

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

# PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E MODELAGEM GEOLÓGICA/GEOQUÍMICA DA PORÇÃO CENTRAL DO ALVO FÓSFORO-URANÍFERO MANDACARÚ, IRAUÇUBA-CE

Alan Dantas Cardoso

Orientador: Dr. Luiz Alberto Vedana

# DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias

São Cristóvão-SE 2022 Alan Dantas Cardoso

# PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E MODELAGEM GEOLÓGICA/GEOQUÍMICA DA PORÇÃO CENTRAL DO ALVO FÓSFORO-URANÍFERO MANDACARÚ, IRAUÇUBA-CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias da Universidade Federal de Sergipe, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geociências.

Orientador: Dr. Luiz Alberto Vedana

São Cristóvão–SE 2022

#### FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

Cardoso, Alan Dantas

C268p Petrografia, geoquímica e modelagem geológica/geoquímica da porção central do Alvo Fósforo-Uranífero Mandacarú, Irauçuba-CE / Alan Dantas Cardoso ; orientador Luiz Alberto Vedana. – São Cristóvão, SE, 2022. 51 f. : il.

Dissertação (mestrado em Geociências e Análise de Bacias) – Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Geociências. 2. Petrologia. 3. Geologia. 4. Geoquímica. 5. Metassomatismo (Mineralogia). 6. Cinturões orogênicos – Ceará. I. Vedana, Luiz Alberto, orient. II. Título.

CDU 552.2(813.1)

# PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E MODELAGEM GEOLÓGICA/GEOQUÍMICA DA PORÇÃO CENTRAL DO ALVO FÓSFORO-URANÍFERO MANDACARÚ, IRAUÇUBA-CE

por:

Alan Dantas Cardoso (Geólogo, Universidade Federal de Sergipe – 2019)

# DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de:

## **MESTRE EM GEOCIÊNCIAS**

#### **BANCA EXAMINADORA:**

Dr. Luiz Alberto Vedana [Orientador – UFS]

Adriane Machado [Membro Interno - UFS]

Data Defesa: 31/05/2022

Dedico esta dissertação a todos aqueles que contribuem para minha evolução pessoal/profissional, seja de forma direta ou indireta, desde ajudas explicativas a pensamentos positivos. A boa vontade move o mundo e essa vitória é uma prova disso.

Se você não está com medo, então você não está se arriscando. E se você não está se arriscando, então o que você está fazendo?

(Ted Mosby)

#### **RESUMO**

O Alvo Mandacarú (Iraucuba-CE) está inserido na Província Fósforo-Uranífera do Centro-Norte do Ceará, em conjunto com as ocorrências Serrotes Baixos, Taperuaba e a Jazida Itataia. As rochas estudadas estão localizadas no Domínio Ceará Central, na Subprovíncia Norte da Província Borborema, formada como resultado da convergência e colisão dos crátons Amazônico, São Luís-Oeste África e São Francisco-Congo, durante a Orogenia Brasiliana/Pan-Africana, formadora do Gondwana Oeste. O trabalho realizou uma caracterização mineralógica química e das estruturas das rochas testemunhadas de furos de sondagem, buscando entender os processos geológicos aos quais as rochas foram submetidas, além de classificar e quantificar a mineralização de fósforo e urânio presente. O estudo petrográfico identificou que as rochas exibem metamorfismo na fácies anfibolito, com grande interferência do hidrotermalismo. Fica evidente o processo de metassomatismo sódico, evidenciado pela cloritização de biotita, albitização dos feldspatos, riebeckitização dos anfibólios e hematitização, além de posterior sericitização e saussoritização da albita. O estudo geoquímico identificou 35 zonas mineralizadas, com espessura variando entre 60 cm e 18 m, com valores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> chegando a 15,11 % e U a 8.380,39 ppm. Destacam-se zonas com espessura superior a 10 m e teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e U superior ou próximo a 10% e 1.000 ppm, respectivamente. A química mineral evidenciou que o colofano, mineral minério das rochas estudadas, quimicamente trata-se de flúorapatita de natureza amorfa, com conteúdo de  $P_2O_5$  entre 36,46 e 42,18 %, CaO entre 50,56 e 56,69 % e F entre 1,23 a 2,22 %. Foi identificado um mineral de SiO<sub>2</sub> e UO<sub>3</sub> que variam de 13,90 a 26,49 % e 55,12 a 77,47 %, respectivamente. Acredita-se tratar de coffinita, entretanto é necessária utilização de outra técnica mais adequada para uma melhor classificação. A modelagem geológica/geoquímica mostrou que a área estudada possui 67,08 % de material considerado estéril e 32,92 % de material mineralizado para fósforo, com teor superior a 4 %. No que diz respeito ao volume, 90,88 % são compostos por rochas estéreis, enquanto 9,12 % são compostos por rochas mineralizadas. As mineralizações se encontram geograficamente concentradas na parte centro-leste da área estudada, além de estarem dispostas próximas das superfícies, o que são pontos positivos para uma possível abertura de mina a céu aberto. As rochas do Alvo Mandacarú possuem semelhanças com as rochas do Depósito Itataia, visto que ambas estão situadas num contexto geológico/geográfico similar, onde em ambos a mineralização está vinculada a albitização (metassomatismo sódico), ligados a fluidos hidrotérmicos. Entretanto, maiores conteúdos de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e U em Itataia podem ser explicados por melhores condições estruturais para concentração do minério, além de uma possível baixa efetividade de algumas das fases mineralizantes no Alvo Mandacarú.

Palavras-chave: Mineralização; Metassomatismo Sódico, Hidrotermalismo.

