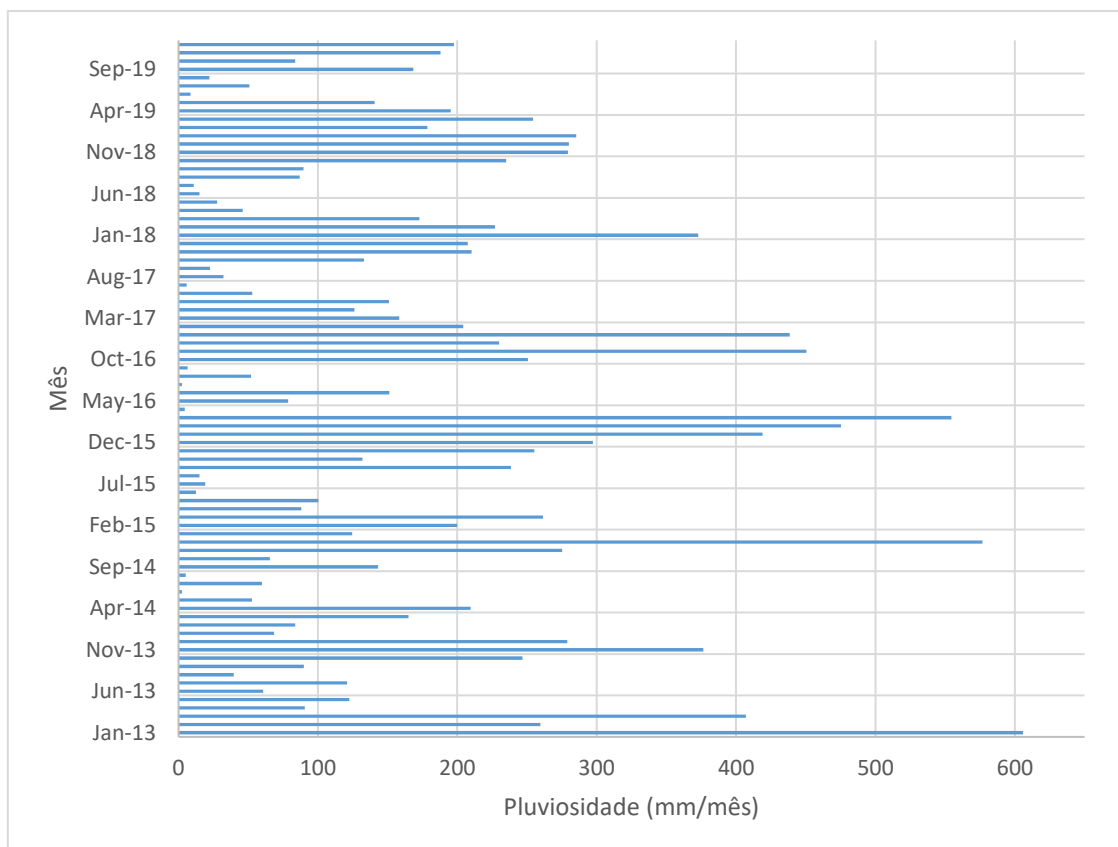


Fonte: Elaborado pela autora, 2021

Com o intuito de realizar uma avaliação histórica e local, a INB-Caldas disponibilizou dados históricos de pluviosidade de janeiro de 2013 a dezembro de 2019. De acordo com a Figura 9, os dados pluviométricos históricos locais reforçam a tendência regional do Planalto de Poços de Caldas.

A Tabela 2 apresenta o acúmulo mensal de chuva, a média anual, pluviosidade anual e a média anual dos anos de 2013 a 2019. A precipitação máxima mensal registrada foi de 606 mm em janeiro de 2013, seguida de aproximadamente 577 mm em dezembro de 2014.

Figura 9. Pluviosidade mensal da INB-Caldas



Fonte: Elaborado pela autora, 2021

Tabela 2. Pluviosidade histórica INB-Caldas 2013 a 2019

| Ano                             | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Janeiro</b>                  | 606,00  | 68,50   | 124,50  | 419,00  | 438,50  | 372,75  | 285,25  |
| <b>Fevereiro</b>                | 259,50  | 83,75   | 200,00  | 475,25  | 204,25  | 227,00  | 178,50  |
| <b>Março</b>                    | 407,00  | 165,00  | 261,50  | 554,50  | 158,25  | 172,75  | 254,25  |
| <b>Abril</b>                    | 90,50   | 209,50  | 88,00   | 4,50    | 126,25  | 46,00   | 195,25  |
| <b>Mai</b>                      | 122,50  | 52,75   | 100,25  | 78,75   | 151,00  | 27,75   | 140,75  |
| <b>Junho</b>                    | 60,75   | 2,50    | 12,50   | 151,25  | 53,00   | 15,00   | 8,50    |
| <b>Julho</b>                    | 121,00  | 59,75   | 19,25   | 2,50    | 5,75    | 11,00   | 50,75   |
| <b>Agosto</b>                   | 39,50   | 5,25    | 15,00   | 52,00   | 32,25   | 87,00   | 22,25   |
| <b>Setembro</b>                 | 90,00   | 143,25  | 238,50  | 6,50    | 22,50   | 89,75   | 168,50  |
| <b>Outubro</b>                  | 246,75  | 65,50   | 132,00  | 250,75  | 133,00  | 235,00  | 83,75   |
| <b>Novembro</b>                 | 376,50  | 275,25  | 255,25  | 450,50  | 210,25  | 279,25  | 188,00  |
| <b>Dezembro</b>                 | 279,00  | 576,75  | 297,25  | 230,00  | 207,50  | 280,00  | 197,50  |
| <b>Média Anual<br/>(mm/ano)</b> | 224,92  | 142,31  | 145,33  | 222,96  | 145,21  | 153,60  | 147,77  |
| <b>Total anual<br/>(mm/ano)</b> | 2699,00 | 1707,75 | 1744,00 | 2675,50 | 1742,50 | 1843,25 | 1773,25 |

Fonte: Elaborado pela autora, 2021

### 3.7. Hidrologia e hidrogeologia

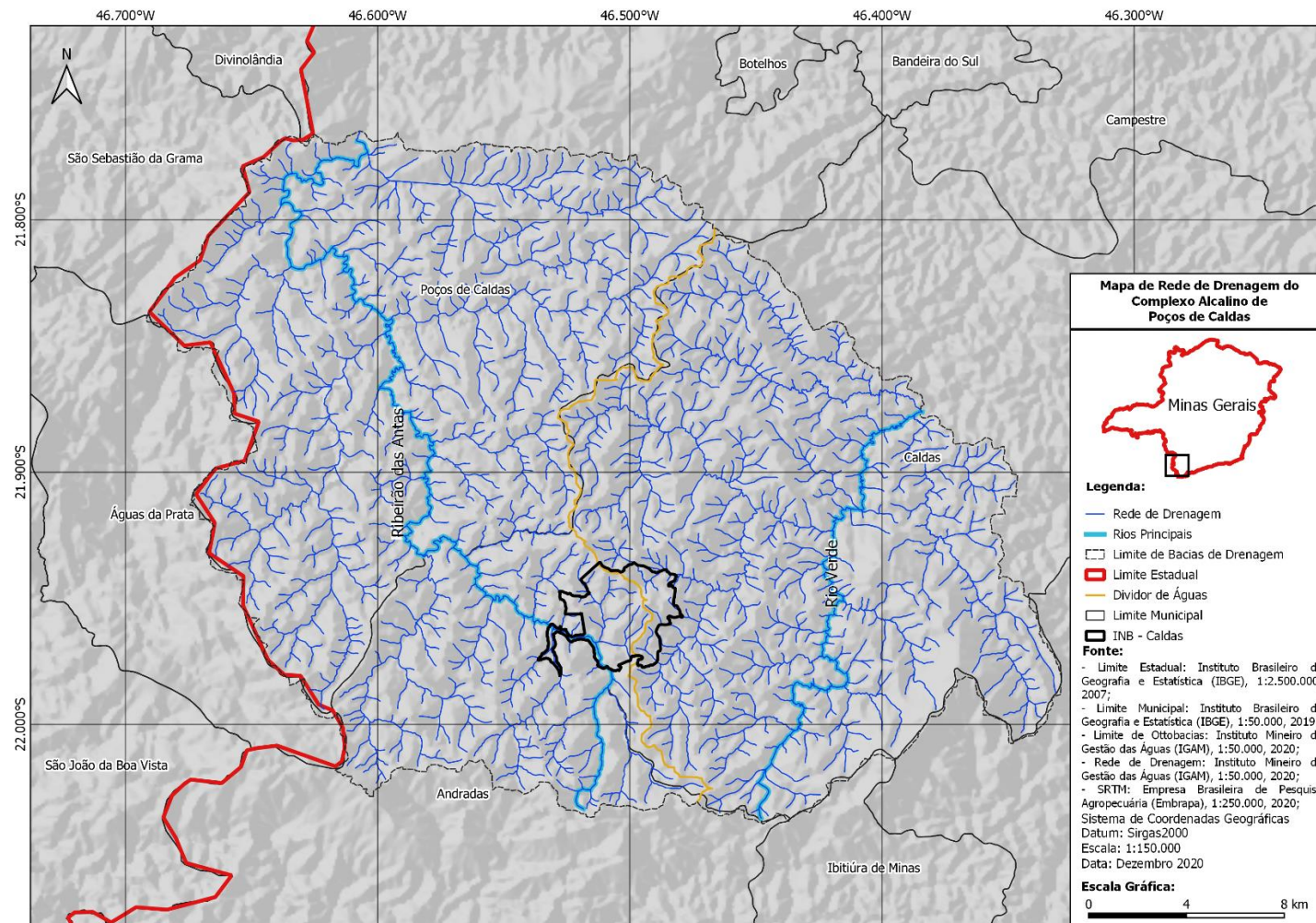
O Planalto de Poços de Caldas abrange o divisor de águas de duas bacias hidrográficas, a bacia do Ribeirão das Antas e a bacia do Rio Verde (Figura 10). A mina Osamu Utsumi está localizada no divisor de águas das duas bacias e possui como principais corpos hídricos o Córrego do Cercado, afluente da bacia do Rio Verde e o Córrego da Consulta, afluente da bacia do Ribeirão das Antas.

Movimentos tectônicos recentes podem ter influenciado criticamente os padrões e orientações hidrológicas no Complexo. As águas subterrâneas estão diretamente relacionadas com a circulação e armazenamento em um sistema aquífero fraturado principal, constituído pelos esforços durante a instalação da estrutura vulcânica, em suas próprias rochas e nas encaixantes. Esse aquífero principal está parcialmente sob um sistema granular, formado no manto de alteração das rochas vulcânicas e alcalinas (CAMPOS *et al.*, 2011).

Por meio de mapas topográficos analisados por Holmes *et al.* (1990), anteriores a atividade de exploração de minério da MOU, foi possível reconhecer vales profundos com diversos córregos. A água subterrânea é recarregada nos interflúvios e no divisor de águas nas elevadas altitudes do vale e descarregava no fundo dos vales, formados por córregos. A infiltração da água subterrânea ocorre pelos poros e brechas e fraturas de rochas e progressivamente adquire potencial redutor, principalmente devido ao contato com pirita contida nas zonas mineralizadas.

A área do CIPC foi profundamente alterada por processos de decapagem e extração mineral, de maneira que houve a remoção do solo e sua deposição em vales adjacentes, além da formação de pilhas de rejeito estéril provinda da triagem do minério. Após a abertura da mina, Holmes *et al.* (1990) destacam que a profundidade da cava da mina modificou significativamente o fluxo da água subterrânea. Desta forma, águas oxidativas da drenagem superficial possuem potencial redutor em maiores profundidades.

Figura 10. Bacias hidrográficas principais no Complexo Alcalino de Poços de Caldas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

### 3.8. Hidroquímica

Para a disposição adequada de resíduos radioativos é fundamental caracterizar o fluxo da água subterrânea e realizar análises hidroquímicas. Ambos os fatores são essenciais para a compreensão do potencial redutor da água subterrânea e da relação água-rocha mobilizar e solubilizar radionuclídeos e metais

A área da cava da mina possui profundidade de cerca de 100 m e expõe o horizonte de oxirredução que consiste em oxi-hidróxidos de ferro no corte superior e pirita no corte inferior.

Amostras de água subterrânea, captadas em poços localizados na cava da mina, foram analisadas por Nordstrom, *et al.* (1992). O estudo reconheceu os elementos K-Fe-SO<sub>4</sub> como predominantes na composição química da água e é preponderante a presença de ferro e fluoreto. Na composição da água subterrânea foi possível caracterizar o aquífero fortemente enriquecido em potássio, devido a predominância do elemento na rocha sã e a ocorrência de mineralização de alteração potássica hidrotermal e ao esgotamento acelerado de outros cátions, quando comparados ao potássio, em decorrência do processo de intemperismo químico e físico.

O pH das amostras analisadas em laboratório variou de 3,29 a 6,42. Altas concentrações de ferro e sulfato, associadas a redução do pH das amostras, com variação sazonal, foram predominantes em amostras coletadas em poços rasos, fato que indica a ocorrência de oxidação de pirita e a geração de drenagem ácida de mina, decorrentes da infiltração de água meteórica. A DAM é responsável pela lixiviação de minerais fraturados presentes na região, a exemplo da fluorita, e aumenta a concentração de fluoreto, ferro, urânio e sulfato no aquífero. Também são reconhecidas altas concentrações de alumínio, complexado pelo fluoreto em pH ácido e zinco devido a oxidação de esfalerita associada a zonas mineralizadas junto a pirita.

No entanto, a ocorrência de amostras mais profundas com valores de pH superiores a 4 e concentrações mais baixas de ferro, urânio e sulfato indicam a neutralização decorrente da dissolução de aluminossilicatos e carbonatos, associada a precipitação dos metais.

O estudo de Campos *et al.* (2011) analisou a drenagem proveniente das pilhas de rejeito da MOU, BF-08 e BF-04, nos pontos de amostragem denominados 75 e D3 e é possível verificar similar tendência de geração de DAM, a partir de altas concentrações de sulfato e metais na água, além de pH acidificado com valores inferiores a 4, como pode

ser observado na Tabela 3 e a Figura 11 apresenta a localização dos pontos monitorados. O ponto PM representa a coleta realizada na cava da mina, similar a coleta apresentada por Nordstrom *et al.* (1992).

Tabela 3. Amostragem de água subterrânea e DAM

| Localização            | Cava da Mina             |                          | BF-04             | BF-08             |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Coleta                 | SW01 <sup>(1)</sup>      | PM <sup>(2)</sup>        | 75 <sup>(2)</sup> | D3 <sup>(2)</sup> |
| pH                     | 3,37/3,29 <sup>(3)</sup> | 3,37 ± 0,40              | 3,47 ± 0,11       | 3,37 ± 0,22       |
| E <sub>h</sub> (mV)    | 627                      | 525,10 ± 53,39           | 466,98 ± 18,55    | 429,05 ± 97,12    |
| K (mg/L)               | 37,7                     | ...                      | ...               | ...               |
| Fe(II) (mg/L)          | 50,5                     | 0,25 ± 0,24              | 1,89 ± 3,74       | 0,94 ± 1,24       |
| Fe (total) (mg/L)      | 53,5                     | 5,18 ± 3,55              | 1,43 ± 0,91       | 19,98 ± 12,73     |
| Al (mg/L)              | 98                       | ...                      | ...               | ...               |
| Mn (mg/L)              | 46                       | 88,42 ± 16,31            | 89,63 ± 34,23     | 107,82 ± 14,6     |
| Zn (mg/L)              | 12,8                     | 12,65 ± 4,78             | 14,47 ± 6,73      | 17,05 ± 2,78      |
| SO <sub>4</sub> (mg/L) | 1200                     | 1410 ± 241,87<br>6035,17 | 778,68 ± 661,91   | 1200,01 ± 665,16  |
| F (mg/L)               | 14,9                     | 25,73 ± 7,55             | 33,60 ± 19,50     | 24,01 ± 9,84      |
| U                      | -                        | 4,02 ± 1,97              | 8,11 ± 4,24       | 8,72 ± 2,18       |
| Th                     | -                        | 0,19 ± 0,07              | 0,19 ± 0,13       | 0,16 ± 0,07       |

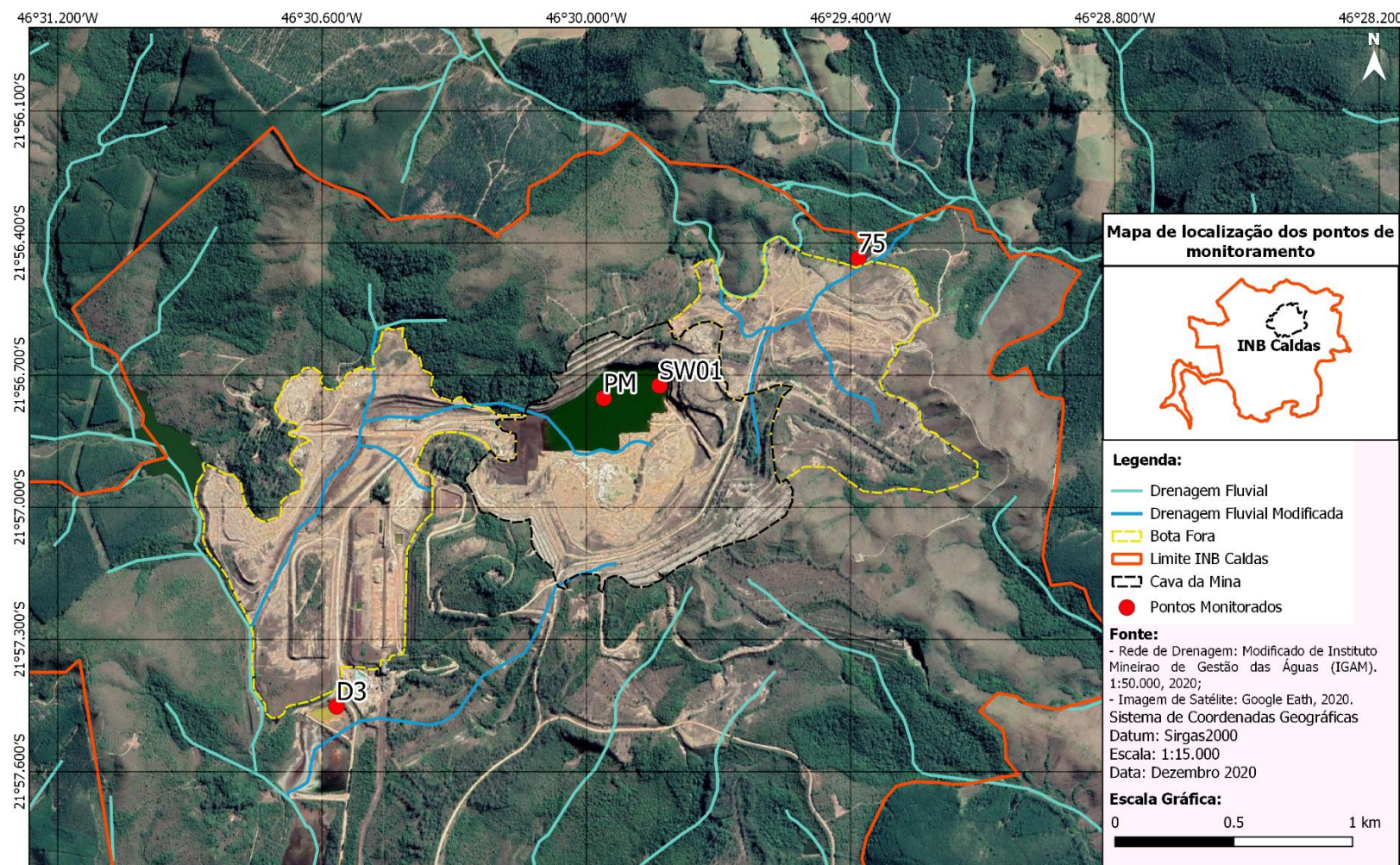
<sup>(3)</sup>pH analisado em campo/ em laboratório

Fonte: Adaptado <sup>(1)</sup>Nordstrom *et al.* (1992) e <sup>(2)</sup>Campos *et al.* (2011)

Apesar de não apresentar dados tabelados relativos à concentração de urânio no ponto SW01, Nordstrom *et al.* (1992), apresenta gráficos de correlação da variação da concentração de urânio e a pluviosidade média mensal, e evidencia uma variação de 20 a 40 mg/L de outubro de 1988 a março de 1989, estação chuvosa. Em épocas de seca a concentração de urânio raramente ultrapassa 5 mg/L.

Os dados apresentados por Campos *et al.* (2011) são decorrentes do cálculo da concentração média de amostras coletadas de janeiro a junho de 2006, enquanto Nordstrom *et al.* (1992) apresenta valores de referência. Os valores de concentração média podem apresentar valores relativamente mais baixos, devido as amostras terem sido coletadas tanto em período de seca quanto de chuva e a variação da concentração dos elementos na DAM ser sazonal. No entanto, ambos os trabalhos evidenciam a ocorrência de metais pesados na DAM e principalmente de elementos radioativos e tóxicos, como o urânio.

Figura 11. Mapa de localização dos pontos monitorados



Fonte: Elaborado pelo autor baseado nos estudos de Nordstorm *et al.* (1992) e Campos *et al.* (2011)

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. Planejamento e descomissionamento de mina

Planejar o descomissionamento compreende integrar as atividades de fechamento de mina ao plano de negócios mineiro, que inclui a análise de processos minerários de curto, médio e longo prazo, ao considerar impactos sócio-ambientais e o planejamento orçamentário do empreendimento. Segundo a ICMM (2019), os principais benefícios da integralização envolvem a elaboração e detalhamento mais preciso dos custos de reabilitação da área, o melhor entendimento dos riscos e das lacunas de conhecimento e informação, redução e prevenção de passivos, minimização de riscos e problemas judiciais e, redução do tempo reabilitação e monitoramento da área no final de sua exploração minerária. Em sua totalidade, todos os benefícios representam uma redução ou diluição dos custos de fechamento de mina e previnem riscos e impactos ambientais complexos e onerosos.

