



FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

CURSO DE LICENCIATURA EM GEOLOGIA APLICADA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PRÉ – PROFISSIONAL

Tema:

INFLUÊNCIA TÉRMICA DAS INTRUSÕES ÍGNEAS NO PADRÃO GEOQUÍMICO DE CERTOS ELEMENTOS - TRAÇO: A (B e As), B (Pb), C (Cd, Hg e Mo), D (Se) e E (F) NO CARVÃO DAS CAMADAS CHIPANGA E BANANEIRAS, NA SECÇÃO 6, DA BACIA CARBONÍFERA DE MOATIZE

Autora:

Carla Shirley Nelson Uane

Maputo, Março de 2026



FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

CURSO DE LICENCIATURA EM GEOLOGIA APLICADA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PRÉ - PROFISSIONAL

Tema:

INFLUÊNCIA TÉRMICA DAS INTRUSÕES ÍGNEAS NO PADRÃO GEOQUÍMICO DE CERTOS ELEMENTOS-TRAÇO: A (B e As), B (Pb), C (Cd, Hg e Mo), D (Se) e E (F), NO CARVÃO DAS CAMADAS CHIPANGA E BANANEIRAS, NA SECÇÃO 6, DA BACIA CARBONÍFERA DE MOATIZE

Autora: Carla Shirley Nelson Uane

Curso: Geologia Aplicada

Supervisor: Mestre Eduardo Siquela (UEM)

Co - Supervisor: Lic. Agostinho A. Niquisse (VULCAN Mozambique S.A)

Co – Supervisor: Doutor Vicente Manjate (UEM)

Maputo, Março 2026

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu **Carla Shirley Nelson Uane**, declaro por minha honra que os resultados obtidos e apresentados neste Relatório de Estágio são resultado da minha dedicação na pesquisa com orientação do Supervisor, elaborado com base no regulamento de Projecto Científico em vigor na Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane e que o presente trabalho nunca foi apresentado para obtenção de qualquer grau académico e assumo toda a responsabilidade.

Maputo, aos de Março de 2026

(Carla Shirley Nelson Uane)

DEDICATÓRIA

A Deus Todo-Poderoso, pela saúde, fé, determinação e perseverança,

por Ele me dado durante o meu percurso.

Aos meus pais Nelson Uane, Atália Uate e

Airina Nhamuchue, por me proporcionarem

ensinos e aprendizados de qualidade durante o meu período

estudantil e pelo apoio imensurável por vós me dado

na construção do meu ser.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus Meu Senhor, pelo dom da vida e pela inspiração por Ele me dada para a elaboração deste trabalho, pois: “ A tua Palavra é lâmpada para os meus passos e luz que ilumina o meu caminho” (Salmos 119:105).

A toda a minha família pelo apoio, força, paciência e suporte incondicional, especialmente aos meus pais Nelson A. Uane, Atália V. Uate e Airina P. Nhamuchue, os responsáveis pela construção do meu carácter e o meu maior orgulho nesta vida. Aos meus irmãos Nila Uane, Shanaya Uane, Wanga Siteo, Sheron Uate, Ethan Uane e Larianny Uane, com quem posso contar em todo o tipo de situação.

As minhas tias Elsa das Neves e Joana Mathe, e aos meus avôs António Uane e Valente Uate, por nunca medirem esforços para a construção do meu sucesso académico.

A elaboração do presente relatório deve-se ao acompanhamento integral dos meus orientadores, o Mestre Eduardo Siquela (UEM) meu Supervisor e docente universitário. Ao Doutor Vicente Manjate (INAMI), agradeço pela orientação dada durante a interpretação e processamento dos dados, Ao Mestre Agostinho Niquisse geólogo e supervisor na área de sondagem geológica na VULCAN Mozambique S.A pela instrução dada no campo e pela partilha de diversas experiências, o meu muito obrigado.

À Companhia VULCAN Mozambique S.A por me ter dado esta oportunidade única, e aos responsáveis pela Geologia pela recepção e orientação devidamente me dada: Teles Sendela, Lino Jeque, Gilberto Luciano, Manuel Fato, Faustina Murimirgua, Carlos Cadeado, Elba Manjate, Caticha Machava e Chipso Sansole.

Ao Mpasso Alberto agradeço pelo suporte e conselhos dados durante o meu trajecto académico.

Agradeço a todos os meus colegas de turma pelo apoio, especialmente aos meus amigos e companheiros de estudo: Plautila Valombe, Letícia Uqueio, Nareia Cambaza, Adriana Barca, Charlene Mabote, Augusto Pais, Yúri Bembele e Leandro Ramos, pelo apoio imensurável por vós me prestado ao longo do curso. Agradeço a minha amiga e prima Taciana que a vida me deu pelo apoio incondicional e por estar presente em todas as fases da minha vida.

RESUMO

A intrusão pode afectar mineralogicamente e geoquimicamente o carvão, o que pode conduzir ao enriquecimento ou empobrecimento de alguns elementos-traço. (Chen, et tal., 2014)

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar através de análises de dados petrográficos e químicos, a influência das intrusões ígneas no padrão geoquímico do carvão da Bacia Carbonífera de Moatize, especificamente nas camadas Bananeiras e Chipanga, na Secção 6 da concessão da empresa VULCAN Mozambique S.A. As intrusões ígneas, ao entrarem em contacto com o carvão, alteram suas propriedades físicas e químicas, afectando a qualidade do recurso (tipo, grau e categoria), sua viabilidade económica e possíveis impactos ambientais.

Este relatório resulta do estágio pré-profissional realizado na empresa VULCAN Mozambique, no âmbito do curso de Licenciatura em Geologia Aplicada pela Universidade Eduardo Mondlane. O estudo englobou diversas etapas metodológicas, como revisão bibliográfica, trabalhos de gabinete, actividades de campo e análise de resultados laboratoriais.

Foram analisados no total, 11 furos feitos na secção 6, no ano de 2018, seguidas de análises de resultados laboratoriais para identificação de elementos-traço (As, B, Cd, Hg, Pb, Se, Mo e F). Através de softwares como: QGIS, Excel, ArcMap e MiniTab foram gerados mapas, gráficos de correlação e perfis geofísicos.

Os resultados indicaram que nem todos os elementos apresentaram correlação com a proximidade das intrusões, sugerindo influências litológicas e mineralógicas pré-existentes. O estudo contribuiu para o melhor entendimento da alteração térmica no carvão, permitindo distinguir zonas menos promissoras e apoiar a gestão sustentável da exploração do carvão em Moçambique, considerando impactos económicos, ambientais e importância académica.

Palavras-chave: Carvão, Intrusão, Bananeiras, Chipanga, Anomalia geoquímica, Elementos-traço, Pirite, Secção 6, Moatize, Tete, Moçambique

ABSTRACT

Intrusions can affect coal mineralogically and geochemically, which can lead to enrichment or depletion of some trace elements. (Chen, et al., 2014)

The main objective of this work is to study, through analysis of petrographic and chemical data, the influence of igneous intrusions on the geochemical pattern of coal from the Moatize Coal Basin, specifically in the Bananeiras and Chipanga layers, in Section 6 of the concession of the company VULCAN Mozambique S.A. The igneous intrusions, when coming into contact with the coal, altered its physical and chemical properties, affecting the quality of the resource (type, grade and category), its economic viability and possible environmental impacts.

This report is the result of a pre-professional internship carried out at VULCAN Mozambique, as part of the Bachelor's Degree in Applied Geology at Eduardo Mondlane University. The study included several methodological stages, such as a bibliographic review, office work, field activities and laboratory analyses results.

A total of 11 boreholes drilled in section 6 in 2018 were analyzed, followed by chemical and petrographic analyses to identify trace elements (As, B, Cd, Hg, Pb, Se, Mo and F). Maps, correlation graphs and geophysical profiles were generated using software such as QGIS, Excel, ArcMap and MiniTab. The results indicated that not all elements were correlated with the proximity of the intrusions, suggesting pre-existing lithological and mineralogical influences.

The study contributes to a better understanding of the thermal alteration of coal, allowing less promising areas to be distinguished and supporting the sustainable management of coal mining in Mozambique, considering economic, environmental impacts and academic importance.

Keywords: Coal, Intrusion, Bananeiras, Chipanga, Geochemical anomaly, Trace-elements, pyrite, Section 6, Moatize, Tete, Mozambique.

ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE HONRA.....	I
DEDICATÓRIA	II
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO.....	IV
ABSTRACT.....	V
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE FÓRMULAS	XII
LISTA DE ANEXOS.....	XII
1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objectivos.....	2
1.2.1. Geral.....	2
1.2.1. Específicos.....	2
1.3. Apresentação do Problema.....	3
1.4. Relevância do Estudo	4
1.4.1. Relevância Económica e Impacto Ambiental	4
1.4.2. Importância Académica	4
1.5. Resenha Histórica de Estudos sobre o Impacto de Intrusões no Carvão em Diferentes Bacias do Mundo e na Bacia Carbonífera de Moatize.....	5
1.6. Materiais e Métodos	6
1.6.1. Materiais	6
1.6.2. Descrição das Actividades de Estágio Pré-Profissional	7
1.6.3. Generalidades	7
1.6.3.1. Padrão Geoquímico.....	7
1.6.3.4. Distribuição Espacial dos Elementos – Traço	7
1.6.4. Metodologia.....	8
1.6.4.1. Revisão Bibliográfica.....	8
1.6.4.2. Estudo de Gabinete.....	9
a. Selecção e tratamento de dados.....	9
b. Análise Estatística Univariada	9
c. Medidas de Tendência Central	9
1.6.4.5. Gráficos Probabilísticos.....	11
1.6.4.7. Cálculo do Índice de Geoacumulação e Coeficiente de Enriquecimento (EF)	12

1.4.8. Visita ao Campo	13
1.6.4.3. Análise dos Resultados Laboratoriais	18
1.6.4.4. Elaboração do Relatório	18
1.7. Aspectos Gerais Concessão Mineira da VULCAN.....	18
1.7.1. Localização e Limites da Concessão	19
1.7.2. Geologia da Concessão Mineira da VULCAN/ Pontos de Perfuração de Sondagem ...	20
1.8. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO	21
1.8.1. Localização Geográfico do Distrito de Moatize	21
1.8.2. Vias de acesso e infraestruturas.....	21
2.1.3. Clima e vegetação.....	22
2.2. Enquadramento Geológico.....	23
2.2.1. Geologia Regional	23
2.2.2. Enquadramento Geológico Local	26
2.2.3. Enquadramento Tectónico – Estrutural.....	26
4. CAPÍTULO IV: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	29
4.1.1. Definição da Extensão da Auréola e Caracterização da Zona de Alteração (Metamorfismo)	29
4.1. Análise da Distribuição Espacial dos Elementos – Traço.....	32
4.1.1. Camada Chipanga.....	32
4.1.2. Camada Bananeiras	38
4.3. Análise Estatística Univariada	42
4.4. Análise de Correlação Linear – Estatística Bivariada.....	44
4.5. Resultados da Determinação de Fundos Geoquímicos e Limiar (Treshold).....	45
4.5.1. Análise da Significância das Anomalias Analisadas	46
4.6. Cálculo de Coeficiente de Enriquecimento (EF).....	51
4.7. Índice de Geoacumulação (Igeo).....	52
5. CAPÍTULO V: CONCLUSÕES	53
5.1. Conclusão.....	53
6. CAPÍTULO VI: POTENCIALIDADES, LIMITAÇÕES e RECOMENDAÇÕES.....	54
6.1. Potencialidades	54
6.2. Limitações	54
6.3. Recomendações.....	54
6.4. Referências Bibliográficas.....	55
7. ANEXOS	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

% - Por cento	MM - Matéria Mineral
µm - Micrómetro	mm - Milímetros
As - Arsénio	MO - Matéria Orgânica
B - Boro	Mo - Molibdénio
BCM - Bacia Carbonífera de Moatize	NE - Nordeste
BNL - Bananeiras Inferior	NW - Noroeste
BNU - Bananeiras Superior	ppm - Partes por milhão
	RC - Sondagem de carvão bruto (Raw coal)
BV - Bureau Veritas	Se - Selénio
cFixo - Carbono Fixo	SE - Sudeste
C0 - Carvão fresco	SW - Sudoeste
C1 - Carvão semi-afectado	UC - Chipanga Superior
C2 - Carvão queimado	UEM - Universidade Eduardo Mondlane
Cd - Cádmio	µg/g - Microgramas/grama
EF - Factor de Enriquecimento	
F - Flúor	
GPS - Sistema de Posicionamento Global	
GTK - Geological Survey of Finland	
Ha - Hectares	
Hg - Mercúrio	
HQ - Sondagem de Alta qualidade (high quality)	
Igeo - Índice de Geo-acumulação	
Kg /m - Quilograma/metros	
Km - Quilómetros	
LC - Chipanga Inferior	
m - Metros	
MC - Chipanga Médio	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Materiais usados durante da abertura dos furos de Sondagem (LD): A-1.Haste de diâmetro menor e 2.haste de diâmetro maior; B- Compressor de ar; C- Perfuratriz da <i>Thompson Drilling</i>	14
Figura 2: D- Procedimentos realizados durante da abertura dos furos e E- Introdução da haste no subsolo com uma perfuratriz da <i>Thompson Drilling</i>	14
Figura 3: Procedimentos realizados na preparação de amostras. F- Porta-testemunho (RC) e G- Introdução de dados no dispositivo <i>Acquire</i>	15
Figura 4 : Perfis Geofísicos dos furos de sondagem (Secção 6) na Camada Bananeiras realizados no ano 2018,.....	16
Figura 5: Perfis Geofísicos dos furos de sondagem (Secção 6) na Camada Chipanga realizados no ano 2018, onde: a) Cinza- estéril, b) Azul – Carvão do Chipanga Inferior, c) Verde – Chipanga Médio e d) Amarelo- Chipanga Superior.....	17
Figura 6: Esquema dos procedimentos realizados para a elaboração do relatório.....	18
Figura 7: Mapa de localização da Concessão Mineira da VULCAN.....	19
Figura 8: Mapa Geológico da Concessão Mineira da VULCAN.....	21
Figura 9: Mapa geológico da área de estudo (Adaptado do Mapa 1:250 000; GTK Consortium 2006b).....	23
Figura 10: Coluna Estratigráfica da Série Produtiva. (Vasconcelos, 1995).....	27
Figura 11: A- Mapa Geológico – Estrutural da Área de Estudo (Secção 6) e B- Corte Geológico da área de estudo.....	30
Figura 12: Gráfico da variação da concentração do As no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	32
Figura 13: Gráfico da variação da concentração do boro no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	33
Figura 14: Gráfico da variação da concentração do cádmio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	34
Figura 15: Gráfico da variação da concentração do chumbo no carvão e a distância do dique dos furos.....	34
Figura 16: Gráfico da variação da concentração do mercúrio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	35
Figura 17: Gráfico da variação da concentração do molibdénio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	36

Figura 18: Gráfico da variação da concentração do selênio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	37
Figura 19: Gráfico da variação da concentração do flúor no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	37
Figura 20: Gráfico da variação da concentração do arsênio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	38
Figura 21: Gráfico da variação da concentração do boro no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	39
Figura 22: Gráfico da variação da concentração do cádmio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	39
Figura 23: Gráfico da variação da concentração do chumbo no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	40
Figura 24: Gráfico da variação da concentração do mercúrio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	41
Figura 25: Gráfico da variação da concentração do molibdênio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	41
Figura 26: Gráfico da variação da concentração do selênio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	42
Figura 27: Gráfico da variação da concentração do flúor no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.....	42
Figura 28: Coeficiente de Correlação da Camada Chipanga, usando a observação de 1 – 69, 5% do valor crítico (bilateral) = 1,6679 para n=69.....	
Figura 29: Coeficiente de Correlação da Camada Chipanga, usando a observação de 1 – 27, 5% do valor crítico (bilateral) = 1, para n=27.....	44
Figura 30: Mapa de Concentração de teores de As (arsênio) na camada Chipanga em relação ao dique.....	47
Figura 31: Mapa de Concentração de teores de As (arsênio) na camada Bananeiras em relação ao dique.....	48
Figura 32: Mapa de Concentração de teores de B (boro) na camada Chipanga em relação ao dique.....	48
Figura 33: Mapa de Concentração de teores de B (boro) na camada Bananeiras em relação ao dique.....	49
Figura 34: Mapa de Concentração de teores de Cd (cádmio) na camada Chipanga em relação ao dique.....	49

Figura 35: Mapa de Concentração de teores de Cd (arsénio) na camada Bananeiras em relação ao dique.....	50
Figura 36: Mapa de Concentração de teores de Pb (chumbo) nas camadas Bananeiras e Chipanga em relação ao dique.....	60
Figura 37: Mapa de Concentração de teores de Hg (mercúrio) nas camadas Bananeiras e Chipanga em relação ao dique.....	60
Figura 38: Mapa de Concentração de teores de Mo (molibdénio) nas camadas Bananeiras e Chipanga em relação ao dique.....	60
Figura 39: Mapa de Concentração de teores de Se (selénio) nas camadas Bananeiras e Chipanga em relação ao dique.....	61
Figura 40: Mapa de Concentração de teores de F (flúor) nas camadas Bananeiras e Chipanga em relação ao dique.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Materiais usados e sua aplicação.....	6
Tabela 2: Sequência Estratigráfica da Bacia de Moatize (Adaptado de Chivurre, 2018.....	25
Tabela 3: Resumo estatístico univariado dos 8 elementos-traço analisados, pertencentes a VULCAN Mozambique, Secção 6 (camada Chipanga).....	43
Tabela 4: Resumo estatístico univariado dos 8 elementos-traço analisados, pertencentes a VULCAN Mozambique, Secção 6 (camada Bananeiras).....	43
Tabela 5: Gráfico probabilístico que ilustra valores calculados do background geoquímico e limiares na Secção 6 (camada Chipanga).....	45
Tabela 6: Gráfico probabilístico que ilustra valores calculados do background geoquímico e limiares na Secção 6 (camada Bananeiras).....	46
Tabela 7: Gráfico comparativo entre valores determinados como anómalos na área de estudo e o Clarke (Fonte: Licht & Plawiak, 2005) para análise de significância das anomalias na camada Chipanga.....	46
Tabela 8: Gráfico comparativo entre valores determinados como anómalos na área de estudo e o Clarke (Fonte: Licht & Plawiak, 2005) para análise de significância das anomalias na camada Bananeiras.....	46
Tabela 9: Resultados do Cálculo de Coeficiente de Enriquecimento (EF) na camada Bananeiras.....	51
Tabela 10: Resultados do Cálculo de Coeficiente de Enriquecimento (EF) na camada Chipanga.....	51
Tabela 11: Resultados do cálculo do índice de Geoacumulação na camada Chipanga.....	52

Tabela 12: Resultados do cálculo do índice de Geoacumulação na camada Bananeiras.....	52
---	----

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1: Média Aritmética.....	10
Fórmula 2: Mediana. (Licth, 1998).....	10
Fórmula 3: Mediana (Licth, 1998).....	10
Fórmula 4: Variância (S ²). (Licth, 1998).....	10
Fórmula 5: Desvio Padrão. (Licth, 1998).....	11
Fórmula 6: Coeficiente de Variação (Licth, 1998).....	11
Fórmula 7: Amplitude. (Licth, 1998).....	11
Fórmula 8: Índice de Geoacumulação (Igeo).....	12
Fórmula 9: Coeficiente de Enriquecimento (EF).....	12

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Boxplots dos 8 elementos selecionados para os estudos, correspondentes aos teores da camada Chipanga. Fonte: Autora.....	58
Anexo 2: Boxplots dos 8 elementos selecionados para os estudos, correspondentes aos teores da camada Bananeiras. Fonte: Autora.....	59
Anexo 3: Boxplots dos 8 elementos selecionados para os estudos, correspondentes aos teores de coeficiente de enriquecimento das camadas A-Bananeiras e B- Chipanga. Fonte: Autora.....	59
Anexo 4: Boxplots dos 8 elementos selecionados para os estudos, correspondentes aos teores de coeficiente de enriquecimento das camadas C- Bananeiras e D- Chipanga. Fonte: Autora.....	59
Anexo 5: E- Gráfico de dispersão entre a Fe (pirite) e o As (arsénio); F- Gráfico de dispersão entre a S (pirite) e o S (Selénio).....	61
Anexo 6: G- Gráfico de dispersão entre a S (pirite) e o Pb (chumbo); H- Gráfico de dispersão entre a Fe (pirite) e o As (arsénio).....	62
Anexo 7: I- Gráfico de dispersão entre a S (pirite) e o Hg (mercúrio); J- Gráfico de dispersão entre a Fe (pirite) e o Se (selénio).....	62
Anexo 8: K- Gráfico de dispersão entre a Ca (apatite) e o F (flúor); L- Gráfico de dispersão entre a Si (silíca) e o B (boro).....	62

Anexo 9: Imagem de Satélite captada pelo Google Earth demonstrando a área da região da licença da VULCAN Mozambique. A imagem ilustra a área ocupada pela licença, a área de pesquisa, entre outros aspectos como densidade de vegetação, hidrografia e morfologia local. Imagem de 2021, capturada aos 12/05/2025.....	63
Anexo 10: Imagem de Satélite captada pelo Google Earth demonstrando a área Prospektada e um perfil topográfico ilustrativo representado pela linha branca. Imagem de 2018, capturada aos 12/05/2025.....	63
Anexo 11: M- Carvão extremamente queimado pelo dique, na secção 2A; N- Carvão Fresco e O- Falha geológica. Fonte: autora	64
Anexo 12: P- Afloramento estudado (totalmente destruído) com o contacto entre o dique e o carvão na secção 6, Q- Pirite no carvão Fonte: autora.....	64
Anexo 13: Coordenadas UTM (34E) dos Furos de Sondagem da a)Camada Chipanga e da b) Camada Bananeiras da Concessão mineira da VULCAN.....	64
Anexo 14: Dados laboratoriais (camada Chipanga) de concentração média dos elementos-traço analisados, concentração em ppm, coordenadas em UTM, Concessão da VULCAN (secção 6).....	65
Anexo 15: Dados laboratoriais (camada Bananeiras) de concentração média dos elementos-traço analisados, concentração em ppm, coordenadas em UTM, Concessão da VULCAN (secção 6).....	65
Anexo 16: Dados laboratoriais (camada Bananeiras) de percentagem média das análises petrográficas, químicas e imediatas de furos de sondagem.....	65

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. Introdução

O estágio académico é realizado com a intenção de consolidar e aplicar no campo os conhecimentos obtidos em aulas teóricas leccionadas no curso de licenciatura em Geologia Aplicada. A VULCAN Mozambique promove este tipo de estágio onde são desenvolvidas actividades para a compreensão prática do funcionamento e aplicação da Geologia, com intuito de preparar o estudante-estagiário para a carreira profissional. A área da concessão da VULCAN ocupa cerca de 25 323,40 Ha encontrando-se assentada no embasamento cristalino, com cerca 10 secções.

A VULCAN Mozambique S.A é uma empresa responsável pela exploração da Mina de carvão em Moatize, um insumo essencial para a transformação do minério de ferro em aço e, para gerar calor e energia em centrais termoeléctricas, produzindo dois tipos de carvão: o metalúrgico e o térmico. É detentora de licenças de Exploração e Extracção na Província de Tete, no distrito de Moatize.

O presente relatório de estágio pré – profissional foi resultado do memorando de entendimento entre a Universidade Eduardo Mondlane e a VULCAN Mozambique S.A, pelo qual, a candidata, em alusão à culminação de estudos para a obtenção do grau de licenciatura no curso de Geologia Aplicada, beneficiou de um estágio pré-profissional com a duração de 3 meses, com o objectivo do desenvolvimento de competências profissionais e possibilitar a colecta de dados necessários para a elaboração deste projecto.

A Bacia Carbonífera de Moatize possui uma das maiores reservas de carvão betuminoso a nível mundial, tendo sido alvo de diversos estudos no que concerne à sua estratigrafia bem como à qualidade do carvão, que resultou na atracção de grandes investimentos, cujo caso é o projecto “Carvão de Moatize” (RDMZ, 2006).

As intrusões ígneas são manifestações magmáticas que podem afectar qualquer tipo de rocha, causando a alteração das propriedades iniciais da rocha encaixante pré-existente. No caso de intrusões em camadas de carvão, as alterações são ainda mais intensas em virtude de seus principais constituintes (macerais), em relação aos efeitos de altas temperaturas e pressões provocados pela intrusão. (Chivurre, 2018)

A influência de intrusões na petrologia, e qualidade do carvão estão relacionadas com a temperatura do magma, forma de transferência de calor (convecção e difusão), forma ou volume da intrusão (dique ou soleira), distância do contacto e as propriedades térmicas das rochas encaixantes. O calor das intrusões auxilia na maturação do carvão, elevando o seu ranking e pode contribuir como um dos

mecanismos para a geração de gás, um dos maiores causadores de explosões nas minas. (Chivurre, 2018)

O estudo efectuado por Dai & Ren, (2007), permitiu-lhes definir que intrusões ígneas modificam geoquimicamente o carvão, o que leva ao enriquecimento ou esgotamento de alguns elementos – traço nos carvões termicamente alterados, o que é evidenciado pelas altas concentrações de elementos do grupo da platina em alguns carvões do Permiano tardio do oeste de Guizhou, definindo o seguinte grupo de elementos: **A** (B, F, Cl, Br, Hg), **B** (As, Co, Cu, Ni, Pb), **C** (Sr, Mg, Ca, Mn e Zn), **D** (U) e **E** (V, Sc, Sb).

Embora vários elementos-traço sejam essenciais para a vida vegetal e animal em baixas concentrações específicas, eles também podem ser tóxicos se presentes em concentrações suficientemente altas. Na maioria dos casos, o limite de concentração que pode ser liberado para o ambiente circundante é especificado pelas autoridades reguladoras. (Anderberg, 2008)

O presente relatório visa estudar a influência da intrusão causada pelo dique no carvão das camadas Bananeiras e Chipanga na Secção 6, com o objectivo de analisar a concentração e o comportamento no padrão geoquímico de elementos-traço em zonas próximas a intrusão ígnea, identificar nitidamente as diferentes zonas de alteração do carvão em volta da auréola de metamorfismo e avaliar o efeito térmico da intrusão sobre o carvão em distâncias diferentes. Assim sendo, este estudo integra fundamentos necessários para a identificação e distinção das zonas menos promissoras de carvão na secção 6 da concessão da empresa VULCAN Mozambique, bem como em bacias afectadas por este tipo de intrusões ígneas mundialmente.

1.2. Objectivos

1.2.1. Geral

O objectivo geral deste projecto é de avaliar a influência térmica das intrusões, com vista a entender o padrão geoquímico de certos elementos – traço: A (B e As), B (Pb), C (Cd, Hg e Mo), D (Se) e E (F), definido por Dai & Ren (2007), baseado na distância em relação à intrusão na jazida de carvão de Moatize, na Secção 6, em Tete.

1.2.1. Específicos

- Analisar a concentração e o comportamento de elementos- traço nas zonas próximas a intrusão;
- Definir a extensão da auréola de metamorfismo e caracterizar as diferentes zonas de alteração do carvão em direcção ao contacto;
- Avaliar o efeito térmico das intrusões sobre o carvão em distâncias diferentes.

1.3. Apresentação do Problema

As bacias sedimentares podem ser consideradas como reactores em larga escala em que ocorrem grande número de reacções importantes, tais como a conversão da turfa em carvão, a geração de gás natural e do petróleo. Todas estas reacções dependerão do tempo e da temperatura, e particularmente da paleotemperatura máxima atingida durante o soterramento (González, 2015).

A história térmica das bacias desempenha um papel fundamental na identificação do momento de ocorrência dos episódios dominantes de aquecimento e arrefecimento que afetaram as rochas sedimentares, para a definição de modelos de acúmulo e exploração de hidrocarbonetos.

A influência de intrusões na petrologia e qualidade do carvão estão relacionadas com a temperatura do magma, forma de transferência de calor (convecção e difusão), forma ou volume da intrusão (dique ou soleira), distância do contacto e as propriedades térmicas das rochas encaixantes. O calor das intrusões pode auxiliar na maturação do carvão, elevando o seu ranking. Também pode contribuir como um dos mecanismos para a geração de gás. (Chivure, 2018)

A intrusão em contacto directo com o carvão tal como ilustra o anexo 2 na figura 20-A, pode provocar carbonificação térmica, transformando-o em grafite ou mesmo em cinzas. Este processo induz a libertação de gases voláteis no carvão, alterando sua qualidade e propriedades combustíveis.

A mina de carvão em Moatize encontra-se afectada por intrusões ígneas. Em certas camadas de carvão, as intrusões são responsáveis pelo metamorfismo de contacto que culmina com a sua queima e consequente formação de coque natural, alterando suas características iniciais, podendo causar um aumento localizado no seu grau, tornando-os atrativos para a exploração (quando o carvão encontra-se protegido por uma camada de rocha argilosa, devido ao seu carácter refratário), ou podendo ser levados ao descarte por terem sido afectados termicamente pelas intrusões, devido ao intenso e rápido metamorfismo a que foram sujeitos. (Sousa & Vasconcelos, 1995)

1.4. Relevância do Estudo

1.4.1. Relevância Económica e Impacto Ambiental

Numa abordagem económica, este estudo adquire relevância dado que as intrusões propiciam a formação de coque natural através da queima do carvão, reduzindo as suas propriedades de combustão e enriquecendo-o em matéria mineral, que é responsável pelo aumento do teor de cinzas, reduzindo a viabilidade de sua exploração, depreciando seu valor económico.