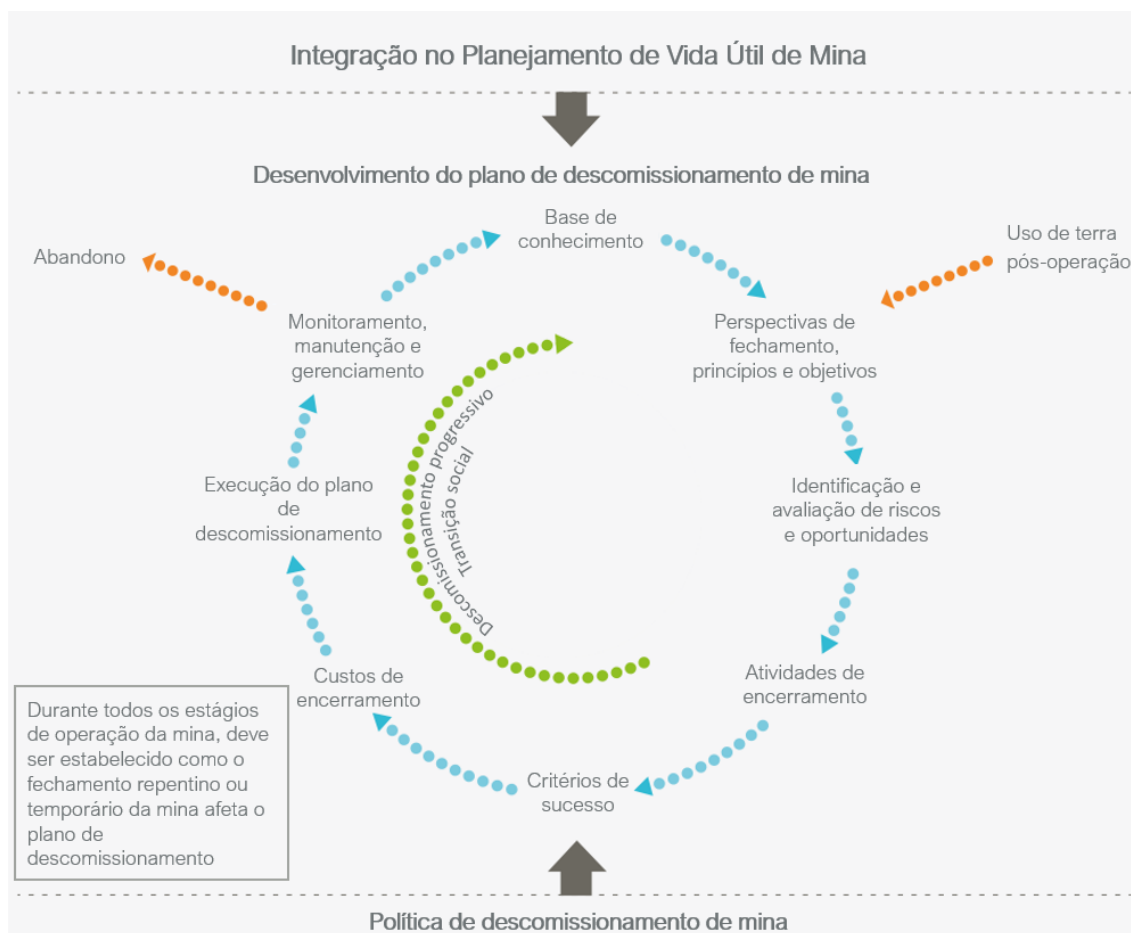
O plano de descomissionamento pode ser desenvolvido sobre a perspectiva do ciclo PDCA (do inglês Plan, Do, Check e Act), ferramenta simples e amplamente conhecida de controle da qualidade, que possui como principais diretrizes as etapas de planejamento, execução, checagem e correção de erros ou falhas. A Figura 12 apresenta o ciclo PDCA adaptado à indústria minerária.

A delimitação de um plano de descomissionamento requer o comprometimento e adesão de todos os responsáveis pela mineração, visto que é um projeto constante em prol da futura sustentabilidade ambiental e financeira do empreendimento.

Após o fechamento da mina, o descomissionamento consiste basicamente na reabilitação, pós operação e encerramento. A reabilitação é a etapa de análise, identificação e minimização das fontes e impactos causados durante a mineração, e possui o intuito de recuperar a área e encaminhar a um novo uso. Nesta etapa os esforços devem estar concentrados na elaboração de um projeto topográfico e de drenagem, remediação da área, elaboração de um processo de suprimento de água, instalações de infraestruturas para descomissionamento e modelagem de fechamento e represamento de água.

O pós-operação e encerramento consistem no monitoramento das atividades de reabilitação, controle de erosão, manutenção de drenagem e a verificação das medidas de remediação de áreas contaminadas.

Figura 12. Elementos do plano de descomissionamento



Fonte: Adaptado ICMM (2019)

#### 4.2. Impacto minerário em recursos hídricos

O conceito de impacto ambiental está relacionado a uma modificação antrópica dos processos naturais ou sociais e consequente alteração da qualidade ambiental. A ação humana é uma causa do impacto ambiental, enquanto este é uma consequência dessas ações. Se o impacto ambiental é uma alteração do meio ambiente provocada pela ação humana, esta modificação pode ser benéfica ou adversa, de forma a desencadear impactos ambientais positivos ou negativos (SÁNCHEZ, 2013).

Na operação minerária, impactos negativos quanto a qualidade da água e disponibilidade hídrica gerados causam preocupação na população direta e indiretamente afetada pelo empreendimento, pelo potencial impacto no suprimento regional de água, contaminação dos recursos hídricos e destruição de ambientes aquáticos mais sensíveis.

A qualidade da água é um conjunto de parâmetros estabelecidos em legislação federal e/ou estadual, que determinam limites de componentes químicos, físicos e

biológicos na água. A qualidade da água é vulnerável devido a interconexão natural dos recursos hídricos (JAIN; CUI; DOMEN, 2015).

Durante todo o processo de mineração a água é utilizada e representa um importante recurso a ser preservado, mesmo quando inserido na cadeia produtiva do empreendimento. O Quadro 1 apresenta as tipologias das águas que são encontradas em empreendimentos minerários.

Quadro 1. Tipologia das águas em empreendimentos minerários

| <b>Tipologia da água</b>               | <b>Descrição</b>                                                                                        |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Água de mina                           | Fluxo superficial ou subterrânea presente na área da mina                                               |
| Água de cominuição (britagem e moagem) | Água utilizada no processo de quebra e dimensionamento de minério                                       |
| Água de processo                       | Água utilizada para processos hidrometalúrgicos e extração, pode conter químicos utilizados no processo |
| Água de serviço de mina                | Fluxo de água auxiliar à operação                                                                       |
| Lixiviado                              | Fluxo de drenagem percolado pelo rejeito de mineração                                                   |
| Efluente                               | Água de mina, processo ou de operação descartada em corpos hídricos superficiais                        |
| Drenagem de mina                       | Águas superficiais ou subterrâneas que flui de áreas da mina para áreas adjacentes                      |
| Drenagem ácida de mina                 | Fluxo acidificado produzido pela oxidação de minerais ricos em sulfetos                                 |

Fonte: Adaptado Jain, Cui e Domen (2015)

A água subterrânea é responsável pelo fornecimento de cerca de 50% da água para consumo humano no mundo e há uma grande preocupação de que a atividade minerária esteja extraindo os recursos hídricos locais de maneira insustentável (JAIN; CUI; DOMEN, 2015).

O rebaixamento do nível freático pelo bombeamento da água subterrânea pode reduzir o rendimento do aquífero, que é definido como a quantidade de água subterrânea disponível para utilização sem que ocorra a depleção ou esgotamento. O bombeamento é realizado para desaguamento da mina, que consiste no bombeamento contínuo da água subterrânea para manter o acesso à área da mineração, com o intuito de evitar que a área

seja inundada. Esta atividade pode rebaixar o nível freático em uma escala local e regional e pode prejudicar os índices de abastecimento da população local.

Os impactos causados durante a mineração são diversos e os recursos hídricos são de extrema importância, tanto nas etapas iniciais, de operação quanto no fechamento da mina, por representarem um parâmetro amplamente modificado pelas atividades antrópicas.

A qualidade da água superficial e subterrânea pode ser afetada pelo armazenamento e disposição dos resíduos da mineração, pela escavação da mina, rebaixamento do nível freático e pelo armazenamento e pela utilização de produtos químicos, reagentes e combustíveis. Os impactos negativos dependem da composição mineral da área, da tecnologia empregada na mineração e no processo utilizado, da vulnerabilidade natural dos recursos hídricos e dos ecossistemas, além do comprometimento da indústria com o meio ambiente e programas de monitoramento.

A Tabela 4 apresenta o padrão de potabilidade da água relacionado aos contaminantes provindos de processos minerários, que são prejudiciais à saúde humana em dosagens superiores ao valor máximo permitido. A parametrização dos níveis máximos de microrganismos, desinfetantes, partículas químicas inorgânicas e orgânicas e radionuclídeos, para consumo humano é estabelecida pela Portaria de Consolidação nº 5 Anexo XX (BRASIL, 2017), enquanto a Resolução Conama 357 apresenta a classificação de corpos hídricos e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes (BRASIL, 2005).

O Quadro 2 apresenta os impactos ambientais relacionados a parâmetros de qualidade da água superficial e subterrânea causados pela mineração.

Os poluentes podem ser orgânicos ou inorgânicos e desencadeiam impactos diretos e indiretos no ecossistema. Impactos diretos incluem a mortalidade de peixes como efeito imediato da poluição, enquanto os impactos indiretos podem representar a poluição a montante de pontos de captação de água para abastecimento de comunidades e a degradação do meio ambiente e consequente impacto na vida selvagem. A poluição da água pode afetar tanto recursos superficiais, quanto subterrâneos, e é responsável pela degradação da flora, fauna e, inclusive, dos recursos utilizados para atividades antrópicas (JAIN; CUI; DOMEN, 2015).

Tabela 4. Padrão de qualidade de água relacionado a contaminantes provindos de processos minerários

| <b>Contaminante</b> | <b>Concentração máxima<sup>(1)</sup></b> | <b>Valor máximo permitido<sup>(2)</sup></b> | <b>Padrões de qualidade de água<sup>(3)</sup> – Classe 2</b> | <b>Fonte</b>                                                   |
|---------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Turbidez            | ...                                      | 1,0 uT em 95% das amostras                  | 100 uT                                                       | Runoff do solo                                                 |
| pH                  | 6,5 – 8,5                                | 6,0 – 9,5                                   | 6,0 – 9,0                                                    | ...                                                            |
| Chumbo              | 0,015 mg/L                               | 0,01 mg/L                                   | 0,01 mg/L                                                    | Erosão de depósitos naturais                                   |
| Mercurio            | 0,002 mg/L                               | 0,001 mg/L                                  | 0,0002 mg/L                                                  | Erosão de depósitos naturais, resíduos de refinarias de metais |
| Nitrato             | 10 mg/L                                  | 10 mg/L                                     | 10 mg/L                                                      | Erosão de depósitos naturais, runoff de fertilizantes          |
| Selênio             | 0,05 mg/L                                | 0,01 mg/L                                   | 0,01 mg/L                                                    | Erosão de depósitos naturais, resíduos de refinarias de metais |
| Tálio               | 0,002 mg/L                               | ...                                         | ...                                                          | Lixiviação de beneficiamento de minério                        |
| Urânio              | 30 µg/L                                  | 30 µg/L                                     | 0,02 mg/L                                                    | Erosão de depósitos naturais                                   |
| Alumínio            | 0,05 – 0,2 mg/L                          | 0,2 mg/L                                    | 0,1 mg/L                                                     | ...                                                            |
| Ferro               | 0,3 mg/L                                 | 0,3 mg/L                                    | 0,3 mg/L                                                     | ...                                                            |
| Manganês            | 0,05 mg/L                                | 0,1 mg/L                                    | 0,1 mg/L                                                     | ...                                                            |
| Prata               | 0,1 mg/L                                 | ...                                         | 0,01 mg/L                                                    | ...                                                            |
| Zinco               | 5 mg/L                                   | 5 mg/L                                      | 0,18 mg/L                                                    | ...                                                            |

<sup>(1)</sup>U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA, 2000)

<sup>(2)</sup>Portaria de Consolidação nº 5 – Anexo XX (BRASIL, 2017)

<sup>(3)</sup>Conama 357, de 17 de março de 2005

Quadro 2. Impactos ambientais relacionados a parâmetros de qualidade da água superficial e subterrânea

| Parâmetro                    | Descrição                                                           | Causa                                                                                                                                                                        | Efeito                                                                                                                                                                            | Mitigação                                                                                                                                                             |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sólidos Suspensos            | Pequenas partículas de sedimento, matéria orgânica e/ ou inorgânica | Erosão de áreas da mineração (pilhas de rejeito, pilhas de estéreis, barragens, vias de acesso, áreas de exploração, áreas de recuperação e infraestruturas).                | Alteração no ambiente aquático, toxicidade e desequilíbrio, assoreamento, acidificação dos sistemas aquáticos, aumento da DBO <sup>(1)</sup> .                                    | Drenagem adequado, dispersão <i>runoff</i> , controle de sedimentos, cobertura vegetal, isolamento de fontes de contaminação, escoamento superficial descentralizado. |
| Drenagem Ácida de Mina (DAM) | Água de baixo pH, alta concentração de metais pesados e sulfatos    | Exposição de sulfetos à água e oxigênio, presença de microrganismos catalisadores e aceleração da oxidação natural. Estéreis e resíduos representam o maior risco ambiental. | Destruição de habitats naturais e fauna, pode ocorrer por tempo indeterminado a depender da concentração de sulfetos, aumento da toxicidade a depender da concentração de metais. | Prognóstico de regiões acidificadas e redução de mineração, prevenir e minimizar a oxidação de sulfetos, uso de materiais neutralizadores, isolamento de sulfetos.    |
| Sólidos dissolvidos          | Metais pesados, sulfatos e intrusões salinas                        | DAM, processamento mineral, rejeitos, exploração mineral, estéreis, armazenamento de produtos químicos, atividades de recuperação, descarga de água de serviço e drenagem.   | Toxicidade de ambientes aquáticos, destruição da biodiversidade e bioacumulação. Contaminação por metais pesados pode causar danos ao sistema nervoso.                            | Tratamento por sedimentação, prevenção de DAM, redução de processos erosivos e monitoramento de extração de água da mina.                                             |
| Nutrientes                   | Componentes de nitrogênio e fósforo.                                | Erosão do solo, fertilizantes, água de serviço, produtos químicos e lixiviação de aterros.                                                                                   | Eutrofização de corpos hídricos, redução do oxigênio dissolvido e redução da biodiversidade.                                                                                      | Tratamento passivo em lagoas de decantação, ativo com precipitação, biológico, aeração e oxidação.                                                                    |

<sup>(1)</sup>DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

Os efluentes providos da mineração podem impactar diretamente no pH da água, nos níveis de oxigênio dissolvido e na temperatura do corpo hídrico onde é descarregado. Ambientes aquáticos são sensíveis a pequenas mudanças de pH e temperatura, alterações que impactam na reprodução das espécies e nos índices de crescimento. A acidificação do pH em corpos hídricos são mais susceptíveis a altas concentrações de metais pesados solubilizados e outros constituintes tóxicos (JAIN; CUI; DOMEN, 2015).

Três parâmetros interessantes de serem abordados quando há a relação da água com a atividade minerária são os sólidos suspensos, sólidos dissolvidos e os metais pesados (JAIN; CUI; DOMEN, 2015).

Os sólidos totais são caracterizados por partículas orgânicas ou inorgânicas suspensas ou dissolvidas na água por alguma turbulência ou agitação e podem ocorrer pela presença de sílica, argila, matéria orgânica, microrganismos e silte, por exemplo. A atividade minerária pode gerar significantes fatores que contribuem para o aumento de turbidez da água, seja pela erosão causada nas áreas ao entorno da mineração, ou em pilhas de rochas e minérios, pilhas de rejeitos e inertes, pela abertura de estradas, terraplanagem, entre outras diversas infraestruturas.

O aumento de sólidos totais pode ser responsável por modificações químicas e físicas em água superficial com principal impacto no desenvolvimento de organismos aquáticos, como peixes, algas e plânctons. Esses componentes podem ser responsáveis pelo carreamento de metais pesados extremamente tóxicos para os organismos (JAIN; CUI; DOMEN, 2015).

A ocorrência de metais pesados nas águas pode ser proveniente da solubilização e dissolução decorrente do contato do corpo rochoso com o oxigênio e a água, que desencadeia a lixiviação local e a drenagem ácida, a instabilidade de pilhas de rejeitos, o aumento da concentração de sólidos suspensos devido a erosão e a disposição incorreta da água contaminada.

Em resumo, a água é fundamental para o processo minerário e sua utilização é realizada em diferentes frentes de operação. O estudo do sistema de drenagem e de águas subterrâneas é um fator de extrema relevância, para que sejam evitados possíveis impactos ambientais, a partir da previsão de mitigação dos impactos inevitáveis e todas as fontes de contaminação sejam previstas. Em estudos ambientais as características químicas e físicas da água, assim como seu fluxo, podem ser importantes indicadores de fontes de contaminação.

#### 4.3. Drenagem ácida de mina

A drenagem ácida de mina (DAM) é o fluxo de água de pH ácido proveniente de minerações, produzido pela oxidação de minerais sulfetados e é comumente ocasionada pela reação da água e do oxigênio à pirita ( $\text{FeS}_2$ ), suscetível também a calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) e a arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ). A ocorrência natural de drenagem ácida é de baixa frequência e lenta reação e é proveniente de zonas inalteradas de baixa exposição ao meio ambiente. O processo de geração de DAM é acelerado pela perturbação do solo e pelas atividades antrópicas, e pode ocorrer mesmo após o fechamento da mina. O processo de geração de acidez no fluxo de água é estudado em diversas áreas de mineração de metais e carvão pelo mundo (USEPA, 1994).

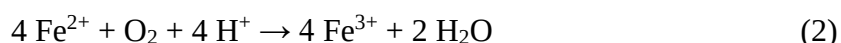
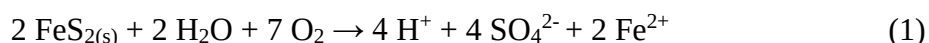
Os rejeitos resultantes da atividade minerária que possuem potencial de geração de drenagem ácida contemplam os resíduos gerados a partir da operação de lixiviação do minério, pilhas de rejeitos estéreis e restos de rochas, a incluir o material de recobrimento da área. As minerações de urânio causam particular preocupação ambiental devido a diversos fatores relacionados à disposição, a ressaltar (IAEA, 2004):

- os níveis radioativos, de longa vida, similares ao do minério do qual o rejeito é derivado;
- a composição de metais pesados biotóxicos;
- a ocorrência de sulfetos minerais e a probabilidade de geração de drenagem ácida;
- a composição granular suscetível a lixiviação, erosão e colapso em diferentes circunstâncias;
- e, a disposição das pilhas de rejeito, que, pela grande área superficial, expõem o material ao meio ambiente e aumenta o risco de emissão de fluxos que contêm radiação, gerados a partir da interação com a drenagem superficial da água;

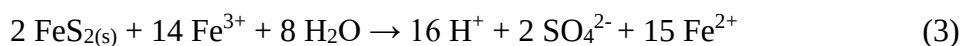
A DAM possui alto potencial de lixiviação do mineral e de rochas próximas e gera percolato que contém ácido sulfúrico e metais dissolvidos (VEIGA, SILVA e HINTON, 2002). Normalmente possui baixo pH, alta concentração de ferro, manganês e alumínio e alta condutividade. Os níveis de contaminação por metais pesados variam a depender da quantidade e do tipo de sulfeto disponível para oxidação (CAMPANER e SILVA, 2008). Os principais fatores condicionantes ao processo são a disponibilidade de oxigênio e sua

concentração, a temperatura, o pH, a atividade química do ferro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), a catalisação por bactérias e a energia de ativação química (AKCIL e KOLDA, 2006).

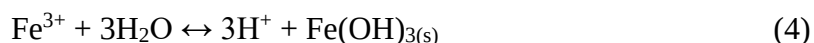
O estudo de Manahan (2000) descreve a cadeia de reações de dissolução da pirita e formação de ácido sulfúrico. A primeira equação (1) representa o contato da rocha com a água e o oxigênio e a, conseqüente, formação dos íons  $\text{H}^+$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  que promovem acidez ao meio ambiente. A equação 2 representa a oxidação do ferro ferroso em férrico.



A oxidação da pirita residual pelo ferro férrico, catalisada por bactérias, equação 3, novamente eleva a acidez.



A dissolução da pirita pelo íon férrico em conjunto com a oxidação do íon ferroso constitui o ciclo de dissolução da pirita. O ferro férrico precipita como óxido de ferro hidratado, equação 4, e é identificável pela coloração amarelada, alaranjada ou avermelhada do depósito e da área do fluxo de drenagem ácida.



#### 4.4. Disposição de rejeito radioativo

O tipo de remediação e as tecnologias a serem aplicadas dependem do reconhecimento do rejeito e da compreensão da eficácia das propostas. O desenvolvimento de soluções práticas e seguras tendem a ser o maior desafio da indústria nuclear, seja para transporte, tratamento, condicionamento, armazenamento e disposição final do rejeito.