Com este estudo, será possível contribuir com o conhecimento da dimensão em que uma intrusão afecta os carvões deste grau de evolução, e através desta provavelmente excluir essa área do cálculo de reservas. (Golab & Carre et. al., 2004)

Numa **perspectiva ambiental**, este estudo torna-se relevante, uma vez que carvões termicamente afectados por intrusões apresentam-se relativamente enriquecidos em matéria mineral, fruto das interações metassomáticas entre o carvão e os fluídos da intrusão, o que conduz a um enriquecimento em certos minerais, responsáveis pela drenagem ácida de minas (DAM) e pela poluição do ar quando sofrem combustão, (Chivurre, 2018) por meio desta, impulsionar um gerenciamento mais eficaz dos recursos naturais, promovendo práticas sustentáveis na exploração deste recurso e desenvolvimento de medidas de mitigação.

1.4.2. Importância Académica

Do ponto de vista académico, este estudo visa explicar os efeitos térmicos resultantes das intrusões na geoquímica dos carvões da Bacia de Carvão de Moatize, isto é, até que nível as intrusões afectam a qualidade do carvão desde ao contacto com a intrusão até a zona não afectada, contribuindo com a percepção deste fenómeno. Por outro lado, o estudo das alterações minerais decorrentes das intrusões ígneas fornece a percepção sobre os processos geológicos como: a formação de depósitos minerais e a evolução térmica das rochas.

1.5. Resenha Histórica de Estudos sobre o Impacto de Intrusões no Carvão em Diferentes Bacias do Mundo e na Bacia Carbonífera de Moatize

Segundo **Gurba et tal. (2001)**, as intrusões ígneas têm efeito positivo no desenvolvimento do metano no carvão afectado, comparativamente as camadas de carvão não afectadas na Bacia de Gunnedah, em Austrália que actualmente tem sido objecto de recente exploração de metano nas camadas de carvão. **Cooper et tal. (2007)**, estudaram a influência de diques na Bacia de Raton (Washington), onde referem que diques e soleiras máficos terciários alteraram milhões de toneladas de carvão para coque natural e podem ter desempenhando um papel menor na geração de alguns recursos de gás metano no carvão, que é actualmente explorado nesta região.

Segundo **Chen et tal., (2014)** a intrusão pode afectar mineralogicamente e geoquimicamente o carvão, o que pode conduzir ao enriquecimento ou empobrecimento alguns elementos-traço. **Dai & Ren (2007)** efectuaram um estudo que lhes permitiu definir a influência que as intrusões ígneas têm no enriquecimento do carvão em certos elementos químicos, definindo o seguinte grupo de elementos: **A** (B, F, Cl, Br e Hg), **B** (As, Co, Cu, Ni e Pb), **C** (Sr, Mg, Ca, Mn e Zn), **D** (U) e **E** (V, Sc e Sb), baseando-se na distância em relação a intrusão, onde os mesmos identificaram que os minerais derivam da alteração térmica que consistem em pirite, calcite e ankerite, onde foram considerados os principais indicadores de alteração térmica.

Vasconcelos (1995) dá uma contribuição em sua tese de Doutoramento em que dá uma contribuição acerca dos carvões da BCM, onde refere que existem numerosos diques doleríticos, responsáveis pelo fenómeno de coquefação do carvão, e que os mesmos por vezes ocorrem preenchendo falhas interiores da bacia.

Chivurre (2018) estudou o efeito das intrusões ígneas na Petrologia dos carvões da BCM, onde concluiu que os carvões foram termicamente afectados pelas intrusões culminando com alterações físicas, químicas e mineralógicas no carvão e em rochas encaixantes.

1.6. Materiais e Métodos

1.6.1. Materiais

Para o desenvolvimento do trabalho foram necessárias as seguintes ferramentas:

Equipamentos de proteção individual (EPI's)	Para o trabalho no campo foi crucial ter: abafadores de ruído, botas com bico de aço, máscara facial, luvas, camisas reflectoras de manga comprida, calça de ganga, capacete e óculos de protecção;
Mapas Geológicos	Para entender a geologia local e regional
Material de Escritório	Bloco de anotações, borracha, marcador e lápis;
Smartphone / Telemóvel	Para a captação de imagens dos pontos de furos de sondagem como da área de estudo;
Material para a Sondagem Exploratória	Para a abertura dos furos de sondagem foi usada uma perfuratriz da Thompson Drilling, acoplada por: hastes, ciclone, compressor e martelo;
Amostragem	Para a amostragem foram usados os seguintes materiais: peneiro manual, saquetas plásticas para a conservação de amostras, balanças para pesar as amostras.
GPS (Trimble)	Para a obtenção das coordenadas de alta precisão dos pontos de furos de sondagem;
Softwares:	ArcMap versão 10.8 e QGIS 3.32 para a produção de mapas de concentração, interpolação e análise espacial dos elementos-traço; Excel 2016 e Minitab para o tratamento estatístico e elaboração de gráficos, para identificar enriquecimento geoquímico e o Acquire para a gestão de bases de dados geoógicos.
Cálculo do Índice de Geoacumulação (Igeo) e Factor de Enriquecimento (EF)	Para interpretar e avaliar o estágio de contaminação por metais pesados como: As, Cd, Pb e Hg, no carvão nas camadas Chipanga e Bananeiras.

Tabela 1. Materiais usados e sua aplicação. Fonte: Autora

1.6.2. Descrição das Actividades de Estágio Pré-Profissional

O estágio pré-profissional é uma actividade de aprendizagem supervisionada que tem como objectivo a preparação de estudantes para o mercado de emprego, onde são aplicados conhecimentos teóricos adquiridos na Universidade para o desenvolvimento de novas habilidades.

1.6.3. Generalidades

1.6.3.1. Padrão Geoquímico

Segundo Matschullat et al. (2000), o termo padrão geoquímico refere – se a valores de referência utilizados para distinção das concentrações naturais de elementos químicos das influências antrópicas. Estudos como o de Reimann & Garrett (2005), enfatizam a importância de estabelecer um padrão geoquímico para a avaliação de riscos potenciais de contaminação e identificar concentrações naturais de elementos-traço em uma determinada área.

1.6.3.2. Elementos – Traço

Elementos-traço são elementos químicos presentes em concentrações muito baixas no ambiente, mas podem ter impactos significativos na saúde humana, na qualidade do solo e segurança alimentar. (Anderberg, 2008)

1.6.3.3. Espectrometria de fluorescência de raio-X

A partir da excitação dos eletrões de orbitais internos por um feixe de raios-X, emite-se a fluorescência com um comprimento de onda característico do elemento químico ativado. As vantagens da aplicação deste método incluem a capacidade de análise multi-elementar, a elevada precisão, e o baixo custo por determinação. As desvantagens são de elevado custo do equipamento e os altos limites de detecção, inadequados para muitos elementos de interesse em exploração mineral. (Lich, 1988)

1.6.3.4. Distribuição Espacial dos Elementos – Traço

O carvão contém teores de elementos – traço e, geralmente apresentam concentrações menores que 1%, que são incorporados no carvão por processos que podem ocorrer antes, durante ou depois da formação do carvão (Anderberg, 2008).

A mineração, o beneficiamento e o uso térmico ou metalúrgico podem resultar na libertação de elementos-traço para o ambiente circundante. Estudos de comportamento de fracionamento (*partitioning*) dos elementos traço durante a combustão do carvão mostram que o As, Cd e Pb concentram-se nas partículas de cinza pelo mecanismo de volatilização e de condensação. Durante a combustão, as espécies voláteis são vaporizadas quando a temperatura aumenta, estas podem

condensar pela fase de vaporização na superfície das partículas de cinza. Verificou-se que os elementos-traço altamente voláteis Se e Hg volatilizam-se facilmente, e podem então permanecer na fase gasosa ou condensar-se na superfície de partículas. O grau de preocupação com a libertação de elementos-traço para o ambiente circundante dependerá dos seguintes fatores:

- **A concentração do elemento-traço libertado**

Embora vários elementos-traço sejam essenciais para a vida vegetal e animal em baixas concentrações específicas, eles também podem ser tóxicos se presentes em concentrações suficientemente altas. Na maioria dos casos, o limite de concentração que pode ser liberado para o ambiente circundante é especificado pelas autoridades reguladoras. As tendências atuais mostram que os limites dos níveis de emissão estão se tornando mais rigorosos com o tempo. (Clarke & Sloss, 1992 em Andeberg, 2008)

- **O modo de ocorrência do elemento-traço**

Para entender o modo de ocorrência, deve-se determinar, se o elemento forma um mineral específico ou está disperso em um mineral hospedeiro ou maceral, com qual fração do carvão o elemento está associado, em qual estado de oxidação o elemento ocorre e assim por diante. Diferentes modos de um elemento podem ter impactos biológicos e/ou ambientais drasticamente diferentes. É importante prever as concentrações dos elementos-traço no carvão, dado que a sua presença pode ter efeitos prejudiciais na qualidade do produto para o qual está sendo utilizado, afectando sua comercialização e consequentemente a viabilidade económica da mina. Por exemplo, o cobre é prejudicial à resistência do aço e, portanto, concentrações excessivas desse elemento nas matérias-primas para a fabricação de aço, como o carvão, serão indesejáveis. (Anderberg, 2008)

1.6.4. Metodologia

Para o alcance dos objectivos específicos e geral, foram adoptadas as metodologias a seguir: revisão bibliográfica, estudo de gabinete e trabalho de campo, análise e interpretação de dados usando os softwares: *Excel*, *ArcMap 10.8* e *QGIS 3.32*, por fim a compilação do relatório.

1.6.4.1. Revisão Bibliográfica

Esta etapa consistiu no levantamento e análise de material relacionado ao tema de pesquisa. Foram estabelecidas as bases teóricas sobre o tema através da revisão de livros, artigos e obras anteriormente desenvolvidos na área de estudo, também em bacias carboníferas ao redor do mundo, relacionados a influência térmica de intrusões ígneas no padrão geoquímico de certos minerais nos carvões. Contudo, as informações foram obtidas na Biblioteca do Departamento de Geologia, nos escritórios da VULCAN Mozambique S.A., em artigos disponibilizados pelo supervisor e fontes da internet.

1.6.4.2. Estudo de Gabinete

a. Selecção e tratamento de dados

Esta fase foi a crucial para a realização do projecto, que consistiu na selecção e interpretação da base dados, facultada pela própria empresa VULCAN, que compreendiam em análises laboratoriais de furos de sondagem feitos no ano de 2018, pela empresa *Bureau Veritas* (BV), que é uma empresa subcontratada pela VULCAN para trabalhos laboratoriais. Desta feita, foram realizadas as seguintes actividades:

- Mapeamento de todos os furos de sondagem do projecto (no QGIS);
 - Selecção de furos de sondagem com elementos – traço nas análises;
 - Selecção do corpo intrusivo para efeito de estudo;
 - Identificação da secção onde decorreu o estudo;
 - Interpretação e correlação dos parâmetros analisados pelo laboratório que passaram pelas seguintes análises:
- a) Referentes à fase de análises químicas e testes
- Índice de Intumescimento do Cadinho (CSN);
 - True Relate Density (TRD);
 - Análise da refletância da vintrinite e do Teor de Cinzas.
- b) Referentes às análises petrográficas
- Medição do poder calorífico (%);
 - Contagem percentual (maceral, mineral e óxidos);
 - Análise da concentração de elementos-traço e Fluorescência de raios X (XRF).

1.6.4.3. Tratamento de Estatístico de Dados

b. Análise Estatística Univariada

A análise estatística univariada foi usada para caracterizar o comportamento dos elementos-traço e a relação entre si. Esta análise permite clarear feições ocultas, caracterizar o comportamento dos elementos químicos e seus relacionamentos, com a finalidade de fazer extrapolações para explicar fenómenos geológicos e geoquímicos. (Frizzo & Licht, 2007)

c. Medidas de Tendência Central

As medidas de tendência central são indicadoras que permitem que se tenha uma primeira ideia ou resumo, do modo como os dados de uma experiência distribuem-se, informando sobre o valor (ou valores) da variável aleatória.

c.1. Média Artimétrica: é representada pelo símbolo $\bar{X}$ e, é calculada pela seguinte expressão:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$\bar{X}$: média artimética

n : número total das amostras

Fórmula 1: Média Aritmética $\sum X_i$ n $i=1$: somatório dos dados da concentração da variável em 1 amostra

c.2. Mediana (Md): é o valor central em relação a um valor mínimo e um valor máximo, quando os valores estão dispostos em ordem crescente (ou decrescente) de uma variável (Correa, 2003). A mediana pode ser determinada pelas seguintes fórmulas:

- Quando a variável apresenta um conjunto n ímpar então a mediana corresponde ao valor central:

$$E_{Md} = \frac{(n+1)}{2}, \text{ onde:}$$

$E(Md)$: elemento mediano, indicando a posição da mediana

$$Md = E(Md) = x$$

Fórmula 2: Mediana. (Licth, 1998)

$$E_{Md} = \frac{n}{2} \quad Md = \frac{x(E_{Md}) + x(E_{Md}) + 1}{2}$$

Fórmula 3: Mediana (Licth, 1998)

- Quando a variável apresenta um conjunto n par então não temos o termo central único de mediana, mas sim, dois termos centrais.

c.3. Moda (Mo): é o teor mais repetido ou frequente em várias amostras para a mesma variável em questão. (Milambo, 2022)

1.6.4.4. Medidas de Dispersão

As medidas de dispersão traduzem a variação de um conjunto de dados em torno da média, ou seja, da maior ou menor variabilidade dos resultados obtidos. Permitem identificar até que ponto os resultados se concentram ou não ao redor da tendência central de um conjunto de observações.

- a. Variância (S^2):** segundo Licth (1998) é a dispersão de valores em torno da média e definida como o somatório das diferenças quadráticas entre cada um dos valores da média, é obtido segundo a fórmula:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}$$

Onde: x_i : é cada uma das observações

$\bar{x}$: é a média do grupo amostral

N : é a quantidade de observações

Fórmula 4: Variância (S^2). (Licth, 1998)

- b. Desvio Padrão (σ):** é uma medida da dispersão dos dados em torno da média. O desvio padrão é sempre positivo, e será tanto maior, quanto mais variabilidade houver entre os dados. Se $\sigma=0$, então não existe variabilidade, isto é, os dados são iguais, ilustrado pela fórmula:

$$S = \sqrt{S^2}$$

Onde: S = desvio padrão; S^2 = variância

Fórmula 5: Desvio Padrão. (Litch, 1998)

- c. Coeficiente de Variação (CV):** uma medida de dispersão relativa definida como a razão entre o desvio padrão e a média. (Litch, 1998).

$$c = \frac{s}{x} \times 100$$

Onde: s = desvio padrão

x = média aritmética

Fórmula 6: Coeficiente de Variação (Litch, 1998)

- d. Amplitude (A):** a amplitude possui apenas interesse informativo, sendo utilizada apenas na forma qualitativa na exploração geoquímica (Litch, 1998).

$$A = (X_{\max} - X_{\min})$$

Onde: $X_{\max}$ é o maior valor das observações

$X_{\min}$ é o menor valor de observações

Fórmula 7: Amplitude. (Litch, 1998)

1.6.4.5. Gráficos Probabilísticos

Os gráficos de probabilidade são ferramentas de fácil construção, que apresentam resultados confiáveis e de grande utilidade na interpretação de dados geoquímicos (Litch, 1998).

1.6.4.6. Métodos Teóricos sobre a Definição de Fundos Geoquímicos: Anomalias Geoquímicas

Os critérios e conceitos de estabelecimento de parâmetros geoquímicos são baseados no tipo e finalidade de análise em campanhas de Prospecção e pesquisa geoquímica. O estabelecimento das anomalias geoquímicas baseia-se na análise do padrão de comportamento dos dados de uma campanha de amostragem geoquímica. Os métodos usados para este relatório foram os seguintes:

- i. Teor de Fundo (Background):** o teor médio de um elemento em materiais geológicos não mineralizados ou contaminado (Litch, 1998)
- ii. Anomalia Geoquímica:** Litch (1998) definiu anomalia geoquímica como um desvio da normalidade e, portanto, uma anomalia geoquímica é entendida como um desvio dos padrões considerados como normais para um determinado espaço geoquímico.
- iii. Limiar (Treshold):** Para Litch (1998) limiar é um valor acima do qual, o teor de uma dada amostra é considerado como anômalo.

$$Z = X + 2 \sigma ;$$

$$Z \leq X + 2 \sigma \text{ (para fundo geoquímico)}$$

$Z \geq X + 2 \sigma$ linha base (para anomalia geoquímica), onde Z é a variável, X é a média e σ é desvio padrão.

1.6.4.7. Cálculo do Índice de Geoacumulação e Coeficiente de Enriquecimento (EF)

O **Índice de Geoacumulação (Igeo)** proposto por Håkanson (1969) e modificado por Müller (1980), é uma ferramenta usada para avaliar a contaminação de sedimentos por metais pesados. Onde compara a concentração de um metal no sedimento com o seu valor de fundo natural, levando em conta a variação do sedimento.

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 \cdot B_n} \right)$$

Onde: **Igeo** = é o índice de geoacumulação

Cn = é a concentração do metal na amostra do sedimento

Bn = é a concentração do metal no teor de fundo ou background

Fórmula 8: Índice de Geoacumulação **1,5** = factor de correcção que leva em conta a variação litogénica

Segundo Rene t al. (2022), o índice de geoacumulação é classificado em cinco categorias a seguir

- $I \leq 0$ (não poluído), $0 < I \leq 1$ (ligeiramente poluído);

- $1 < I \leq 2$ (moderadamente poluído);

- $2 < I \leq 3$ (fortemente poluído) e $I > 3$ (severamente poluído).

O **coeficiente de enriquecimento (EF)** é uma ferramenta útil para avaliar o grau de contaminação por metais de origem antropogénica (NOLTING et al., 1999). A concentração de cada metal é normalizada utilizando-se um elemento químico conservador. Este índice é calculado pela equação seguinte:

$$EF = \frac{C_n}{B_n}$$

Onde: **EF** = é o coeficiente de enriquecimento

Cn = é a taxa de concentração de cada metal na amostra

Fórmula 9: Coeficiente de enriquecimento **Bn** = é o background

O valor de EF igual a 1 indica uma origem predominantemente natural para o elemento químico no sedimento, enquanto que, valores mais elevados indicam enriquecimento devido a causas naturais ou a influência antrópica. Os valores de $EF < 1$, podem refletir remobilização e perda do elemento químico, ou sobrestimação dos valores de referência (MIL-HOMENS et al, 2006).

1.4.8. Visita ao Campo

O trabalho de campo foi realizado em oito dias, na empresa VULCAN. O seguinte trabalho foi realizado com o acompanhamento de geólogos, engenheiros de minas e geofísicos, onde foram desenvolvidas as seguintes actividades:

a) Reconhecimento

Nesta fase, na secção 6, na concessão mineira da VULCAN, foram feitos:

- O reconhecimento do terreno;
- A identificação do corpo intrusivo previamente seleccionado;
- Escolha dos pontos alternativos influenciada pela acessibilidade ao terreno, controlado por aspectos naturais (cobertura do afloramento por estéril e por se tratar de um furo antigo parte do dique visível encontrava-se totalmente destruído segundo a imagem no anexo 11- P, não permitindo a análise macroscópica do contacto entre o dique e carvão);
- A análise macroscópica do contacto entre o dique e o carvão noutra secção S2A (anexo 12-M), onde havia o afloramento de um dique.

b) Abertura de Furos de Sondagem e Preparação de Amostras (Sondagem Exploratória)

i. Planificação dos pontos para a abertura dos furos de Sondagem

Nesta etapa, foi estabelecido o local onde se faria a perfuração, local este escolhido para que futuros furos fossem feitos, motivados pelos resultados obtidos nesta pesquisa. Ao todo, foi possível realizar a amostragem até 73m de profundidade no total.

ii. Abertura de Furos de Sondagem

Para a abertura dos furos de sondagem foram usados dois métodos a seguir:

• Perfuração do tipo Circulação Reversa (RC- *Reverse Circulation*)

A sondagem RC é um método de perfuração rotativo e destrutivo, no qual é usado a injeção de ar, água ou fluídos de sondagem como lamas de bentonite por um compressor (figura 1-B), para cortar ou destruir a rocha por meio de um martelo de tungsten (bit) e a amostra ou testemunho de sondagem sai em forma de fragmento ou pó conforme ilustra a figura 3-A. Ela é chamada de "reversa" porque o material perfurado retorna pelo centro da haste, ao contrário da circulação convencional. Por conseguinte, os furos foram abertos por uma haste com 40 mm de diâmetro interior e 90 mm de diâmetro exterior, atingindo 73 m de profundidade. (informação oral do co-supervisor, fonte escrita não encontrada).



Figura 1: Materiais usados durante da abertura dos furos de Sondagem (LD): A-1.Haste de diâmetro menor e 2.haste de diâmetro maior; B- Compressor de ar; C- Perfuratriz da Thompson Drilling. Fonte:Autora

- **Perfuração de Largo de Diâmetro (LD - Large Diameter) e de Alta Qualidade (HQ - High Quality)**

Para a obtenção de melhor informação de qualidade e para investigação geotécnica é usada a sondagem diamantada que consiste no uso da coroa/broca de diamante acoplada às hastes, (figura 2-D e E), para cortar ou perfurar rochas resistentes com as quais, a recuperação do testemunho é integral (*full cored*). Existem vários métodos de sondagem diamantada, a diferença entre eles está no diâmetro da coroa que também, influencia no diâmetro do testemunho recuperado. Os métodos mais aplicados no programa de furos exploratórios nas áreas visitadas, são: o **HQ** que possui diâmetro do Bit (broca de perfuração) =61 mm e diâmetro da broca do furo – 96 mm e o **LD** que possui diâmetro do Bit – 146 mm e diâmetro da broca do furo – 210 mm. (Vale Moçambique Lda., 2021)

Os furos executados com este método têm larga vantagem em relação aos furos RC, porque para além de providenciar material necessário para estudos de qualidade, também produzem material que pode ser usado para outras investigações como são os casos de estudos geotécnicos.



Figura 2: Procedimentos realizados durante da abertura dos furos. D- Introdução da haste no subsolo e E- Perfuração de Sondagem feita com uma perfuratriz da Thompson Drilling. Fonte:Autora

iii. Preparação de amostras

- **Crivagem:** seleccionou-se 1 crivo de (5 μ m), um peneiro manual de 5 μ m para o peneiramento das amostras de siltito e arenito, para facilitar a recuperação do concentrado mais fino usou-se bateia (que serviu de bandeja), porém as amostras de carvão passam directamente para embalagem dado a sua granulometria fina;
- **Preparação e embalagem da amostra:** seleccionou-se uma amostra representativa equivalente a duas colheres e colocou num porta-testemunho (figura 3-F), onde cada compartimento representa 1 m de cada litologia obtida durante a perfuração feita, de seguida é colocado 1kg num saco da mesma amostra para testes laboratoriais adicionais e por fim rotuladas consoante a profundidade;
- **Log Geológico:** foram introduzidos os dados lidos no separador de amostras no AcQuire (figura 3-G), da seguinte forma: intervalo de profundidade, registado o nome do geólogo responsável, litologia (tipo de rocha), percentagem da litologia, cor e granulometria da litologia.

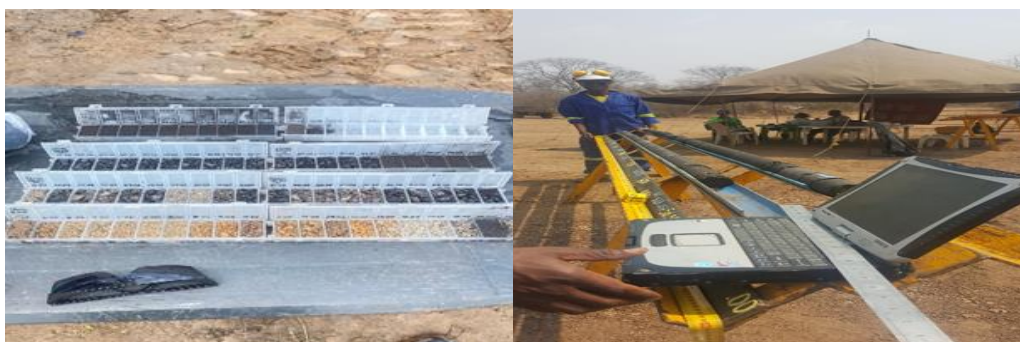


Figura 3: Procedimentos realizados na preparação de amostras. F- Porta-testemunho (RC); G- Introdução de dados no dispositivo Acquire. Fonte: Autora

iv. Perfilagem Geofísica

A **Perfilagem geofísica** é o processo pelo qual envolve a realização de medição ao longo de um furo de sondagem, permitindo a obtenção de informações detalhadas e confiáveis que permitam caracterizar a litologia, estruturas e propriedades das formações geológicas atravessadas através de parâmetros como: a resistividade eléctrica, densidade, radioatividade natural, porosidade e a condutividade térmica, proporcionando dados físicos das rochas perfuradas. Por conseguinte, é produzido um log físico do perfil do furo para cada parâmetro estudado. (Vale Moçambique Lda., 2021)

- **Conciliação e correlação de dados geofísicos:** foi importado um arquivo para a aquisição do banco de dados de modo a evitar a leitura de erros e, de seguida foi feita a impressão física geofísica para a conciliação do nome do poço e da sua profundidade final;

- **Ajuste de Profundidade:** é um processo que envolve a correlação do log litológico e o log geofísico dos poços para compensar as imprecisões resultantes da medição incorrecta da variação do comprimento da haste e discrepâncias de comprimentos acumuladas de registo litológico;

- **Estabelecimento das Secções Geológicas de Carvão:** com a impressão do log físico do perfil do furo, as camadas das jazidas são mapeadas em resultados geofísicos de levantamentos de densidade < 1,80 g/cc, caso contrário deve ser chamado de não carbonífera. Este tipo de correlação é para permitir a identificação da mudança de padrão da camada de carvão devido a falhas ou outro evento geológico.

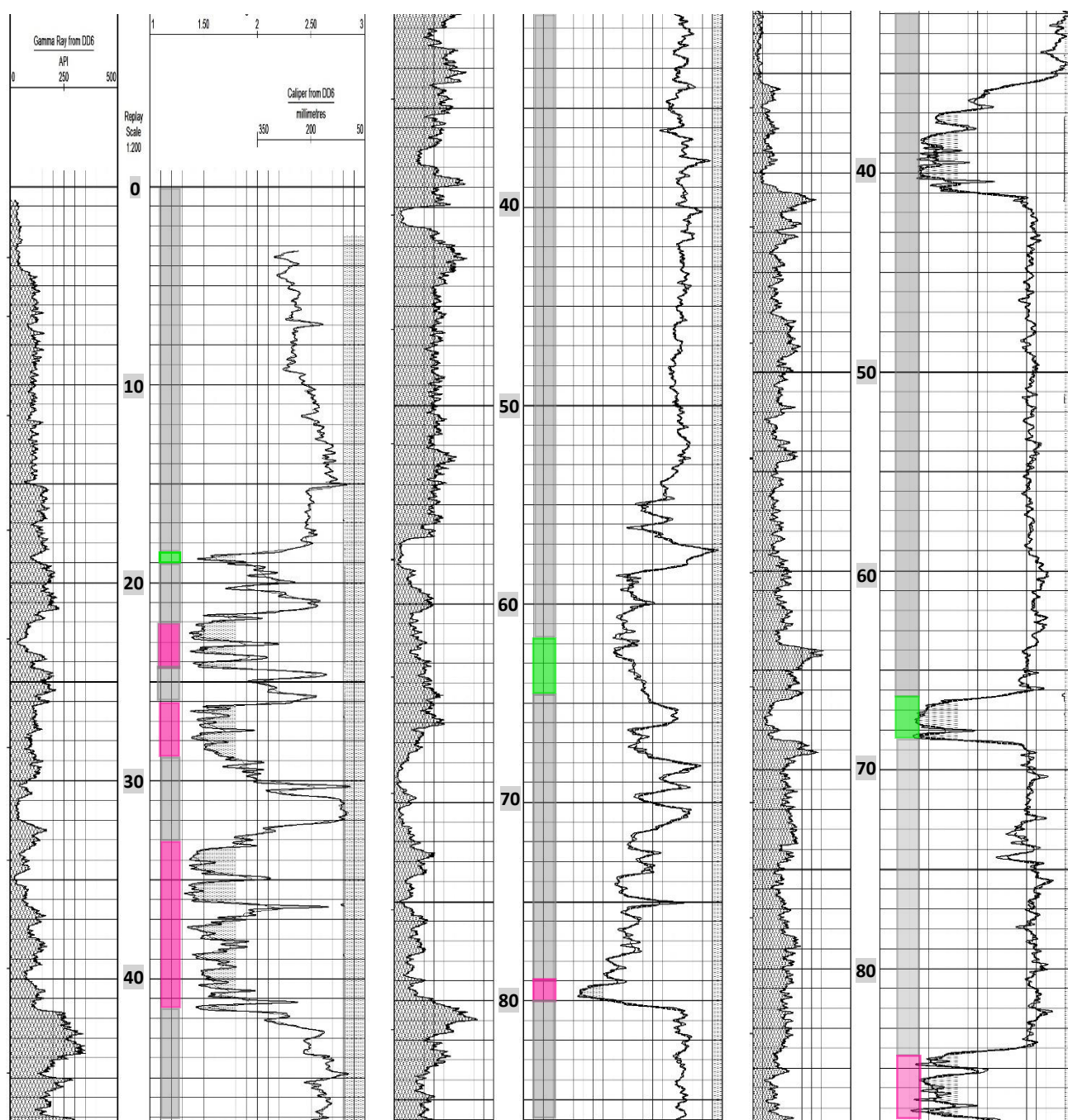


Figura 4: Perfis Geofísicos dos furos de sondagem (Secção 6) na Camada Bananeiras realizados no ano 2018, onde as cores: a) cinza- estéril, b) verde- camada Bananeiras Superior e c) rosa- camada.

Bananeiras Inferior. Fonte: VULCAN MOZAMBIQUE S.A

+

S6_187

S6_152

S6_321

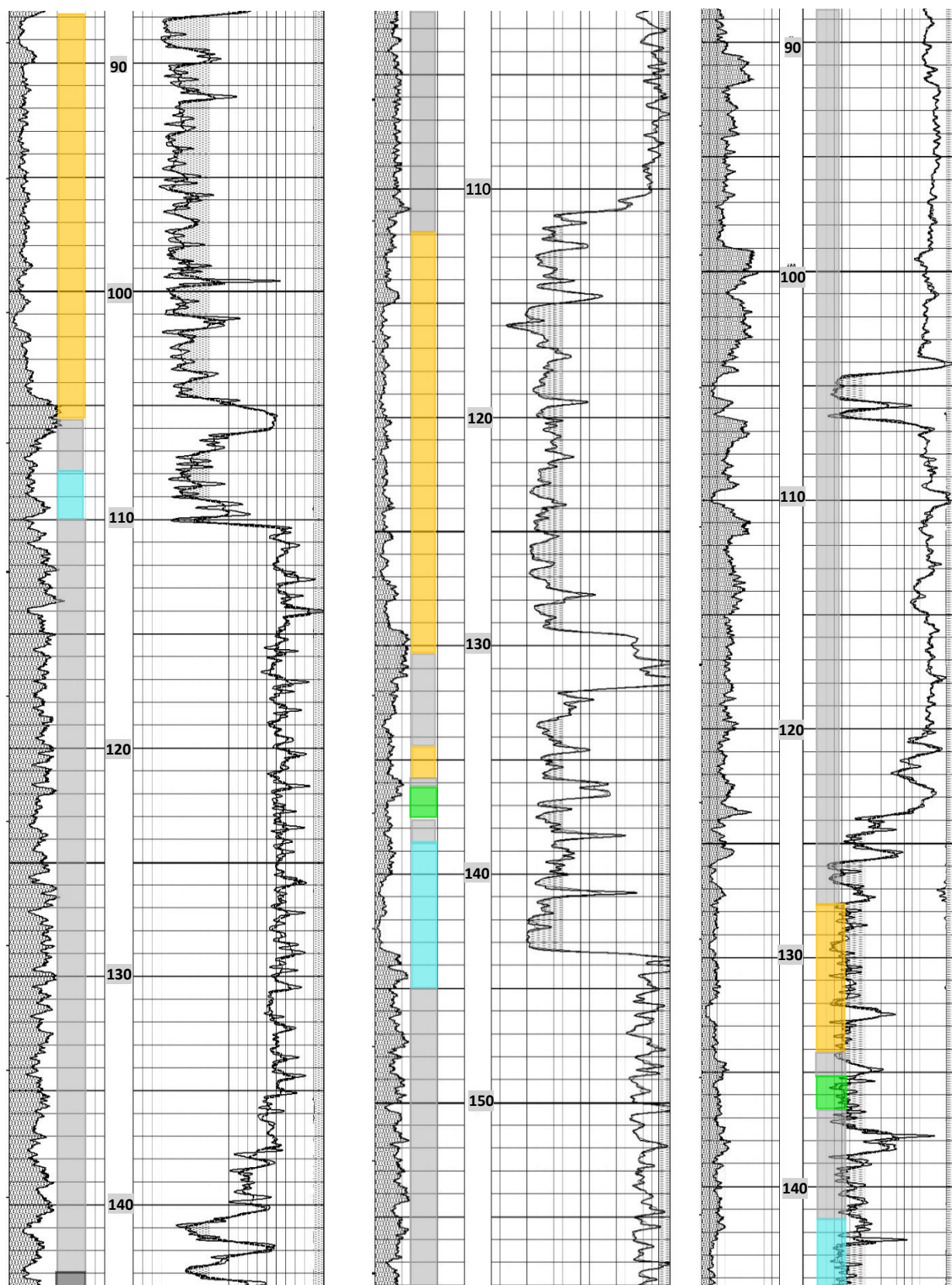


Figura 5: Perfil Geofísicos dos furos de sondagem (Secção 6) na Camada Chipanga realizados no ano 2018, onde: a) Cinza- Estéril, b) Azul- Carvão do Chipanga Inferior, c) Verde- Chipanga Médio e d) Amarelo- Chipanga Superior. Fonte: VULCAN MOZAMBIQUE S.A

1.6.4.3. Análise dos Resultados Laboratoriais

Feita a amostragem, foram selecionadas somente amostras de carvão para análise subsequente no laboratório, feita pela empresa *Bureau Veritas* (BV), que é uma empresa subcontratada pela VULCAN para trabalhos laboratoriais. Neste conjunto foram estudados 8 elementos-traço, selecionados com base nos resultados laboratoriais obtidos, sendo os elementos selecionados os seguintes: As, B, Cd, Hg, Pb, Se, Mo e F.

1.6.4.4. Elaboração do Relatório

Esta fase que constitui a final, consistiu na análise integrada, elaboração de gráficos de correlação, geração de mapas, compilação, interpretação e representação de todos os dados obtidos nas etapas anteriores, e finalmente a elaboração do relatório final apresentado a proposta dos furos afectados termicamente pelas intrusões (figura 6).

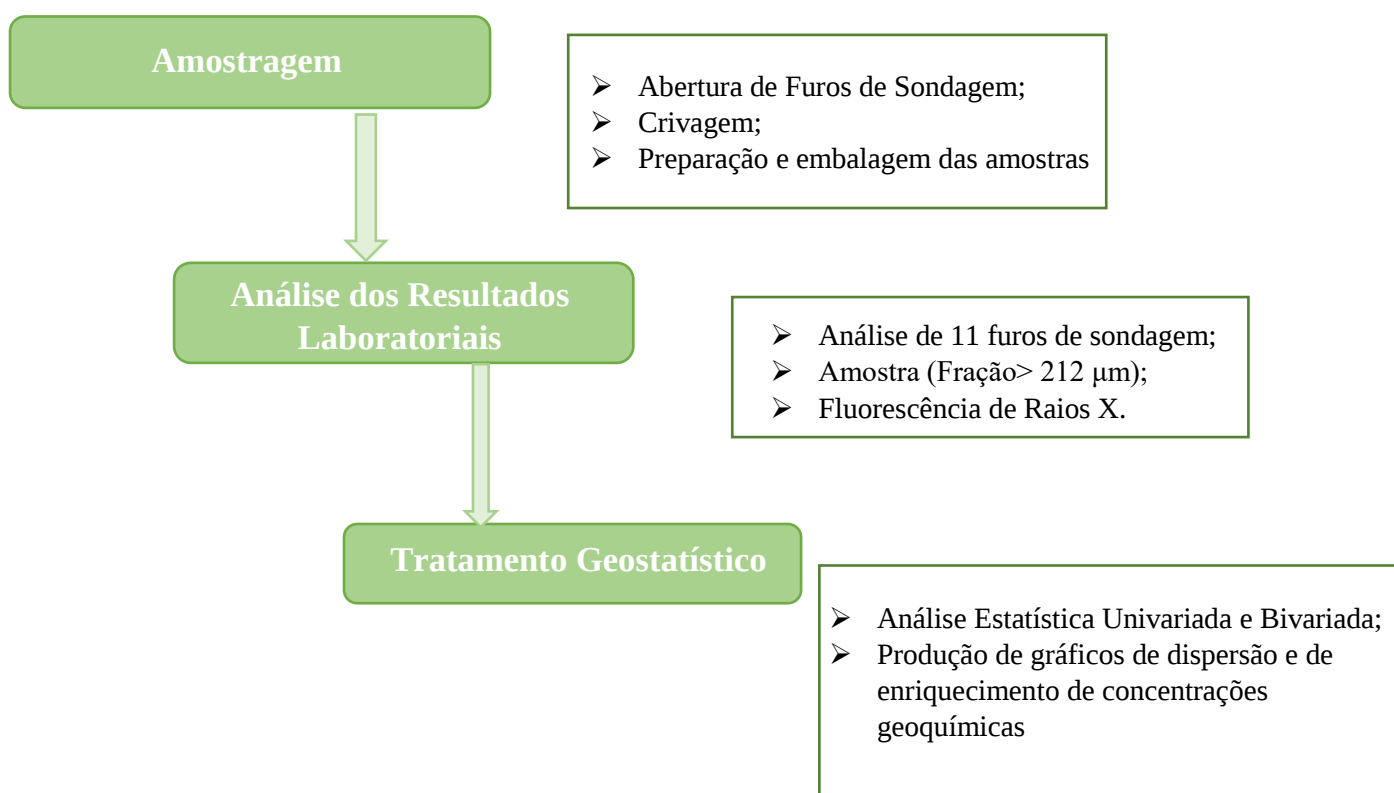


Figura 6: Organograma ilustrando as etapas para a elaboração do relatório

1.7. Aspectos Gerais Concessão Mineira da VULCAN

Para a realização do estudo de gabinete e das actividades de campo nesta licença foram necessárias o auxílio de informações pré-existentes.

1.7.1. Localização e Limites da Concessão

A concessão localiza-se geograficamente na região Centro de Moçambique, entre os distritos de Moatize, Sede, Marara e Chioco (na parte nordeste), na província de Tete, tal como ilustra a figura 7 abaixo. A Bacia Carbonífera de Moatize está incluída na Bacia Hidrográfica do Rio Zambeze, que cobre uma área de 137.000 km² em Moçambique (Real, 1966). É atravessada pelos rios Revúboè e Moatize. A secção 6 é uma das parcelas da área da concessão do Projecto Moatize, esta área situa-se entre os paralelos 16° 10' 30''S e 16° 23' 41''S, e entre os meridianos 34° 05' 45'' e 34° 19' 53'', distando 2 km da Vila do Distrito de Moatize.

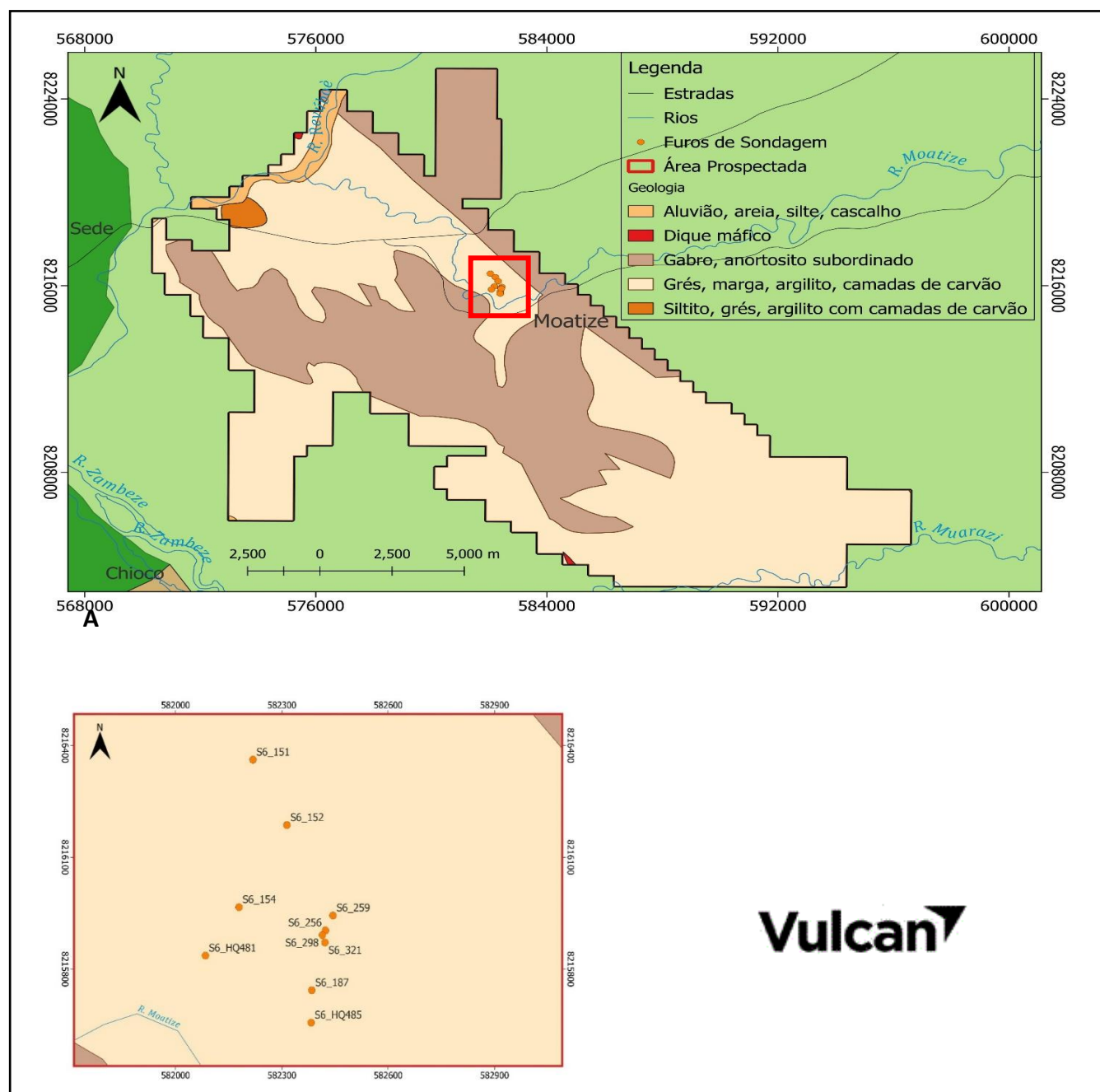


Figura 7: Mapa de localização da Concessão Mineira da VULCAN

1.7.2. Geologia da Concessão Mineira da VULCAN/ Pontos de Perfuração de Sondagem

A área da concessão ilustrada na figura 8, é constituída por rochas pertencentes ao Supergrupo Karoo e ao Precâmbrico, sendo estas compostas essencialmente por carvão e intrudidas por corpos intrusivos. Foram mapeadas as seguintes unidades litológicas na área aqui descritas das ocorrências mais antigas até as mais novas: gabro e anortosito (Suíte de Tete), sequências sedimentares compostas por arenito, siltito e carvão (Formação de Moatize), vulcanismo do Jurássico representado predominantemente por doleritos e sequências aluvionares (figura 7).

via rodoviária e a cerca de 600km da Beira e 700 km de Quelimane. A seguir a Cidade de Tete, a povoação mais importante é a Vila de Moatize, com cerca de 11000 habitantes (Censo de 1980). Com a difusão da guerra nos anos 80, esta população aumentou, gerando inúmeros problemas sociais e económicos pela falta de infraestruturas capazes de absorver tão elevado número de pessoas. (Sousa & Vasconcelos, 1948)

1.8.3. Hidrografia e Orografia

A Bacia Carbonífera de Moatize está englobada na Bacia Hidrográfica do rio Zambeze a qual em território nacional, se estende no sentido Oeste-Este do Zumbo (na fronteira com a Zâmbia e o Zimbabwé) até à sua foz no Oceano Índico (Chinde), e da Zâmbia/Malawi ao Zimbabwé, no sentido norte-sul. A bacia hidrográfica do rio Zambeze ocupa, em Moçambique, uma extensão de cerca de 137 000 km². (Real, 1966). Na zona de Tete e de Moatize, o rio Moatize apresenta uma largura enorme, com margens relativamente baixas. Na cidade a largura atinge cerca de 2 km. O rio Moatize, que corre de este para oeste, é um subsidiário do rio Revúbuè. Este rio, durante a época seca, não tem caudal de superfície. A rede fluvial que drena a Bacia Carbonífera de Moatize é uma rede de drenagem dendrítica que conflui no rio Revúbuè, a norte do Monte M'Pandí (zonas central e noroeste do graben) e, a sudeste deste monte, a rede drena para outros afluentes do rio Zambeze os quais têm curso NE-SW. A rede de drenagem da região é caracterizada por rios de curso impersistente (Sousa & Vasconcelos, 1948). Durante os meses da estação seca (Abril a Dezembro), e considerando a natureza permeável dos terrenos, os rios apresentam leitos secos. Nos meses restantes, caracterizados por chuvas torrenciais, os rios têm caudais turbulentos que impedem a navegação e aceleram a erosão. Em termos de relevo, a bacia situa-se num graben num graben com uma largura variando de 2.5 a 8 km e uma extensão de mais de 20 km, estando a superfície, plana e levemente ondulada, situada a uma altitude entre 140 m e 220 m acima do mar. As zonas bordejantes do graben, de idade precâmbrica, situam-se altitudes maiores (cerca de 300m). (Sousa & Vasconcelos, 1948).

2.1.3. Clima e vegetação

Os climas predominantes no distrito de Moatize são os seguintes: clima seco de estepe na região sul do distrito e clima tropical chuvoso de savana na região norte do distrito. Assim sendo, nos dois tipos de clima predominam duas estações distintas, a época chuvosa entre os meses de Dezembro a Março e a época seca entre Abril a Novembro. (Sousa & Vasconcelos, 1948)

2.2. Enquadramento Geológico

2.2.1. Geologia Regional

A província de Tete é caracterizada por unidades litoestratigráficas divididas em soco cristalino de idade precâmbrica (Proterozóico) e rochas de cobertura de idade fanerozoica, descrito na figura 9. As rochas do soco cristalino compreendem um conjunto heterógeno de paragneisses supracrustais metamorfizados, granulitos, migmatitos, ortogneisses e rochas ígneas. As formações fanerozóicas são constituídas por rochas do Supergrupo do Karoo (que se estende do Carbonífero Superior ao Jurrássico Inferior-Médio) e formações do Jurássico Superior ao Recente (formações pós-Karoo), (Consórcio GTK, 2006a).

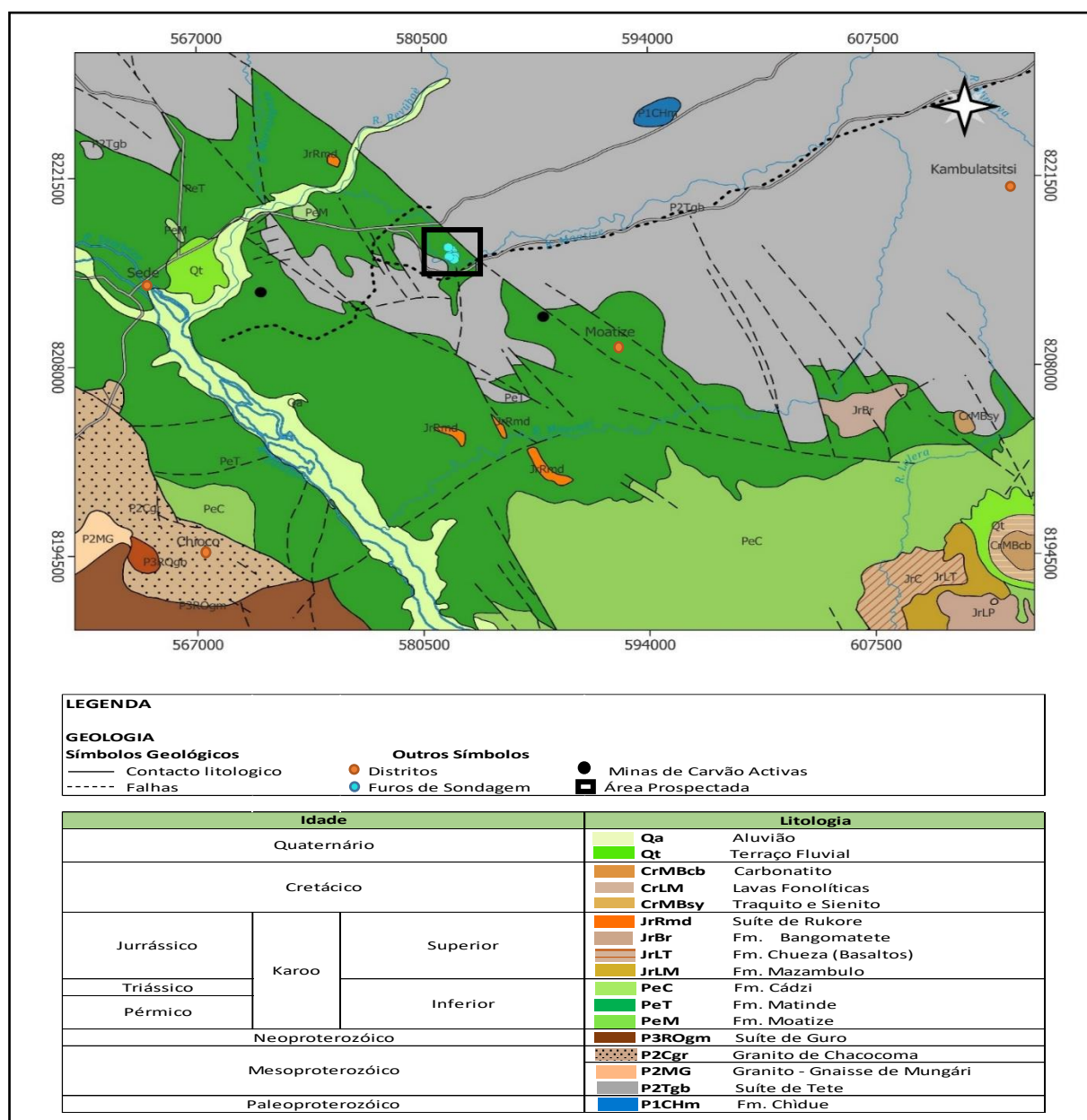


Figura 9: Mapa geológico da área de estudo (Adaptado do Mapa 1:250 000; GTK Consortium 2006b).

2.2.1.1. Pré-Cambrico

Na província de Tete as formações de idade precâmbrica encontram-se agrupadas em três terrenos, que colidiram e se amalgamaram durante a orogenia pan-africana, nomeadamente:

O Terreno do Gondwana Este está representado pelo Grupo de Angónia (constituído por gnaisses) e pela Suíte de Ulônguè (constituída por gnaisses, anortositos, meta-gabros e piroxenitos). O Terreno Gondwana Oeste é constituído por i) rochas supracrustais, ii) rochas metavulcânicas, iii) rochas intrusivas de idade mesoproterozóica (± 2.7 Ga): essencialmente de granitóides e rochas da Suíte de Tete (P₂T – gabros e anortositos), nas quais se encaixa o graben de Moatiz4e e iv) rochas intrusivas pan-africanas. O Terreno do Gondwana Sul é representado pela formação de Chíduè, e é constituída por mármore, gnaisses e meta-arenitos, e pelo granito de Chacoma (Consórcio GTK, 2006a).

2.2.1.2. Supergrupo do Karoo

As unidades sedimentares do Supergrupo do Karoo em Moçambique estão representadas em bacias de tipo rift com preenchimento desde o Carbonífero Superior até ao Jurássico Inferior). As rochas Karoo de Moçambique ocorrem em várias estruturas do tipo Graben de rifte/margem passiva. Estas incluem (de norte a sul) o Graben Metangula (Província de Niassa), Bacia Rovuma (Província de Cabo Delgado) e o Graben do Meio- Zambezi (Província de Tête). Mais ao sul, rochas vulcânicas básicas e ácidas dos monoclinios de Nuanetsi-Sabi e Lebombo compõem a maior parte da sequência Karoo. (GTK Consortium, 2006; Paulino et al., 2010)

O Karoo é definido como estratos assentes em discordância sobre o soco precâmbrico e discordantemente sobrepostos por estratos do Jurrássico Médio ou mais recentes. (GTK Consortium, 2006b).

O Karoo é constituído por uma grande bacia com uma sequência geológica bem caracterizada por fósseis, o que permitiu dividir o Supergrupo Karoo em níveis estratigráficos, nomeadamente Dwyka, Ecca, Beaufort, Stormberg e Drakenberg, (as primeiras quatro formações são sedimentares e a última vulcânica). Em Moçambique, a diferenciação em níveis estratigráficos tornou-se difícil em virtude das bacias serem irregulares e a sequência geológica não ser completamente representada por fósseis e litologias características (Paulino, 2009 citado por Afonso 1978).

O Supergrupo Karoo compreende uma série de formações maioritariamente sedimentares, com episódios ígneos bimodais no seu término e que variam em idade desde o Carbonífero Superior ao Jurrássico Inferior.

Sequência Estratigráfica da Bacia de Moatize				
Era	Período	Grupo	Formação	Litologia
Cenozóico	Quaternário		-	Aluvião e Terraços Fluviais
Mesozóico	Cretácico	Karoo Superior	Suíte Monte Muambe	Carbonatitos, Sienitos e Traquitos
	Jurássico		Suíte de Rukore Formação de Bangomatete	Diques doleríticos, Riolitos e Basaltos
	Triássico			
Paleozóico	Pérmico	Karoo Inferior	Formação de Cádzi	Grés arcósico, horizontes de conglomerado e calcário
			Formação de Matinde, Moatize e Vúzi	Conglomerados, arenitos, argilito e camadas de carvão
Meso-protezóico			Granito de Chacocoma Granito-Gnaisse de Mungári Suíte de Tete	Granito Biotítico Porfirítico Granito-Gnaisse Gabros e Anortositos
Paleo-proterozóico			Formação Chidue	Mármore

Tabela 2: Sequência Estratigráfica da Bacia de Moatize (Adaptado de Chivurre, 2018)

Na província de Tete, o Supergrupo Karoo é representado por bacias sedimentares com orientação Este-Oeste e Noroeste- Sudeste ao longo do vale do rio Zambeze. Na região de Moatize, o Supergrupo Karoo assenta em discordância sobre o Precâmbrico, num contacto muitas vezes por falhas. É caracterizado por rochas sedimentares detríticas de origem continental, com diques e soleiras associadas que intruem na fase final da deposição, alguns dos diques cortando as falhas de bordadura (Vasconcelos, 2005). Na região de Moatize o Supergrupo Karoo (tabela 2), consiste numa sequência de arenitos, siltitos, argilitos, xistos argilosos e carvão próximo à base, e intrusões doleríticas (diques e soleiras) que afectam termicamente o carvão e outras rochas encaixantes (Vasconcelos, 1995).

Contudo, uma das características perceptíveis na Bacia Carbonífera de Moatize é a abundância de camadas de carvão intercaladas na Formação de Moatize. (Vasconcelos & Achimo, 2010)

2.2.2. Enquadramento Geológico Local

A área de estudo, neste caso a secção 6, localiza-se na parte Este de uma das maiores sub-bacias da grande Bacia do Karroo do Médio de Zambeze em Moçambique, a Bacia Carbonífera de Moatize. Esta bacia acomoda sedimentos do Karroo Inferior e tem uma extensão de cerca de 20 km de comprimento e 28 km de largura, com uma tendência geral que passa de NW-SE (a montante) para E-W (a jusante) em direcção a Minjova (Vale, 2006). A formação de Moatize consiste principalmente numa sequência de arenitos (carbonáceos e quártzicos), argilitos, siltitos, xistos argilosos, carvão próximo a base e intrusões doleríticas (diques e soleiras) que consequentemente afectaram termicamente o carvão e as rochas encaixantes. (Sousa & Vasconcelos, 2005)

2.2.3. Enquadramento Tectónico – Estrutural

A Bacia Carbonífera de Moatize tem a forma de um sinclínório suave e assimétrico, com o flanco NE inclinado 17° e o flanco oposto (SW) inclinado a 13°. A bacia está alinhada ao longo de um graben orientado a NW-SE, limitado parcialmente do substrato cristalino por grandes falhas de bordadura com a mesma direcção. (Sousa & Vasconcelos, 1995)

A falha de Bordadura, ilustrada no mapa estrutural da figura 12, é a estrutura mais evidente, que é limitada a NE pelo graben com uma extensão de 30km largamente exposta com uma tendência praticamente rectilínea na direcção NW-SE, inflectindo para a direcção E-W na zona sudeste do graben por mais cerca de 10km (Magnee & Thonnard, 1996 em Sousa & Vasconcelos, 1995), com uma inclinação média de 45° SW.

Porém, o bordo sudoeste do graben é diferente, visto que a falha do Monte M’Pandi só persiste 4km, estando constantemente interrompida, provocando o surgimento de numerosos blocos falhados separados por rochas da Série Ígnea de Tete e Angónia (Sousa & Vasconcelos, 1995)

As falhas são do tipo normal, característico de estruturas em graben. A estrutura intensamente falhada desta região deve estar ligada à formação gradual do Vale do Zambeze para sul (AUSTROMINERAL, 1985 em Sousa & Vasconcelos, 1995).