Após o encerramento da atividade minerária existe a probabilidade de ocorrência de contaminação na área. A remediação destas áreas pode requerer estudos prévios e deve ser analisada caso-a-caso pela peculiaridade de cada unidade. A remediação de rejeito radioativo é a disposição de maneira a isolar o rejeito em condições controladas, que permita o decaimento natural dos radioelementos ou a lenta dispersão em níveis aceitáveis por um longo período (WANG *et al.*, 2016).

Qualquer que seja a opção selecionada para a disposição do rejeito radioativo, o sistema deve ser baseado em um conceito de segurança passiva, de maneira que não seja necessária supervisão e manutenção da área. O isolamento de rejeito radioativo ocorre após o estabelecimento de uma disposição em multibarreiras que restringem a emissão de radionuclídeos para o meio ambiente. O Quadro 3 apresenta o conceito multibarreiras para diferentes opções de disposição. Os possíveis materiais a serem utilizados e suas funções principais estão descritas no Quadro 4.

Quadro 3. Características e limitações de diferentes disposições

| <b>Opção</b>                                                       | <b>Características</b>                                                                                                                  | <b>Limitações</b>                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Disposição superficial ou subsuperficial sem sistema de barreiras. | Cobertura de solo em trincheiras escavadas. Solução simples e de baixo custo.                                                           | Recomendado apenas para remediações de curto prazo e rejeitos de baixa radiação. Susceptível a erosão, intrusão e infiltração de água de chuva. |
| Disposição superficial ou subsuperficial com sistema de barreiras. | Abordagem multibarreiras com o intuito de aumentar a segurança. Aplicável para rejeito de baixo e médio nível de radiação.              | Capacidade reduzida de isolamento dos rejeitos de longa-vida. Suscetível a erosão, intrusão e infiltração de água de chuva.                     |
| Perfurações e cavidades em profundidade intermediária.             | Redução do risco de erosão, intrusão e infiltração de água. Possibilidade de utilização de cavidades e minas. Simples e de baixo custo. | Barreiras geológicas dependem das características do meio.                                                                                      |
| Disposição geológica (incluindo perfurações)                       | Adequado para todas as categorias de rejeito. Aprimorado confinamento.                                                                  | Alto custo e complexidade tecnológica.                                                                                                          |

Fonte: Wang *et al*, 2016

As técnicas de imobilização consistem em envolver os radionuclídeos em uma matriz sólida, que pode ser cimentada, envidraçada ou de cerâmica. A cimentação de rejeitos radioativos possui algumas desvantagens devido seu alto potencial de lixiviação e a baixa redução de volume de rejeito. No entanto, a técnica é usada mundialmente para a imobilização de rejeitos de baixa e média radioatividade, por conta da compatibilidade com os sistemas de drenagem e capacidade de desencadear mecanismos químicos e físicos de inativação de espécies orgânicas.

Quadro 4. Aplicação de barreiras

| <b>Tipo de barreira</b> | <b>Função</b>                                                                                                   | <b>Material</b>                     |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Contêiner               | Resistência mecânica; Limitação de entrada de água; Retenção de radionuclídeos.                                 | Concreto;<br>Metal.                 |
| Disposição              | Resistência mecânica; Limitação de entrada de água; Retenção de radionuclídeos.                                 | Cimento;<br>Betão;<br>Polímero.     |
| Aterro                  | Preenchimento de vazios; Limitação de entrada de água; Retenção de radionuclídeos; Controle de gases;           | Cimento;<br>Argila.                 |
| Materiais estruturais   | Barreiras físicas para estabilidade e contenção.                                                                | Concreto;<br>Aço.                   |
| Recobrimento            | Limitação de infiltração de água; Controle de emissão gasosa; Barreira contra erosão; Barreira contra intrusão. | Argila;<br>Cascalhos;<br>Geotêxtil. |

Fonte: Wang *et al*, 2016 apud IAEA, 2001

Ademais, o cimento possui baixo custo monetário, alta disponibilidade e simples transporte. A imobilização do rejeito radioativo após a cimentação inclui a fixação química de radionuclídeos devido a interação entre os produtos da hidratação do cimento e os radiocontaminantes, pela adsorção física, e o encapsulamento físico do rejeito pela baixa permeabilidade no cimento endurecido. Cimentos possuem propriedade química alcalina que garantem baixa solubilidade para os principais radionuclídeos.

Cimentos hidráulicos representam a classe mais importante de materiais para a disposição de rejeitos radioativos, devido sua composição por materiais inorgânicos, que reagem com a água, endurecendo de maneira a ser mais resistente a ação da água. Os cimentos mais utilizados são os compostos por silicatos de cálcio e podem ser utilizados para diferentes aplicações, seja para a composição de contêineres, aterros, valas e cavidades.

Devido a vulnerabilidade do cimento à lixiviação é importante estabelecer critérios para a composição do material de recobrimento do rejeito e estudar a durabilidade da alternativa a longo prazo.

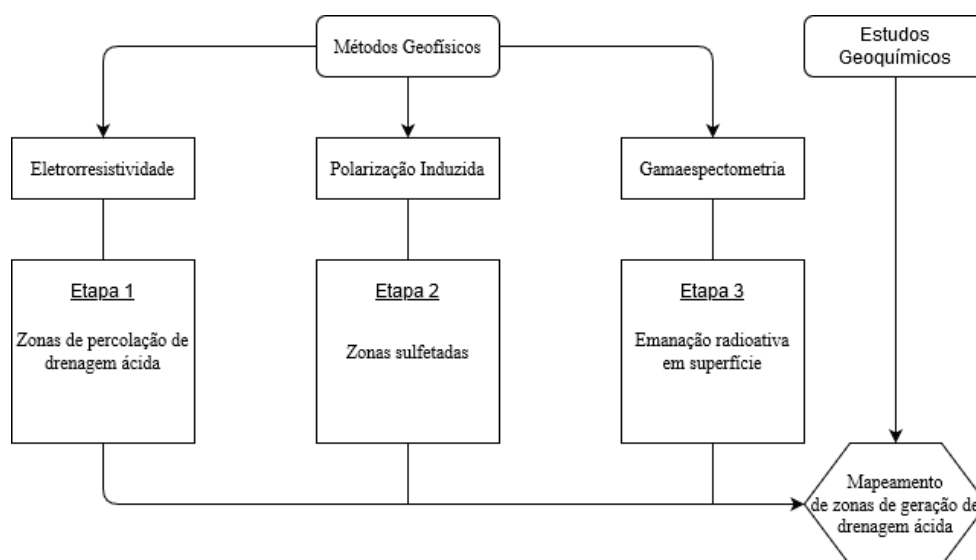
## 5. MATERIAIS E MÉTODO

O estudo projeto complementa os trabalhos iniciados a partir da parceria UNESP-INB, que proporciona a Indústrias Nucleares do Brasil bases teóricas e científicas, conhecimento técnico e direcionamento quanto a mitigação dos impactos gerados decorrentes de atividades minerárias executadas pela empresa.

O corpo técnico investigativo objetiva caracterizar a pilha de rejeito a partir de métodos geofísicos integrados a dados geoquímicos, para o entendimento da dinâmica hidrogeológica nos bota-foras, e propor soluções *in situ* e alternativas diretas e locais, que possibilitarão a redução da geração de drenagem ácida e consequente redução orçamentária para tratamento dos efluentes captados.

A aplicação de métodos geofísicos na pilha de rejeito é pioneira e parte de conceitos técnicos de prospecção mineral e estudos de contaminação ambiental. As etapas de estudo, apresentada na Figura 13, visa o diagnóstico detalhado da área, a partir do reconhecimento de zonas de infiltração de águas pluviais e superficiais, e zonas de percolação de drenagens ácidas no interior de pilhas de rejeito da mineração de urânio, reconhecer depósitos e zonas sulfetadas e verificar a hipótese de emissão radioativa em superfície a partir do intemperismo químico dos minerais. O diagnóstico gerado a partir da integração dos resultados é direcionado ao mapeamento de zonas de geração de drenagem ácida e possibilita a realização de prognóstico e estudo de alternativas para a mitigação efetiva da geração de efluentes ácidos.

Figura 13. Etapas do diagnóstico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Os produtos fornecidos pela geofísica rasa complementarão o banco de dados existente, que serve de subsídio para o planejamento de obras de engenharia e direcionam a INB para a conservação dos recursos hídricos e aprimoramento da etapa de descomissionamento.

### 5.1. Radioatividade e decaimento radioativo

O conhecimento das propriedades físicas das fontes radioativas possui grande relevância na geociência devido a capacidade de detecção de radioatividade para análise e reconhecimento através de detectores locais e remotos (IAEA, 2003).

Os átomos são as menores partículas de massa com distintas propriedades químicas e é, basicamente, constituído por um núcleo cercado de elétrons. O núcleo consiste em cargas positivas, denominadas prótons, e cargas neutras, os nêutrons. Átomos de elementos químicos que possuem a mesma quantidade de prótons e diferentes números de nêutrons, são conhecidos como isótopos. Os isótopos possuem propriedades químicas idênticas, porém diferentes propriedades físicas. Átomos que contêm o mesmo número de prótons e nêutrons são classificados como nuclídeos (IAEA, 2003.).

No núcleo de alguns isótopos ocorre certa instabilidade, devido a energia excedente, e pode desencadear o decaimento para uma forma de núcleo mais estável de um isótopo diferente. Esse processo de decaimento é acompanhado de emissões de partículas ou energia, denominadas radiação nuclear. Nuclídeos com esse potencial de decaimento são conhecidos como radionuclídeos.

A lei de decaimento radioativo é expressa pelo número de átomos desintegrados de um radionuclídeo em função do tempo, Equação (5).

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Onde:

$N_t$  = Número de átomos presentes após o tempo  $t$ ;

$N_0$  = Número de átomos presentes em  $t=0$ ;

$\lambda$  = Constante de decaimento de um radionuclídeo ( $s^{-1}$ ).

A constante de meia vida,  $T_{1/2}$ , é o tempo necessária para que ocorra o decaimento de metade dos radionuclídeos.

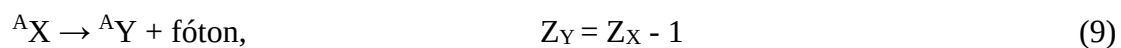
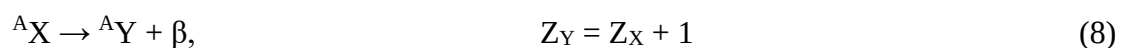
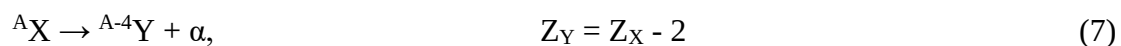
$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (6)$$

Existem três principais tipos de decaimento radioativo, decorrentes da liberação de partículas alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) e gama ( $\gamma$ ). A partícula  $\alpha$  consiste na liberação de 2 prótons e 2 nêutrons. O decaimento  $\beta$  é dividido em  $\beta^-$  e  $\beta^+$ , o primeiro representa a emissão de uma partícula  $\beta$  idêntica a um elétron e o segundo, e menos frequente, é acompanhado da emissão de um pósitron, e decorrente produção de fótons (IAEA, 2003). A captura eletrônica é um tipo de decaimento  $\beta^+$  e ocorre quando um elétron orbital, normalmente da camada K do átomo, é capturado pelo núcleo. Em decorrência da vacância de elétron na camada K, pode ocorrer o preenchimento por elétrons de camadas superiores e a liberação a energia conhecida como raio X ou a liberação de um elétron do átomo, conhecido como elétron de Auger (GILMORE, 2008).

As partículas alfa, formadas por dois prótons e dois nêutrons, são núcleos estáveis de hélio ( ${}^4_2\text{He}^+$ ) e são responsáveis pelo principal processo de decaimento radioativo. Estas partículas possuem inicialmente alta energia cinética, rapidamente diminuída devido a colisão com outros núcleos atômicos. Dois elétrons orbitais são incorporados ao núcleo estável e o torna indistinguível de outros átomos de hélio. Devido a rápida perda de energia, a distância percorrida pelo átomo em rocha sólida é medida na fração de milímetros (MILSON, 2003).

Partículas beta são compostas por elétrons ejetados do núcleo atômico e diferem de outros elétrons apenas pela alta energia cinética. Esta energia pode ser medida em centímetros em sólidos e líquidos, mas é rapidamente cessada pela múltipla colisão, principalmente com outros elétrons.

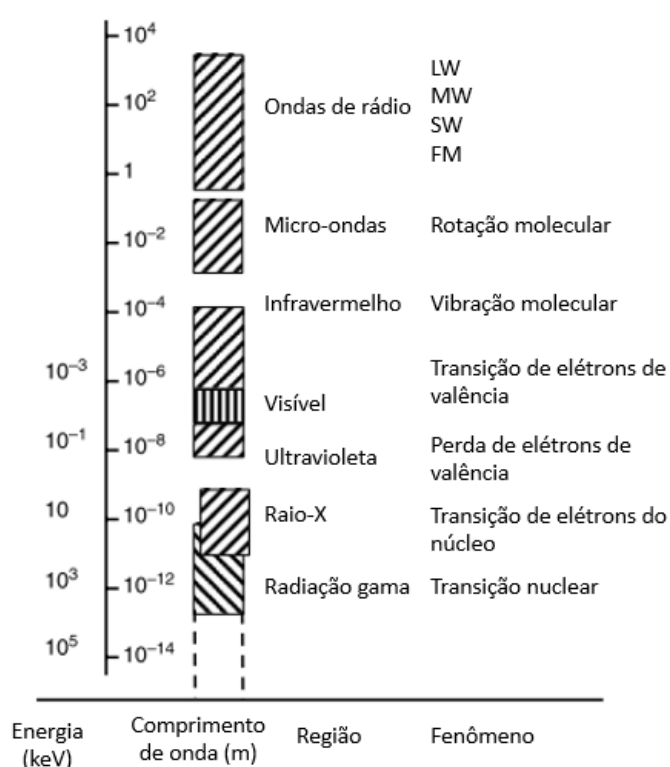
As Equações (7), (8) e (9) demonstram o decaimento alfa e beta e a captura de elétrons, assim como o impacto sobre o número atômico.



Ao contrário dos decaimentos alfa e beta, a emissão de raios gama não altera o número de prótons ou nêutrons, nem a massa atômica, mas é um resultado da perda do estado de excitação energética como consequência dos decaimentos citados anteriormente (GILMORE, 2008).

Os raios gama são ondas eletromagnéticas de alta frequência, descritos por fótons de energia proporcional a frequência de onda. Fótons são partículas de energia na forma de radiação eletromagnética, eletricamente neutras, com potencial de penetração superior às partículas alfa e beta. Apesar do potencial de detecção cerca de 90% dos raios gama são detectados entre 20 a 30 cm através de uma barreira de rocha e apenas cerca de 10% penetra no solo em profundidades próximas a 50 cm (MILSON, 2003). A Figura 14 apresenta o espectro eletromagnético, de maneira que destaca as principais características da emissão gama, a alta frequência e o curto comprimento de onda.

Figura 14. O espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado GILMORE, 2008

É possível verificar que há uma sobreposição entre raios-X de alta frequência e raios gama de baixa frequência, de maneira que a diferença só é estabelecida devido à diferentes origens.

A radiação gama fornece informações sobre a presença de núcleos atômicos instáveis e são oriundos, em sua maioria, de espécies minerais que contêm isótopos radioativos, como os núclídeos cosmogênicos, potássio ( $^{40}\text{K}$ ), urânio ( $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ ) e tório ( $^{232}\text{Th}$ ), referidos como Materiais Radioativos de Ocorrência Natural, ou pelo acrônimo NORM em inglês, contemplam um amplo espectro de nuclídeos descendentes. Estes

elementos são isótopos de longa vida, sobretudo associados a rochas ígneas ácidas e a depósitos sedimentares, como evaporitos, ou em ambientes redutores (DENTITH; MUDGE, 2014; GILMORE, 2008; MILSON, 2003).

O isótopo radioativo  $^{40}\text{K}$ , compõe cerca de 0,0118% do potássio de ocorrência natural e possui uma abundância de 3,1 ppm na crosta terrestre. O  $^{40}\text{K}$  decai em um único estágio, ou pela emissão beta que permite a formação de  $^{40}\text{Ca}$ , ou pela captura de elétron pela formação de  $^{40}\text{Ar}$  (MILSON, 2003; DENTITH; MUDGE, 2014). O núcleo de argônio perde seu estado de excitação após a emissão de 1,46 MeV e 11 fótons. A meia vida do  $^{40}\text{K}$  é de 1470 milhão de anos para o decaimento beta e 11000 milhões de anos para captura eletrônica.

O urânio possui dois isótopos radioativos naturais  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$  e possui uma abundância média de 1,8 ppm na crosta. O  $^{235}\text{U}$  é correspondente a 0,7114% de todo o urânio de ocorrência natural, portanto, apesar de sua energia de decaimento contribuir com cerca de 5% de toda a atividade das diferentes formas de urânio, sua detecção pode ser relativamente rara. Desta forma, com o propósito de estudos ambientais, há maior interesse na detecção do  $^{238}\text{U}$ , devido sua maior disponibilidade natural, 99,275% do urânio de ocorrência natural. Na cadeia de decaimento do  $^{238}\text{U}$ , o  $^{214}\text{Bi}$  possui a produção do maior número de fótons e consequente energia, 1,76 MeV e 19 fótons.

O  $^{232}\text{Th}$  é o único isótopo radioativo natural do tório e possui uma abundância média na crosta de 7,2 ppm. Nos primeiros estágios de decaimento do  $^{232}\text{Th}$  ocorre uma fraca atividade e emissão gama e a maior radiação é proveniente do  $^{208}\text{Tl}$ , decaimento acompanhado pela emissão de 100 fótons e 2,62 MeV (MILSON, 2003). A Tabela 5 apresenta a série de decaimento dos isótopos radioativos de urânio, tório e potássio.

Tabela 5. Decaimento radioativo natural de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ 

| Isótopo parental                               | Decaimento     | Isótopo descendente | Energia $\gamma$ (MeV) e porcentagem de produção |
|------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------------------------------------|
| <b>Decaimento <math>^{238}\text{U}</math></b>  |                |                     |                                                  |
| $^{238}\text{U}$                               | $\alpha$       | $^{234}\text{Th}$   | 0,09 (15), 0,6 (7), 0,3 (7)                      |
| $^{234}\text{Th}$                              | $\alpha$       | $^{234}\text{Pa}$   | 1,01(2), 0,77 (1), 0,04 (3)                      |
| $^{234}\text{Pa}$                              | $\beta$        | $^{234}\text{U}$    | 0,05 (28)                                        |
| $^{234}\text{U}$                               | $\alpha$       | $^{230}\text{Th}$   | -                                                |
| $^{230}\text{Th}$                              | $\alpha$       | $^{226}\text{Ra}$   | -                                                |
| $^{226}\text{Ra}$                              | $\alpha$       | $^{222}\text{Rn}$   | 0,19 (4)                                         |
| $^{222}\text{Rn}$                              | $\alpha$       | $^{218}\text{Po}$   | -                                                |
| $^{218}\text{Po}$                              | $\alpha$       | $^{214}\text{Pb}$   | -                                                |
| $^{214}\text{Pb}$                              | $\beta$        | $^{214}\text{Bi}$   | 0,35 (44), 0,24 (11), 0,29 (24), 0,05 (2)        |
| $^{214}\text{Bi}$                              | $\beta$        | $^{214}\text{Po}$   | 2,43 (2), 2,20 (6), 1,76 (19), 1,38 (7)          |
| $^{214}\text{Po}$                              | $\alpha$       | $^{210}\text{Pb}$   | -                                                |
| $^{210}\text{Pb}$                              | $\beta$        | $^{210}\text{Bi}$   | -                                                |
| $^{210}\text{Bi}$                              | $\beta$        | $^{210}\text{Po}$   | 0,04 (4)                                         |
| $^{210}\text{Po}$                              | $\alpha$       | $^{206}\text{Pb}$   | -                                                |
| <b>Decaimento <math>^{232}\text{Th}</math></b> |                |                     |                                                  |
| $^{232}\text{Th}$                              | $\alpha$       | $^{228}\text{Ra}$   | 0,06 (24)                                        |
| $^{228}\text{Ra}$                              | $\beta$        | $^{228}\text{Ac}$   | -                                                |
| $^{228}\text{Ac}$                              | $\beta$        | $^{228}\text{Th}$   | 1,64 (13), 1,59 (12), 0,99 (25), 0,97(18)        |
| $^{228}\text{Th}$                              | $\alpha$       | $^{224}\text{Ra}$   | -                                                |
| $^{224}\text{Ra}$                              | $\alpha$       | $^{220}\text{Rn}$   | -                                                |
| $^{220}\text{Rn}$                              | $\alpha$       | $^{216}\text{Po}$   | -                                                |
| $^{216}\text{Po}$                              | $\alpha$       | $^{212}\text{Pb}$   | -                                                |
| $^{212}\text{Pb}$                              | $\beta$        | $^{212}\text{Bi}$   | 0,30 (5), 0,24 (82), 0,18 (1), 0,12 (2)*         |
| $^{212}\text{Bi}$                              | $\beta$ (66%)  | $^{212}\text{Po}$   | 1,18 (1), 0,83 (8), 0,73 (10)                    |
| $^{212}\text{Po}$                              | $\alpha$       | $^{208}\text{Pb}$   | -                                                |
| $^{212}\text{Bi}$                              | $\alpha$ (34%) | $^{208}\text{Tl}$   | -                                                |
| $^{208}\text{Tl}$                              | $\beta$        | $^{208}\text{Pb}$   | 2,62 (100), 0,86 (14), 0,58 (83), 0,51 (25)      |
| <b>Decaimento <math>^{40}\text{K}</math></b>   |                |                     |                                                  |
| $^{40}\text{K}$                                | $\beta$ (89%)  | $^{40}\text{Ca}$    | -                                                |
|                                                | K (11%)        | $^{40}\text{Ar}$    | 1,46 (11)                                        |

<sup>(1)</sup>O número de fótons de energia produzidos a cada 100 decaimentos é indicado em porcentagem de produção em parênteses.