Na BCM é comum a ocorrência de grandes diques doleríticos, com uma extensão de mais de 10 km e espessuras variáveis desde alguns centímetros a mais de 50m, estando confinados às zonas do Monte M’Pandi a noroeste e na zona de Calambo a sudeste e têm orientação geral da bacia. Na zona de extensão sudeste, dois diques cortam as camadas quase paralelamente a elas, mostrando um aspecto de soleiras. (Sousa & Vasconcelos, 1995)

Quando os diques cortam as camadas de carvão, que provocam fenómenos de coquefação natural em ambos lados dos diques cuja extensão depende da espessura da espessura dos diques, raramente ultrapassando 25m para cada lado do dique. Portanto, para o caso das soleiras a SE, o processo de coquefação é mais extenso, quer horizontalmente (ao longo contacto com o dique/camada) quer verticalmente (com vários metros de espessura). (Sousa & Vasconcelos, 1995)

2.2.3.1. Formação Moatize

i. Caracterização das camadas de carvão da Formação de Moatize

Segundo Hatton & Fardell, a sequência estratigráfica da Formação de Moatize inclui seis principais (figura 10) camadas de carvão depositadas durante o Karroo Inferior, da base ao topo a seguir:

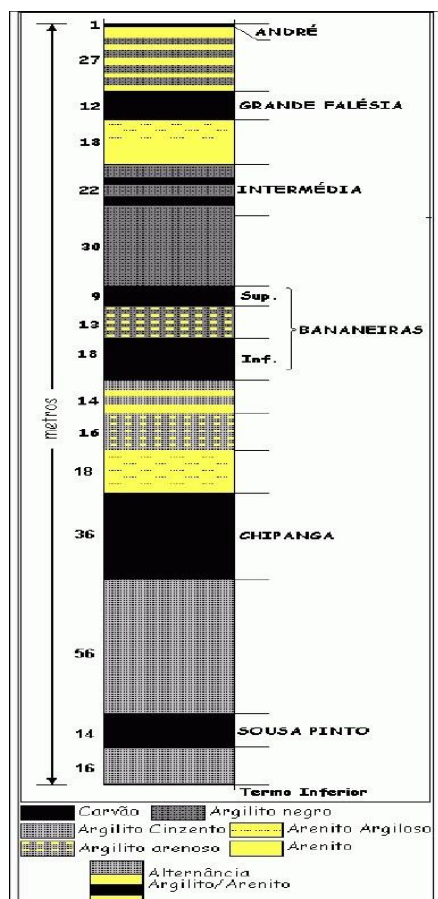


Figura 10: Coluna Estratigráfica da Série Produtiva. (Sousa & Vasconcelos, 1995)

a) Camada André

Esta camada é homogénea, também rica em vitrino na base, com espessuras variando de 0.60 m to 8.35 m. Ela não tem interesse económico dado a baixa espessura, associada a presença de intercalações de lentes de arenitos. (Susa & Vasconcelos, 1995)

b) Camada Grande Falésia

Esta camada encontra-se separada da intermediária por uma intercalação de arenitos na base gradando para arenitos pelíticos no topo da sequência. Ocorre em toda a bacia, mas com exposição bastante limitada. Apresenta uma notável alternância de bandas de pelitos e carvão rico em vitrino na base. Dado ao alto teor de cinzas que caracteriza esta camada, sua exploração é considerada sub-económica. (Sousa & Vasconcelos, 1995)

Esta camada é composta de duas sub-camadas separadas por xisto negro e parece não ter interesse económico dado a sua heterogeneidade. A sua espessura varia de 1.25 m a 21 m e a sua composição é bastante irregular. (Vasconcelos & Pinheiro, 2004)

c) Camada Bananeiras

A Camada Bananeiras está presente por toda a bacia e pode ter condições favoráveis de exploração. A sua parte inferior tem características semelhantes à Chipanga. Está subdividida em três partes, sendo a basal homogénea, rica em carvão (anexo 11- N) e com mais de 1 m de espessura, a parte intermédia é pelítica com 0.50 m de espessura, e a parte superior, nem sempre presente, é estéril. No total, a espessura varia de 3.05 m a 57.45 m. (Vasconcelos, 2005)

d) Camada Chipanga

A Camada Chipanga pré-existe ao longo de toda a bacia com variações moderadas de espessura e composição. É a camada mais espessa Bacia Carbonífera de Moatize e mais homogénea de todas, sendo uma alternância de camadas de carvão e de pelitos. A espessura varia entre 24 m a 65 m. Em certas áreas da bacia mostra um *split* com uma intercalação arenítica de até 50 m de espessura. (Vasconcelos, 2005)

Caracteriza-se pela sua homogeneidade de distribuição na bacia. Dado as diferenças do comportamento geológico observadas nesta camada, foi subdividida em três partes cujos nomes indicam a posição vertical a que cada uma destas pertence: Chipanga Inferior (LC), Chipanga Médio (MC) e Chipanga Superior (UC), ilustrada na figura 11, sendo o LC o mais rico e importante de toda a BCM, dado o teor baixo de cinzas nele presente. (RDMZ, 2006)

e) Camada Sousa Pinto

A Camada Sousa Pinto tem uma grande variação lateral de fácies com altos teores de cinzas. Apresenta uma alternância rítmica de carvão/estéril (ciclotema), em que as zonas de carvão são constituídas por intercamadas de carvão/argilito, ao passo que os estéreis são pelitos. (Vasconcelos, 2005)

4. CAPÍTULO IV: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Discussão de Resultados

4.1.1. Definição da Extensão da Auréola e Caracterização da Zona de Alteração (Metamorfismo)

Vasconcelos (2009) defende que o carvão da BCM possui um poder reflector médio de 1.39% (correspondente carvão betuminoso de médios voláteis) com uma tendência de aumento do topo até a base das camadas. Com base nos valores dos $Pr_a\%$ (Stach et al., 1982, Vasconcelos 2005) de forma geral percebe-se que o carvão sofreu um aumento no seu grau de incarbonização, tendo gradado de betuminoso de médios voláteis na base da camada para meta-antracite junto ao contacto.

Singh et al. (2008) citado em Vasconcelos (2009), subdividiu a auréola de alteração formada em carvões betuminosos da bacia de Jharia da Índia em três zonas: i) zona do carvão inalterado, com um $Pr_a\%$ que varia de 0.8 a 1.3% caracterizada pela presença de minerais primários, ii) zona de carvões moderadamente alterados com $\%Pr_a$ entre 1.3 e 1.8%, com minerais primários e secundários e iii) com $\%Pr_a$ acima de 1,8% como carvão severamente alterado que é caracterizado somente por minerais secundários, essencialmente os carbonatos. Tendo em conta os valores do $Pr_a\%$, as estruturas de coque natural e outras alterações observadas em direcção a intrusão, o carvão da camada Chipanga divide-se em duas zonas principais: i) a zona do carvão não afectado (NFC) e ii) a zona do carvão afectado (BC), esta última é subdividida em duas sub-zonas, a zona do carvão moderadamente afectado (TC) e severamente afectado (BC). (Anderberg, 2008)

A zona do carvão não afectado dista 115 metros do dique na camada Chipanga (Fig. 11) e na camada Bananeiras dista 105 metros, representados pelas amostras dos furos S6_151, S6_152, S6_154 e S6_HQ485, com uma média de 1,38% de $Pr_a\%$ na camada Bananeiras (Anexo 15) e 1.34 % na camada Chipanga (Anexo 14). Ela é caracterizada pela presença dos macerais típicos desta camada, isto é, altos conteúdos de vitrinite (varia de 72,8 a 83%), seguida de inertinite (Vasconcelos 1995) na sua forma inalterada. Essas amostras possuem um valor de CSN máximo observado, igual a 9 em ambas camadas, conservando ainda as suas propriedades coqueificantes excepto no furo S6_321 (contém carvão afectado). Foram encontrados valores de TRD que variam de 1,62 a 1,67% nas amostras de ambas camadas.

A zona de carvão moderadamente afectado dista 120 metros do dique na camada Chipanga (figura 11), representadas pelas amostras dos furos: S6_187, S6_256, S6_259 e S6_HQ481, com uma média de 1,8% de $\%Pr_a$, e na camada 128 metros do dique na camada Bananeiras representada pelos furos S6_LD477, S6_256 e S6_151, com uma média de 1,5% de $\%Pr_a$.

A zona do carvão afectado estende-se por 150 m abaixo quanto a lateral do dique na zona do Perfil (Fig. 11), representadas pelas amostras dos furos: S6_256 e S6_321. com uma média de 1,9% de Pra%, com a intensidade dos efeitos aumentando na medida em que a distância do carvão aumentando em relação ao contacto. Sendo que a espessura da intrusão na zona do Perfil é de 25m, essa observação enquadra-se nas conclusões de Pareek (1964) e Kalkreuth (2016), que defendem que uma intrusão numa camada de carvão produz uma auréola de alteração com extensão igual ou superior à espessura da intrusão.

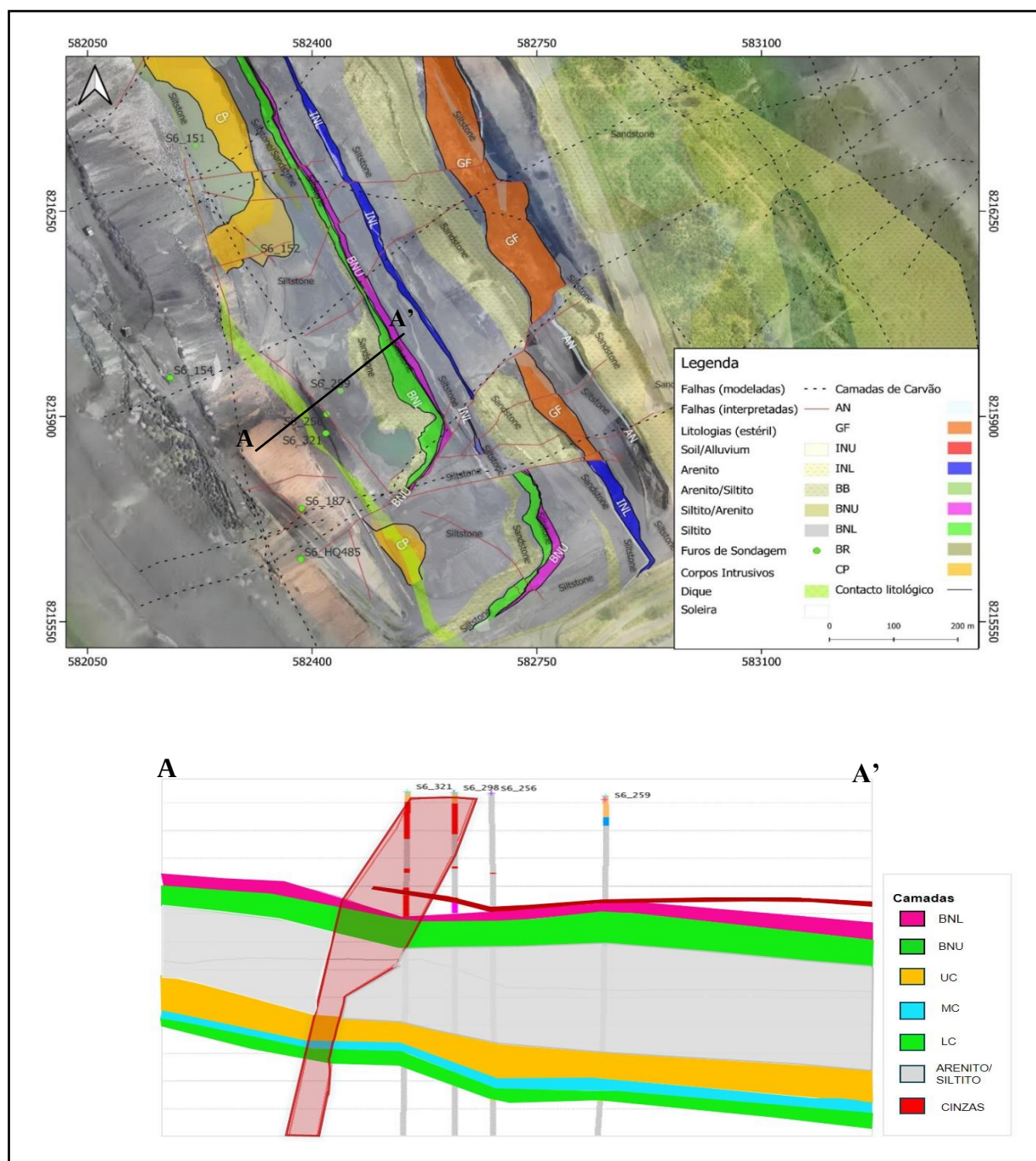


Figura 11: A- Mapa Geológico – Estrutural da Área de Estudo (Secção 6), abaixo o corte Geológico da área de estudo. Fonte: VULCAN Mozambique S.A

Para determinar a qualidade do carvão foram necessários os seguintes parâmetros: a) grau, que é o estágio de evolução da matéria orgânica; b) tipo, é a composição maceral do carvão e a categoria, que é definida com base em análises químicas (determinação do teor de cinzas com base em cálculos). Para conhecer as principais propriedades químicas do carvão em estudo foram analisados resultados laboratoriais efectuados em 2018 pela *Bureau Veritas*.

As cinzas correspondem a substâncias compostas de material inorgânico, proveniente da combustão da matéria-mineral e da matéria-orgânica (Chivurre, 2018). Verificou-se que, a amplitude dos valores varia de 2%(S6_298) e 10,5% (S6_HQ485), onde os furos com valores mais altos de cinzas são os furos mais próximos do contacto com a intrusão variando de 8,6% a 10,5%, diferente dos furos mais distantes do contacto com valores que variam de 2% a 2,9% (S6_298 e S6_187), ilustrado no anexo 15.

Os valores de cinzas registados próximo ao contacto estão ligados ao facto de junto deste ocorrer um enriquecimento em MM, destacando carbonatos e pelo intenso calor que conduz a queima da MO. Através do teor de cinzas foi possível constatar que os valores do furo próximo ao contacto da intrusão sofreram alterações ainda mais intensas que os mais distantes da intrusão.

O grupo maceral dominante é o das vintrinites (anexo 15) em percentagens variando de 80 a 84,4% (S6_298 e S6_187), de seguida as telovintrinites que variam de 51 a 76,5% (S6_HQ485 e S6_298) e por fim, as inertinites com percentagens que variam em torno de 8,4 a 13,6% (S6_247A e S6_154).

O poder refletor apresenta valores que variam entre 1,1 a 1,6% (S6_HQ485 e S6_S6_187).

O Índice de Intumescimento no Cadinho (CSN) determina poder de aglutinação do coque, e o seu valor varia de 0 a 10 (Chivurre, 2018). Onde o $CSN < 4$ o carvão não pode ser usado como metalúrgico; $CSN > 4$ pode ser usado para a produção de coque metalúrgico. Nos resultados laboratoriais analisados identificou-se apenas um furo com uma média de 0,6% (S6_321), e as remanescentes apresentam valores superiores a 4, o que indica que este carvão pode ser usado como metalúrgico.

4.1. Análise da Distribuição Espacial dos Elementos – Traço

Para a efetivação dos objectivos traçados, o estudo da distribuição espacial dos elementos – traço foi realizado em duas camadas de carvão da Secção 6, a saber:

- ✓ Camada Chipanga, e;
- ✓ Camada Bananeiras.

4.1.1. Camada Chipanga

a) Arsénio

O arsénio é um elemento cancerígeno, que danifica os nervos e as células sanguíneas. A média da concentração na crosta terrestre é de 1.8 ppm. Primariamente, é associado aos sulfuretos como impureza no carvão. A pirite (FeS_2) pode acomodar pequenas quantidades de As na sua estrutura. Altas concentrações de As geralmente estão associadas a mineralização de sulfetos, onde a arsenopirite (FeAsS) é uma das formas (Clarke & Sloss, 1989 citado por Anderberg, 2008).

Os dados na figura 12, demonstram valores de arsénio que variam de 0,3 a 3 ppm na sua composição. O gráfico denota amostras com valores acima de sua tendência, que variam de 4,4 a 5,8 ppm, que ultrapassam a média normal na crosta terrestre. As concentrações do arsénio (desde a zona C0 a C2), não apresentam uma tendência preferencial em relação a distância ao dique, excluindo a possibilidade da produção dessas quantidades terem sido causadas directamente pela intrusão. Tendo em vista que a percentagem da pirite apresenta uma tendência de aumento na medida em que a percentagem de arsénio aumenta (anexo 5-E), isto indica que o arsénio foi mobilizado para o carvão pela precipitação da pirite (processo que ocorre quando a pirite é exposta a ambientes redutores, com a presença de ferro e enxofre), que deriva da alteração térmica pelo metamorfismo de contacto, o que se equipara a conclusão de Dai & Ren (2014) onde “a pirite epigenética é precipitada no coque natural, derivada da alteração térmica causada pela intrusão no campo de Huianan, na China”.

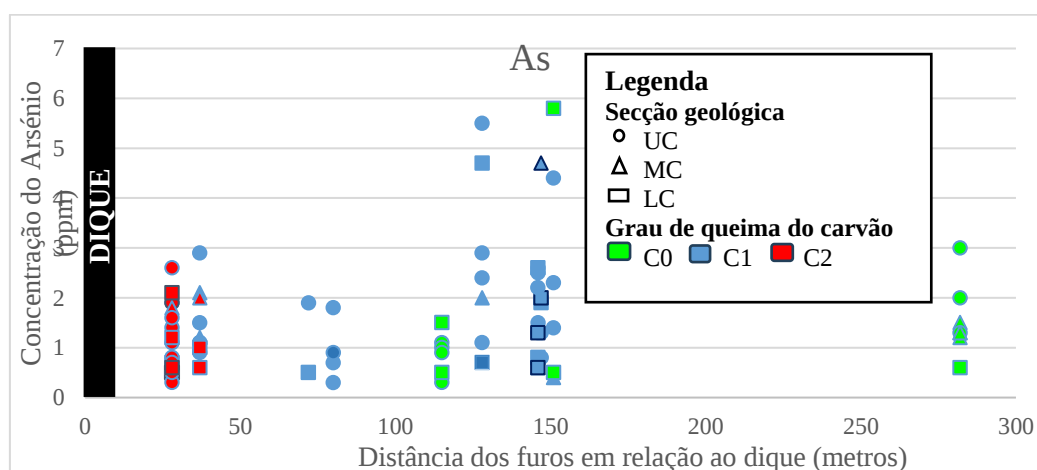


Figura 12: Gráfico da variação da concentração do As no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

b) Boro

O boro é um elemento cuja concentração média na crosta terrestre é de 9 ppm. Está associado primariamente a aluminossilicatos e, em excesso é tóxico para as plantas e humanos. Entra na atmosfera na fase vaporização (fusão). (Clarke & Sloss, 1989, citado por Anderberg, 2008)

Os dados na figura 13 demonstram que, o boro varia de 3.1 a 11,8 ppm. O gráfico denota amostras com valores acima de sua tendência, que variam de 15 a 26,6 ppm. As concentrações do boro não apresentam uma tendência em relação ao aumento ou redução das concentrações, logo a concentração do boro não tem relação com a temperatura e a proximidade da intrusão. Contudo, a concentração de boro aumenta na medida em que a dos silicatos aumenta (anexo 5- F), indicando que este é originário de aluminossilicatos incorporados no próprio carvão. (Clarke & Sloss, 1989 citado em Anderberg, 2008).

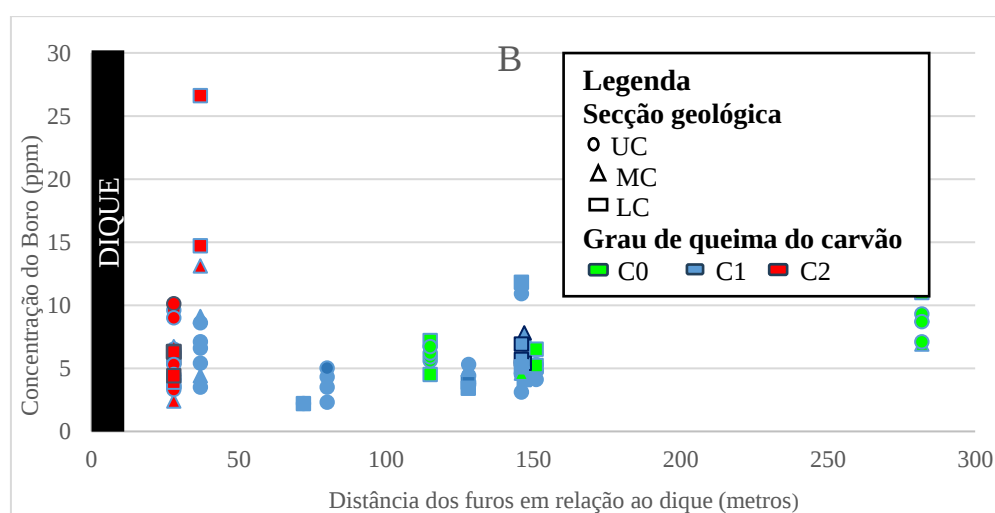


Figura 13: Gráfico da variação da concentração do boro no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.

c) Cádmio

O cádmio é um elemento tóxico para a vida aquática. A concentração média na crosta terrestre é de 0.16 µg/g. Porém, a pirite pode acomodar pequenas quantidades de Cd na sua estrutura. Geralmente, altas concentrações são associadas com a mineralização de sulfetos, onde a *esfaielite* (ZnS), usualmente contém Cd na sua solução com Zn (Clarke & Sloss, 1989 citado por Anderberg, 2008).

As concentrações do cádmio segundo o gráfico ilustrado na figura 14, não ultrapassam 0.8 ppm, indicando as mesmas variações tanto nos carvões afectados quanto nos não afectados, excluindo a possibilidade da produção dessas quantidades terem sido causadas pela intrusão. No entanto, o cádmio é oriundo da precipitação da pirite ou a esfaielite (mineral presente em abundância no carvão de Moatize), dado que este tende a aumentar segundo o aumento da esfaielite (anexo 6- G).

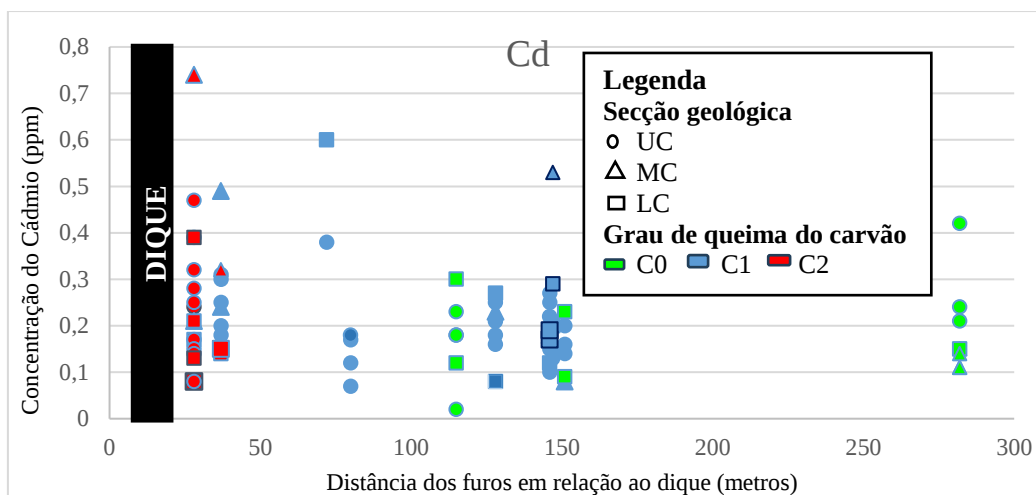


Figura 14: Gráfico da variação da concentração do cádmio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.

d) Chumbo

O chumbo é tóxico, causando anemia e danos ao sistema nervoso em quantidades excessivas. Acredita-se, que o envenenamento por chumbo dado à exposição ambiental cause retardo mental em crianças. O Pb geralmente encontra-se associado ao sulfureto de pirite como galena (PbS) e foi encontrado como substituto do bário em silicatos e fosfatos, Clarke & Sloss, (1989) citado por Anderberg, (2008).

As concentrações do chumbo no gráfico abaixo (figura 15) variam de 1,4 a 22,9 ppm. O gráfico apresenta valores anômalos que variam de 30,5 a 54,8 ppm que ultrapassam a concentração média na crosta terrestre. Estes dados não apresentam uma tendência preferencial pois, tanto os carvões afetados como os não afetados termicamente denotam valores próximos, indicando com isto a ausência de correlação com a proximidade da intrusão. Contudo, o chumbo aumenta com o incremento da concentração da galena denotando que este elemento origina da precipitação da pirite no carvão (anexo 6- H), descrito por Clarke & Sloss, (1989) citado por Anderberg, (2008).

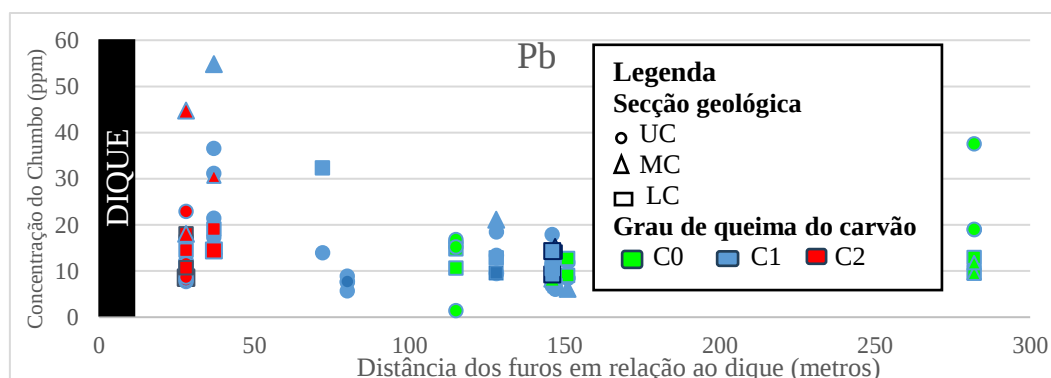


Figura 15: Gráfico da variação da concentração do chumbo no carvão e a distância do dique dos furos

e) Mercúrio

Dentre todos os elementos, o mercúrio é o que gera a mais preocupante quantidade de metais pesados poluentes. A exposição a quantidades excessivas de mercúrio causa toxicidade crónica e cutânea. Pode ser achado em soluções sólidas na pirite.

Segundo Clarke e Sloss (1989) citado por Anderberg (2008), a combustão é o maior escopo de emissões de mercúrio causadas pelas actividades humanas, é responsável por dois terços de emissões mundialmente. Um estudo feito por Bignoli (1989), estima que para todas as estações de força consideradas, 89% do Hg presente no carvão é emitida de pilhas, largamente como vapor.

Os dados ilustrados na figura 16, demonstram concentrações que variam de 0.01 a 0.28 ppm do mercúrio tanto dos carvões afectados quanto nos não afectados. O gráfico denota amostras com concentrações anómalas que variam de 0,44 a 0,88 ppm, ultrapassando a sua média na crosta terrestre, indicando as mesmas variações, denotando de certa forma que a proximidade da intrusão não influencia no seu padrão geoquímico. Portanto, o mercúrio atmosférico pode estar associado a matéria particulada, mercúrio – orgânico, $(CH_3) HgBr$ e minerais sulfetos (Clark Sloss, 2008), dado este justificado com o aumento da concentração do Hg segundo o incremento do sulfeto da pirite (anexo 8 - L).

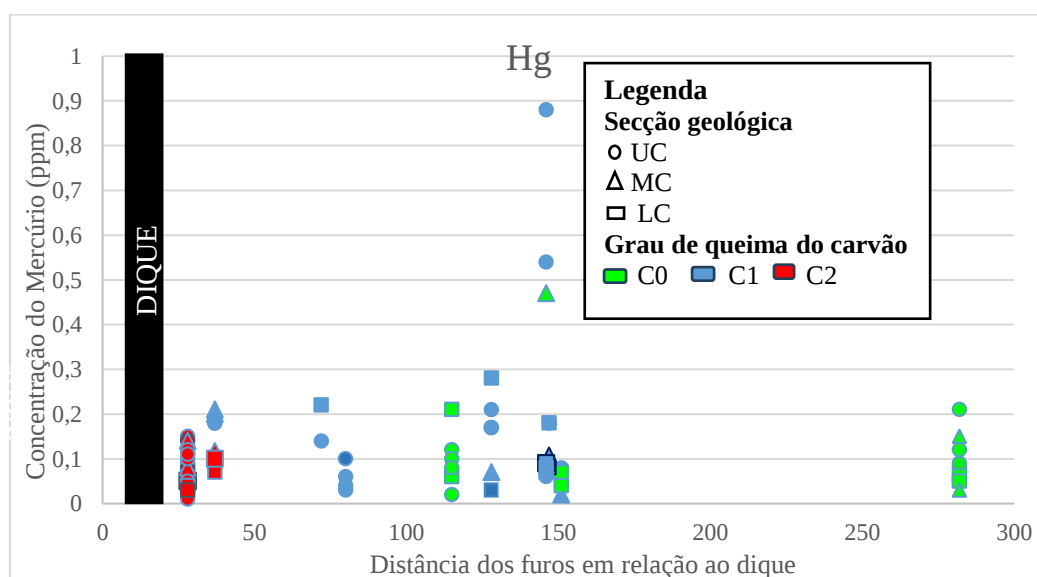


Figura 16: Gráfico da variação da concentração do mercúrio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

f) Molibdénio

O molibdénio é um elemento essencial com baixa toxicidade. Poucos dados estão disponíveis acerca da toxicidade humana do molibdénio. Uma síndrome semelhante à gota e pneumoconiose foram

associadas a concentrações excessivas de Mo, mas o desenho inadequado impede uma determinação adequada da etiologia desses efeitos. O Mo geralmente, está associado ao mineral molibdenita, que é um sulfeto de molibdênio (MoS_2), Clarke & Sloss, (1989) citado por Anderberg, (2008).

As concentrações no gráfico abaixo (figura 17) variam de 2 a 14 ppm. O gráfico também demonstra concentrações anômalas de Mo que variam de 16 a 24 ppm. As concentrações do Mo não apresentam uma tendência em relação a distância da intrusão, o que indica a não influência da intrusão no seu surgimento no mesmo carvão, que corrobora com o facto de este elemento ter sido mobilizado após a precipitação da pirite, dado que a concentração do molibdênio aumenta na medida em que a concentração da pirite aumenta segundo o anexo 7- I.

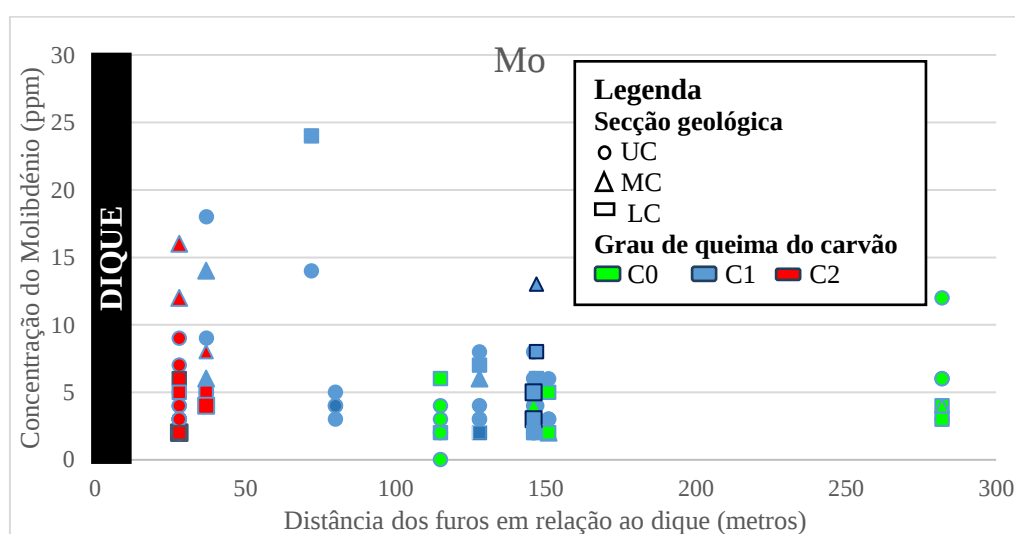


Figura 17: Gráfico da variação da concentração do molibdênio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

e) Selênio

O selênio é o quarto elemento na tabela periódica, ametal, e é quimicamente relacionado ao enxofre e o telúrio. O Se normalmente ocorre com o S, comumente como selenitos em minerais sulfetos. No carvão esta associação está com a pirite (sulfeto de ferro ou FeS_2). A crosta terrestre tem como concentração média valores que variam de 0.03 – 0.08 ppm. O selênio é um micronutriente essencial para todas as formas de vida, componente de ácido aminoselenocisteno. Este mineral é de particular importância para o homem, tendo importância na fertilidade masculina e na prevenção do câncer de próstata, Clarke & Sloss, (1989) citado por Anderberg, (2008).

No carvão o Se é encontrado como elemento – traço em muitos sulfetos de Cu, principalmente na pirite (FeS_2) que de certa forma se encontra presente no carvão.

De acordo com os dados ilustrados na figura 18, o Se apresenta concentrações que variam de 0.1 a 0.7 ppm, tal como os outros elementos tem uma dispersão nos dados que indicam que o dique não influencia directamente na sua presença no carvão, tendo origem na precipitação da pirite, facto este justificado pelo incremento do selénio segundo o aumento da pirite (anexo 7- J).

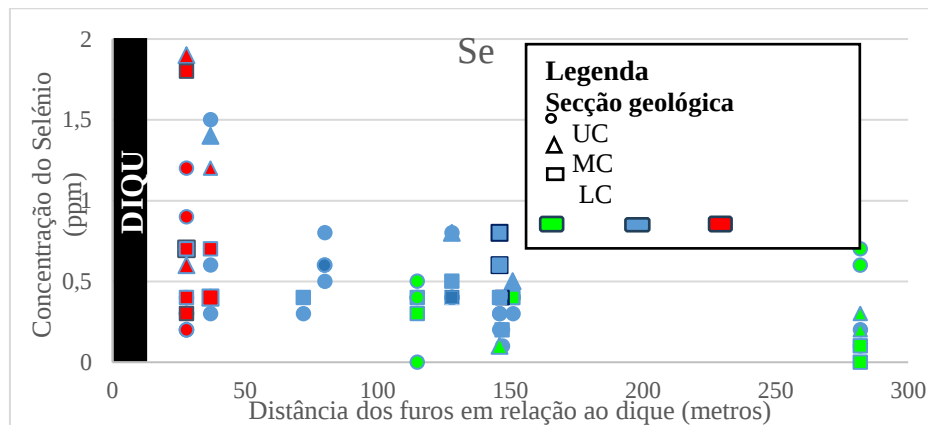


Figura 18: Gráfico da variação da concentração do selénio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

f) Flúor

Segundo Finkelman (1995), o flúor geralmente encontra-se associado a minerais de argila, por conseguinte associado a fluorapatite $[Ca_5(PO_4)_3F]$. É absorvida no corpo e concentra-se nos mesmos tecidos que o cálcio. Conforme observado no gráfico 19, as concentrações do flúor variam de 39 a 392 ppm tanto nos carvões afectados termicamente quanto nos não afectados. Apresentam valores anómalos que variam 424 a 481 ppm e, não demonstram uma tendência preferencial indicando que a intrusão não controla suas concentrações. No campo de Huinan, Dai & Ren (2014) concluíram que o cálcio foi transportado para o carvão por fluídos hidrotermais, assim sendo o flúor pode ter sido mobilizado para o carvão por fluídos hidrotermais, tornando sua concentração tão elevada tanto nos afectados como os não afectados, facto este justificado pelo aumento do flúor segundo o incremento da apatite no gráfico K (anexo 8).

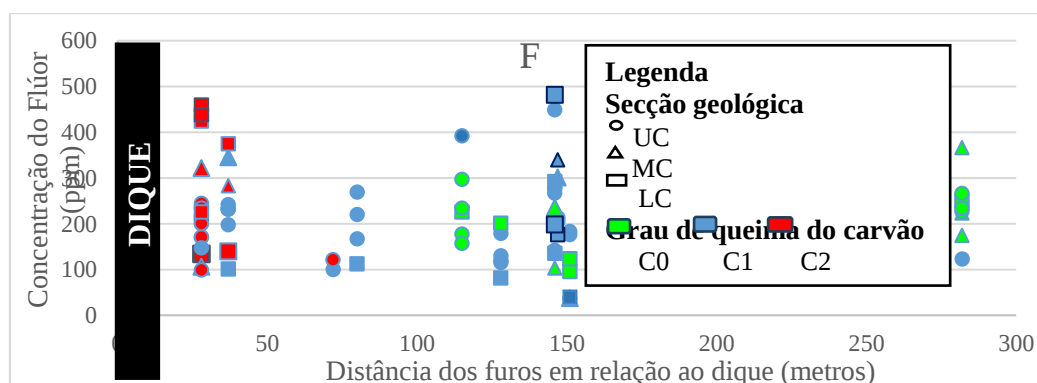


Figura 19: Gráfico da variação da concentração do flúor no carvão e a distância dos furos

4.1.2. Camada Bananeiras

a) Arsénio

As concentrações de arsénio patentes na figura 20, demonstram valores que variam de 0,2 a 1,5 ppm, com valores anómalos que variam de 1,9 a 3,3 ppm tanto nos carvões afectados quanto nos não afectados. Os dados não indicam uma tendência preferencial em relação a distância do dique, excluindo a possibilidade dessas quantidades terem sido causadas pela intrusão, indicando que o arsénio foi mobilizado para o carvão pela precipitação da pirite, facto este justificado pelo aumento crescente do arsénio segundo o incremento da pirite (anexo 5- E).

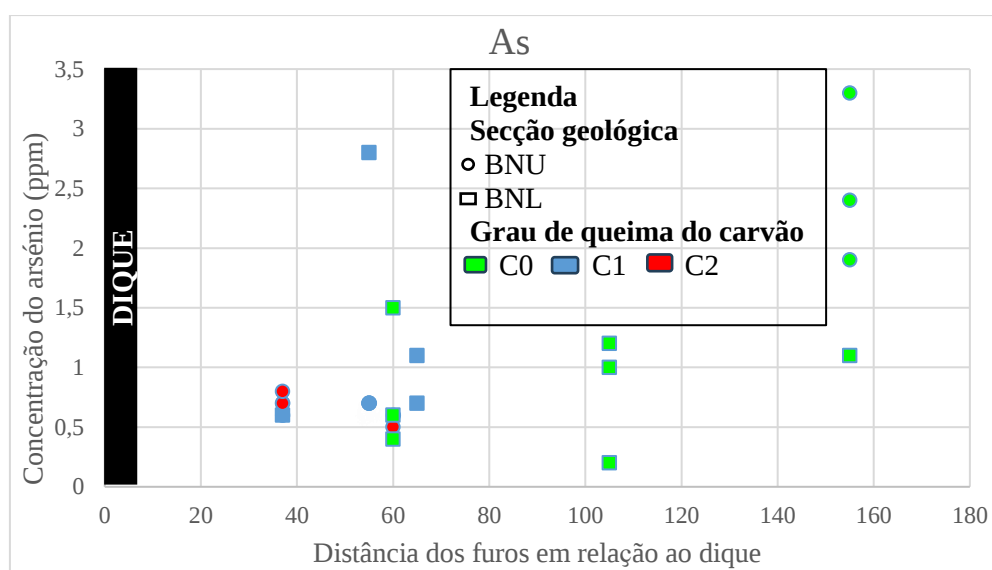


Figura 20: Gráfico da variação da concentração do arsénio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

b) Boro

Nos dados ilustrados na figura 21, as concentrações do boro variam de 3,1 a 6,2 ppm, com valores anómalos que variam de 6,2 a 9 ppm nos carvões termicamente afectados quanto nos não afectados, o que indica uma tendência não preferencial em relação ao aumento ou redução das concentrações, denotando que os factores temperatura e distância com a intrusão não controlam suas concentrações no carvão. Com isso, este elemento origina da precipitação da pirite no carvão, facto este justificado com o seu aumento na medida em que a dos silicatos aumenta (anexo 5- F), indicando que este é originário de aluminossilicatos incorporados no próprio carvão.

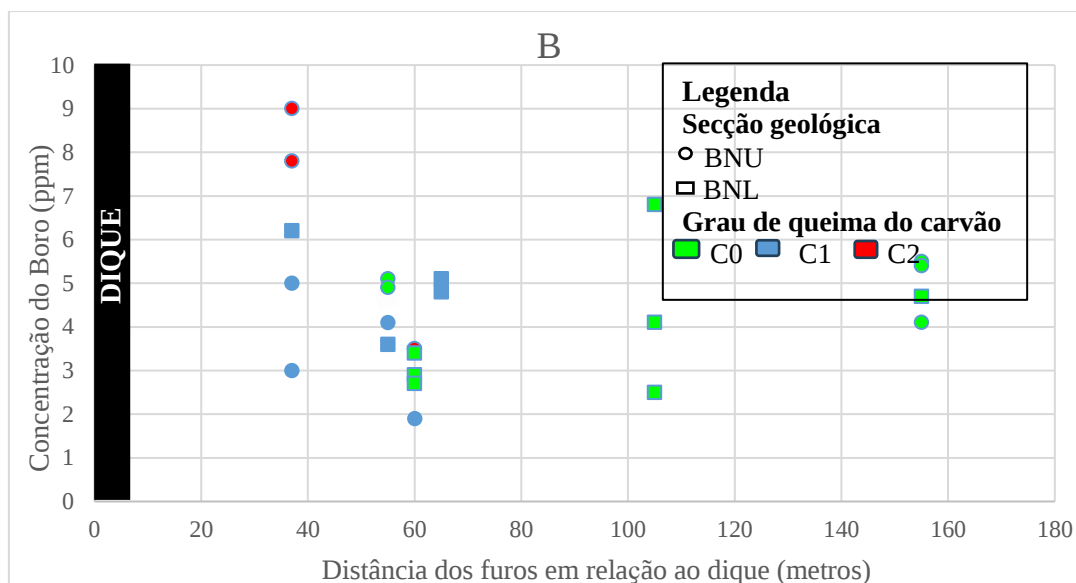


Figura 21: Gráfico da variação da concentração do boro no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

c) Cádmio

Os dados (figura 22) demonstram que as concentrações do cádmio variam de 0.01 a 0.27 ppm. O gráfico contém uma amostra anômala com valor igual a 0,41 ppm acima de sua tendência média na crosta terrestre. No geral as concentrações não apresentam uma tendência em relação a distância do dique, contudo apresentam valores aproximados tanto nos carvões termicamente afectados quanto nos não afectados, excluindo a possibilidade dos factores temperatura e proximidade do dique dolerítico controlarem as concentrações do cádmio na sua composição. O cádmio foi mobilizado para o carvão pela precipitação da pirite, visto que este tende a aumentar segundo o aumento da esfaielite (anexo 6-G).

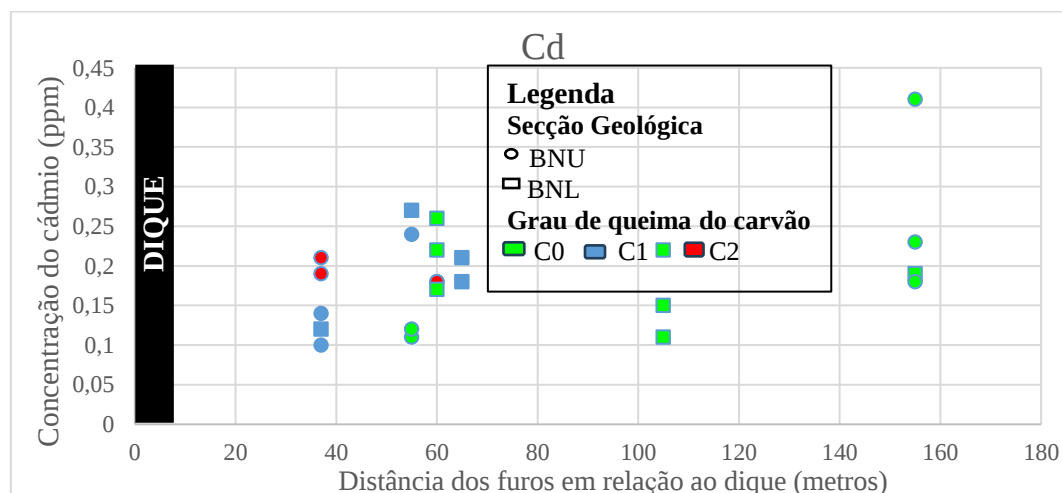


Figura 22: Gráfico da variação da concentração do cádmio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

d) Chumbo

As concentrações do chumbo segundo o gráfico (figura 23), variam de 6,4 a 14 ppm. Os dados também demonstram valores anómalos acima da concentração média na crosta terrestre, que variam de 13,8 a 18,9 ppm. Assim sendo, não apresentam uma tendência preferencial pois, tanto os carvões afectados como os não afectados termicamente denotam valores próximos ou mesmo iguais, indicando com isto que a temperatura e a proximidade à intrusão não controlam essa concentração. Este elemento origina da precipitação da pirite no carvão, dado que o chumbo aumenta com o incremento da concentração da galena denotando que este elemento origina da precipitação da pirite no carvão (anexo 6- H).

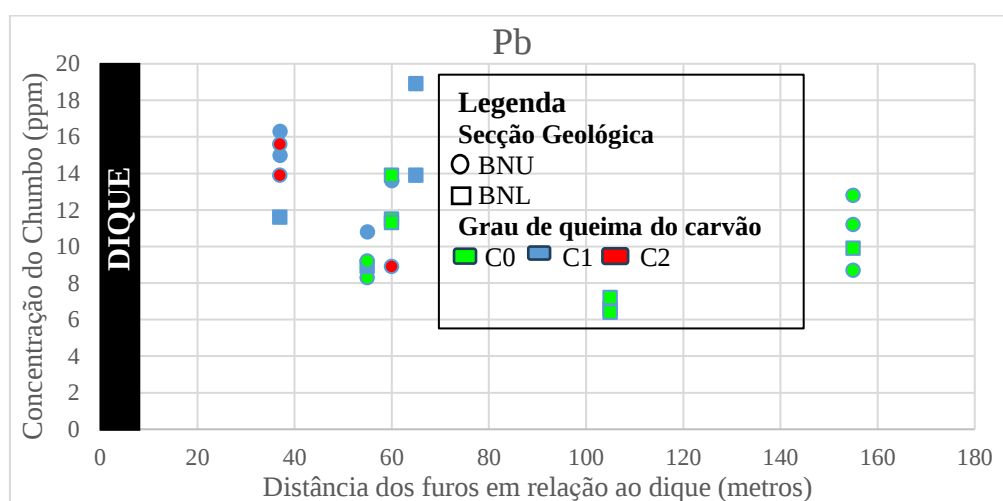


Figura 23: Gráfico da variação da concentração do chumbo no carvão e a distância dos furos em relação ao dique.

e) Mercúrio

Segundo os dados ilustrados na figura 24, as concentrações que variam de 0.02 a 0.7 ppm do mercúrio, denotam uma similaridade tanto dos carvões afectados quanto aos não afectados, indicando que de certa forma não influencia no seu padrão geoquímico. O mercúrio origina da precipitação da pirite no carvão, justificado com o aumento da concentração do Hg segundo o incremento do sulfeto da pirite (anexo 8 - L).

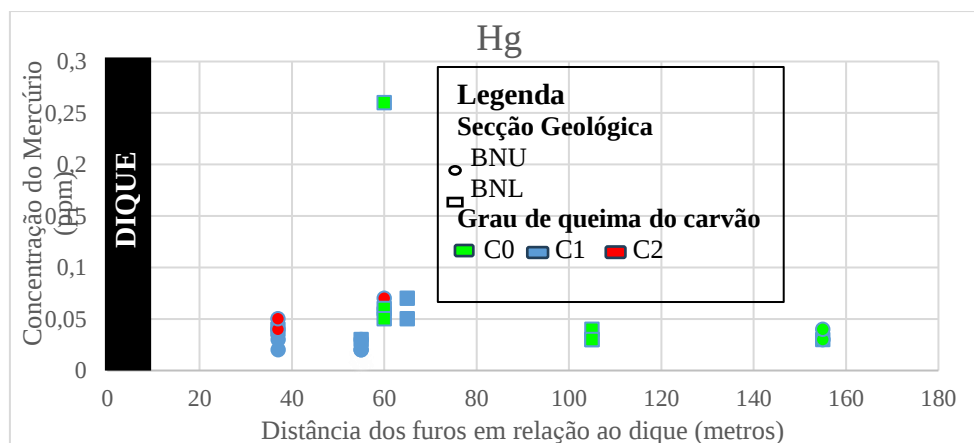


Figura 24: Gráfico da variação da concentração do mercúrio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

f) Molibdénio

As concentrações do molibdénio no gráfico abaixo (figura 25) variam de 3 a 8 ppm, tal como os outros elementos – traço apresentam similaridade, o que indica a não influência da intrusão nas suas concentrações no mesmo carvão, indicando que este elemento origina da precipitação da pirite no carvão.

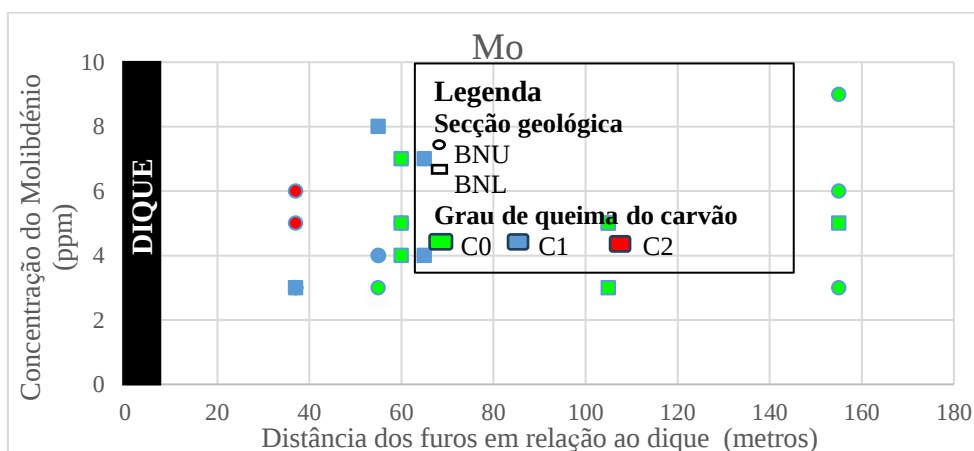


Figura 25: Gráfico da variação da concentração do molibdénio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

e) Selénio

As concentrações do selénio ilustrados na figura 26, variam de 0.1 a 0.4 ppm, tal como os outros elementos tem uma dispersão sem nenhuma orientação preferencial, o que indica a não influencia do dique e/ou soleira na presença nos carvões afectados como não afectados, o que indica proveniência oriunda da precipitação da pirite no carvão.

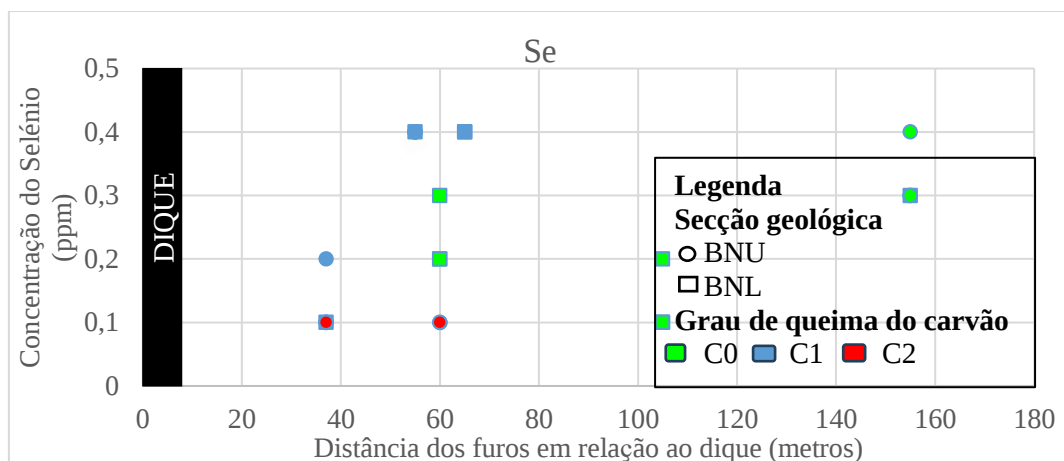


Figura 26: Gráfico da variação entre a concentração do selênio no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

f) Flúor

Conforme observado no gráfico 27, as concentrações do flúor que variam de 98 a 210 ppm, não apresentando uma tendência preferencial pois, tanto os carvões afectados como os não afectados termicamente denotam valores próximos ou mesmo iguais, indicando com isto a ausência de correlação com intrusão. O flúor foi mobilizado para o carvão pela precipitação de fluorapatite [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$], tornando sua concentração tão elevada tanto nos afectados como os não afectados.

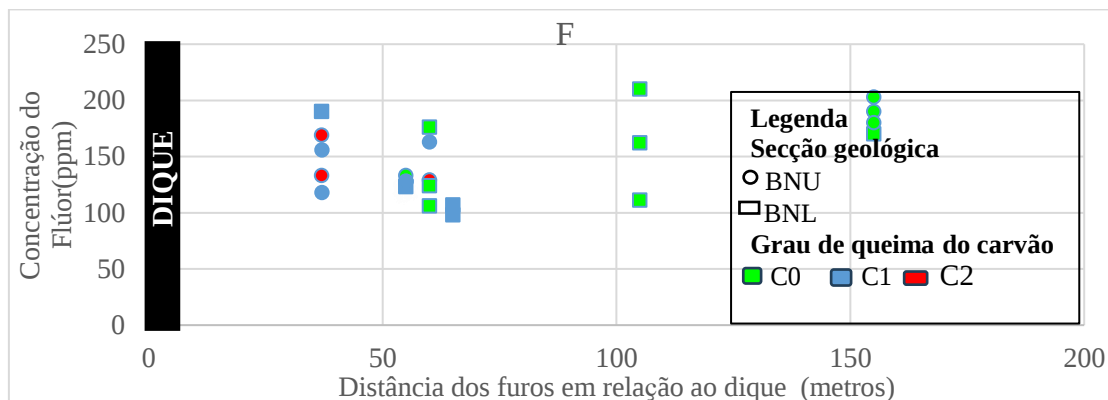


Figura 27: Gráfico da variação da concentração do flúor no carvão e a distância dos furos em relação ao dique

4.3. Análise Estatística Univariada

Para a análise dos resultados, foram usadas as estimativas estatísticas: média, variância, máximo, mínimo, desvio padrão, porem dado a presença de valores extremos, foram utilizadas as medianas.

As tabelas 3 e 4, sintetizam os resultados da estatística descritiva para as distribuições de concentrações (ppm) dos elementos-traço constituintes das amostras analisadas.

Variável (ppm)	X	Md	σ	CV	S ²	Alcance	Mínimo	Máximo	Assimetria
As	1,59	1,30	1,19	0,75	1,42	5,50	0,30	5,80	1,76
B	5,99	5,30	3,48	0,58	12,11	24,40	2,20	26,60	3,47
Cd	0,22	0,19	0,13	0,56	0,02	0,72	0,02	0,74	1,79
Pb	14,25	11,90	8,92	0,63	79,56	53,40	1,40	54,80	2,38
Hg	0,12	0,09	0,13	1,02	0,02	0,87	0,01	0,88	3,82
Mo	5,46	4,00	4,15	0,76	17,21	24,00	0	24,00	2,23
Se	0,54	0,40	0,36	0,67	0,13	1,90	0	1,90	1,90
F	211,26	200,00	101,98	0,48	10400,9	444,00	37,00	481,00	0,79

Tabela 3: Resumo estatístico univariado dos 8 elementos-traço analisados, pertencentes a VULCAN

Mozambique, Secção 6 (camada Chipanga)

Variável ()	X	Md	σ	CV	S ²	Alcance	Mínimo	Máximo	Assimetria
As	0,94	0,70	0,65	0,70	0,42	2,60	0,20	2,80	2,05
B	4,97	4,45	2,54	0,51	6,45	11,00	1,90	12,90	1,70
Cd	0,20	0,18	0,10	0,53	0,01	0,50	0,10	0,60	2,91
Pb	12,41	11,55	4,65	0,37	21,60	20,00	6,40	26,40	1,28
Hg	0,06	0,04	0,05	0,93	0,00	0,24	0,02	0,26	3,26
Mo	4,75	5,00	1,44	0,30	2,09	5,00	3,00	8,00	0,59
Se	0,24	0,20	0,14	0,58	0,02	0,40	0,10	0,50	0,40
F	140,45	131,00	29,34	0,21	860,65	112,00	98,00	210,00	0,74

Tabela 4: Resumo estatístico univariado dos 8 elementos-traço analisados, pertencentes a VULCAN

Mozambique, Secção 6 (camada Bananeiras)

Observações

Através das análises dos cálculos da estatística descritiva (Tabela 3 e Tabela 4) correspondentes as camadas Chipanga e Bananeiras respectivamente, fez-se as seguintes observações:

- **Camada Chipanga (Tabela 3):** as variáveis As, B, Cd, Pb, Hg, Mo, Se e F, apresentaram uma distribuição normal, o que significa que apresentaram medidas de tendência central (média aritmética e mediana) muito próximos. Todas as variáveis apresentaram uma distribuição assimétrica com valores superiores a 1, excepto o F que apresenta assimetria tendendo a 0.
- **Camada Bananeiras (Tabela 4):** as variáveis As, B, Cd, Pb, Hg, Mo, Se e F, apresentaram uma distribuição normal dado que todas apresentaram medidas de tendência central (média aritmética e a mediana) muito próximos. As variáveis As, B, Cd, Pb, Hg não apresentam assimetria na sua distribuição, notável pelos valores da assimetria superiores a 1, excepto o Mo, Se e F, que apresentaram simetria em sua distribuição no intervalo de [0,40 – 0,74].