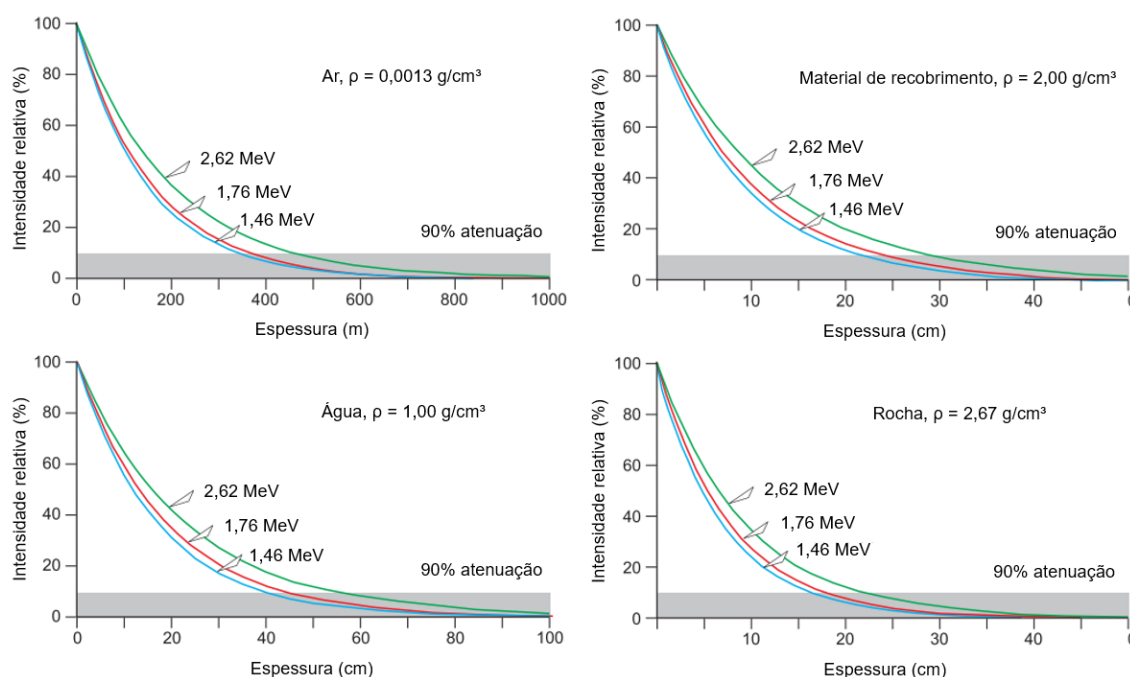
Fonte: Adaptado Milson (2003)

### 5.1.1. Fontes naturais de radiação e mobilidade de elementos radioativos no ambiente geológico

A interação da radiação gama com o meio ocorre através da atenuação e da absorção dos raios gama e ocorre de maneira natural em contato com o ar, água, solo e rocha. É possível delimitar coeficientes de atenuação e de absorção, de maneira que o primeiro representa a medida da redução da intensidade dos raios gama em função da absorção pela matéria, enquanto o segundo expressa a quantidade de energia retida por um absorvedor conforme a radiação gama passa por ele (GILMORE, 2009).

A atenuação natural da emissão gama pode ser delimitada por uma curva exponencial de redução de intensidade em função da espessura dos materiais, como observado na Figura 15. Materiais de alta densidade causam forte atenuação em menores espessuras e raios gama de menor intensidade facilmente perdem sua energia.

Figura 15. Exemplo de atenuação de raios gama com diferentes energias iniciais por materiais geológicos



Fonte: Adaptado Dentith, Mudge (2014), apud Grasty (1979)

Devido a relação de densidade de diferentes materiais e atenuação natural, a energia emitida por raios gama apenas pode ser detectada quando originada em rochas ou material de recobrimento a poucos centímetros da superfície. Além da densidade, as

condições do meio podem interferir, como a maior umidade no material de recobrimento, pode resultar em maior atenuação do que em material seco.

No meio geológico, a emissão de radiação está associada a espécies minerais que contêm um ou mais radioelementos de potássio, urânio e tório. Estes elementos podem ser constituintes primários do mineral ou ocorrem em pequenas quantidades como impurezas na estrutura cristalina.

O potássio é um elemento alcalino e pode ocorrer em feldspatos alcalinos, micas e ilitas, e é o elemento radioativo mais abundante no ambiente geológico, quando comparado ao urânio e ao tório (DENTITH, MUDGE, 2014).

O urânio e o tório possuem amplo raio iônico e são fortemente carregados, portanto, tendem a formar minerais próprios. O urânio pode formar tanto óxidos quanto silicatos, quartzos, feldspatos e, outros minerais podem conter traços de urânio e tório, mas em sua maioria ocorrem em minerais acessórios como zirconita, monazita, esfena, rutilo, entre outros. O urânio também pode substituir uma variedade de cátions de tamanho e carga similares, como tório, zircônio e cálcio. O Quadro 5 apresenta os minerais radioativos, seus elementos associados e a ocorrência. A Tabela 6 relaciona os minerais de urânio e tório e a porcentagem de peso de cada radioelemento.

Na série de decaimento do  $^{232}\text{Th}$  a meia vida dos elementos varia de nanossegundos a poucos anos, com exceção do próprio  $^{232}\text{Th}$ , portanto, o equilíbrio pode ser restabelecido instantaneamente em uma escala geológica. No entanto, a meia vida dos elementos da série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  varia de frações de segundo a milhares de anos, e uma variedade de mecanismos físicos e químicos podem remover ou introduzir isótopos a série, consequentemente, estão em constante desequilíbrio.

Os processos mais importantes associados à cadeia de decaimento são a remoção, o transporte e a deposição de potássio, urânio e tório. O decaimento do urânio pode ocorrer em diferentes etapas, principalmente quando promovido pela lixiviação, solubilização e mobilização dos elementos radioativos. O urânio e o rádio são solúveis e podem ser removidos pela água subterrânea, por exemplo (DENTITH, MUDGE, 2014).

Sob condições quimicamente redutoras, o urânio e o tório existem em estado tetravalente, portanto, relativamente insolúveis. No entanto, em condições oxidantes o urânio ocorre em estado hexavalente, ou seja, de quatro elétrons na última camada eletrônica passa a ter seis elétrons. O íon uranila hexavalente ( $\text{UO}_2^{2+}$ ) é solúvel em água e sua mobilidade em estado hexavalente também é afetada pela adsorção em óxidos de ferro hidratados, argilas minerais, zeólitas e colóides.

Quadro 5. Minerais radioativos

| Elemento | Mineral                                                 | Ocorrência                                               |
|----------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Potássio | Feldspato ortoclásio e microclínio $[KAlSi_3O_8]$       | Rochas ígneas ácidas e pegmatitos                        |
|          | Muscovita $[H_2KAl(SiO_4)_3]$                           | Rochas ígneas ácidas e pegmatitos                        |
|          | Alunita $[K_2Al_6(OH)_{12}SO_4]$                        | Alteração em rochas vulcânicas ácidas                    |
|          | Silvita $[KCl]$ , Carnalita $[MgCl_2 \cdot 6H_2O]$      | Depósitos salinos sedimentares                           |
| Tório    | Monazita $[ThO_2 + \text{fosfato de terras raras}]$     | Granitos, pegmatitos e gneisses                          |
|          | Torianita $[(Th,U)O_2]$                                 | Granitos, pegmatitos e plácer                            |
|          | Torita, uranotorita $[ThSiO_4 + U]$                     | Granitos, pegmatitos e plácer                            |
| Urânio   | Uraninita [óxido de U, Pb, Ra+ Th, REE]                 | Granitos, pegmatitos e associados a veios de Ag, Pb e Cu |
|          | Carnotita $[K_2O \cdot 2UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot 2H_2O]$ | Arenitos                                                 |
|          | Gumita [alteração da uraninita]                         | Associada a uraninita                                    |

Fonte: adaptado Reynolds, 2011

Tabela 6. Minerais de urânio e tório

| Mineral                 | Fórmula química                     | % em peso K | % em peso U | % em peso Th |
|-------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| Bramerita               | $(U,Ca,Ce)(Ti,Fe)_2O_2$             | -           | 33,54       | -            |
| Carnotita               | $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 1-3H_2O$ | 8,67        | 52,77       | -            |
| Coffinita               | $U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$           | -           | 72,63       | -            |
| Monazita                | $(Ce,La,Nd,Th,Y)PO_4$               | -           | -           | 4,83         |
| Thorite                 | $(Th)SiO_4$                         | -           | -           | 71,59        |
| Uraninita (pitchblenda) | $UO_2$                              | -           | 88,15       | -            |
| Uranofano               | $Ca(UO_2)_2Si_2O_7 \cdot 6H_2O$     | -           | 40,59       | -            |

Fonte: Adaptado Dentith, Mudge, 2014

O intemperismo decompõe a maior parte dos minerais potássicos e o potássio é absorvido por minerais como a ilita. Apenas a zirconita e a monazita são minerais que contém urânio e estáveis durante o intemperismo. Os demais minerais de urânio

intemperizados resultam na liberação e mobilidade do urânio, que podem eventualmente ser retidos em óxidos de ferro autigênicos e em argilominerais, além da forma iônica em soluções como um íon complexo. O tório oriundo do intemperismo pode ser encontrado em óxidos ou hidróxidos de ferro, em óxidos de titânio ou em argilas.

A emissão radioativa em rochas inalteradas e seus equivalentes intemperizados depende de diversos fatores, principalmente pelas condições meteorológicas, como chuva e temperatura, pH do meio e salinidade da água (DENTITH, MUDGE, 2014).

A drenagem superficial possui um papel significativo na distribuição superficial dos três radioelementos, pela probabilidade de carreamento de minerais e ocorrem como um marcador radioativo de drenagem.

## 5.2. Gamaespectrometria

A Gamaespectrometria é o método radiométrico que mede a ocorrência natural de radioatividade na forma de raios gama, originários, em maioria, de espécies minerais que contêm isótopos radioativos, como os núclídeos cosmogênicos, potássio ( $^{40}\text{K}$ ), urânio ( $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ ) e tório ( $^{232}\text{Th}$ ), referidos pelo acrônimo, em inglês, NORM (*Naturally Occuring Radioactive Materials*), que contempla um amplo espectro de núclídeos descendentes, principalmente, dos isótopos de urânio e tório.

O método é caracterizado como geofísico passivo, ao medir uma fonte natural de energia e possuir como principais objetivos, a determinação de níveis de radiação e a avaliação dos níveis de contaminação gerados a partir de ações antrópicas (DENTITH; MUDGE, 2014; GILMORE, 2008). O gamaespectrômetro realiza a medição da quantidade de raios gama em faixas discretas, próximas e de energia pré-definida, conhecidas como canais. A Tabela 7 apresenta os canais e os limites estabelecidos.

Tabela 7. Canais de raios gama monitorados por pesquisa radiométrica

| Canal    | Alvo                                                     | Energia (MeV) |
|----------|----------------------------------------------------------|---------------|
| Potássio | $^{40}\text{K}$ (1,460 MeV)                              | 1,370 – 1,570 |
| Tório    | $^{208}\text{Tl}$ (2,614 MeV) na série $^{232}\text{Th}$ | 2,410 – 2,810 |
| Urânio   | $^{214}\text{Bi}$ (1,765 MeV) na série $^{238}\text{U}$  | 1,660 – 1,860 |

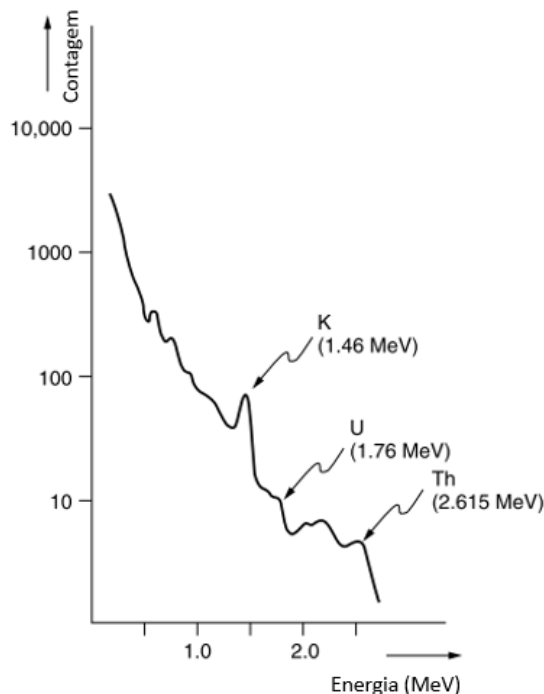
Fonte: adaptado IAEA, 1991.

A escolha da medição das bandas energéticas dos elementos potássio, urânio e tório ocorrem devido a detecção energética dos raios gama provinda de elementos relevantes, ao contrário de elementos de emissões fracas ou raras. Decorrente da não

emissão de raios gama por parte dos elementos urânio e tório, são utilizadas medições de elementos das cadeias de decaimento, como o bismuto ( $^{214}\text{Bi}$ ) e o tálio ( $^{208}\text{Tl}$ ). A medição indireta dos elementos emissores parte do princípio de que a concentração de emissões gama é proporcional a concentração da fonte radioativa, ou seja, a série de decaimento deve estar em equilíbrio (IAEA, 1991).

Gamaespectrômetros terrestres portáteis, usados para o mapeamento de radionuclídeos naturais, monitoram canais de energia de 1461 keV ( $^{40}\text{K}$ ), 1765 keV ( $^{214}\text{Bi}$ ) e 2615 keV ( $^{208}\text{Tl}$ ) para estimar as concentrações de potássio, urânio e tório, respectivamente (IAEA, 1989). A contagem de partículas por segundo nos canais de K, U e Th obtida pelo detector é linearmente relacionada a concentração dos elementos no meio (IAEA, 2003). A relação entre a contagem e a energia monitorada pode ser observada pela Figura 16 e as leituras gamaespectrométricas em contagens por segundo (cps ou c/s) são convertidas automaticamente em concentrações pelo equipamento. Equipamentos possuem diferentes fatores de sensibilidade que devem ser considerados na análise dos dados.

Figura 16. Espectro natural de raios gama



Fonte: adaptado Milsom, 2003

A concentração dos elementos no meio é determinada pela Equação 10.

$$c_e = \frac{n_{ie}}{s_{ie}} \quad (10)$$

Onde:

- $c$  = Concentração do radioelemento (e=K, U ou Th), (% K, ppm U, ppm Th);
- $n$  = Contagem de partículas no canal de energia (i=1, 2, 3), (c/s);
- $s$  = Sensibilidade do gamaespectrômetro para a detecção dos elementos no canal de energia, (c/s por unidade de concentração de cada radioelemento);

Os dados obtidos pela aplicação do coeficiente de sensibilidade são concentrações estimadas de radioelementos na área estudada e são expressas em porcentagem para o potássio e em partes por milhão para o urânio e o tório. Como as concentrações de U e Th são obtidas a partir da emissão de Bi e Tl, elas dependem do equilíbrio da série de decaimento dos radioelementos, de maneira que são referidas como concentrações equivalentes, eU e eTh (DENTITH e MUDGE, 2014).

As medições radiométricas ocorrem a partir de fontes próximas ao detector, portanto, a contribuição máxima está localizada imediatamente abaixo do equipamento. Visto que, a atenuação natural é menor com raios gama de alta energia, a medição é influenciada por este parâmetro. Ao considerar o detector circunscrito por pontos equidistantes, e altura da coluna de ar entre a superfície, o material investigado, e o detector, é definido o círculo de investigação em planta.

As relações de emissão e capacidade de transpasse são relevantes no ponto de vista geofísico devido ao controle de profundidade em subsuperfície e a detecção dos produtos de decaimento, ponto que influencia, inclusive, na proximidade necessária do gamaespectrômetro da fonte radioativa (DENTITH e MUDGE, 2014).

O método gamaespectrométrico também é capaz de medir as variáveis de dose e taxa dose. A dose é definida como a energia transmitida pela radiação a uma unidade de massa de matéria irradiada, enquanto a taxa dose é uma correlação da dose a um intervalo de tempo (IAEA, 2003). A dose é calculada a partir das concentrações de potássio, urânio e tório através de fatores específicos de conversão.

## 6. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

### 6.1. Calibração e aquisição de dados

O gamaespectrômetro RS-332 permite a aquisição de dados pelo tempo de 120, 180, 240 e 300 segundos. Com o intuito de compreender a variação dos resultados dos dados coletados em função do tempo, foram realizadas quatro coletas experimentais em função do tempo em um mesmo ponto na área de estudos. A Figura 17 apresenta o gamaespectrômetro utilizado para a coleta de dados de campo e a Tabela 8 apresenta os dados coletados em função da variação dos quatro tempos de aquisição.

Figura 17. Gamaespectrômetro RS-332 durante coleta de dados na área de estudos



Fonte: Acervo pessoal, 2021

Tabela 8. Dados coletados em função da variação do tempo de aquisição

| <b>Tempo (seg.)</b>      | <b>120</b>  | <b>180</b>  | <b>240</b>  | <b>300</b>  |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>K (%)</b>             | 7,00 ± 0,25 | 7,28 ± 0,20 | 7,23 ± 0,18 | 7,27 ± 0,18 |
| <b>U (ppm)</b>           | 142 ± 1,6   | 139 ± 1,3   | 142 ± 1,1   | 140 ± 1,2   |
| <b>Th (ppm)</b>          | 141 ± 2,8   | 147 ± 2,3   | 144 ± 2,0   | 146 ± 2,1   |
| <b>Dose (μR)</b>         | 2,2         | 3,7         | 5,2         | 6,6         |
| <b>Taxa dose (μR/hr)</b> | 88          | 88          | 89          | 89          |

O desvio padrão é uma medida de dispersão estatística e indica a uniformidade do conjunto de dados. No presente estudo, o desvio padrão é calculado em função dos dados

coletados nos diferentes tempos em um mesmo ponto na área de estudos para que seja determinado o tempo ideal de aquisição de dados. O desvio padrão calculado para análise dos tempos de aquisição não está relacionado ao desvio padrão dos dados coletados e apresentados no Apêndice A, caso em que é utilizado para estimar a faixa de desvios e erros das medições radiométricas (IAEA, 2003).

O desvio padrão é calculado pela Equação 11.

$$Dp = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M_A)^2}{n}} \quad (11)$$

De forma que:

$x_i$  = Valor na posição i no conjunto de dados

$M_A$  = Média aritmética

$n$  = Quantidade de dados

$D_p$  = Desvio padrão

Como o desvio padrão é expresso na mesma unidade dos dados coletados em campo, para que seja possível analisar a dispersão em termos relativos ao valor médio, é utilizado o coeficiente de Pearson, ou coeficiente de variação. O coeficiente de variação é calculado pela divisão do desvio padrão pela média em função da porcentagem.

Desta forma, a Tabela 9 apresenta o desvio padrão e o coeficiente de variação do conjunto de dados coletados em função da variação do tempo de aquisição.

Tabela 9. Desvio padrão e coeficiente de variação dos dados coletados

| Parâmetro                      | Desvio Padrão         | Coeficiente de Variação |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| K (%)                          | 0,11 %                | 1,59 %                  |
| U (ppm)                        | 1,30 ppm              | 0,92 %                  |
| Th (ppm)                       | 2,29 ppm              | 1,59 %                  |
| Taxa dose ( $\mu\text{R/hr}$ ) | 0,50 $\mu\text{R/hr}$ | 0,56 %                  |

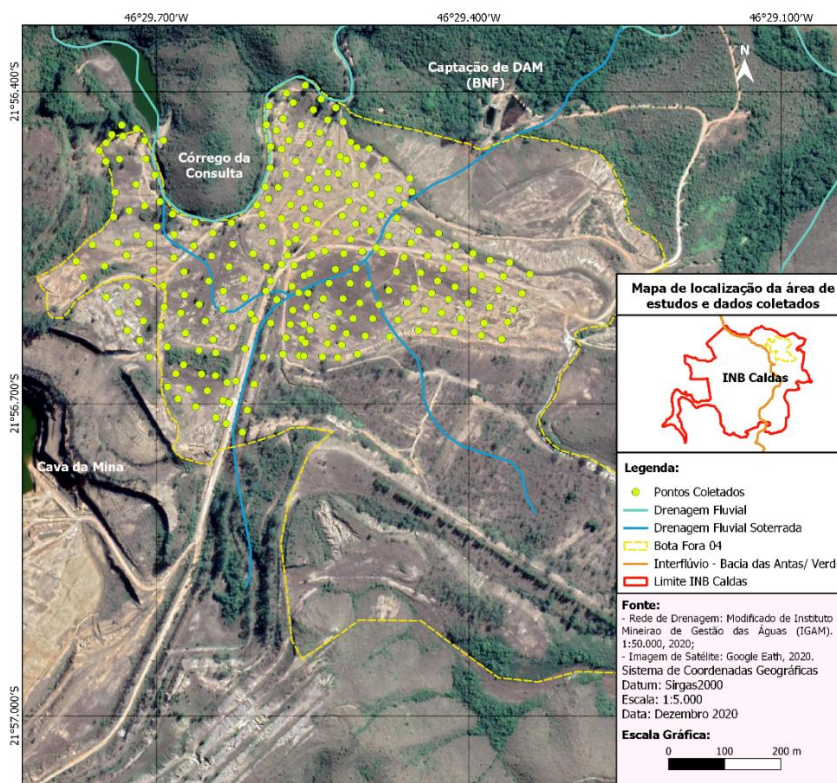
Para o parâmetro dose não há interesse em determinar o desvio padrão e o coeficiente de variação devido sua proporcionalidade ao aumento do tempo, ou seja, quanto maior o tempo de aquisição, maior a dose medida. Dentre os parâmetros de porcentagem de potássio (K), concentração de urânio (U), tório (Th) e taxa de dose todos apresentam valores de coeficiente de variação abaixo de 2%, de maneira que é possível

adotar o tempo de aquisição a partir do planejamento e execução de campo, sem alterar a consistência e representatividade dos dados.