4.4. Análise de Correlação Linear – Estatística Bivariada

Tendo em conta a matriz de correlação de Person entre 8 elementos seleccionados na área de estudo (camada de Chipanga, bem como a tabela 3 e a Fig. 28, é possível aferir que:

- Existe uma correlação positiva (≥ 0.75) entre os elementos: Cd-Mo.
- Uma correlação moderada (0.5-0.75) verifica-se entre: As-Se; Cd (Pb, Mo, Se); Pb (Cd, Mo); Hg (Cd, Mo); Mo (Cd, Pb, Hg,) e Se (As, Cd).
- O menor coeficiente de correlação fraco (≤ 0.5) verifica-se entre: As (B, Cd, Pb, Hg, Mo, F); B (As, Cd, Pb, Hg, Mo, Se, F); Cd (As, B, F); Pb (As, B, Hg, Se, F), Hg (As, B, Pb, Se, F), Mo (As, B, Se, F) e Se (B, Pb, Hg, Mo, F).

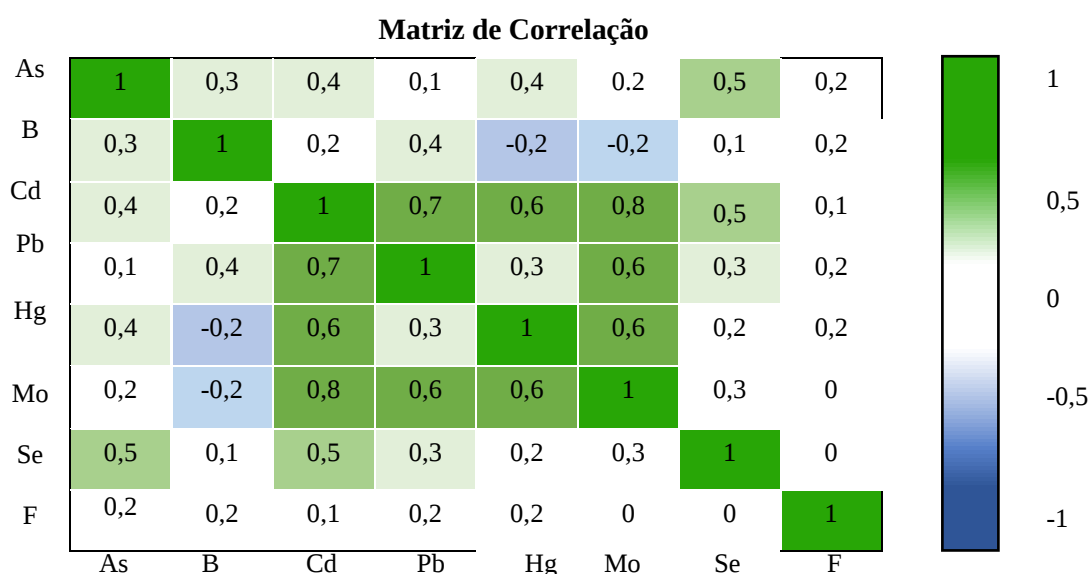


Figura 28: Coeficiente de Correlação da Camada Chipanga, usando a observação de 1 – 69, 5% do valor crítico (bilateral) = 1,6679 para $n = 69$

Tendo em conta a matriz de correlação de Person entre 14 elementos seleccionados na área de estudo (Camada Bananeiras), bem como a tabela 4 e a Fig. 29, é possível aferir que:

- Existe uma correlação positiva (≥ 0.75) entre os elementos: Cd-Mo.
- Uma correlação moderada (0.5-0.75) verifica-se entre: As-Se; **Cd** (Pb, Hg, Mo, Se); **Pb** (Cd, Hg, Mo); **Hg** (Cd, Pb, Mo); **Mo** (Cd, Pb, Hg) e **Se** (As, Cd).
- O menor coeficiente de correlação fraco (≤ 0.5) verifica-se entre: **As** (B, Cd, Pb, Hg, Mo, F); **B** (As, Cd, Pb, Hg, Mo, Se, F); **Cd** (As, B, F); **Pb** (As, B, Se, F); **Hg** (As, B, Se, F), **Mo** (As, B, Se, F); **Se** (B, Pb, Hg, Mo, F); **F** (As, B, Cd, Pb, Hg, Mo, Se, F).

Matriz de Correlação

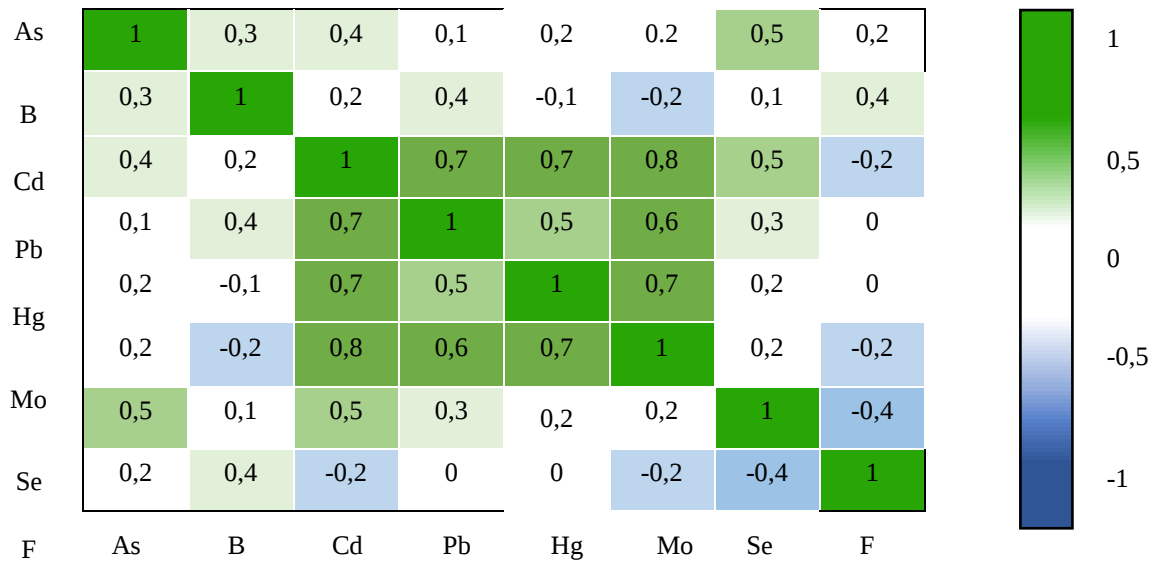


Figura 29: Coeficiente de Correlação da Camada Bananeiras, usando a observação de 1 – 27, 5% do valor crítico (bilateral) = 1,7033 para n = 27

4.5. Resultados da Determinação de Fundos Geoquímicos e Limiar (Treshold)

Este trabalho tem como finalidade identificar o padrão de anomalias geoquímicas que podem representar um risco a qualidade do carvão, e a discriminação de zonas anómalas do fundo geoquímico é feita mediante um limiar geoquímico.

	Gráfico Probabilístico		
Variável (µg/g)	Background (50%)	Limiar (84%)	Limiar (97.7%)
As	1,30	2,78	3,97
B	5,30	9,47	12,95
Cd	0,19	0,35	0,47
Pb	11,90	23,17	32,09
Hg	0,09	0,25	0,38
Mo	4,00	9,61	13,76
Se	0,40	0,90	1,26
F	200,00	313,25	415,23

Tabela 5: Gráfico probabilístico que ilustra valores calculados do background geoquímico e limiares na Secção 6 (camada Chipanga)

	Gráficos Probabilísticos		
Variável	Background (50%)	Limiar (84%)	Limiar (97.7%)
As	0,7	1,58	2,23
B	4,45	7,50	10,04
Cd	0,18	0,30	0,40
Pb	11,55	17,05	21,70
Hg	0,04	0,10	0,16
Mo	5	6,19	17,63

Se	0,2	0,37	0,51
F	131	169,78	199,12

Tabela 6: Gráfico probabilístico que ilustra valores calculados do background geoquímico e limiares na Secção 6 (camada Bananeiras)

4.5.1. Análise da Significância das Anomalias Analisadas

A definição de valores absolutos de anomalia, threshold e background depende de uma série de factores conforme ilustrados nas tabela 5 e 6. Em Prospeção e Pesquisa mineral, o foco são as anomalias positivas, tendo em conta valores Cut-off e o Clarke. Para esta pesquisa, considerar-se-á somente o Clarke, para a noção da significância destas anomalias. (Milambo, 2022) **NB:** as anomalias foram selecionadas segundo o limiar geoquímico, e correspondem aos valores iguais ou superiores aos tabelados na coluna correspondente a anomalia contendo na base de dados.

Elemento (ppm)	Anomalia	Clarke	Significância
As	]4,4 - 5,5]	1.8	Significativa
B	]13,1 - 26,6]	9	Significativa
Cd	]0,49 - 0,74]	0.16	Significativa
Pb	]32,3 - 54,8]	12	Significativa
Hg	]0,47 - 0,88]	0.1	Significativa
Mo	]14 - 34]	1,0 - 10	Significativa
Se	]1,4 - 1,9]	0.03 – 0.08	Significativa
F	]424 - 481]	286	Significativa

Tabela 7: Gráfico comparativo entre valores determinados como anómalos na área de estudo e o Clarke (Fonte: Licht & Plawiak, 2005) para análise de significância das anomalias na camada Chipanga.

Elemento (ppm)	Anomalia	Clarke	Significância
As	]2,8]	1.8	Significativa
B	]7,8 - 9]	9	Insignificativa
Cd	]0,21 - 0,6]	0.16	Significativa
Pb	]18,9 - 26,4]	12	Significativa
Hg	]0,26]	0.1	Significativa
Mo	]7 - 8]	1,0 - 10	Insignificativa
Se	]0,4 -0,5]	0.03 – 0.08	Significativa
F	]169 - 210]	286	Insignificativa

Tabela 8: Gráfico comparativo entre valores determinados como anómalos na área de estudo e o Clarke (Fonte: Licht & Plawiak, 2005) para análise de significância das anomalias na camada Bananeiras.

Observações

- **Camada Chipanga:** observando a tabela 7, comparando os teores anómalos e teores de Clarke, é possível constatar que todos os elementos apresentam anomalias significativas, visto que suas anomalias partem de valores acima do Clarke. Tendo em conta o valor do Clarke, pode se

inferir que o carvão analisado contém concentrações anómalas dos elementos selecionados para a pesquisa, sobretudo na camada Chipanga, pois apresenta valores acima do Clarke.

- **Camada Bananeiras:** observando a tabela 8, constatou-se que todos os elementos apresentam anomalias significativas, excepto o B, Mo e F, que demonstram-se parcialmente significativas, dado que suas anomalias partem de valores abaixo do Clarke.

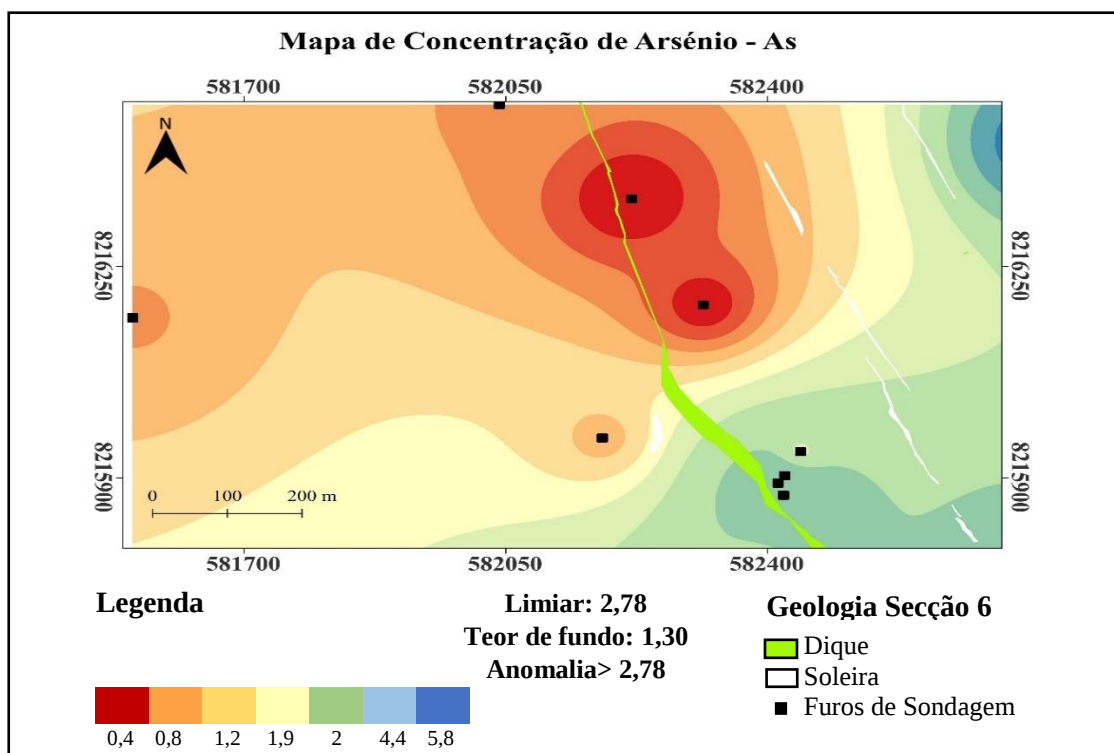


Figura 30: Mapa de concentração de teores de As (arsénio) na camada Chipanga em relação ao dique.
Fonte: Autora.

Observações

- **Camada Chipanga:** observando o mapa na figura 30, é possível observar que o elemento arsénio apresenta valores dentro dos limites de concentração nos furos a NW quanto SW, ou seja, nenhum valor anómalo.
- **Camada Bananeiras:** observando o mapa na figura 31, é possível observar que o As apresenta anomalias significativas nos furos a SW que variam de 2,6 a 3 ppm, contrariamente aos furos a NW em valores dentro dos limites de concentração,

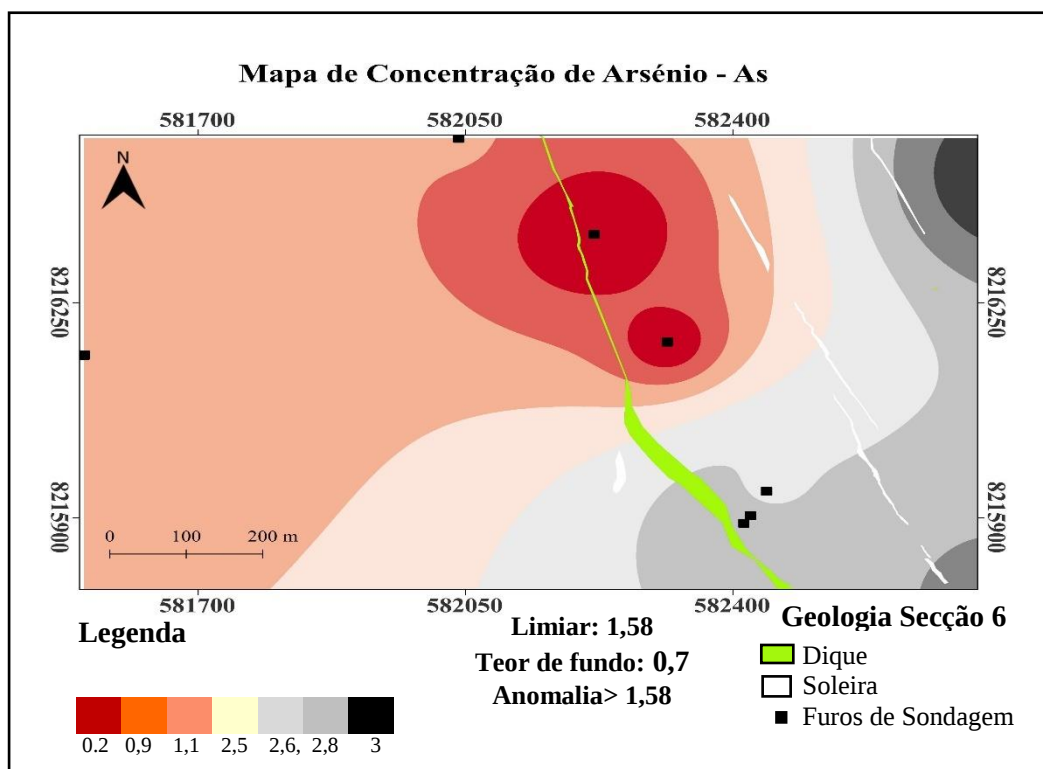


Figura 31: Mapa de concentração de teores de As (arsénio) na camada Bananeiras em relação ao dique.

Fonte: Autora

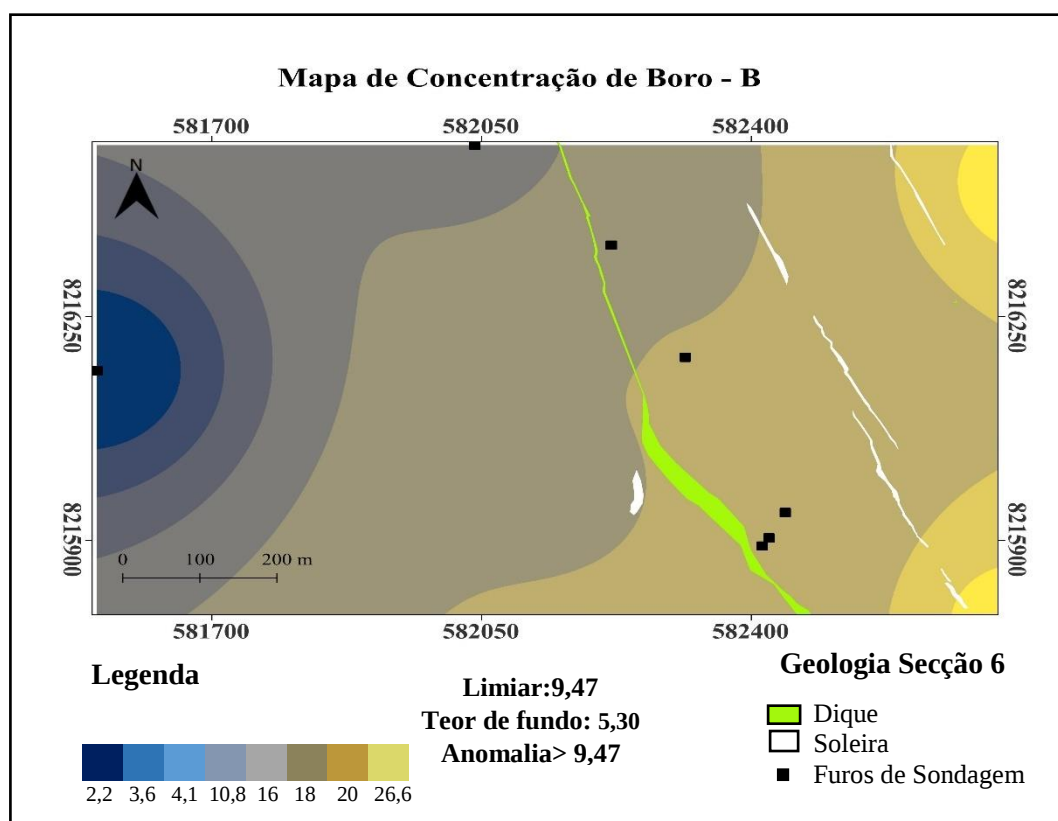


Figura 32: Mapa de concentração de teores de B (boro) na camada Bananeiras em relação ao dique. Fonte:

Autora

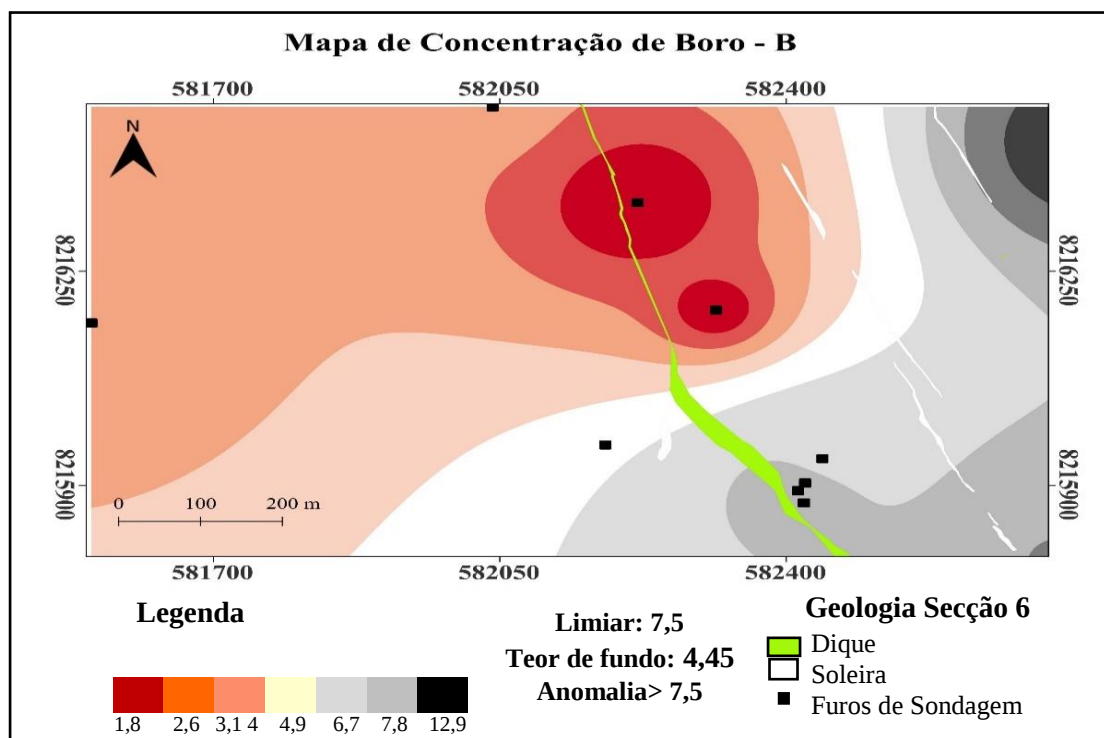


Figura 33: Mapa de concentração de teores de B (boro) na camada Chipanga em relação ao dique. Fonte: Autora

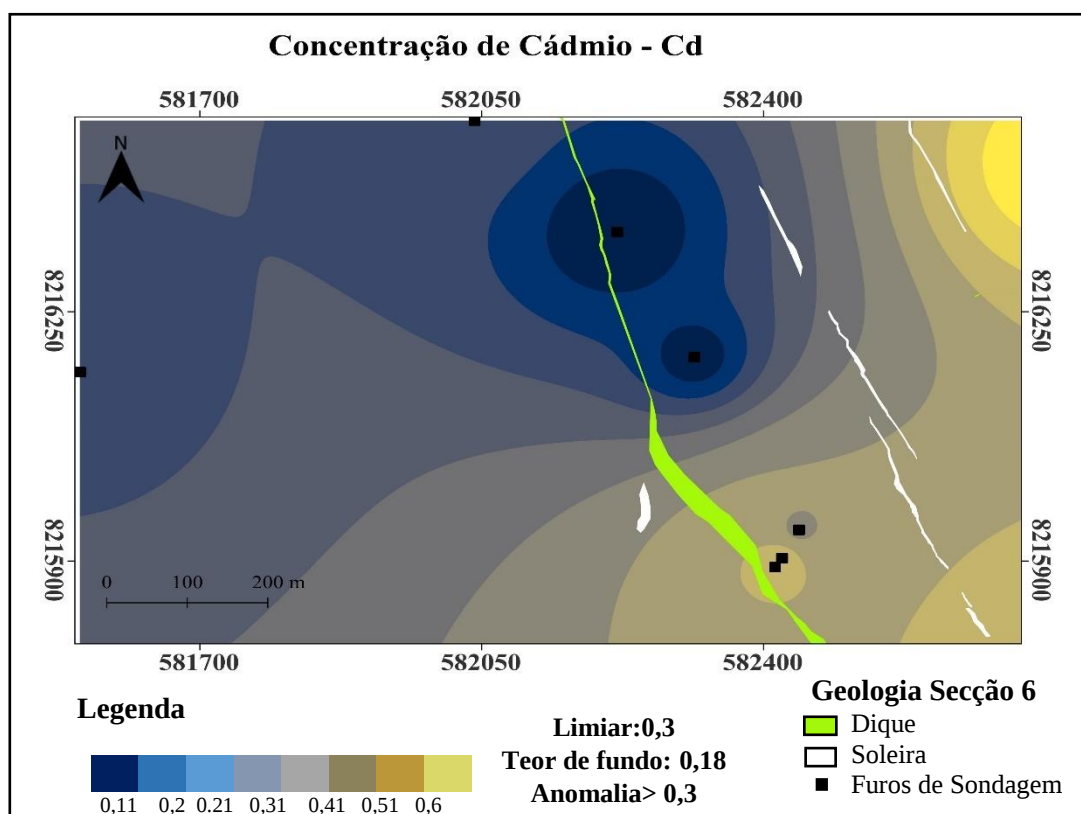


Figura 34: Mapa de concentração de teores de Cd (cádmio) na camada Bananeiras em relação ao dique.

Fonte: Autora

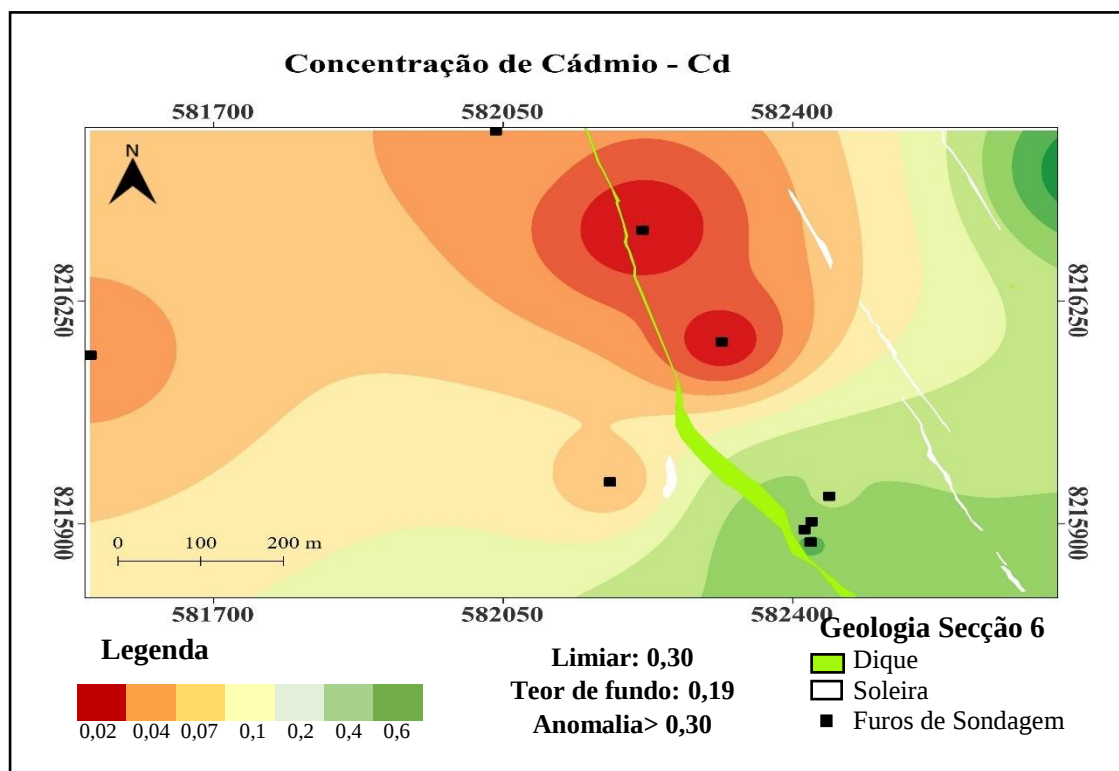


Figura 35: Mapa de concentração de teores de Cd (Cádmiio) na camada Chipanga em relação ao dique.

Fonte: Autora

Observações

- **Camada Chipanga:** observando os mapas nas figuras 33 e 35, é possível observar que os elementos B e Cd apresentam anomalias significativas que variam de B (7,8 a 12,9ppm) e Cd (0,4 a 0,6ppm) nos furos a SW, e apresenta valores dentro dos limites de concentração nos furos a NW, ou seja, nenhum valor anómalo
- **Camada Bananeiras:** observando os mapas nas figuras 32 e 34, constatou-se que o elemento B que variam de 10,8 a 26,6ppm apresenta anomalia significativa em todos os furos e o Cd (0,41 a 0,6ppm) apresenta anomalias significativas, excepto a NW que demonstram-se parcialmente significativas, dado que suas anomalias partem de valores abaixo do limiar.

4.6. Cálculo de Coeficiente de Enriquecimento (EF)

O cálculo do coeficiente de enriquecimento permitiu avaliar o grau de poluição nas amostras abaixo analisadas:

Elemento	151	152	1,6	187	247A	256	298	321	HQ481	HQ485	Média	Classificação
As	2,2	2,5	0,7	1,3	1,5	1,8	2,1	1,1	1,2	1,2	1,6	Enriquecimento baixo
B	1	1	1,1	0,7	1,1	2,3	1,2	1,2	1,3	1,8	1,3	Enriquecimento baixo
Cd	0,8	1,1	0,9	0,7	1,5	1,3	1,6	1,5	0,9	1,1	1,1	Enriquecimento baixo
Pb	4,8	7,1	6,8	3,9	5,1	13,5	7,6	7,6	5,8	8,4	7,1	Enriquecimento significativo
Hg	1,1	2,2	2,9	0,7	2,2	1,6	0,9	0,9	2,2	2,2	1,7	Enriquecimento baixo
Mo	0,8	1,2	0,7	1	1,9	2	1,3	1,3	1,1	1,3	1,3	Enriquecimento baixo
Se	1	1,3	0,8	1,5	0,7	1,8	1,8	1,8	1,3	0,8	1,2	Enriquecimento baixo
F	0,5	0,7	1,2	1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,3	1,2	1	Enriquecimento baixo

Tabela 9: Resultados do Cálculo de Coeficiente de Enriquecimento (EF) na camada Chipanga. (MIL-HOMENS et al., 2006.)

Elemento	151	152	247A	256	259	LD477	Média	Classificação
As	1,7	1,3	1,1	1	1	3,1	1,5	Enriquecimento baixo
B	1	1,1	1	0,6	1,4	1,1	1	Enriquecimento baixo
Cd	1	1,1	0,9	1,1	0,8	1,4	1	Enriquecimento baixo
Pb	0,8	1,5	0,6	1	1,3	0,9	1	Enriquecimento baixo
Hg	0,8	1,5	0,8	2,5	0,9	0,8	1,2	Enriquecimento baixo
Mo	1	1,1	0,9	1	0,8	1,2	1	Enriquecimento baixo
Se	2	2	0,7	0,9	0,6	1,5	1,3	Enriquecimento baixo
F	1	0,8	1,2	1,1	1,2	1,4	1,1	Enriquecimento baixo

Tabela 10: Resultados do Cálculo de Coeficiente de Enriquecimento (EF) na camada Bananeiras. (MIL-HOMENS et al., 2006)

Observações

- **Camada Chipanga:** observando a tabela 9, é possível constatar que o valor do índice de enriquecimento em todos elementos varia de 1 a 1,7, colocando os resultados na classificação de enriquecimento baixo, excepto o elemento Pb que tem como índice de enriquecimento 7,1, classificando-se como enriquecimento significativo.

- **Camada Bananeiras:** observando a tabela 10, é possível constatar que o valor do índice de enriquecimento em todos elementos varia de 1 a 1,5, colocando os resultados na classificação de enriquecimento baixo.

4.7. Índice de Geoacumulação (Igeo)

A análise do índice de geo-acumulação (Igeo) permitiu quantificar e interpretar o grau de poluição por metais pesados nas amostras estudadas.

Elemento	151	152	154	187	247A	256	298	321	HQ481	HQ485	Média	Classificação
As	-0,7	-0,5	-1	-0,2	0	0,3	0,5	-0,5	-0,3	-0,3	-0,3	Não poluído
B	-0,5	-0,5	-0,3	-1	-0,5	0,6	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3	Não poluído
Cd	-1	-0,5	-0,7	-1	0	-0,2	0,1	0	-0,7	-0,5	-0,5	Não poluído
Pb	0,8	1,3	1,3	0,5	0,8	2,2	1,4	1,4	1	1,6	1,2	Moderadamente poluído
Hg	3	4	4,4	2,3	4	3,5	2,7	2,7	4,4	4,4	3,5	// fortemente poluído
Mo	-0,7	-0,3	-1	-1	0,3	0,4	-0,2	-0,2	-0,5	-0,2	-0,3	Não poluído
Se	-0,5	-0,3	-1	0	-1,3	0,3	0,3	0,3	-0,3	-1	-0,4	Não poluído
F	-1,7	-1	-0,3	-0,7	-0,3	-0,3	-0,5	-0,5	-0,3	-0,3	-0,6	Não poluído

Tabela 11: Resultados do cálculo do Índice de Geoacumulação na camada Chipanga. (Muller, 1980).

Elemento	151	152	247A	256	259	LD477	Média	Classificação
As	0,1	-0,2	-0,3	-0,5	-0,7	-0,7	-0,1	Não poluído
B	-0,5	-0,5	-0,5	-1,3	-0,2	-0,5	-0,6	Não poluído
Cd	-0,5	-0,5	-0,7	-0,5	-0,7	-0,2	-0,5	Não poluído
Pb	-1	-0,2	-1,3	-0,5	-0,3	-0,7	-0,5	Não poluído
Hg	-1	0	-1	0,8	-0,7	-1	-0,5	Não poluído
Mo	-0,7	-0,5	-0,7	-0,5	-1	-0,3	-0,6	Não poluído
Se	0,4	0,4	1,3	0,7	1,3	0	0,7	Não poluído
F	-0,5	-1	-0,3	-0,5	-0,3	-0,2	-0,5	Não poluído

Tabela 12: Resultados do cálculo do Índice de Geoacumulação na camada Bananeiras. (Muller, 1980).

Observações

- **Camada Chipanga:** observando a tabela 12, é possível constatar que os valores do Igeo nos elementos As, B, Cd, Mo, Se e F variam de -1,7 a -0,2, o Pb de 0,8 a 1,6 e o Hg de 2,7 a 4,4. Estes resultados classificam as amostras desta camada como não poluído para o As, B, Cd, Mo, Se e F, e de moderadamente poluído a fortemente poluído para Pb e Hg respectivamente.
- **Camada Bananeiras:** os valores de Igeo em todos os elementos variam de -0,6 a -0,1, excepto o selénio que varia de 0 a 0,7. Logo, os resultados classificam as amostras como não contaminadas.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSÕES

5.1. Conclusão

As intrusões ígneas causam alteração física, química e mineralógica nas rochas encaixantes. Essas alterações são ainda mais intensas no carvão dado a instabilidade que seus constituintes (macerais) apresentam em relação aos constituintes de outras rochas (minerais). No presente estudo foram analisados dados de onze (11) furos feitos na mina da empresa VULCAN Mozambique S.A, que foram estudadas de tal modo que fosse possível avaliar o padrão geoquímico do carvão, desde a zona não afectada a afectada termicamente pelo corpo intrusivo. Com base nas análises petrográficas, químicas e testes constatou-se que:

- Conforme os dados apresentados pelos gráficos de correlação entre a distância da intrusão e a percentagem de cada elemento, tanto na camada Chipanga quanto na Bananeiras, os elementos – traço (As, B, Cd, Pb, Hg, Mo, Se e F), não foram influenciados pela intrusão no que concerne ao seu enriquecimento ou empobrecimento, logo a presença destes elementos no carvão é influenciado pelos seguintes factores:
 - Incorporação dos minerais: durante a formação do carvão, minerais presentes no solo e na água foram incorporados à matéria orgânica. Os minerais em causa são argilas e sulfetos como a fluorapatite e a pirite, que contém elementos-traço que por conseguinte sofreram precipitação e mobilização, resultando na sua presença no carvão das camadas Chipanga e Bananeiras;
- As concentrações dos elementos – traço (As, B, Cd, Pb, Hg, Mo, Se e F) na camada Chipanga são anómalos em relação à concentração média estimada na crosta terrestre. Este mesmo comportamento ocorre na camada Bananeiras, com a excepção dos elementos: F, Mo e o B que apresentam valores dentro das concentrações médias;
- Os valores obtidos no cálculo do coeficiente de enriquecimento e índice de geo-acumulação, na camada Chipanga permitiram classificar as amostras como não contaminadas a moderadamente contaminadas e na camada Bananeiras como não contaminadas. Através desta análise pode-se concluir que na camada Chipanga ocorre uma contaminação por metais pesados (Pb, Hg) ainda que em pequenas percentagens, diferentemente da camada Bananeiras que não ocorre nenhuma contaminação.

A presença de metais pesados como o chumbo e mercúrio no carvão constitui um risco para o ambiente após sofrer combustão, consequentemente, limitando a sua aplicação podendo agravar a sua procura e a comercialização.

6. CAPÍTULO VI: POTENCIALIDADES, LIMITAÇÕES e RECOMENDAÇÕES

6.1.Potencialidades

Os resultados das actividades de pesquisa na concessão anfitriã, indicaram como zonas potenciais para a ocorrência de carvão atrativo a exploração, a camada Bananeiras, que apresentou menores percentagens de elementos-traço na sua composição, contrariamente a camada Chipanga que apresenta na sua maioria concentrações anómalas dos elementos como: As, Cd, Hg, Se e Pb que com a sua combustão podem ser prejudiciais ao meio ambiente. A região prospectada apresenta concentrações anómalas da pirite (visíveis a olho nú), sobre toda a secção 6, dados confirmados pelas análises laboratoriais feitas dos testemunhos de sondagem de furos realizados no ano de 2018.

6.2.Limitações

No decorrer do presente trabalho de pesquisa, houve limitações características de todo trabalho de campo, portanto ficam aqui os principais factores restritivos de carácter antrópico ou não, que influenciaram de forma considerável no cumprimento dos objectivos finais, a saber:

- Quanto ao acesso aos pontos perfurados em 2018, o afloramento escolhido para o estudo encontra-se coberto por estéril e o corpo intrusivo em questão parcialmente destruído (anexo 12- P), este aspecto dificultou na análise macroscópica do contacto entre o dique e o carvão na secção 6, tendo-se optado por outras secções (3 e 4) onde este fenómeno era completamente visível.
- Quanto a transitabilidade dos veículos para a mina, o projecto foi realizado em época chuvosa, aspecto este que humedecia o solo dificultando a circulação tanto dos veículos quanto das máquinas que efectuavam as perfurações de sondagem, obrigando a paralisação das actividades.

6.3.Recomendações

- Recomenda-se que sejam feitos estudos geoquímicos de maior detalhe em áreas adjacentes na secção de camadas de carvão com concentrações elevadas, aplicando métodos convencionais e pouco influenciados pela natureza e por actividades antrópicas. Ademais, que se façam mais estudos geoquímicos cujo foco são camadas de carvão ricas em minerais como a pirite e a fluorapatite, os quais as análises laboratoriais não detectaram na sua maioria;
- Que sejam feitos mais estudos geofísicos para a identificação de áreas anómalas que poderão indicar uma certa mineralização.
- Que sejam feitos testes adicionais como: granulometria e análises petrográficas, monitoramento ambiental e continuidade de estudos em áreas adjacentes.

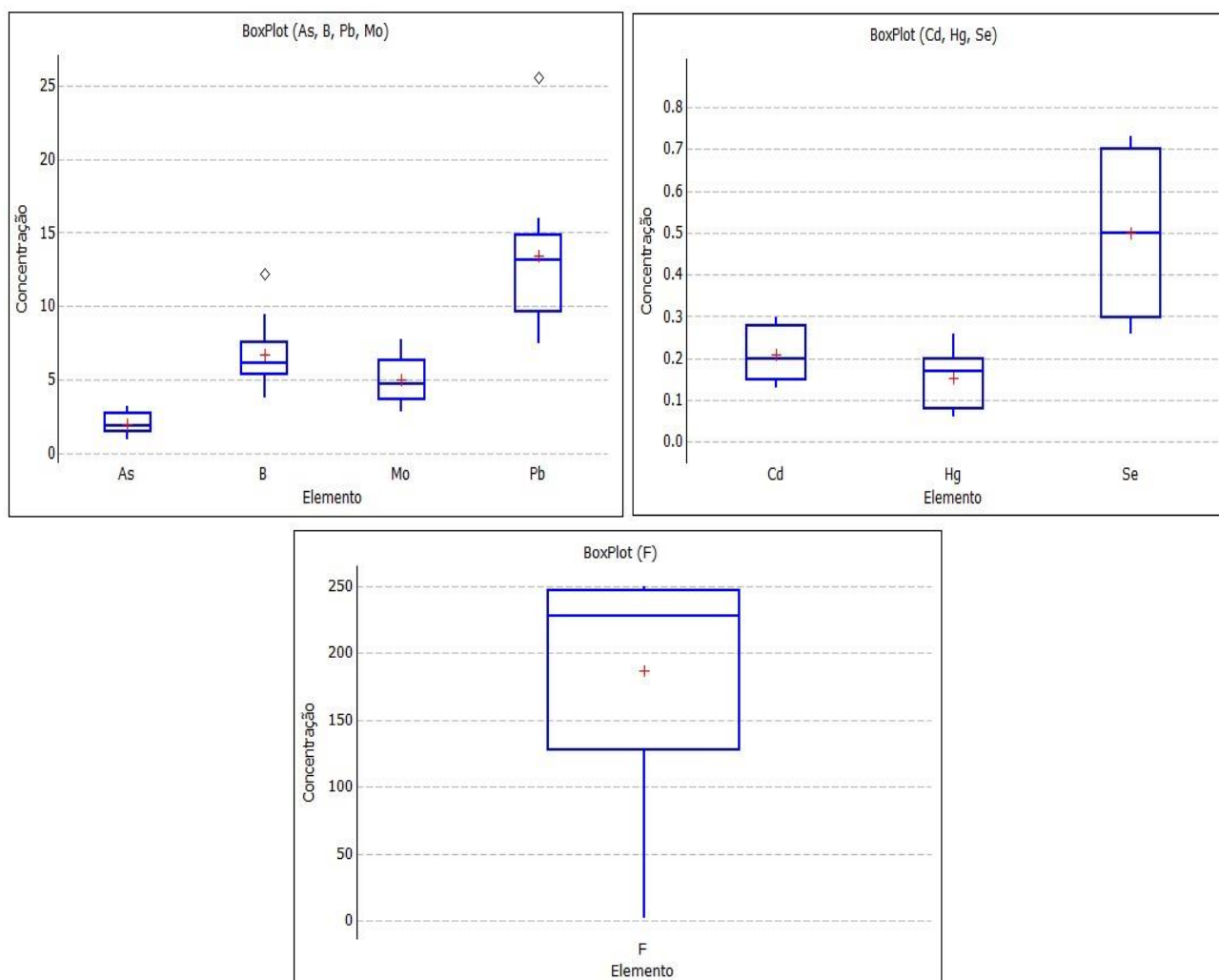
6.4. Referências Bibliográficas

1. Anderberg, I. (2008), Moatize Project – Coal Quality Training Course at Tete Mozambique, Coal Testing Procedures.127pp. Austrália. CPG Resources – QCC Pty Limited, Vol.1.
2. Ashwall, L.D., Evans, R.J. & Hamilton, M.A. (1999), Mafic, ultramafic, and anorthositic rocks of the Tete Complex, Mozambique: petrology, age, and significance, artigo, Departamento de Geologia da Universidade Rand Afrikaans. South African Journal of Geology 102 (2), República da África do Sul, pp. 153-166
3. Chen, J, Liu, G., H.. & Wu, B. (2014), Mineralogical and geochemical responses of coal to igneous intrusion in the Pansan Coal Mine of the Huanan Coalfield, Anhui, Intern. J. Coal Geology. International Journal of Coal Geology, China, 124: 11-352, pp. 11-35. DOI:10.1016/j.coal.2013.12.018
4. Chivurre, A. M. (2018), Efeitos das Intrusões Ígneas na Petrologia dos Carvões da Bacia Carbonífera de Moatize. Projecto Científico. Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane. Moçambique. Não publicado.
5. Cooper, J.R, Creling, J.C., Rimmer, S.M., Whittington, A.G. (2007), Coal metamorphism by igneous intrusion in the Raton Basin, CO and NM: Implications for generation of volatiles, International Journal of Coal Geology, vol.71, p.15-27. DOI: 10.1016/j.coal.2006.05.007
6. Dai, S. & Ren, D., (2007). Effects of magmatic intrusion on minerology and geochemistry of coals from the Fengfeng-Handan CoalField, Hebei, China: Energy & Fuels, 21, 1663-1673.
7. Danúbio, R. (2011), Contribuição para o Conhecimento da Litoestratigrafia da Bacia Carbonífera de Moatize através da Correlação de Camadas Mapeamento Geológico da secção 2B. Projecto Científico, Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane. Moçambique. Não Publicado.
8. Fernandes, P., Cogné, N., Jamal, D., Jorge, R., Rodriguez, B., História térmica do Supergrupo do Karoo da Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova, Província de Tete, Moçambique. Integração de dados do poder reflector da vitrinite e da termocronologia dos traços de fissão da apatite, artigo, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal, p.428.
9. Golab, A.N. & Carr, P. F. (2004), Changes in geochemistry and mineralogy of thermally altered coal, Upper Hunter Valley, Australia, International I. Coal, 70 (1-3).
10. Gonçalves, R., (2010), Moatize Project – Coal Quality Training Course at Tete Mozambique, Tete, Mozambique, vol.1,

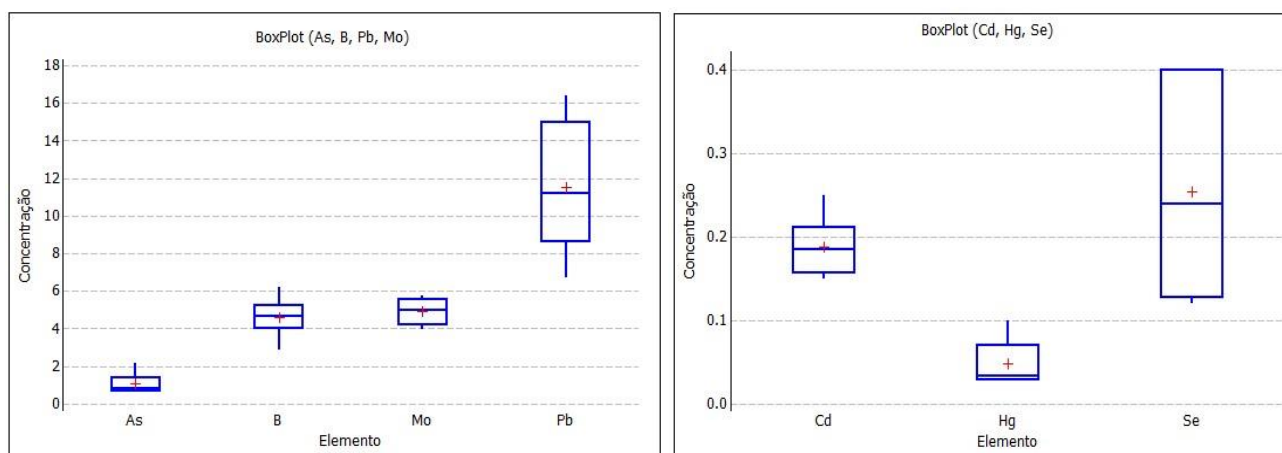
11. González, A. (2015), Influência Térmica de Intrusões de Diabásio nas Camadas de Carvão e Rochas Sedimentares Encaixantes da Jazida Santa Terezinha, Rio Grande do Sul, Projecto Científico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, vol. I. 33.
12. GTK Consortium. (2006)., Notícia Explicativa das 1631, 1632, 1633, 1634, 1734, 1832, 1833, 1834, 1932, 1933 e 1934. Escala 1:250 000, Vol. 2. República de Moçambique, Ministério dos Recursos Minerais, Direcção Nacional de Geologia.
13. Gurba, L.W & Weber, C.R. (2001), Effects of igneous intrusions on coalbed methane potential, Gunnedah Basin, International Journal of Coal Geology, Australia, vol.46, p.113-131.doi: 10.1016/S0166-5162(01)00020-9.
14. Hatton, W & Fardell, A. (2011), New discoveries of coal in Mozambique – Development of the coal resource estimation methodology for International Resource Reporting Standards. Interm.J. Coal Geology, pp.2-12. DOI: 10.1016/j.coal.2011.02.010.
15. Hunting, A. (1984), Geology and Geophysics Ground Geophysics. Mineral Inventory Project in Tete Province and Parts of Manica, Sofala and Zambezia Provinces. Report on ground geophysical investigations for the 1982 and 1983 field season. Unpubl. Rept., DNG, Maputo.
16. Lich, O. (1998), Prospecção Geoquímica: Princípios, técnicas e métodos, Rio de Janeiro: CPRM.
17. Litch, O. (2006), Xuejing, B., Qin, Z., Miyazawa, M., Valores Médios de Referência de variáveis geoquímicas e geofísicas em sedimentos de drenagem e solos, Estado do Paraná, Brasil.
18. Milambo, M. (2022), Prospecção e Pesquisa Geoquímica Para a Identificação de Zonas Anómalas Com Potencial de Ocorrência De Pedras Preciosas e Semi-Preciosas Na Licença 7314LPP, No Distrito De Moma-Nampula. Moçambique. Não Publicado.
19. Müller, G. (1979), Heavy Metals in the Sediment of the Rhine-Changes Seity. Umschau in Wissenschaft und Technik, 79, 778-783.
20. Nolting, R., Ramkema, A. & Everaats, J.(1999), The geochemistry of Cu, Cd, Zn, Ni and Pb in sediment cores from the continental slope of the Banc d'Arguin Mauritania, Continental Shelf Research, pp.665-691.
21. RDMZ (2006), Projecto Carvão Moatize: Geological Exploration Report. Rio Doce Mozambique, Tete, Moçambique.
22. Reimann, C. Garret, R.G. (2005), Geochemical background – concept and reality. Science of the Total Environmental, v.350, p. 12-27

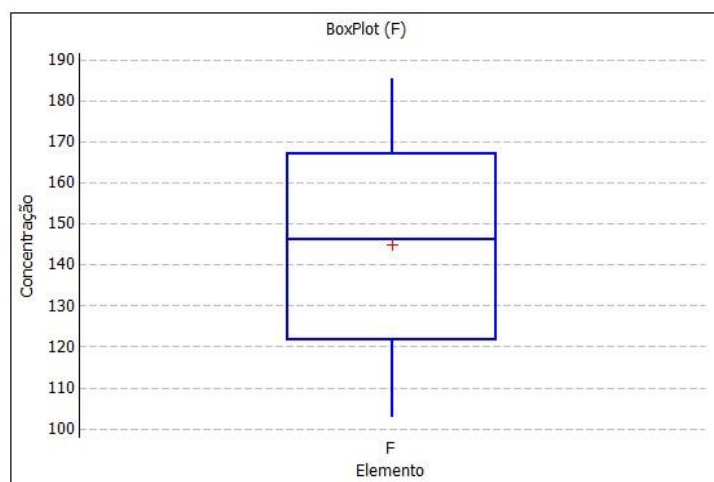
23. Sousa, D. & Vasconcelos, L. (1995), Contribuição para o Conhecimento dos Carvões da Bacia Carbonífera de Moatize, Província de Tete, República de Moçambique.
24. Vale Moçambique Lda. (2021), Geology Program Procedure and Outcome, Tete, Mozambique.
25. Vasconcelos, L. & Pinheiro, H. (2004), A review of the coal deposits of Mozambique. Comissioned by Meteorex Limited., Moçambique, não publicado.
26. Vasconcelos, L. (2005), Apontamentos das disciplinas da Geologia dos Carvões para o novo curriculum da Licenciatura em Geologia em vigor desde 2004, Departamento de Geologia, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique, não publicado.
27. Vasconcels, L. (2009), Coal in Mozambique, Symposium on Gondwana Coals, PUCRS, Porto Alegre, RS, Brazil, 16-18.09.

7. ANEXOS

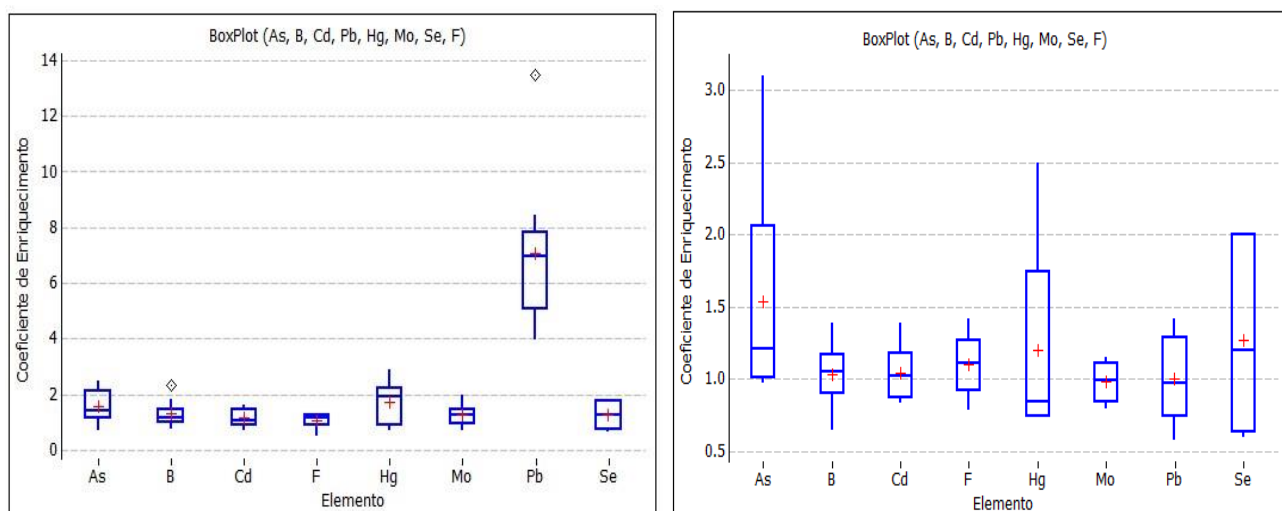


Anexo 1: Boxplots dos 8 elementos selecionados para os estudos, correspondentes aos teores da camada Chipanga. Fonte: Autora.

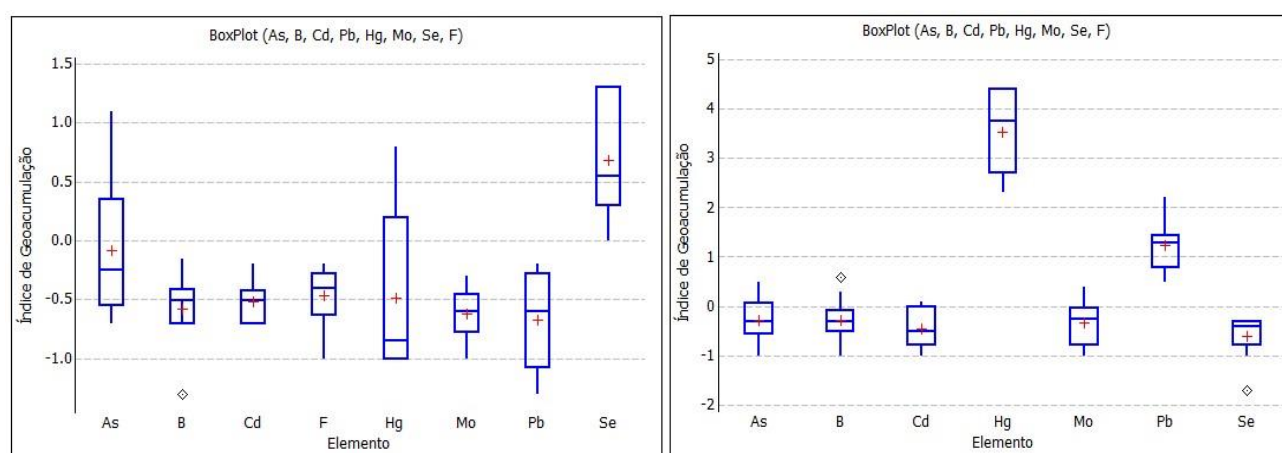




Anexo 2: Boxplots dos 8 elementos selecionados para os estudos, correspondentes aos teores da camada Bananeiras. Fonte: Autora.



Anexo 3: Boxplots dos 8 elementos selecionados para os estudos, correspondentes ao teor de enriquecimento das camadas A- Bananeiras e B- Chipanga. Fonte: Autora.



Anexo 4: Boxplots dos 8 elementos selecionados para os estudos, correspondentes ao Índice de Geoacumulação das camadas: C- Bananeiras e D- Chipanga . Fonte: Autora.