A aquisição de dados geofísicos de gamaespectrometria foi realizada nos dias 30 de maio, 27 de junho, 4 e 11 de julho de 2020 através de 281 pontos de coleta com tempo de aquisição de 120 segundos e em uma área total de, aproximadamente, 28,16 ha pertencente ao BF-04 de rejeito estéril exposto, sem cobertura vegetal ou solo. A aquisição foi concentrada em altitude média de 1378,305 m, em área marginal ao Córrego da Consulta, a margem norte do BF-04 em patamar superior a BNF e na região centro-oeste do bota fora, como pode ser observado na Figura 18. Os pontos de coleta foram dispostos em linhas paralelas em sentido Norte-Sudoeste, com espaçamento médio de cerca de 30 m.

O gamaespectrômetro portátil RS-332 *Multipurpose Gamma-Ray Spectrometer System* da *Radiation Solutions INC* foi utilizado devido sua alta sensibilidade, proteção térmica, fácil manuseio e GPS incluso. Possui um detector de óxido germanato de bismuto com colimador interno para absorção e suavização dos feixes de radiação. O RS-332 capta de 30 keV a 3.000 keV (0,03 MeV a 3 MeV), energia suficiente para o reconhecimento das séries de decaimento do tório, urânio e potássio, com sensibilidade de 160 cps.

Figura 18. Mapa de localização da Área de Estudos e Pontos Coletados

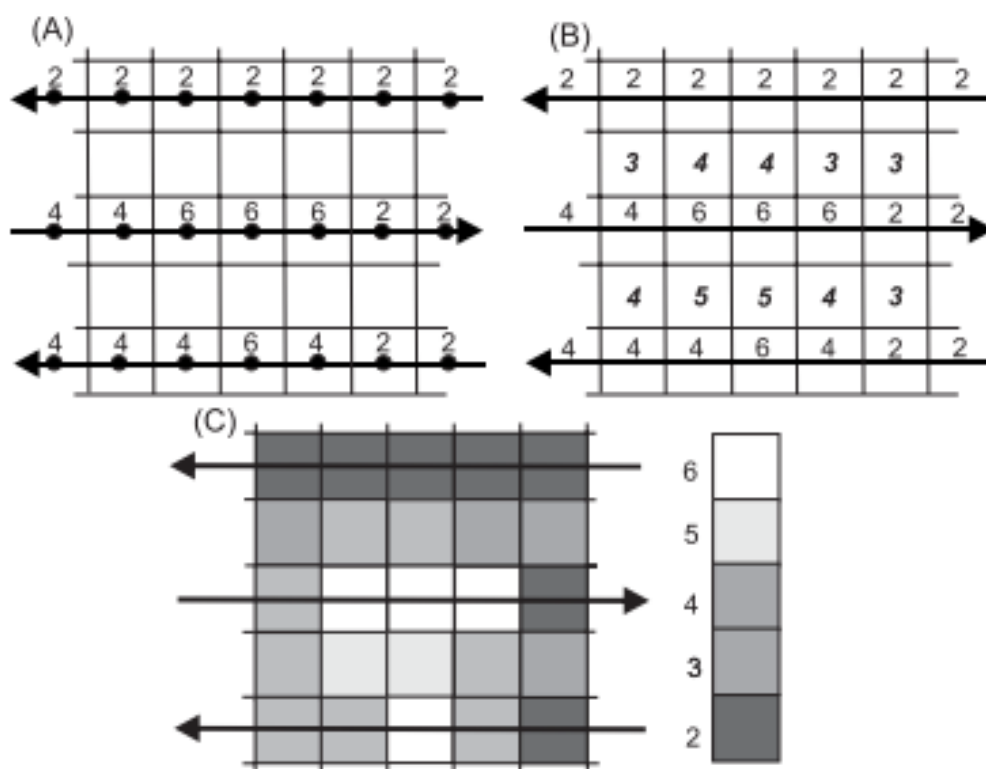


Fonte: Elaborado pela autora, 2021

## 6.2. Processamento dos dados radiométricos

Após a aquisição dos dados radiométricos, foi realizado o processamento dos dados com o intuito de ser estabelecida uma planta superficial que reflète a abrangência da radiação na área estudada. A aquisição por malha de pontos por referência de linhas (Figura 19) auxilia no processamento e interpolação dos dados (REYNOLDS, 2011). Os dados são analisados em *software* para interpretações geofísicas e incluem coordenadas geográficas e topografia para que não haja distorções da seção gerada. A Figura 19.A exemplifica a malha de aquisição de pontos linearizados e o dado radiométrico relacionado a cada ponto. A interpolação dos dados é responsável pelo recobrimento das áreas entre pontos coletados com médias de dados radiométricos próximos (Figura 19.B). Por fim, são designadas cores aos valores interpolados para a visualização em mapa de cores ou escalas (Figura 19.C).

Figura 19. Medidas e interpolação de dados radiométricos para visualização em planta



Fonte: Reynolds, 2011

Os 281 pontos coletados foram submetidos a uma rotina de interpolação na plataforma Oasis Montaj (Geosoft) para gerar a seção bidimensional dos valores de

concentração de tório, potássio, urânio, de dose e de taxa dose em termos de distância. Devido a atenuação natural dos raios gama e a capacidade do receptor de reconhecer a energia emitida imediatamente abaixo e em subsuperfície, dados radiométricos não foram processados em profundidade.

A interpolação é representada pela suavização dos dados a partir do modelo matemático dos mínimos quadrados e minimiza as diferenças de valores calculados pelo *software* e os valores medidos em campo. A rotina do *software* consiste na criação automática de um modelo bidimensional teórico pela divisão da subsuperfície em blocos retangulares. A distribuição e o tamanho dos blocos são gerados automaticamente pelo programa, pela distribuição dos pontos de dados como guia aproximado (TARGA, 2020 *apud* LOKE, 2003). As concentrações são calculadas pelo programa a partir do modelo de blocos, onde é feita a comparação entre os valores medidos e os modelados. Os parâmetros dos blocos são ajustados iterativamente até que o valor aparente calculado seja concordante com os valores medidos em campo.

Após o processamento, são gerados mapas com gradação colorimétrica (*color-scale*) ou em tons de cinza (*grey-scale*), que representam teores quantitativos dos elementos K (%), eU e eTh (ppm) (REYNOLDS, 2011). Com os dados geofísicos processados, são preparados mapas diretos, que objetivam a análise da distribuição dos radioelementos individualmente.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

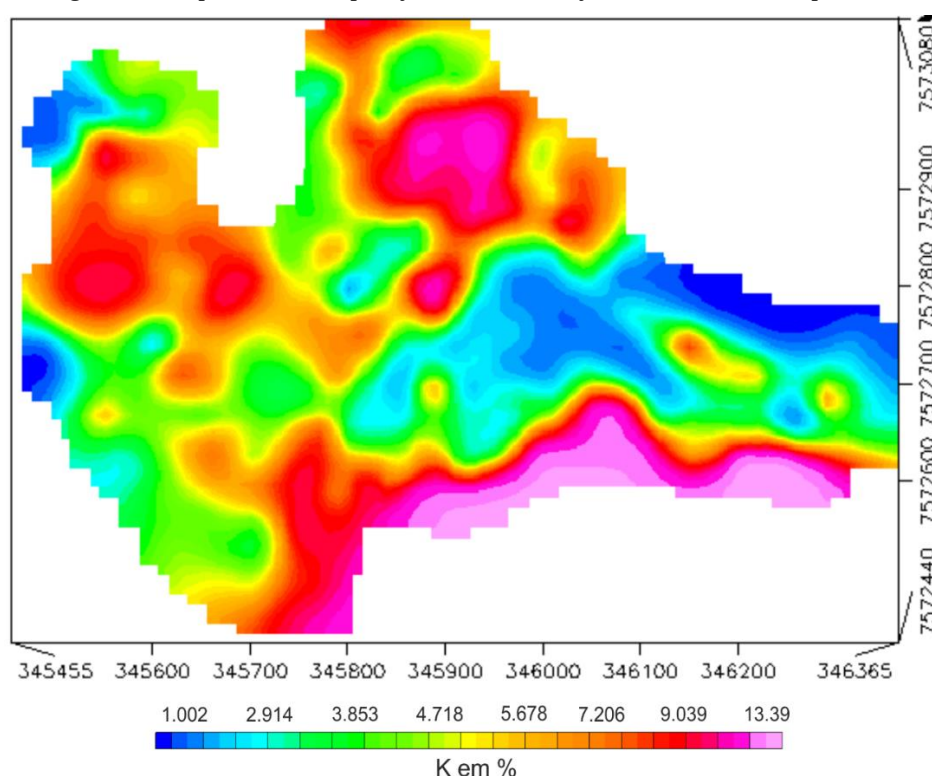
Neste capítulo são apresentados e discutidos os dados geofísicos interpolados que possibilitaram a identificação de anomalias radiométricas em superfície ao gerar modelos 2D da área de estudos. São descritas também as relações de desequilíbrio e mobilidade dos radioelementos potássio, urânio e tório, assim como a resposta radiométrica do Bota-Fora 04 de rejeito estéril da Mina Osamu Utsumi.

Devido ao potássio possuir alta mobilidade e solubilidade geoquímica em diferentes condições ambientais, a decomposição da maior parte dos minerais potássicos pelo intemperismo pode ser fortemente observada em clima tropical e subtropical. A alta pluviosidade estudada no Planalto de Poços de Caldas é responsável pelo desenvolvimento de processos intempéricos, principalmente em áreas com exposição em superfície das rochas potássicas, como é o caso do BF-04.

A resposta gamaespectrométrica depende destas relações, de maneira que altas concentrações de potássio (K) indicam rochas inalteradas, a sedimentação do elemento em áreas alagáveis ou a reabsorção por argilominerais e, em contrapartida, baixas concentrações sugerem a depleção e mobilidade devido ao intemperismo da rocha.

A Figura 20 apresenta o mapa 2D de interpolação da concentração do radioelemento potássio no BF-04.

Figura 20. Mapa 2D de interpolação da concentração do radioelemento potássio



Altas concentrações de potássio são observadas nas regiões sudeste e norte da área de estudos com taxas que variam de 5,678% a 13,39%. No entanto, a região central apresenta concentrações relativamente baixas de 1,002% a 4,718% de potássio.

Os processos mais importantes associados à cadeia de decaimento do urânio e tório são a remoção, o transporte e a deposição. A mobilização do urânio ( $U^{6+}$ ) ocorre em ambientes intempéricos e sua solubilização é intensificada em ambientes oxidantes pela formação do íon uranila hexavalente ( $UO_2^{2+}$ ). As principais diferenças entre a mobilização dos radioelementos urânio e tório estão na capacidade de lixiviação do urânio e na retenção do tório em substâncias pedogênicas orgânicas e inorgânicas.

A Figura 21 apresenta o mapa 2D de interpolação da concentração do radioelemento urânio, enquanto a Figura 22 apresenta a concentração de tório, ambos no BF-04. Os mapas apresentam tendência similar ao potássio para o BF-04, onde as maiores concentrações de urânio e tório são encontradas nas regiões sudeste e norte, com variação de eU de 87,76 ppm a 312,61 ppm e de eTh de 113,90 ppm a 221,14 ppm.

Figura 21. Mapa 2D de interpolação da concentração do radioelemento urânio

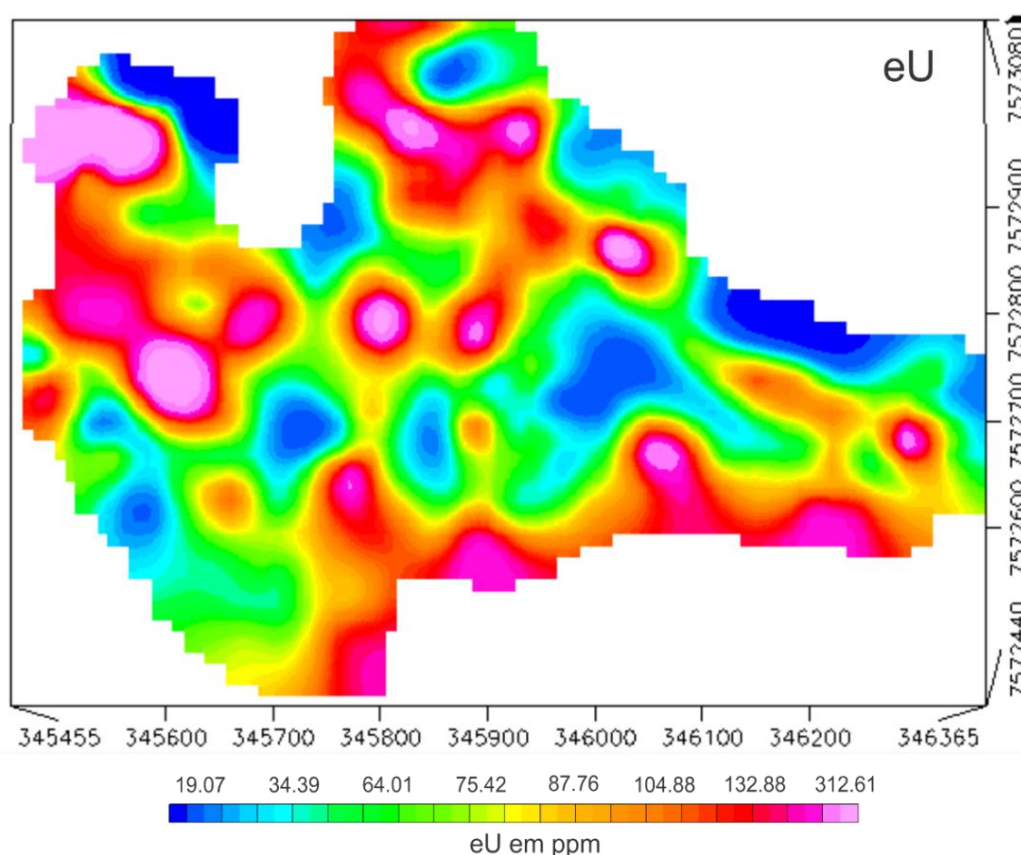
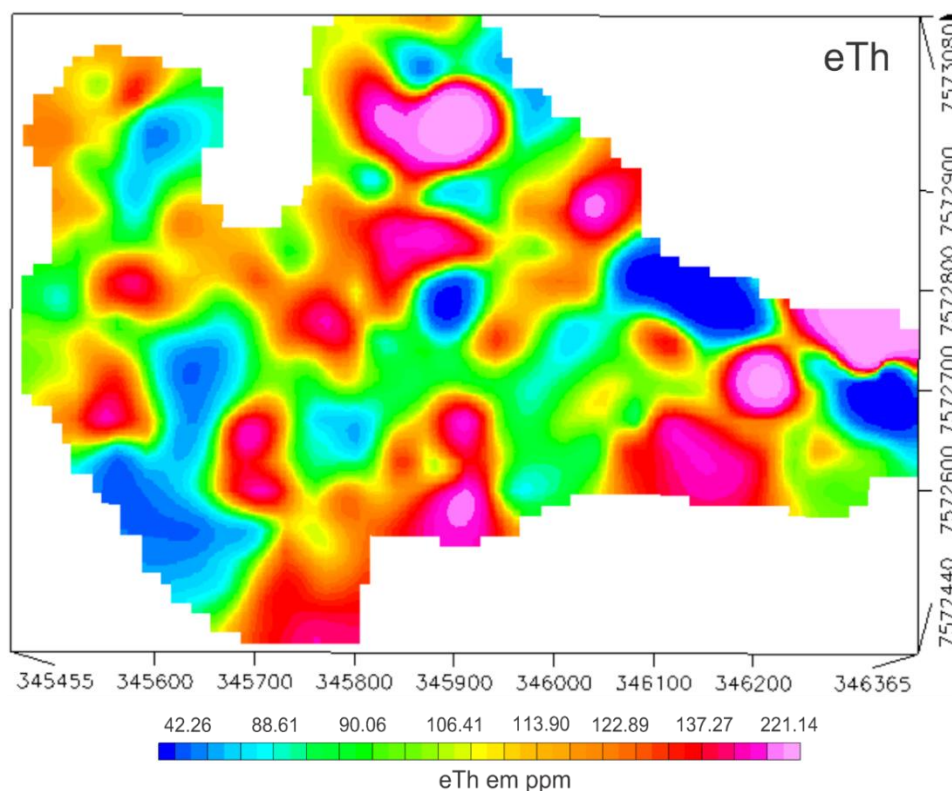


Figura 22. Mapa 2D de interpolação da concentração do radioelemento tório

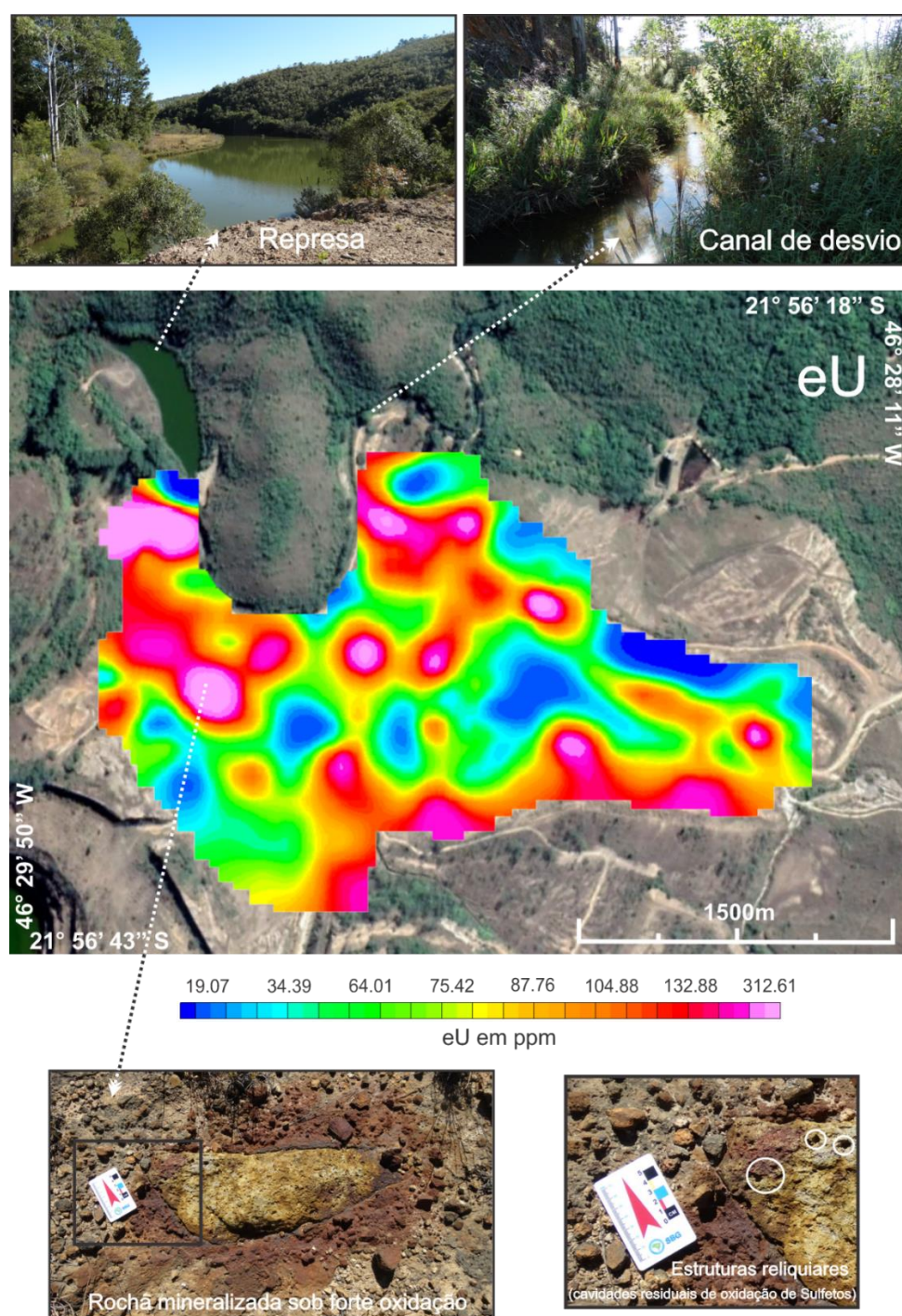


A região estudada do BF-04 é caracterizada por uma área predominantemente plana delimitada a norte pelo canal de desvio do Córrego da Consulta e a sul por taludes do patamar superior da pilha de estéril. O estudo de Casagrande (2019) apresenta investigação geofísica pelo método geofísico de Eletorresistividade, que permite reconhecer o fluxo subterrâneo salino associado a drenagem ácida existente no local, além do uso do método de Polarização Induzida que reconhece zonas sulfetadas na pilha de estéril BF-04. O reconhecimento de zonas oxirredutoras associadas a formação de drenagem ácida devido a oxidação da pirita corrobora com a destruição de minerais radioativos e solubilização de metais nas águas. Desta forma, é possível associar o decaimento e as altas concentrações de eU e eTh em superfície à oxidação da pirita e a formação de drenagem ácida.

O estudo de Casagrande (2019) apresenta a infiltração de água do canal não impermeabilizado do Córrego da Consulta como um dos principais processos-chave gerador de drenagem ácida de mina, devido a interação química da drenagem com sulfetos. Esta tendência também é reconhecida pela radioatividade de urânio próxima ao canal, de maneira que alta radioatividade do urânio devido a zona oxidativa atua como um marcador radioativo de drenagem ácida.

A Figura 23 apresenta o canal de desvio do Córrego da Consulta, provavelmente o principal responsável pela infiltração da água e formação de drenagem ácida na região norte do BF-04 e um testemunho de rocha sulfetada oxidada encontrado em uma zona de alta concentração de eU.

Figura 23. Canal de desvio do Córrego da Consulta associado a formação de drenagem ácida de mina e alta concentração de eU



## 8. CONCLUSÕES

Os resultados de um empreendimento mineiro que desconsiderou quaisquer impactos ambientais futuros são diversos: a perda de biodiversidade, a contaminação do solo e da água, a impossibilidade de uso futuro, impactos socioambientais e a perda de recursos naturais. Elencado a contaminação, a drenagem ácida de mina é um impacto de alta complexidade em termos técnicos. Os resultados deste estudo proporcionam, neste sentido, uma contribuição relevante no planejamento de ações de atenuação de impactos.

Os resultados gamaespectrométricos proporcionaram o aprofundamento na investigação da contaminação por drenagem ácida de mina proveniente de pilha de rejeito. Altas concentrações de elementos radioativos associadas a zonas sulfetadas e de formação de drenagem ácida de mina proporcionou um melhor entendimento e caracterização do Bota-fora 04 e consolida a gamaespectrometria como ferramenta investigativa para casos similares.

Os resultados obtidos dão subsídio a tomada de decisão quanto a aplicação de soluções *in situ*, com o intuito evitar a formação do contaminante.

Correlacionada a geração de drenagem ácida pela ação química da drenagem superficial com zonas sulfetadas com dados radiométricos, é possível destacar a necessidade de implementação de um sistema de drenagem pluvial efetivo, que diminua a infiltração de água meteórica na pilha de estéril. Associada a drenagem superficial, a impermeabilização do canal de desvio do Córrego da Consulta impossibilitará a infiltração da drenagem fluvial para dentro do BF-04 e a consequente formação de contaminante ao entorno da margem da pilha de estéril. Zonas radioativas com altas concentrações de urânio e tório devem ser cimentadas e impermeabilizadas, com o intuito de evitar o intemperismo e diminuir a concentração de radioelementos na água.

Este estudo complementa uma série de investigações geofísicas que subsidiam a tomada de decisão das Indústrias Nucleares do Brasil acerca da geração de drenagem ácida e possibilita a gestão eficiente da remediação dos impactos ambientais da Mina Osamu Utsumi.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AMARAL, E.C.S., GODOY, J.M., ROCHEDO, E.R.R., VASCONCELLOS, L.M.H., Pires do Rio MA (1988) The environmental impact of the uranium industry: is the waste rock a significant contributor? *Radiat Prot Dosim* 22:165–171

BUSHEE J.1971. Geochronological and petrographic studies of alkali rocks from southern Brazil. Berkeley. 145p. Tese de Doutorado, California University.

BIONDI, J. C. Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros. 2ª edição revisada e atualizada. Oficina de Textos. São Paulo. 552p. 2015

BRASIL. Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 Anexo XX.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.

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

CAMPOS, M. B.; AZEVEDO, H.; NASCIMENTO, M. R. L.; ROQUE, C. V.; RODGHER, S. Environmental assessment of water from a uranium mine (Caldas, Minas

Gerais State, Brazil) in a decommissioning operation. *Environmental Earth Science* (2011) 62:857-863. DOI 10.1007/s12665-010-0572-9.

CASAGRANDE, M. F.S. Investigação Geofísica em Pilha de Estéril Afetada por Processo de Drenagem Ácida na Mina Osamu Utsumi, Poços de Caldas-MG. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. 2019.

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

DENTITH, M.; MUDGE, S.T. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. 2014. 438 p. Cambridge University Press.

Ellert, R. (1959). Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. *Boletim Da Faculdade De Filosofia Ciências E Letras, Universidade De São Paulo. Geologia*, (18), 5-60. <https://doi.org/10.11606/issn.2526-3862.bffcluspgeologia.1959.121851>

FERNANDES, H.M., VEIGA L.H.S., FRANKLIN, M.R., PRADO, V.C.S., TADDEI, J.F. (1995). Environmental impact assessment of uranium mining and milling facilities: a study case at the Poços de Caldas uranium mining and milling site, Brazil. *J Geochem Explor* 52:161–173

GILMORE, G. R. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. 2008. 2º Edição. 387 p. John Wiley & Sons Ltda.

GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; ALVES, F. M. SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. *Computers & Geosciences*. V. 33. 10-19 p. Elsevier. 2007.

HOLMES, D. C.; PITTY, A. E.; NOY, D. J. Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera and the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro

analogue study sites, Brazil. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO. 70 p. 1990.

HUDSON, T. L.; FOX, F. D.; PLUMLEE, G.S. Metal Mining and the Environment. AGI Environmental Awareness Series, 3. American Geological Institute. Virginia (EUA). 63 p. 1999.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL (INB). Como será feito o descomissionamento da antiga unidade de mineração e beneficiamento de urânio? Disponível em: <<https://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/como-sera-feito-o-descomissionamento-da-antiga-unidade-de-mineracao-e-beneficiam?Origem=1143>> Acesso em 09 de jan. de 2021.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL (INB). Relatório Integrado 2020. Disponível em: <<https://www.inb.gov.br/Portals/0/Conteudo/Images/ce2db0ec-cb59-495f-aeb7-8a2eda888bf4.pdf>> Acesso em 05 de jul. de 2021.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING & METALS (ICMM). Mining with Principles. Integrated Mine Closure. Good Practice Guide. 2ª Edição. 130 p. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). 2019. Relatório Anual de Atividades. Janeiro a Dezembro de 2019.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Construction and Use of Calibration Facilities for Radiometric Field Equipment, Technical Reports Series. 1989. 309p. Viena, Áustria.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). X-ray and gamma-ray standards for detector calibration. 1991. 151p. Viena, Áustria.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. 2003. 172p. Viena, Áustria.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). The long term stabilization of uranium mill tailings. Final report of a co-ordinated research project 2000-2004. 2004. 311p. Viena, Áustria.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). The long term stabilization of uranium mill tailings. 309p. Viena, Áustria. 2004.

JAIN, K. R.; CUI, Z.C.; DOMEN, J. K. Environmental impact of mining and mineral processing. Management, monitoring, and auditing strategies. Elsevier. Oxford, Reino Unido. 309p. 2016.

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

MANAHAN, S. E. Environmental Chemistry. 2000. 7ª Edição. 876p. Lewis Publishes, Boca Raton, EUA.

MILSOM, J. Field Geophysics. The Geological Field Guide Series. 3ª Edição. University College London. 232p. 2003.

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

NORDSTORM, D. K.; MCNUTT, R.; PUIGDOMENECH, I.; SMELLIE, J. A. T.; WOLF, M. Groundwater chemistry and geochemical modeling of water-rock interactions at the Osamu Utsumi mine and the Morro do Ferro. Journal of Geochemical Exploration. V. 45. 249-287p. 1992.

REYBOLDS, J. M. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. 2. Ed. Oxford, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd. 2011. 696 p.

SADWSKI, G. R.; DIAS NETO, C. M. O lineamento sismo-tectônico de Cabo Frio. Revista Brasileira de Geociências. V. 11(4). 209-212 p. São Paulo. 1981.

SÁNCHEZ, L. E. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. 2ª edição. Oficina de Textos. 530 p. São Paulo. 2013

SCHORSCHER, H. D.; SHEA, M. E. The regional geology of the Poços de Caldas alkaline complex: mineralogy and geochemistry of selected nepheline syenites and phonolites. Journal of Geochemical Exploration. V. 45. 25-51 p. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 1992.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Sensoriamento Remoto e Geofísica – GeoSGB. Acesso em 24 de dezembro de 2020. Disponível em: < <https://geoportal.cprm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=ab9142d362c24941840132959df3a179> >

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Catálogo de Projetos Aerogeofísicos. Acesso em 24 de dezembro de 2020. Disponível em: < <https://www.cprm.gov.br/aero/2000/aero2000.htm> >

ULBRICH, H. H. G. J. A Petrografia, a Estrutura e o Quimismo de Nefelina Sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo. 534 p. 1984

ULBRICH, H. H. G. J.; GOMES, C. B. Alkaline Rocks From Continental Brazil. Earth-Science Reviews. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. V. 17. 135-154 p. 1981.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Abandoned mine site characterization and cleanup handbook. 2000. 129p. Seattle, WA, EUA.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Technical Document. Acid Mine Drainage Prediction. 1994. 48p. Washington, DC, EUA.

VEIGA, M. M. da; SILVA, A. R. B. da; HINTON, J. J. O garimpo de ouro na Amazônia: aspectos tecnológicos, ambientais e sociais. CETEM/MCT, 2002.

WANG, L. K.; SUNG WANG, M.; HUNG, Y.T.; SHAMMAS, N. K. Natural Resources and Control Processes. Handbook of Environmental Engineering. Springer. 633p. 2016.

### Apêndice A – Dados Coletados por Gamaespectrometria

| ID | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)   | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|----|----------|-----------|----------|---------|-----------|---------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 1  | 219407,8 | 4649489   | 1383,5   | 0,09949 | 2,98468   | 5,20647 | 0,12038       | 19,07059     | 0,67207       | 89,12908    | 1,33458       |
| 2  | 219407,8 | 4649519   | 1376,4   | 0,34661 | 1,03984   | 1,03984 | 0,2401        | 208,1669     | 1,50122       | 71,18584    | 2,36312       |
| 3  | 219406   | 4649532   | 1381,2   | 0,17339 | 5,20164   | 5,20164 | 0,15078       | 57,52295     | 0,98511       | 145,9727    | 1,89088       |
| 4  | 219405,4 | 4649556   | 1379,2   | 0,1513  | 4,53899   | 4,53899 | 0,14165       | 59,59412     | 0,89674       | 92,6806     | 1,6359        |
| 5  | 219407,2 | 4649554   | 1379,7   | 0,45734 | 1,37201   | 1,37201 | 0,30249       | 273,3417     | 1,93255       | 114,4758    | 3,10968       |
| 6  | 219406,9 | 4649572   | 1380,9   | 0,40206 | 1,20618   | 1,20618 | 0,26821       | 232,5777     | 1,72399       | 108,4413    | 2,79937       |
| 7  | 219408,2 | 4649580   | 1378,9   | 0,18226 | 5,46767   | 5,46767 | 0,16297       | 80,54049     | 1,06314       | 102,6314    | 1,90719       |
| 8  | 219409,4 | 4649592   | 1379,2   | 0,43184 | 1,29551   | 1,29551 | 0,27476       | 250,2387     | 1,76092       | 121,3205    | 2,87052       |
| 9  | 219411,2 | 4649581   | 1380,3   | 0,16566 | 4,96971   | 4,96971 | 0,15149       | 67,76228     | 0,96768       | 96,83121    | 1,75309       |
| 10 | 219410,8 | 4649559   | 1384,6   | 0,33067 | 9,92007   | 9,92007 | 0,22343       | 176,5521     | 1,40705       | 114,0294    | 2,35566       |
| 11 | 219410,8 | 4649517   | 1392,1   | 0,25964 | 7,7891    | 7,7891  | 0,20493       | 132,8783     | 1,24345       | 85,95279    | 2,07135       |
| 12 | 219413,3 | 4649502   | 1378,6   | 0,19571 | 5,87131   | 5,87131 | 0,18204       | 83,91013     | 1,11756       | 99,05094    | 1,97549       |
| 13 | 219414,9 | 4649533   | 1378,1   | 0,13479 | 4,04361   | 4,04361 | 0,1433        | 43,85172     | 0,82227       | 79,24487    | 1,50543       |
| 14 | 219416,1 | 4649566   | 1379,7   | 0,26003 | 7,80083   | 7,80083 | 0,20522       | 117,8497     | 1,242         | 118,4652    | 2,15852       |
| 15 | 219420,1 | 4649569   | 1379,7   | 0,25893 | 7,76791   | 7,76791 | 0,22144       | 124,2494     | 1,34602       | 102,281     | 2,29244       |
| 16 | 219419,1 | 4649544   | 1380,8   | 0,24951 | 7,48532   | 7,48532 | 0,20527       | 122,7945     | 1,27469       | 98,15511    | 2,17664       |
| 17 | 219418,3 | 4649519   | 1380,9   | 0,25037 | 7,51121   | 7,51121 | 0,20854       | 120,7075     | 1,26267       | 97,41532    | 2,15329       |
| 18 | 219417,6 | 4649495   | 1376,8   | 0,19924 | 5,9771    | 5,9771  | 0,17229       | 79,00667     | 1,09459       | 125,8168    | 2,00266       |
| 19 | 219419,6 | 4649474   | 1374,3   | 0,27546 | 8,26371   | 8,26371 | 0,20549       | 137,1911     | 1,28428       | 110,8522    | 2,19378       |
| 20 | 219421,6 | 4649500   | 1377,2   | 0,19355 | 5,80637   | 5,80637 | 0,15985       | 81,76301     | 0,99216       | 98,61594    | 1,76242       |
| 21 | 219423   | 4649532   | 1379,5   | 0,29031 | 8,70932   | 8,70932 | 0,22092       | 129,5518     | 1,37116       | 149,0095    | 2,42152       |

| ID | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)   | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|----|----------|-----------|----------|---------|-----------|---------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 22 | 219424,2 | 4649563   | 1381,5   | 0,30033 | 9,00984   | 9,00984 | 0,21439       | 151,5144     | 1,36639       | 126,8018    | 2,34331       |
| 23 | 219424,5 | 4649603   | 1380,2   | 0,26627 | 7,98823   | 7,98823 | 0,20303       | 142,5476     | 1,27908       | 88,8104     | 2,12603       |
| 24 | 219427,2 | 4649629   | 1382     | 0,12608 | 3,7823    | 3,7823  | 0,11855       | 36,04786     | 0,75803       | 108,8532    | 1,47788       |
| 25 | 219429,7 | 4649617   | 1376,2   | 0,33395 | 1,00184   | 1,00184 | 0,22982       | 186,7687     | 1,46104       | 101,387     | 2,40509       |
| 26 | 219427,9 | 4649583   | 1379,1   | 0,18648 | 5,5944    | 5,5944  | 0,17495       | 72,99098     | 1,08547       | 116,7966    | 1,98082       |
| 27 | 219426,2 | 4649548   | 1383     | 0,24508 | 7,35232   | 7,35232 | 0,20133       | 121,1195     | 1,24717       | 94,23479    | 2,11659       |
| 28 | 219424,4 | 4649511   | 1379,4   | 0,24598 | 7,37936   | 7,37936 | 0,19887       | 109,1686     | 1,25225       | 128,1344    | 2,21731       |
| 29 | 219422,9 | 4649472   | 1376,3   | 0,17085 | 5,12552   | 5,12552 | 0,16837       | 56,59302     | 1,01011       | 114,1546    | 1,88172       |
| 30 | 219421   | 4649438   | 1374,1   | 0,25578 | 7,67338   | 7,67338 | 0,2124        | 116,3886     | 1,29084       | 113,5256    | 2,2404        |
| 31 | 219421   | 4649380   | 1374,9   | 0,13268 | 3,98028   | 3,98028 | 0,13382       | 45,13333     | 0,83251       | 88,86614    | 1,55309       |
| 32 | 219422,6 | 4649410   | 1377,8   | 0,29892 | 8,96765   | 8,96765 | 0,21581       | 144,2942     | 1,35744       | 130,7031    | 2,35251       |
| 33 | 219424,7 | 4649440   | 1377,5   | 0,33268 | 9,98031   | 9,98031 | 0,23706       | 183,785      | 1,49964       | 95,88364    | 2,4502        |
| 34 | 219426,6 | 4649472   | 1376,3   | 0,24021 | 7,20625   | 7,20625 | 0,20009       | 114,8778     | 1,27415       | 104,4826    | 2,20093       |
| 35 | 219428,6 | 4649505   | 1377,8   | 0,4652  | 1,39559   | 1,39559 | 0,27249       | 291,3702     | 1,74851       | 91,158      | 2,74085       |
| 36 | 219431,2 | 4649548   | 1381,8   | 0,16877 | 5,06314   | 5,06314 | 0,14257       | 59,72561     | 0,94792       | 128,9073    | 1,79678       |
| 37 | 219432,9 | 4649580   | 1380,4   | 0,13782 | 4,13448   | 4,13448 | 0,12861       | 44,02429     | 0,82312       | 111,6447    | 1,58077       |
| 38 | 219435,4 | 4649561   | 1378,8   | 0,24457 | 7,33715   | 7,33715 | 0,16852       | 106,7876     | 1,14093       | 160,6233    | 2,08701       |
| 39 | 219433,8 | 4649530   | 1378,4   | 0,15287 | 4,58599   | 4,58599 | 0,13638       | 50,08258     | 0,87591       | 117,7886    | 1,666         |
| 40 | 219431,1 | 4649489   | 1376,2   | 0,31661 | 9,49829   | 9,49829 | 0,2257        | 178,6068     | 1,39619       | 77,25452    | 2,24084       |
| 41 | 219428,8 | 4649456   | 1375,5   | 0,19496 | 5,84895   | 5,84895 | 0,17207       | 83,52629     | 1,01642       | 80,54252    | 1,7557        |
| 42 | 219426,4 | 4649412   | 1375,2   | 0,19544 | 5,86309   | 5,86309 | 0,17571       | 85,42294     | 1,12506       | 102,6051    | 2,00506       |
| 43 | 219424,5 | 4649378   | 1375     | 0,19309 | 5,79273   | 5,79273 | 0,15306       | 75,63226     | 0,96262       | 114,1977    | 1,75257       |

| ID | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)   | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|----|----------|-----------|----------|---------|-----------|---------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 44 | 219421,6 | 4649331   | 1377,6   | 0,23435 | 7,03036   | 7,03036 | 0,20621       | 102,147      | 1,28496       | 120,4427    | 2,27548       |
| 45 | 219438,2 | 4649547   | 1381,2   | 0,1336  | 4,00807   | 4,00807 | 0,12673       | 56,3811      | 0,81564       | 71,96774    | 1,46123       |
| 46 | 219436,7 | 4649521   | 1377,5   | 0,18352 | 5,50573   | 5,50573 | 0,14285       | 68,45885     | 0,94725       | 131,8295    | 1,77284       |
| 47 | 219434,5 | 4649488   | 1380,1   | 0,17014 | 5,10432   | 5,10432 | 0,15112       | 73,40056     | 0,95921       | 87,71175    | 1,70131       |
| 48 | 219432,6 | 4649456   | 1378,8   | 0,2428  | 7,2841    | 7,2841  | 0,17805       | 116,2726     | 1,07762       | 89,27662    | 1,82236       |
| 49 | 219430,4 | 4649416   | 1377,8   | 0,16102 | 4,83059   | 4,83059 | 0,1406        | 60,05367     | 0,89861       | 101,4782    | 1,65714       |
| 50 | 219428   | 4649384   | 1377,1   | 0,20179 | 6,05371   | 6,05371 | 0,17245       | 81,66701     | 1,10457       | 123,4541    | 2,01443       |
| 51 | 219426   | 4649345   | 1379,1   | 0,23603 | 7,08077   | 7,08077 | 0,20108       | 95,1691      | 1,27399       | 148,1887    | 2,32055       |
| 52 | 219424,1 | 4649315   | 1379,9   | 0,39378 | 1,18135   | 1,18135 | 0,25542       | 230,1858     | 1,62926       | 95,01744    | 2,60954       |
| 53 | 219426,2 | 4649291   | 1380,2   | 0,21924 | 6,57718   | 6,57718 | 0,18856       | 94,22744     | 1,17711       | 117,8275    | 2,09581       |
| 54 | 219428   | 4649324   | 1380,8   | 0,23483 | 7,04492   | 7,04492 | 0,17646       | 94,27399     | 1,104         | 139,3211    | 1,99932       |
| 55 | 219430   | 4649361   | 1376,5   | 0,20356 | 6,10672   | 6,10672 | 0,19474       | 85,12144     | 1,17053       | 96,31979    | 2,05491       |
| 56 | 219431,9 | 4649393   | 1376,9   | 0,14876 | 4,46282   | 4,46282 | 0,13467       | 47,35928     | 0,8298        | 105,7601    | 1,56616       |
| 57 | 219434,1 | 4649432   | 1378     | 0,17484 | 5,2452    | 5,2452  | 0,14973       | 70,77226     | 0,95717       | 100,8521    | 1,73243       |
| 58 | 219435,4 | 4649461   | 1381,4   | 0,15181 | 4,55437   | 4,55437 | 0,15651       | 59,58394     | 0,97485       | 85,80354    | 1,76004       |
| 59 | 219437,5 | 4649493   | 1380,3   | 0,20251 | 6,07526   | 6,07526 | 0,17111       | 87,49179     | 1,00593       | 83,89752    | 1,73678       |
| 60 | 219439,9 | 4649527   | 1377,1   | 0,12251 | 3,67541   | 3,67541 | 0,1296        | 40,92057     | 0,82391       | 89,95272    | 1,55343       |
| 61 | 219442,5 | 4649512   | 1379,7   | 0,17318 | 5,19531   | 5,19531 | 0,16857       | 65,77331     | 0,97492       | 84,54997    | 1,73018       |
| 62 | 219440,9 | 4649483   | 1378,3   | 0,19177 | 5,753     | 5,753   | 0,16869       | 81,37643     | 1,03847       | 96,60448    | 1,8406        |
| 63 | 219438,7 | 4649454   | 1377,4   | 0,27789 | 8,33657   | 8,33657 | 0,20439       | 142,6251     | 1,2667        | 99,97362    | 2,12401       |
| 64 | 219436,8 | 4649422   | 1375     | 0,20921 | 6,27622   | 6,27622 | 0,1619        | 65,22208     | 1,06097       | 183,3992    | 2,05951       |
| 65 | 219434,9 | 4649394   | 1379,3   | 0,15265 | 4,57947   | 4,57947 | 0,13468       | 46,5287      | 0,84249       | 119,995     | 1,61607       |