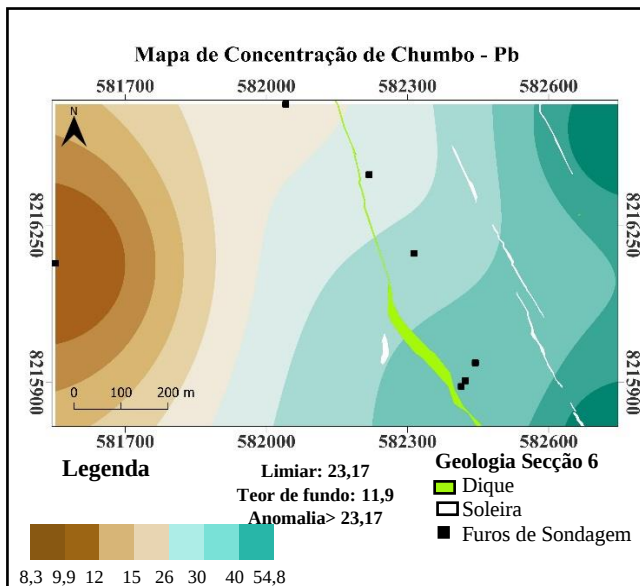
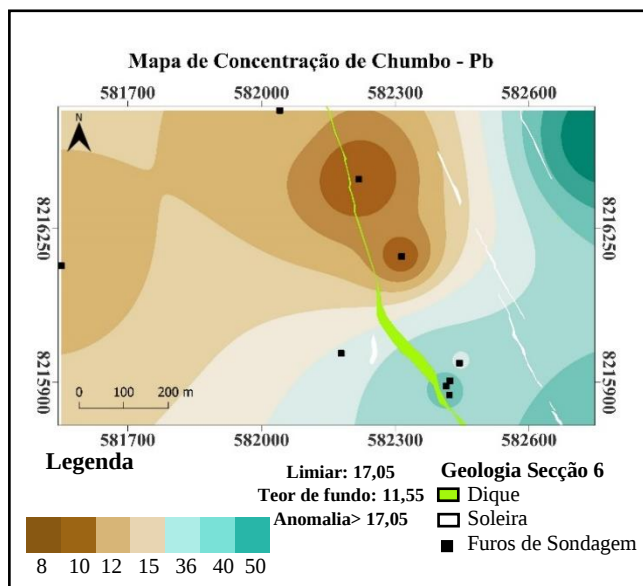


Figura 36: Mapa de concentração de teores de Pb (chumbo) na camada Chipanga e Bananeiras em relação ao dique. Fonte: Autora

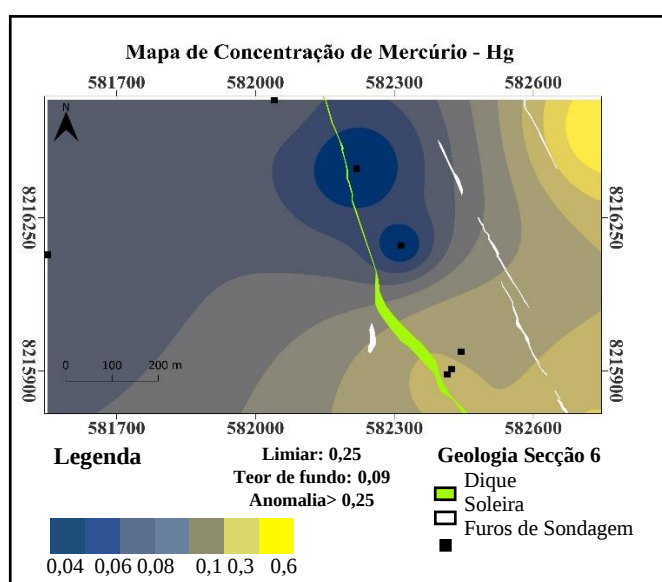
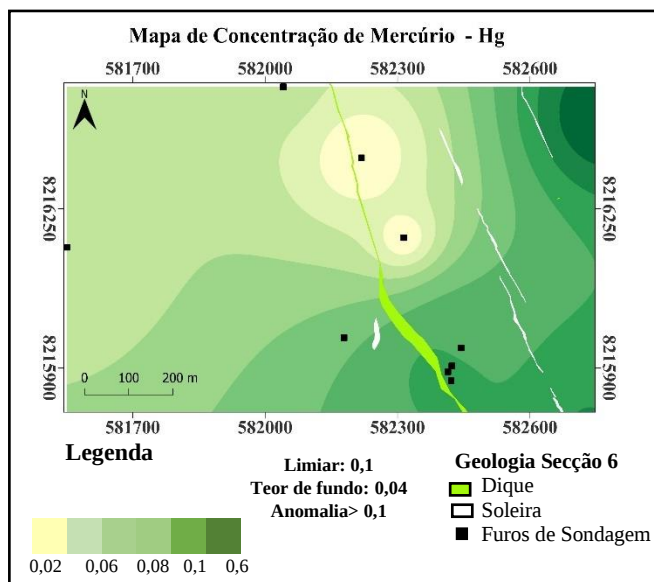


Figura 37: Mapa de concentração de teores de Hg (mercúrio) na camada Chipanga e Bananeiras em relação ao dique. Fonte: Autora

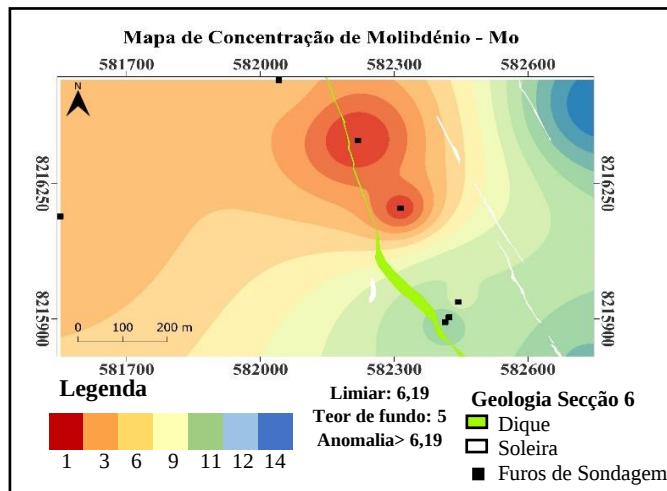
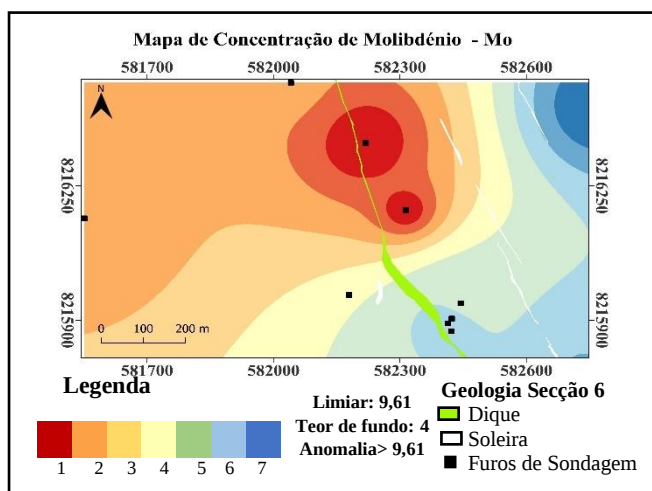


Figura 38: Mapa de concentração de teores de Mo (molibdênio) na camada Bananeiras e Chipanga em relação ao dique. Fonte: Autora

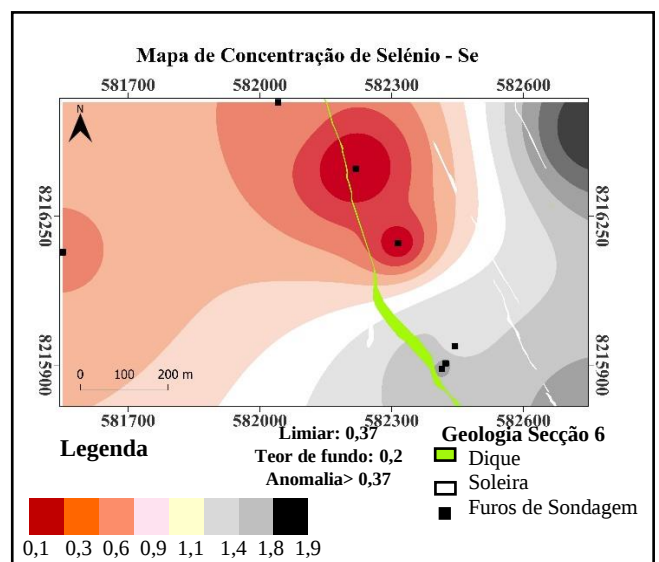
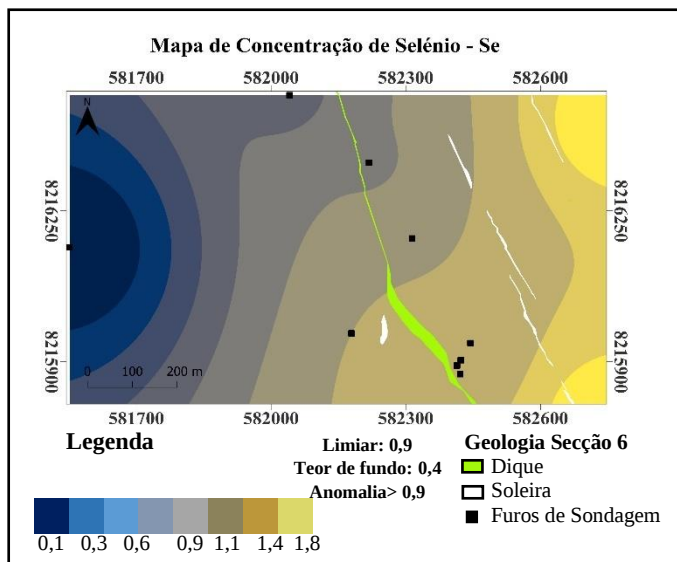


Figura 39: Mapa de concentração de teores de Se (selênio) na camada Chipanga e Bananeiras em relação ao dique. Fonte: Autora

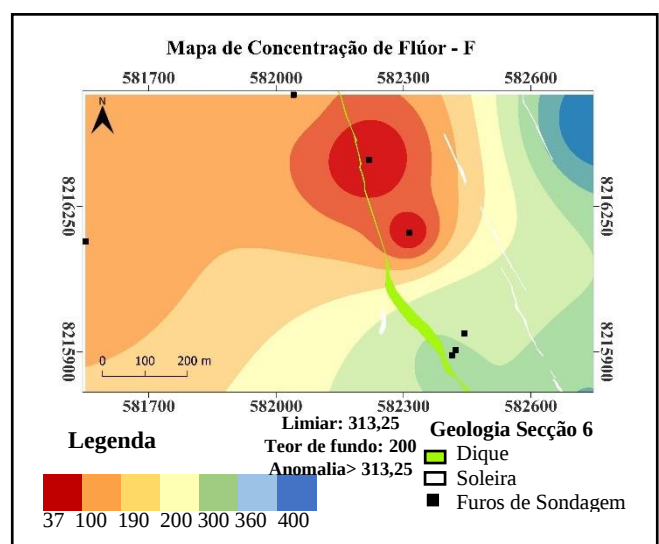
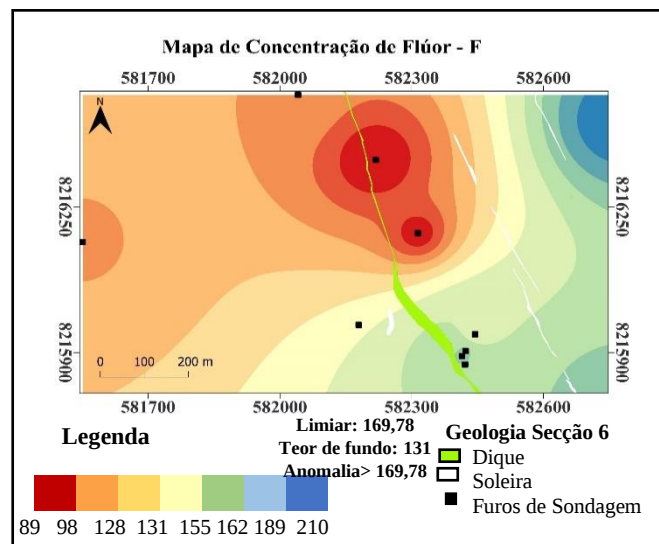
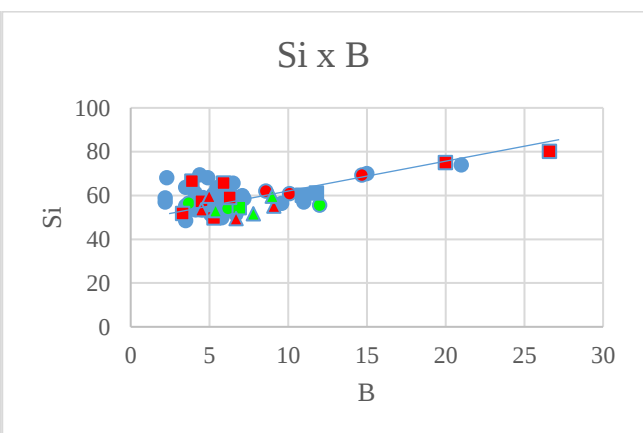
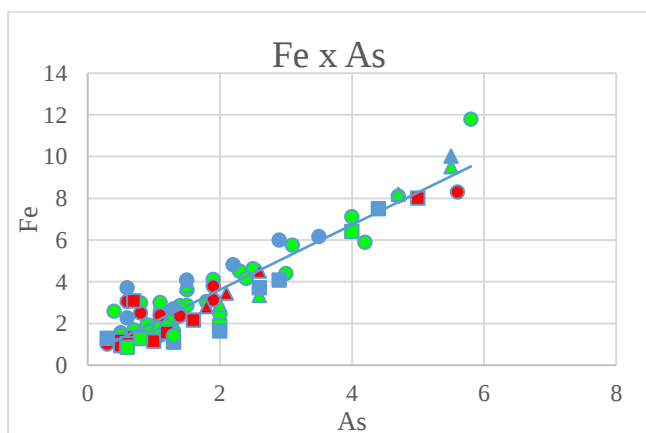
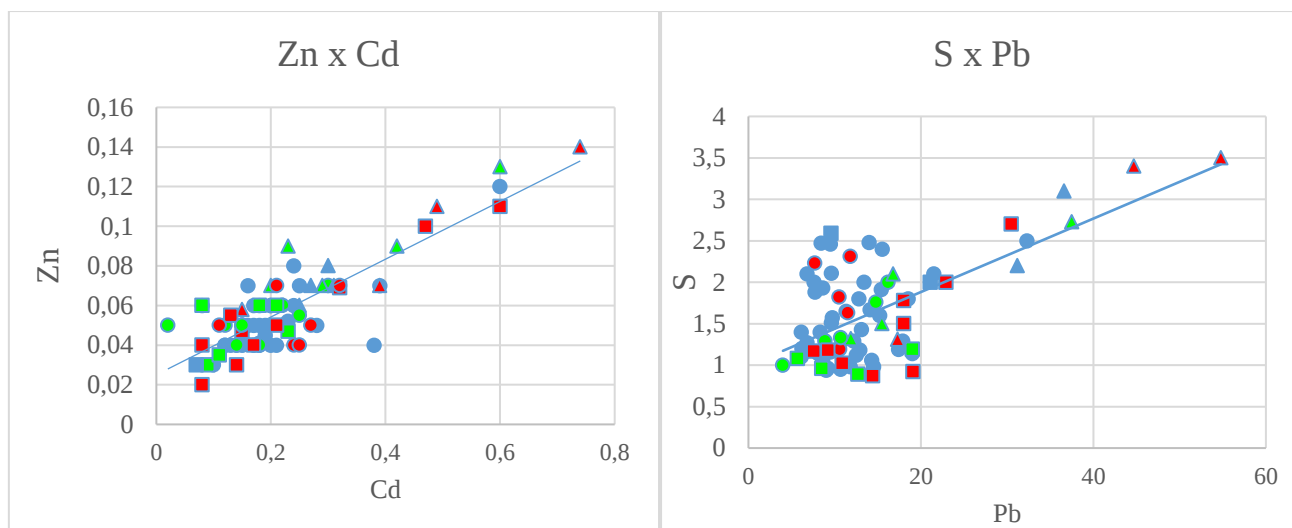


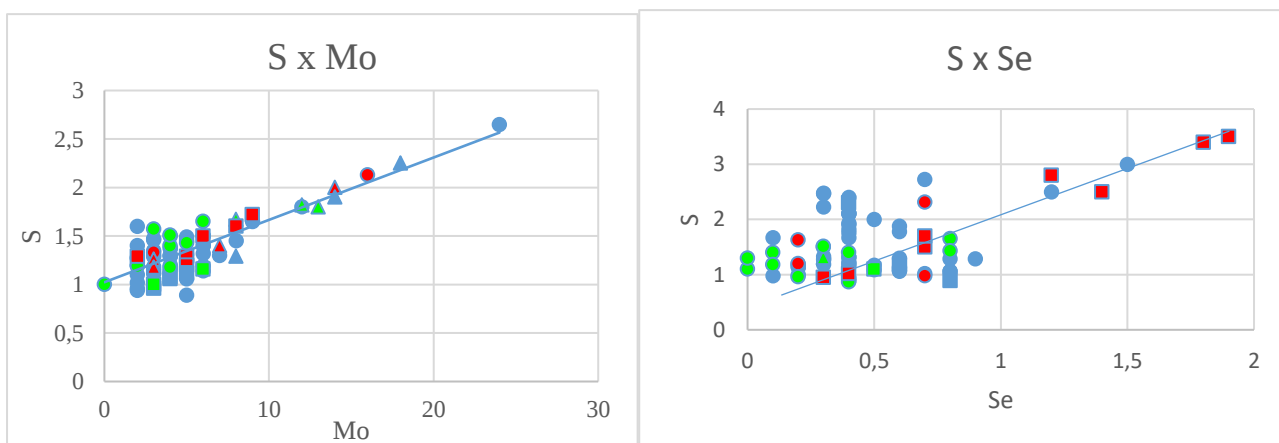
Figura 40: Mapa de concentração de teores de F (flúor) na camada Chipanga e Bananeiras em relação ao dique. Fonte: Autora.



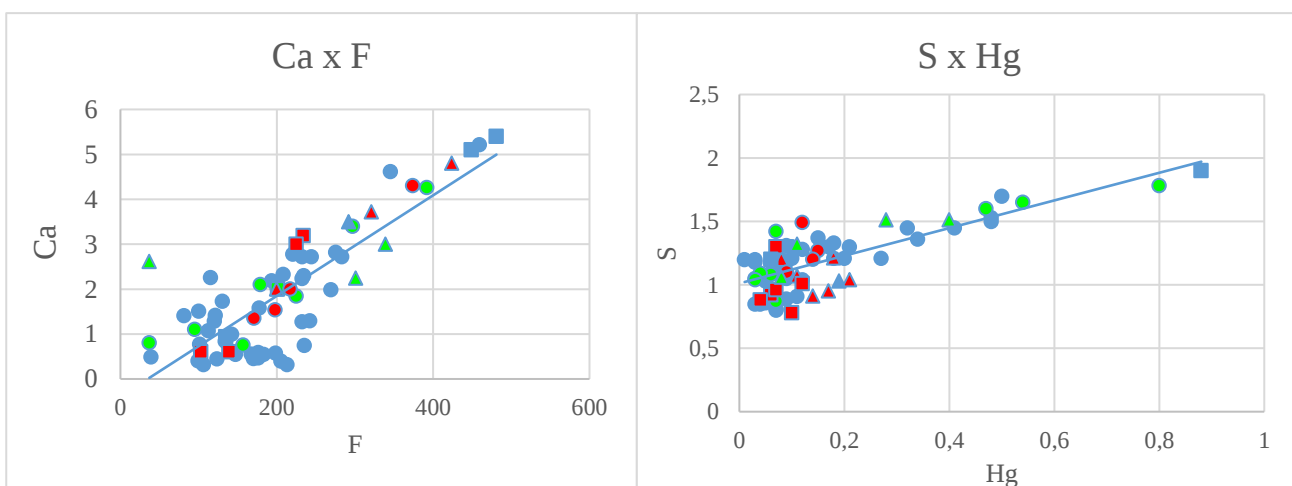
Anexo 5: E- Gráfico de dispersão entre a Fe (pirite) e o As (arsênio); F- Gráfico de dispersão entre a Si (sílica) e o B (boro). Fonte: Autora.



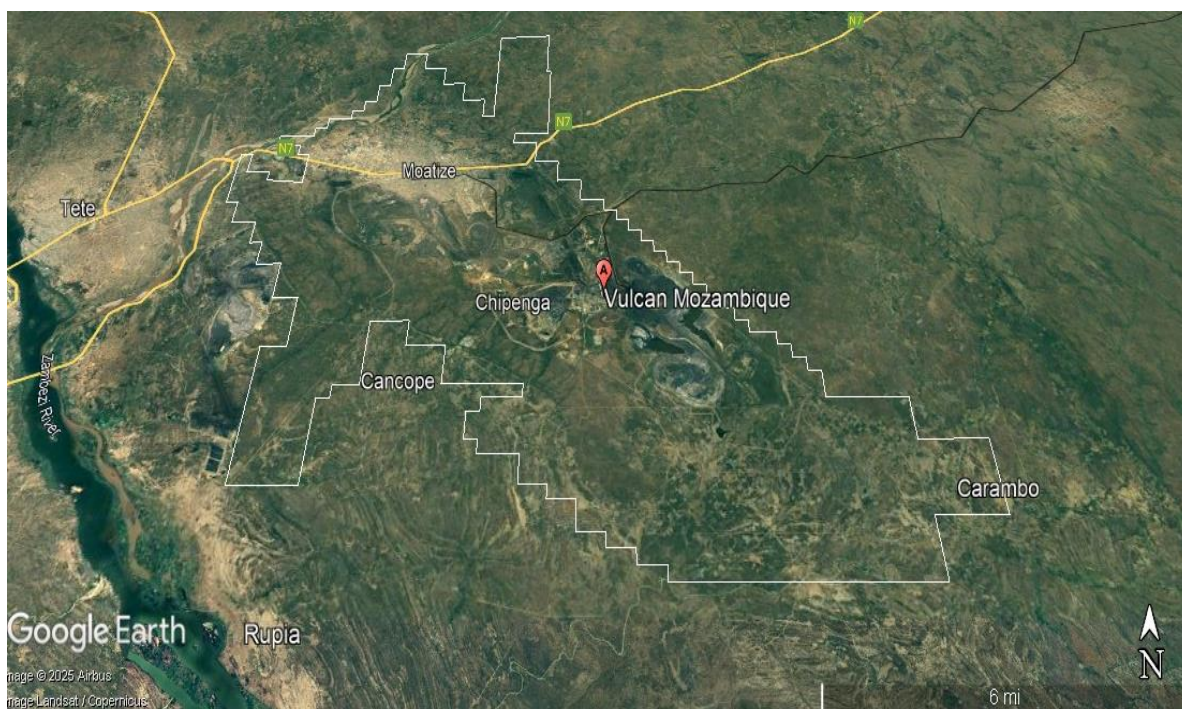
Anexo 6: G- Gráfico de dispersão entre o Zn (esfaielite) e o Cd (cádmio); H- Gráfico de dispersão entre a S (pirite) e o Pb (chumbo). Fonte: Autora.



Anexo 7: I- Gráfico de dispersão entre a S (pirite) e o molibdénio (Mo) e J- Gráfico de dispersão entre a Fe (pirite) e o Se (selénio).



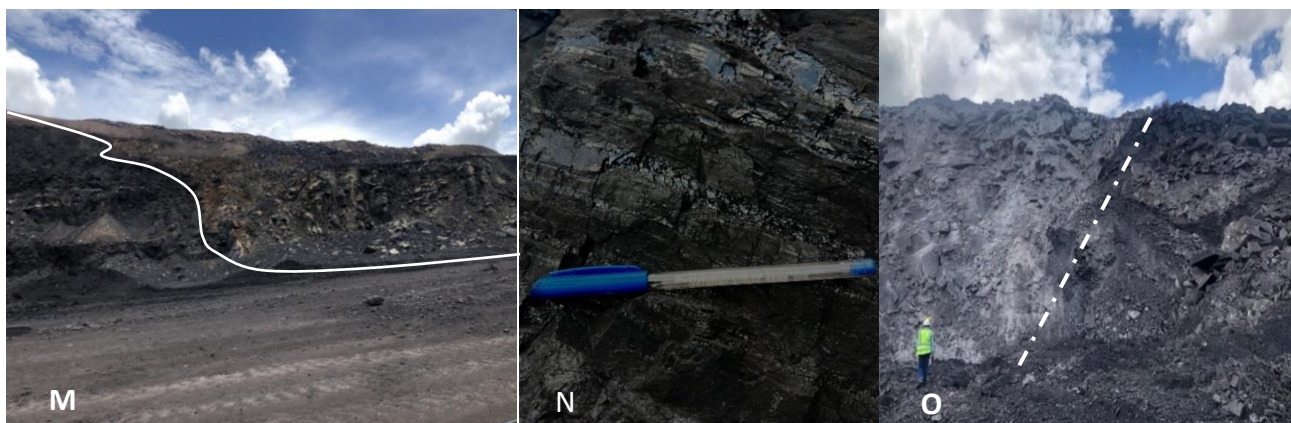
Anexo 8: K- Gráfico de dispersão entre a F (flúor) e o Ca (fluorapatite) e L- Gráfico dispersão entre S (pirite) e Hg (mercúrio). Fonte: Autora.



Anexo 9: Imagem de Satélite captada pelo Google Earth demonstrando a área da região da licença da VULCAN Mozambique. A imagem ilustra a área ocupada pela licença, a área de pesquisa, entre outros aspectos como densidade de vegetação, hidrografia e morfologia local. Imagem de 2021, capturada aos 12/05/2025.



Anexo 10: Imagem de Satélite captada pelo Google Earth demonstrando a área Prospektada e um perfil topográfico ilustrativo representado pela linha branca. Imagem de 2018, capturada aos 12/05/2025.



Anexo 11: M- Carvão extremamente queimado pelo dique, na secção 2 N-Carvão Fresco e O- Falha normal
Fonte:Autora.



Anexo 12: P- Afloramento estudado (totalmente destruído) com o contacto entre o dique e o carvão na secção 6, Q- Pirite no carvão Fonte: Autora.

Código	Latitude	Longitude	As	B	Cd	Pb	Hg	Mo	Se	F
S6_151	582218.29	8216361.9	2.9	5.2	0.15	9.2	0.1	3.3	0.4	98.6
S6_152	582314.18	8216186.5	3.2	5.4	0.2	13.5	0.2	4.7	0.5	138
S6_154	582178.98	8215966.1	0.9	6	0.17	12.9	0.26	2.83	0.3	247
S6_187	582384.2	8215743.3	1.7	3.8	0.13	7.5	0.06	4	0.6	192
S6_247A	582041.15	8216518.3	1.98	5.94	0.28	9.74	0.2	7.4	0.26	246.8
S6_256	582422.88	8215903.9	2.4	12.2	0.25	25.6	0.14	7.8	0.73	237.8
S6_298	582414.17	8215891.4	2.7	6.3	0.3	14.5	0.08	5.2	0.7	222.4
S6_321	582421.41	8215871.4	1.4	6.3	0.28	14.5	0.08	5.2	0.7	214.5
S6_HQ481	582084.17	8215836.3	1.5	6.9	0.18	11	0.2	4.3	0.5	250
S6_HQ485	582382.41	8215656.5	1.5	9.5	0.2	16	0.2	5.3	0.3	232.8

Anexo 13: : Coordenadas UTM (34E) dos Furos de Sondagem, dados laboratoriais (camada Chipanga) de
concentração média dos elementos-traço analisados, concentração em ppm, coordenadas em UTM,
Concessão da VULCAN (secção 6).

Código	Latitude	Longitude	As	B	Cd	Pb	Hg	Mo	Se	F
S6_151	582218.3	8216362	1.2	4.4	0.18	9.3	0.03	4.75	0.4	128
S6_152	582314.2	8216362	0.9	4.9	0.19	16.4	0.06	5.5	0.4	103
S6_247A	582041.1	8216518	0.8	4.46	0.16	6.73	0.03	4.3	0.13	161
S6_256	582422.9	8215904	0.72	2.88	0.2	11.8	0.1	5.2	0.18	139.6
S6_259	582444	8215944	0.68	6.2	0.15	14.48	0.036	4	0.12	153.2
S6_LD477	581968.95	8217261.3	2.17	4.9	0.25	10.65	0.032	5.75	0.3	185.7

Anexo 14: Dados laboratoriais (camada Bananeiras) de concentração média dos elementos-traço analisados, concentração em ppm, coordenadas em UTM, Concessão da VULCAN (secção 6).

	Análises Imediatas e Testes			Análises Petrográficas			Poder Refletor
Código	Cinzas (%)	CSN	TRD (g/cm ³)	Vitrinite	Inertinite	Telovitrine	Pra%
S6_151	8.7	8.8	1.64	83.4	12.5	64	1.36
S6_152	8.5	8.9	1.64	84	12.7	66.4	1.38
S6_154	8.8	8.9	1.65	82.5	13.6	63.7	1.31
S6_187	2.9	7.5	1.6	84.4	9.7	60.8	1.6
S6_247A	8.6	9	1.8	83.4	8.4	77	1.7
S6_256	8.9	7.4	1.7	83.5	12	71.7	1.8
S6_298	2	8.6	1.7	80	10.7	76.5	1.5
S6_321	8.7	0.6	1.6	83.43	10.7	71.7	1.9
S6_HQ481	8.6	7.95	1.7	83.5	11.8	71.8	1.7
S6_HQ485	10.5	8.4	1.73	81.45	10.6	51	1.4

Anexo 15: Dados laboratoriais (camada Chipanga) de percentagem média das análises petrográficas, químicas e imediatas furos de sondagem.

	Análises Imediatas e Testes			Análises Petrográficas			Poder Refletor
Código	Teor de Cinzas (%)	CSN	TRD (g/cm ³)	Vitrinite	Inertinite	Telovitrine	Pra%
S6_151	8.5	8.8	1.75	83.1	12.9	68.3	1.6
S6_152	8.9	6.5	1.7	81.8	14	68.3	1.7
S6_247A	8.9	8.6	1.7	85.6	10.3	78.8	1.6
S6_256	8.2	6.8	1.6	79.5	11.3	71.5	1.5
S6_259	8	7.4	1.6	72.3	8.72	64.3	1.3
S6_LD477	10.7	9	1.4	84.6	10.1	71.2	1.4

Anexo 16: Dados laboratoriais (camada Bananeiras) de percentagem média das análises petrográficas, químicas e imediatas furos de sondagem.