| ID | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)   | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|----|----------|-----------|----------|---------|-----------|---------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 66 | 219433   | 4649359   | 1376,3   | 0,14052 | 4,21563   | 4,21563 | 0,13782       | 45,83978     | 0,85188       | 98,98639    | 1,60077       |
| 67 | 219430,3 | 4649318   | 1379,8   | 0,21987 | 6,59596   | 6,59596 | 0,19384       | 92,65707     | 1,17372       | 110,5948    | 2,07684       |
| 68 | 219435,6 | 4649349   | 1378,7   | 0,19172 | 5,75168   | 5,75168 | 0,16535       | 91,20406     | 1,06795       | 84,68863    | 1,85065       |
| 69 | 219437,8 | 4649379   | 1376,2   | 0,21806 | 6,54193   | 6,54193 | 0,18133       | 100,9385     | 1,13203       | 97,01426    | 1,96689       |
| 70 | 219439,7 | 4649410   | 1375,4   | 0,14745 | 4,42353   | 4,42353 | 0,15382       | 51,67962     | 0,96456       | 97,84522    | 1,79573       |
| 71 | 219441,4 | 4649432   | 1377     | 0,23567 | 7,07024   | 7,07024 | 0,1989        | 90,26643     | 1,19853       | 139,0127    | 2,17368       |
| 72 | 219441,8 | 4649405   | 1380     | 0,25096 | 7,52891   | 7,52891 | 0,20218       | 92,35123     | 1,22304       | 157,1844    | 2,24157       |
| 73 | 219443,8 | 4649457   | 1374,5   | 0,18578 | 5,57329   | 5,57329 | 0,171         | 70,73849     | 0,99171       | 92,86913    | 1,76122       |
| 74 | 219445,2 | 4649469   | 1378,2   | 0,1702  | 5,10591   | 5,10591 | 0,16439       | 67,28391     | 0,95022       | 76,17691    | 1,66117       |
| 75 | 219447,3 | 4649482   | 1376,6   | 0,18778 | 5,63335   | 5,63335 | 0,18988       | 72,8223      | 1,08903       | 85,43428    | 1,91424       |
| 76 | 219449,2 | 4649466   | 1378     | 0,19068 | 5,72037   | 5,72037 | 0,15838       | 78,22713     | 0,93513       | 88,91467    | 1,64378       |
| 77 | 219447,6 | 4649448   | 1376,2   | 0,17415 | 5,22458   | 5,22458 | 0,16476       | 63,43497     | 0,96185       | 94,22265    | 1,72846       |
| 78 | 219445,2 | 4649428   | 1376,2   | 0,19681 | 5,90427   | 5,90427 | 0,16657       | 85,30223     | 0,9684        | 73,3047     | 1,65341       |
| 79 | 219445,5 | 4649406   | 1377,4   | 0,16527 | 4,95819   | 4,95819 | 0,15765       | 62,4064      | 0,89678       | 73,10953    | 1,57375       |
| 80 | 219447,9 | 4649419   | 1376,4   | 0,16592 | 4,97763   | 4,97763 | 0,14739       | 63,94749     | 0,9308        | 101,0945    | 1,69844       |
| 81 | 219450,4 | 4649437   | 1378,8   | 0,20273 | 6,08202   | 6,08202 | 0,16204       | 87,91438     | 0,97688       | 92,43105    | 1,70399       |
| 82 | 219452,2 | 4649405   | 1379,8   | 0,21377 | 6,41319   | 6,41319 | 0,18266       | 84,94766     | 1,13261       | 127,8628    | 2,05347       |
| 83 | 219449,5 | 4649394   | 1378,3   | 0,1941  | 5,82288   | 5,82288 | 0,17518       | 74,94532     | 1,09758       | 120,8697    | 2,00528       |
| 84 | 219446,6 | 4649387   | 1381,3   | 0,20787 | 6,23604   | 6,23604 | 0,16587       | 85,08533     | 1,05489       | 123,9595    | 1,9124        |
| 85 | 219418,2 | 4649339   | 1378,2   | 0,16514 | 4,95435   | 4,95435 | 0,15609       | 57,23567     | 0,98699       | 116,7903    | 1,8511        |
| 86 | 219415,3 | 4649326   | 1375,8   | 0,18463 | 5,53877   | 5,53877 | 0,1698        | 65,19445     | 1,049         | 122,8862    | 1,94479       |
| 87 | 219412,2 | 4649318   | 1377,6   | 0,17046 | 5,11386   | 5,11386 | 0,16154       | 63,67996     | 0,98854       | 99,70782    | 1,79824       |

| ID  | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)   | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-----------|---------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 88  | 219408,8 | 4649317   | 1377,6   | 0,23174 | 6,9521    | 6,9521  | 0,2072        | 105,6281     | 1,30785       | 109,6595    | 2,28267       |
| 89  | 219405,3 | 4649324   | 1373,7   | 0,34155 | 1,02465   | 1,02465 | 0,26413       | 184,0133     | 1,70374       | 116,0792    | 2,82951       |
| 90  | 219402,3 | 4649320   | 1375,2   | 0,2433  | 7,29898   | 7,29898 | 0,19859       | 117,5658     | 1,28065       | 107,5591    | 2,21572       |
| 91  | 219400,2 | 4649292   | 1377,8   | 0,27228 | 8,16826   | 8,16826 | 0,19285       | 133,3787     | 1,20233       | 105,491     | 2,05114       |
| 92  | 219399   | 4649262   | 1374,2   | 0,29918 | 8,97552   | 8,97552 | 0,25703       | 150,8169     | 1,64322       | 121,9776    | 2,80105       |
| 93  | 219401,8 | 4649281   | 1373,1   | 0,14924 | 4,47726   | 4,47726 | 0,13795       | 57,48218     | 0,87939       | 87,23701    | 1,60305       |
| 94  | 219404,3 | 4649297   | 1376,8   | 0,2551  | 7,65289   | 7,65289 | 0,1864        | 109,8961     | 1,17967       | 137,0593    | 2,1052        |
| 95  | 219406,2 | 4649308   | 1376,9   | 0,30664 | 9,19923   | 9,19923 | 0,20823       | 143,739      | 1,30056       | 129,8778    | 2,24709       |
| 96  | 219409,2 | 4649300   | 1378,5   | 0,32538 | 9,76131   | 9,76131 | 0,24076       | 155,7325     | 1,53079       | 149,0353    | 2,65967       |
| 97  | 219407,8 | 4649288   | 1377,9   | 0,45515 | 1,36544   | 1,36544 | 0,29245       | 230,9123     | 1,89074       | 189,6519    | 3,24835       |
| 98  | 219405,4 | 4649269   | 1380,3   | 0,13584 | 4,07527   | 4,07527 | 0,1187        | 46,85149     | 0,7719        | 95,17593    | 1,44987       |
| 99  | 219402,9 | 4649249   | 1376,8   | 0,11148 | 3,34441   | 3,34441 | 0,10082       | 39,72549     | 0,64065       | 67,76863    | 1,18035       |
| 100 | 219401,2 | 4649236   | 1379,3   | 0,14483 | 4,3448    | 4,3448  | 0,13416       | 47,09688     | 0,84708       | 110,8093    | 1,6113        |
| 101 | 219402,6 | 4649213   | 1375,3   | 0,18069 | 5,42084   | 5,42084 | 0,16342       | 71,73842     | 1,00827       | 100,8746    | 1,8174        |
| 102 | 219404,5 | 4649226   | 1376,9   | 0,16969 | 5,0908    | 5,0908  | 0,15079       | 69,12071     | 0,93528       | 92,05511    | 1,67441       |
| 103 | 219406,6 | 4649239   | 1377     | 0,22821 | 6,8464    | 6,8464  | 0,20116       | 94,2596      | 1,20244       | 106,6978    | 2,11266       |
| 104 | 219408,4 | 4649256   | 1374,9   | 0,32429 | 9,72867   | 9,72867 | 0,22053       | 156,6129     | 1,37105       | 132,0419    | 2,35512       |
| 105 | 219411,2 | 4649277   | 1377,3   | 0,23407 | 7,02213   | 7,02213 | 0,1887        | 90,34612     | 1,16177       | 140,4093    | 2,11139       |
| 106 | 219413,2 | 4649293   | 1376,6   | 0,27818 | 8,34541   | 8,34541 | 0,2199        | 149,332      | 1,33208       | 67,92377    | 2,1528        |
| 107 | 219415,4 | 4649305   | 1377,5   | 0,23147 | 6,94408   | 6,94408 | 0,16994       | 102,7141     | 1,01826       | 92,65629    | 1,7518        |
| 108 | 219417,2 | 4649321   | 1376,5   | 0,16858 | 5,05747   | 5,05747 | 0,14391       | 54,39305     | 0,90702       | 124,3847    | 1,72087       |
| 109 | 219419,6 | 4649331   | 1375,5   | 0,25557 | 7,6672    | 7,6672  | 0,20339       | 116,4186     | 1,26331       | 115,9938    | 2,1949        |

| ID  | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)    | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 110 | 219420,3 | 4649300   | 1376,8   | 0,19069 | 5,72057   | 4,86272  | 0,17479       | 75,42501     | 1,10384       | 113,9037    | 2,00327       |
| 111 | 219418,1 | 4649286   | 1379,1   | 0,20337 | 6,10124   | 4,26855  | 0,17509       | 72,6516      | 1,12553       | 150,993     | 2,11587       |
| 112 | 219416,2 | 4649270   | 1378,6   | 0,22591 | 6,77734   | 8,66973  | 0,20732       | 92,74557     | 1,25486       | 119,0433    | 2,22945       |
| 113 | 219414   | 4649257   | 1378,6   | 0,29104 | 8,73111   | 9,2633   | 0,22831       | 134,9908     | 1,42688       | 138,6043    | 2,49796       |
| 114 | 219411,1 | 4649239   | 1381,4   | 0,33627 | 1,0088    | 10,68902 | 0,23718       | 144,6641     | 1,47402       | 182,7031    | 2,62655       |
| 115 | 219408,3 | 4649224   | 1377,8   | 0,52167 | 1,565     | 9,87538  | 0,31299       | 135,6546     | 2,00225       | 539,407     | 4,00822       |
| 116 | 219404,9 | 4649201   | 1376,6   | 0,15038 | 4,51126   | 3,6638   | 0,14547       | 62,02451     | 0,92513       | 86,26682    | 1,66911       |
| 117 | 219408,1 | 4649189   | 1377,9   | 0,38081 | 1,14243   | 10,72593 | 0,26062       | 200,0839     | 1,65833       | 150,2192    | 2,82179       |
| 118 | 219410,4 | 4649206   | 1378,8   | 0,29393 | 8,81805   | 9,01555  | 0,21795       | 98,39339     | 1,34689       | 221,1448    | 2,54451       |
| 119 | 219413   | 4649226   | 1378,2   | 0,22782 | 6,83452   | 8,59521  | 0,18806       | 102,7583     | 1,14407       | 100,0064    | 1,98249       |
| 120 | 219415,6 | 4649245   | 1378,6   | 0,24546 | 7,36368   | 9,66492  | 0,18621       | 129,3469     | 1,13125       | 63,16731    | 1,84696       |
| 121 | 219418,7 | 4649264   | 1378,7   | 0,21176 | 6,35294   | 4,40773  | 0,16997       | 82,72869     | 1,10163       | 142,8454    | 2,0378        |
| 122 | 219421,4 | 4649277   | 1377,8   | 0,20847 | 6,25409   | 3,52045  | 0,15336       | 74,11902     | 1,00325       | 155,3252    | 1,89184       |
| 123 | 219424,3 | 4649289   | 1378,1   | 0,26806 | 8,04195   | 5,3302   | 0,21704       | 128,8398     | 1,42165       | 137,0789    | 2,50195       |
| 124 | 219427,6 | 4649300   | 1377,5   | 0,22633 | 6,78999   | 9,22671  | 0,17428       | 108,8706     | 1,05411       | 78,34205    | 1,77977       |
| 125 | 219431,9 | 4649325   | 1377,5   | 0,26684 | 8,00531   | 8,44945  | 0,19974       | 125,3157     | 1,24802       | 120,5071    | 2,17129       |
| 126 | 219436,6 | 4649344   | 1374,9   | 0,41016 | 1,23047   | 10,63616 | 0,24784       | 241,0486     | 1,58574       | 107,0688    | 2,5722        |
| 127 | 219441,2 | 4649358   | 1374,4   | 0,25135 | 7,54064   | 10,55007 | 0,19232       | 120,534      | 1,15787       | 89,94063    | 1,95784       |
| 128 | 219446,3 | 4649373   | 1372,9   | 0,23623 | 7,08704   | 11,96928 | 0,20347       | 104,8765     | 1,19212       | 90,2891     | 2,03412       |
| 129 | 219449,9 | 4649384   | 1374,3   | 0,22433 | 6,73001   | 8,35241  | 0,18676       | 87,84851     | 1,13498       | 132,0869    | 2,05285       |
| 130 | 219453,2 | 4649389   | 1372,2   | 0,21358 | 6,40739   | 8,731    | 0,18747       | 85,59428     | 1,12878       | 116,7779    | 2,0219        |
| 131 | 219454,6 | 4649363   | 1381,3   | 0,27415 | 8,22455   | 9,40715  | 0,21065       | 121,2187     | 1,29943       | 137,274     | 2,29137       |

| ID  | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)    | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 132 | 219451   | 4649355   | 1378,9   | 0,27092 | 8,1277    | 8,13148  | 0,21408       | 132,105      | 1,34546       | 114,7183    | 2,315         |
| 133 | 219446,9 | 4649344   | 1380,2   | 0,2068  | 6,20386   | 8,61449  | 0,18834       | 86,26464     | 1,13102       | 103,2402    | 1,99921       |
| 134 | 219442,5 | 4649329   | 1378,6   | 0,27023 | 8,10687   | 5,65181  | 0,21841       | 128,9555     | 1,41993       | 130,1687    | 2,48405       |
| 135 | 219437,1 | 4649317   | 1378     | 0,17152 | 5,14573   | 3,10138  | 0,14782       | 81,90789     | 0,97272       | 77,46417    | 1,69632       |
| 136 | 219433,3 | 4649308   | 1378,7   | 0,17339 | 5,20177   | 3,78691  | 0,16185       | 72,89209     | 1,042         | 99,05882    | 1,87835       |
| 137 | 219431,2 | 4649283   | 1378,5   | 0,17128 | 5,1385    | 4,58899  | 0,15942       | 64,93655     | 1,00263       | 106,0326    | 1,83681       |
| 138 | 219427,8 | 4649280   | 1377,7   | 0,19706 | 5,91187   | 6,76284  | 0,17954       | 84,97526     | 1,10325       | 95,61404    | 1,94211       |
| 139 | 219423,6 | 4649277   | 1381     | 0,19228 | 5,76842   | 4,57504  | 0,17446       | 72,2178      | 1,10943       | 126,5106    | 2,0466        |
| 140 | 219420,5 | 4649259   | 1379,5   | 0,18364 | 5,50908   | 3,33267  | 0,16692       | 66,15437     | 1,08743       | 134,0262    | 2,04352       |
| 141 | 219417,9 | 4649243   | 1379,9   | 0,19557 | 5,8672    | 3,10959  | 0,16216       | 64,09972     | 1,06296       | 159,3949    | 2,03962       |
| 142 | 219415,5 | 4649226   | 1381,7   | 0,19655 | 5,89659   | 8,3495   | 0,17357       | 84,28851     | 1,03955       | 85,39318    | 1,80712       |
| 143 | 219413,2 | 4649209   | 1378,9   | 0,21915 | 6,57441   | 8,67246  | 0,21252       | 94,61812     | 1,28357       | 93,56599    | 2,23081       |
| 144 | 219410,9 | 4649196   | 1379,4   | 0,28752 | 8,62548   | 9,97957  | 0,2126        | 132,8463     | 1,31002       | 125,6864    | 2,26938       |
| 145 | 219409   | 4649179   | 1381     | 0,35052 | 1,05156   | 10,17298 | 0,23245       | 171,8764     | 1,46683       | 151,5398    | 2,52926       |
| 146 | 219409,2 | 4649160   | 1381,4   | 0,17131 | 5,13922   | 10,08119 | 0,17007       | 60,30301     | 0,96455       | 85,0733     | 1,71924       |
| 147 | 219411,8 | 4649170   | 1381,3   | 0,21068 | 6,32028   | 11,26249 | 0,19458       | 80,05177     | 1,12417       | 101,2987    | 1,98692       |
| 148 | 219414,9 | 4649182   | 1381,8   | 0,26966 | 8,08971   | 9,03906  | 0,20868       | 134,025      | 1,29353       | 101,848     | 2,1923        |
| 149 | 219417,6 | 4649192   | 1381,6   | 0,22476 | 6,74284   | 10,13837 | 0,19084       | 98,94855     | 1,13256       | 90,31699    | 1,94418       |
| 150 | 219419,9 | 4649203   | 1383,2   | 0,28008 | 8,40236   | 7,0723   | 0,22306       | 125,0224     | 1,42114       | 150,0681    | 2,52341       |
| 151 | 219422,6 | 4649213   | 1382,2   | 0,25792 | 7,73747   | 9,9062   | 0,20032       | 134,7177     | 1,21923       | 71,36671    | 1,99605       |
| 152 | 219425,6 | 4649231   | 1380,5   | 0,3258  | 9,77394   | 11,45536 | 0,21769       | 196,7793     | 1,32748       | 42,26357    | 2,00305       |
| 153 | 219426,3 | 4649254   | 1376,5   | 0,25925 | 7,77743   | 5,58851  | 0,20849       | 133,0878     | 1,34975       | 102,3609    | 2,2904        |

| ID  | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)    | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 154 | 219429,5 | 4649264   | 1378,5   | 0,15653 | 4,69587   | 2,94165  | 0,13751       | 59,81802     | 0,89348       | 100,4301    | 1,64592       |
| 155 | 219432,2 | 4649273   | 1381,1   | 0,14566 | 4,36977   | 2,6414   | 0,14699       | 52,11314     | 0,95513       | 99,65749    | 1,78244       |
| 156 | 219435   | 4649282   | 1379,6   | 0,15889 | 4,76669   | 4,33553  | 0,15476       | 58,11633     | 0,96556       | 101,3122    | 1,77606       |
| 157 | 219437,3 | 4649286   | 1379,7   | 0,16737 | 5,021     | 3,5841   | 0,15815       | 62,9866      | 1,0141        | 113,0055    | 1,87795       |
| 158 | 219439,4 | 4649293   | 1380,6   | 0,20469 | 6,14081   | 6,11579  | 0,1783        | 87,97917     | 1,11256       | 106,7218    | 1,97388       |
| 159 | 219442   | 4649298   | 1381,4   | 0,24902 | 7,47072   | 9,82504  | 0,21376       | 114,8953     | 1,29738       | 105,3852    | 2,23611       |
| 160 | 219442,3 | 4649271   | 1377,2   | 0,20266 | 6,07977   | 5,07377  | 0,1756        | 87,76569     | 1,11881       | 115,3839    | 2,0064        |
| 161 | 219439,6 | 4649268   | 1380     | 0,20619 | 6,18573   | 5,53776  | 0,17526       | 73,91152     | 1,09938       | 144,1521    | 2,04928       |
| 162 | 219437,3 | 4649265   | 1377,1   | 0,15867 | 4,76015   | 3,00683  | 0,15025       | 53,79256     | 0,97089       | 122,9757    | 1,84563       |
| 163 | 219434,6 | 4649260   | 1378     | 0,12984 | 3,89533   | 2,38415  | 0,12428       | 39,97883     | 0,7987        | 103,8219    | 1,53458       |
| 164 | 219432,3 | 4649257   | 1378,7   | 0,14134 | 4,24008   | 2,57974  | 0,13364       | 51,72261     | 0,86957       | 97,13232    | 1,62          |
| 165 | 219429,1 | 4649255   | 1378,9   | 0,20353 | 6,10579   | 3,65439  | 0,19395       | 90,45829     | 1,27499       | 113,4827    | 2,28138       |
| 166 | 219426,1 | 4649251   | 1377,1   | 0,19303 | 5,79081   | 4,70017  | 0,16733       | 84,05687     | 1,07058       | 107,3774    | 1,91687       |
| 167 | 219423,5 | 4649247   | 1377,9   | 0,24978 | 7,49347   | 11,00728 | 0,20274       | 124,9215     | 1,21567       | 80,56503    | 2,02604       |
| 168 | 219421,2 | 4649243   | 1378,3   | 0,19386 | 5,81582   | 4,64626  | 0,17899       | 68,43829     | 1,13503       | 142,1733    | 2,1302        |
| 169 | 219418,2 | 4649238   | 1381,1   | 0,2174  | 6,52193   | 5,39858  | 0,18128       | 78,70078     | 1,14874       | 157,9796    | 2,14995       |
| 170 | 219411   | 4649134   | 1380,6   | 0,1562  | 4,68593   | 4,66083  | 0,1576        | 56,48811     | 0,97674       | 106,6928    | 1,81102       |
| 171 | 219413,5 | 4649146   | 1382,3   | 0,18419 | 5,52565   | 5,93062  | 0,18194       | 72,57294     | 1,12271       | 108,9518    | 2,03637       |
| 172 | 219416,4 | 4649156   | 1382,1   | 0,28663 | 8,59883   | 9,87698  | 0,20801       | 138,2456     | 1,28807       | 119,966     | 2,21716       |
| 173 | 219418,8 | 4649168   | 1381,6   | 0,24765 | 7,4295    | 6,01563  | 0,20515       | 120,4136     | 1,31326       | 112,1764    | 2,27021       |
| 174 | 219421,2 | 4649181   | 1381,9   | 0,17998 | 5,39947   | 4,54656  | 0,1427        | 75,31584     | 0,90446       | 101,1039    | 1,62366       |
| 175 | 219423,7 | 4649189   | 1383,7   | 0,20497 | 6,149     | 4,70652  | 0,17687       | 92,83994     | 1,13831       | 105,765     | 2,01245       |

| ID  | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)    | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 176 | 219425,9 | 4649200   | 1384,1   | 0,16982 | 5,09463   | 3,244    | 0,15865       | 70,39491     | 1,0342        | 100,6026    | 1,87368       |
| 177 | 219428,5 | 4649213   | 1379,8   | 0,15754 | 4,72616   | 2,91454  | 0,12489       | 57,99515     | 0,81161       | 108,6594    | 1,51277       |
| 178 | 219430,7 | 4649224   | 1377,8   | 0,1388  | 4,16407   | 3,17352  | 0,13163       | 48,70681     | 0,83678       | 94,94752    | 1,5626        |
| 179 | 219433,2 | 4649233   | 1379,6   | 0,2947  | 8,84113   | 8,92068  | 0,23002       | 151,1201     | 1,44182       | 111,3328    | 2,43625       |
| 180 | 219435,9 | 4649244   | 1379,7   | 0,18864 | 5,65907   | 4,51189  | 0,16229       | 76,89824     | 1,03755       | 116,5677    | 1,89034       |
| 181 | 219438,2 | 4649254   | 1379,4   | 0,16447 | 4,93408   | 5,97775  | 0,15259       | 58,30078     | 0,9251        | 102,2733    | 1,69969       |
| 182 | 219440,2 | 4649262   | 1378,2   | 0,1651  | 4,95314   | 3,20274  | 0,16021       | 64,27629     | 1,03969       | 107,9611    | 1,91625       |
| 183 | 219442,4 | 4649264   | 1379,2   | 0,22473 | 6,74199   | 8,79972  | 0,17653       | 95,94881     | 1,0706        | 112,7713    | 1,89113       |
| 184 | 219442,5 | 4649234   | 1379,3   | 0,3149  | 9,44708   | 10,74577 | 0,2447        | 149,2046     | 1,51464       | 144,5381    | 2,62716       |
| 185 | 219440,3 | 4649226   | 1382,9   | 0,22236 | 6,67071   | 8,21016  | 0,17913       | 105,8684     | 1,09889       | 90,45884    | 1,8853        |
| 186 | 219437,8 | 4649218   | 1381,8   | 0,21945 | 6,58357   | 4,59082  | 0,19746       | 87,86983     | 1,27868       | 144,6915    | 2,35053       |
| 187 | 219435,4 | 4649209   | 1380     | 0,21499 | 6,44968   | 3,85325  | 0,1847        | 76,11534     | 1,20427       | 168,8464    | 2,28287       |
| 188 | 219433,2 | 4649202   | 1380,1   | 0,14222 | 4,26664   | 2,30209  | 0,13065       | 52,17986     | 9,921428      | 99,21428    | 1,60737       |
| 189 | 219430,7 | 4649190   | 1380,5   | 0,18033 | 5,40991   | 4,24356  | 0,16292       | 74,01099     | 1,0418        | 108,6882    | 1,89319       |
| 190 | 219428,3 | 4649181   | 1380,6   | 0,22031 | 6,60917   | 3,6824   | 0,18485       | 90,94695     | 1,21766       | 136,0902    | 2,22138       |
| 191 | 219425,6 | 4649171   | 1380,2   | 0,17524 | 5,25708   | 3,45752  | 0,15767       | 70,39481     | 1,02627       | 113,769     | 1,88624       |
| 192 | 219422,3 | 4649158   | 1381,6   | 0,19026 | 5,70792   | 3,06404  | 0,16992       | 79,57816     | 1,12601       | 116,5805    | 2,04996       |
| 193 | 219419,8 | 4649141   | 1380,2   | 0,18571 | 5,57128   | 4,9738   | 0,1587        | 80,13521     | 1,00391       | 100,2419    | 1,79024       |
| 194 | 219417,5 | 4649126   | 1382,7   | 0,21286 | 6,38565   | 6,38586  | 0,17536       | 85,92358     | 1,09333       | 123,3765    | 1,97583       |
| 195 | 219415,7 | 4649112   | 1383     | 0,19577 | 5,87301   | 4,67763  | 0,19057       | 81,51595     | 1,21579       | 112,4466    | 2,19339       |
| 196 | 219413,9 | 4649094   | 1383,9   | 0,20603 | 6,18075   | 8,08976  | 0,18873       | 80,67464     | 1,13943       | 119,4891    | 2,05716       |
| 197 | 219416,1 | 4649091   | 1383,7   | 0,20989 | 6,29661   | 7,55269  | 0,17331       | 51,83499     | 1,03085       | 188,9321    | 2,02665       |

| ID  | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)    | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 198 | 219418   | 4649103   | 1382,7   | 0,47156 | 1,41467   | 10,85991 | 0,28327       | 279,9627     | 1,8301        | 127,1621    | 2,96475       |
| 199 | 219420,3 | 4649115   | 1381,8   | 0,16083 | 4,82501   | 3,2675   | 0,15623       | 61,27564     | 1,01031       | 109,9298    | 1,8744        |
| 200 | 219423,1 | 4649129   | 1384,2   | 0,17223 | 5,16678   | 2,72874  | 0,15112       | 64,43978     | 0,99581       | 123,1857    | 1,86322       |
| 201 | 219425,8 | 4649139   | 1380,8   | 0,16402 | 4,92049   | 3,15688  | 0,14733       | 60,34892     | 0,95327       | 116,4384    | 1,77911       |
| 202 | 219425   | 4649148   | 1405,6   | 0,15402 | 4,62053   | 2,70028  | 0,13755       | 59,09363     | 0,89826       | 104,4592    | 1,66535       |
| 203 | 219430,8 | 4649162   | 1379,2   | 0,13185 | 3,95552   | 2,44916  | 0,12198       | 39,12593     | 0,78201       | 103,185     | 1,50777       |
| 204 | 219433,8 | 4649175   | 1379     | 0,19091 | 5,72731   | 4,17042  | 0,16523       | 81,9636      | 1,06281       | 104,103     | 1,90094       |
| 205 | 219436,3 | 4649185   | 1381     | 0,18983 | 5,69491   | 4,24516  | 0,14881       | 81,42995     | 0,95893       | 105,024     | 1,72099       |
| 206 | 219438,7 | 4649196   | 1377,3   | 0,16713 | 5,01393   | 3,29321  | 0,14765       | 57,9924      | 0,95125       | 124,4562    | 1,79344       |
| 207 | 219440,6 | 4649204   | 1380,5   | 0,18094 | 5,42823   | 3,13156  | 0,15065       | 61,66166     | 0,98308       | 144,013     | 1,87347       |
| 208 | 219442,6 | 4649210   | 1382,9   | 0,31516 | 9,45467   | 11,26855 | 0,24081       | 129,7947     | 1,47669       | 181,0324    | 2,65868       |
| 209 | 219442   | 4649178   | 1376,7   | 0,21338 | 6,40132   | 11,10052 | 0,18763       | 92,73447     | 1,09559       | 83,51509    | 1,88059       |
| 210 | 219439,1 | 4649166   | 1377,5   | 0,15977 | 4,79316   | 3,42275  | 0,1514        | 59,80755     | 0,97252       | 106,5629    | 1,80144       |
| 211 | 219436,4 | 4649154   | 1379,9   | 0,14362 | 4,30867   | 2,8394   | 0,128         | 50,36724     | 0,82389       | 102,0832    | 1,5456        |
| 212 | 219434,1 | 4649144   | 1378,1   | 0,17257 | 5,17724   | 5,10784  | 0,17446       | 69,40036     | 1,08581       | 99,06015    | 1,95778       |
| 213 | 219431,8 | 4649128   | 1377     | 0,12719 | 3,81561   | 2,13784  | 0,11576       | 38,32992     | 0,74871       | 100,0599    | 1,44091       |
| 214 | 219428,9 | 4649116   | 1378,4   | 0,13183 | 3,95503   | 2,60855  | 0,11551       | 44,10989     | 0,74009       | 94,14767    | 1,39506       |
| 215 | 219426,5 | 4649104   | 1378,8   | 0,12907 | 3,87215   | 2,43456  | 0,11644       | 42,64967     | 0,74993       | 91,42915    | 1,41609       |
| 216 | 219424,2 | 4649093   | 1378,6   | 0,17029 | 5,10873   | 2,66042  | 0,14095       | 59,30569     | 0,92702       | 129,652     | 1,75718       |
| 217 | 219422,3 | 4649081   | 1381,4   | 0,21321 | 6,39633   | 5,67786  | 0,1843        | 91,68527     | 1,16599       | 116,8368    | 2,08441       |
| 218 | 219422,7 | 4649049   | 1381,8   | 0,14894 | 4,46808   | 2,25768  | 0,13307       | 77,45855     | 0,89022       | 57,64913    | 1,51764       |
| 219 | 219426,3 | 4649066   | 1378,2   | 0,14672 | 4,40175   | 2,87677  | 0,13461       | 54,7159      | 0,87147       | 99,13019    | 1,61605       |

| ID  | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)    | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 220 | 219429   | 4649077   | 1377,2   | 0,13492 | 4,04762   | 2,36588  | 0,12076       | 41,5037      | 0,78006       | 106,7274    | 1,50052       |
| 221 | 219431,5 | 4649088   | 1377     | 0,17085 | 5,12554   | 3,95723  | 0,15493       | 64,99413     | 0,98762       | 110,8358    | 1,81914       |
| 222 | 219433,8 | 4649099   | 1377     | 0,17552 | 5,26545   | 3,64861  | 0,16299       | 66,94754     | 1,04972       | 116,596     | 1,94121       |
| 223 | 219436,6 | 4649114   | 1375,1   | 0,18271 | 5,48131   | 5,05868  | 0,17233       | 69,16322     | 1,07912       | 116,9026    | 1,98149       |
| 224 | 219439,2 | 4649127   | 1379,3   | 0,23169 | 6,95065   | 12,24998 | 0,19339       | 95,02962     | 1,12239       | 102,3724    | 1,95235       |
| 225 | 219438,2 | 4649081   | 1378,7   | 0,2295  | 6,88486   | 10,6578  | 0,18597       | 100,9615     | 1,1014        | 93,83942    | 1,8947        |
| 226 | 219435   | 4649071   | 1379,4   | 0,36013 | 1,08038   | 11,47721 | 0,24114       | 191,0947     | 1,50829       | 116,4617    | 2,51517       |
| 227 | 219432,3 | 4649060   | 1378,8   | 0,1742  | 5,22609   | 3,47735  | 0,14271       | 63,24635     | 0,92121       | 122,1298    | 1,72141       |
| 228 | 219430,3 | 4649050   | 1378,8   | 0,14573 | 4,37177   | 2,26196  | 0,12049       | 52,15269     | 0,79292       | 103,1086    | 1,48912       |
| 229 | 219428,4 | 4649041   | 1376,7   | 0,16408 | 4,92239   | 2,1322   | 0,13229       | 56,19067     | 0,87993       | 128,7059    | 1,67652       |
| 230 | 219426,6 | 4649033   | 1379,7   | 0,22646 | 6,79387   | 4,68293  | 0,19446       | 99,84494     | 1,26519       | 129,994     | 2,27382       |
| 231 | 219424,6 | 4649021   | 1380,5   | 0,12368 | 3,71052   | 2,71933  | 0,11528       | 47,90976     | 0,73822       | 73,29536    | 1,34709       |
| 232 | 219425,9 | 4648993   | 1380,9   | 0,11054 | 3,31617   | 2,88741  | 0,10779       | 43,07094     | 0,67873       | 61,66548    | 1,22896       |
| 233 | 219428,3 | 4649007   | 1378,4   | 0,25181 | 7,55426   | 5,03934  | 0,19624       | 103,7015     | 1,27566       | 159,2705    | 2,32995       |
| 234 | 219431,3 | 4649022   | 1379,9   | 0,14373 | 4,31187   | 1,77448  | 0,12849       | 48,05851     | 0,85696       | 110,476     | 1,63653       |
| 235 | 219433,3 | 4649033   | 1378,4   | 0,17487 | 5,2462    | 3,51302  | 0,14128       | 66,54755     | 0,91182       | 114,1923    | 1,68191       |
| 236 | 219435,4 | 4649043   | 1380,5   | 0,27972 | 8,39149   | 10,99018 | 0,19615       | 141,1604     | 1,19016       | 88,60709    | 1,9782        |
| 237 | 219438,3 | 4649056   | 1380     | 0,30081 | 9,02426   | 11,21247 | 0,23468       | 135,2283     | 1,43711       | 139,3835    | 2,51051       |
| 238 | 219438,6 | 4649023   | 1379,6   | 0,28169 | 8,45072   | 10,97747 | 0,21332       | 125,1331     | 1,2957        | 128,6228    | 2,26123       |
| 239 | 219436,3 | 4649014   | 1379     | 0,20637 | 6,19122   | 3,54335  | 0,17168       | 67,32429     | 1,11785       | 170,7558    | 2,1484        |
| 240 | 219433,9 | 4649001   | 1378,1   | 0,1534  | 4,6019    | 2,32827  | 0,14288       | 56,14715     | 0,94567       | 108,4136    | 1,77371       |
| 241 | 219431,8 | 4648992   | 1379,7   | 0,16792 | 5,03759   | 3,2598   | 0,14995       | 62,89471     | 0,9693        | 115,8932    | 1,79937       |

| ID  | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)    | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 242 | 219429,4 | 4648980   | 1380,9   | 0,26864 | 8,05906   | 9,24163  | 0,20297       | 131,0507     | 1,2545        | 107,6228    | 2,14325       |
| 243 | 219427   | 4648966   | 1380,3   | 0,1286  | 3,85793   | 2,77459  | 0,12334       | 49,84092     | 0,79102       | 75,49097    | 1,4419        |
| 244 | 219427,4 | 4648935   | 1380,5   | 0,11076 | 3,32266   | 2,42012  | 0,11223       | 41,96326     | 0,71497       | 69,54288    | 1,30998       |
| 245 | 219429,6 | 4648945   | 1382,8   | 0,24609 | 7,38261   | 4,71776  | 0,2153        | 112,9398     | 1,40813       | 131,4669    | 2,49628       |
| 246 | 219431,7 | 4648953   | 1380,5   | 0,2492  | 7,47603   | 6,606    | 0,18624       | 105,6065     | 1,17817       | 141,052     | 2,1158        |
| 247 | 219434,5 | 4648967   | 1379,9   | 0,15389 | 4,6166    | 3,13732  | 0,13802       | 52,19049     | 0,885         | 112,6778    | 1,67146       |
| 248 | 219437,1 | 4648976   | 1380,4   | 0,22529 | 6,75884   | 5,89308  | 0,18452       | 88,54658     | 1,16643       | 144,0899    | 2,13652       |
| 249 | 219439   | 4648980   | 1379,7   | 0,23056 | 6,91675   | 5,25664  | 0,17389       | 91,82286     | 1,11448       | 152,4056    | 2,04777       |
| 250 | 219439,7 | 4648948   | 1380,9   | 0,24587 | 7,37622   | 6,7289   | 0,18894       | 99,29362     | 1,18979       | 149,9536    | 2,16101       |
| 251 | 219436,9 | 4648938   | 1377,8   | 0,19578 | 5,87341   | 5,11764  | 0,15869       | 77,72323     | 1,00171       | 118,6295    | 1,82254       |
| 252 | 219435   | 4648929   | 1378,9   | 0,16288 | 4,88647   | 2,92549  | 0,14095       | 50,84655     | 0,91075       | 133,1659    | 1,75191       |
| 253 | 219432,3 | 4648915   | 1379,1   | 0,39288 | 1,17863   | 7,54648  | 0,27188       | 118,8949     | 1,74899       | 348,7794    | 3,40719       |
| 254 | 219429,2 | 4648903   | 1379,5   | 0,15077 | 4,52302   | 2,46518  | 0,13689       | 46,09416     | 0,89128       | 128,4718    | 1,72983       |
| 255 | 219428,6 | 4649151   | 1380,8   | 0,17299 | 5,18969   | 3,63991  | 0,16308       | 66,05977     | 1,04873       | 113,7369    | 1,93504       |
| 256 | 219429,7 | 4648884   | 1380,9   | 0,16304 | 4,89128   | 2,75554  | 0,15415       | 58,75595     | 1,00784       | 120,4095    | 1,89358       |
| 257 | 219431,5 | 4648893   | 1381,5   | 0,22341 | 6,70221   | 4,50923  | 0,18397       | 104,9554     | 1,19765       | 114,3434    | 2,10862       |
| 258 | 219434,3 | 4648904   | 1382,1   | 0,2282  | 6,84605   | 4,18362  | 0,16536       | 95,68852     | 1,08452       | 145,8619    | 1,98027       |
| 259 | 219436,8 | 4648913   | 1382,6   | 0,24857 | 7,45713   | 5,46178  | 0,19063       | 116,9298     | 1,23375       | 119,7771    | 2,1648        |
| 260 | 219438   | 4648919   | 1381,8   | 0,17953 | 5,38586   | 3,64307  | 0,14949       | 63,04197     | 0,96034       | 132,6252    | 1,80562       |
| 261 | 219439,8 | 4648927   | 1383,2   | 0,31454 | 9,43626   | 13,3944  | 0,23416       | 141,4269     | 1,40974       | 139,3495    | 2,44852       |
| 262 | 219440,1 | 4648896   | 1383,2   | 0,27803 | 8,34104   | 13,16284 | 0,20853       | 128,9377     | 1,23722       | 106,4136    | 2,10833       |
| 263 | 219437,8 | 4648886   | 1381,7   | 0,17659 | 5,29761   | 3,55021  | 0,16619       | 70,44822     | 1,07683       | 110,4955    | 1,97085       |

| ID  | Latitude | Longitude | Altitude | Dose    | Taxa Dose | K (%)    | Desvio Padrão | Urânio (ppm) | Desvio Padrão | Tório (ppm) | Desvio Padrão |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 264 | 219435,1 | 4648877   | 1382,1   | 0,16829 | 5,04869   | 2,46227  | 0,15379       | 61,74885     | 1,01985       | 124,5567    | 1,91697       |
| 265 | 219432,7 | 4648863   | 1381,4   | 0,2069  | 6,2071    | 4,08651  | 0,17411       | 82,38223     | 1,13194       | 136,9152    | 2,08424       |
| 266 | 219430   | 4648849   | 1381,9   | 0,17413 | 5,2238    | 2,87475  | 0,13871       | 73,11858     | 0,91742       | 109,1859    | 1,67506       |
| 267 | 219429,8 | 4648811   | 1380,4   | 0,50766 | 1,52298   | 3,29956  | 0,29434       | 95,2148      | 1,98665       | 647,3246    | 4,19159       |
| 268 | 219431,9 | 4648827   | 1379,8   | 0,14003 | 4,20079   | 4,05753  | 0,13374       | 49,70205     | 0,82692       | 88,25816    | 1,52384       |
| 269 | 219434,3 | 4648846   | 1383,2   | 0,2078  | 6,23395   | 5,07223  | 0,17293       | 92,3672      | 1,10506       | 111,6924    | 1,96467       |
| 270 | 219436,5 | 4648861   | 1380,9   | 0,172   | 5,16008   | 2,42035  | 0,13384       | 62,69311     | 0,8899        | 124,7831    | 1,6736        |
| 271 | 219438,2 | 4648873   | 1382,7   | 0,19087 | 5,72616   | 3,82066  | 0,15728       | 73,397       | 1,01892       | 131,2833    | 1,88898       |
| 272 | 219439,9 | 4648885   | 1381,5   | 0,28358 | 8,50738   | 12,66896 | 0,22177       | 127,0633     | 1,32251       | 119,7927    | 2,28036       |
| 273 | 219440,7 | 4648854   | 1378,4   | 0,23704 | 7,11116   | 11,23801 | 0,21168       | 96,11092     | 1,2494        | 116,0385    | 2,20863       |
| 274 | 219438   | 4648845   | 1382,4   | 0,19525 | 5,85739   | 4,07706  | 0,15143       | 77,52654     | 0,97821       | 126,5449    | 1,79608       |
| 275 | 219434,7 | 4648837   | 1382,5   | 0,48604 | 1,45813   | 10,95996 | 0,2926        | 312,6094     | 1,88894       | 81,64596    | 2,93076       |
| 276 | 219432,5 | 4648822   | 1383,3   | 0,19829 | 5,94872   | 4,21022  | 0,20214       | 85,46962     | 1,30389       | 112,6714    | 2,3399        |
| 277 | 219430,1 | 4648806   | 1385,3   | 0,13245 | 3,97344   | 2,93227  | 0,12506       | 51,29985     | 0,80218       | 80,04778    | 1,46885       |
| 278 | 219432,3 | 4648786   | 1381,9   | 0,15115 | 4,53438   | 2,85395  | 0,13209       | 54,56501     | 0,85572       | 107,6054    | 1,60359       |
| 279 | 219434,1 | 4648793   | 1382,3   | 0,16562 | 4,9686    | 3,64366  | 0,14167       | 76,45224     | 0,91589       | 81,68813    | 1,61431       |
| 280 | 219435,9 | 4648798   | 1382,5   | 0,13739 | 4,12185   | 3,60272  | 0,12986       | 59,70472     | 0,82049       | 68,24375    | 1,45207       |
| 281 | 219437,5 | 4648805   | 1379,7   | 0,21204 | 6,36132   | 4,00796  | 0,16878       | 91,78131     | 1,10438       | 125,6555    | 1,99401       |