#### ABSTRACT

The Mandacaru target (Iraucuba-CE), besides the Serrotes Baixos, Taperuaba occurrences and the Itataia deposit are part of the Uranium-Phosphorus Province which occurs in the Center-Northen part of the Ceará state. Those rocks are part of the Central Ceará Domain, northern part of the Borborema Province, mostly a result of the convergence and collision of Archean and Paleoproterozoic crust and major adjacent cratonic areas during the Brazilian/Pan-African Orogeny. We present new structural, mineralogical and chemical data from the Mandacaru target rocks, using drillhole samples, aiming to understand the main geological processes registered in the rocks and to classify and quantify the phosphorus and uranium mineralization. Seven groups of rocks were identified: (1) paragneisses, (2) impure marbles, (3) quartzites (4) cataclasites/breccias; (5) hydrothermalites; (6) colofanites and (7) ground cover and saprolite with vein quartz. Amphibolite facies mineral assemblage was identified, although intense retrometamorphism interfere in a more accurate determination. Retrometamorphism and sodium metasomatism is evidenced by biotite chloritization, albitization of feldspars, riebeckitization of amphiboles and hematitization, in addition to subsequent sericitization and saussortization of albite. Whole rock geochemical analysis led to the identification of 35 mineralized zones, with thickness of the zones varying between 60 cm and 18 m, with P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and U values reaching 15.11% and 8380.39 ppm respectively. Zones that stand out, have thickness greater than 10 meters and a P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and U content greater than, or close to 10% and 1000 ppm, respectively. The mineral chemistry showed that the ore mineral colophane, chemically is fluorine-apatite of amorphous nature, with P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO and F content ranging from 36.46 to 42.18%, 50.56 to 56 .69%, 1.23 to 2.22% respectively. A mineral of SiO<sub>2</sub> and UO<sub>3</sub> was identified, ranging from 13.90 to 26.49% and 55.12 to 77.47% respectively. It is believed to be coffinite, however more accurate techniques are necessary to identification and classification. The geological/geochemical modeling showed that the studied area has 67.08% of sterile material and 32.92% of mineralized phosphorus material, with a content greater than 4%. With regard to volume, 90.88% is composed of sterile rocks, while 9.12% is composed of mineralized rocks. The mineralization is geographically concentrated and arranged close to the surface, which are positive points for a future open pit mine. The Mandacarú target rocks have similarities with the Itataia Deposit rocks, since both are located in a similar geological/geographic context, and in both the mineralization is linked to albitization (sodic metasomatism), associated to hydrothermal fluids. However, higher P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and U contents in Itataia can be explained by better structural conditions for ore concentration, in addition to a possible low effectiveness of some of the mineralizing phases in the Mandacarú target. Further studies on mineral chemistry, fluid inclusions and isotopic geochemistry are recommended, aiming to improve the understanding of the mineralization processes and disparities between deposits.

Keywords: Mineralization; Sodium Metasomatism, Hydrothermalism.

# SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	
1 INTRODUÇÃO	
1.1 APRESENTAÇÃO	
1.2 OBJETIVOS	
1.3 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	
1.4 MÉTODOS DE TRABALHO	
1.4.1 Levantamento Bibliográfico	
1.4.2 Campanha de Sondagem	
1.4.3 Descrições Macroscópicas	
1.4.4 Petrografia	
1.4.5 Geoquímica	
1.4.6 Modelagem Geológica/Geoquímica	14
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
GEOLÓGICA/GEOQUÍMICA DA PORÇÃO CENTR URANÍFERO MANDACARÚ, IRAUÇUBA-CE PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E MODELAGEM GEOLÓGICA/GEOQUÍMICA DA PORÇÃO CENTR	AL DO ALVO FÓSFORO- 
URANIFERO MANDACARU, IRAUÇUBA-CE	
1 INTRODUCAO	
,	
2 MATERIAIS E MÉTODOS	
2 MATERIAIS E MÉTODOS 2.1 Levantamento Bibliográfico	
2 MATERIAIS E MÉTODOS 2.1 Levantamento Bibliográfico 2.2 Campanha de Sondagem	
<ul> <li>2 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>2.1 Levantamento Bibliográfico</li> <li>2.2 Campanha de Sondagem</li> <li>2.3 Descrições Macroscópicas</li> </ul>	
<ul> <li>2 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>2.1 Levantamento Bibliográfico</li> <li>2.2 Campanha de Sondagem</li> <li>2.3 Descrições Macroscópicas</li> <li>2.4 Petrografia</li> </ul>	
<ul> <li>2 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>2.1 Levantamento Bibliográfico</li> <li>2.2 Campanha de Sondagem</li> <li>2.3 Descrições Macroscópicas</li> <li>2.4 Petrografia</li> <li>2.5 Geoquímica</li> </ul>	18         19         19         19         20         20         20         20         20         20         20         20         20         20
<ul> <li>2 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>2.1 Levantamento Bibliográfico</li> <li>2.2 Campanha de Sondagem</li> <li>2.3 Descrições Macroscópicas</li> <li>2.4 Petrografia</li> <li>2.5 Geoquímica</li> <li>2.6 Modelagem Geológica/Geoquímica</li> </ul>	18         19         19         19         20         20         20         20         21
<ul> <li>2 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>2.1 Levantamento Bibliográfico</li> <li>2.2 Campanha de Sondagem</li> <li>2.3 Descrições Macroscópicas</li> <li>2.4 Petrografia</li> <li>2.5 Geoquímica</li> <li>2.6 Modelagem Geológica/Geoquímica</li> </ul> 3 GEOLOGIA REGIONAL	18         19         19         19         19         20         20         20         20         20         20         21
<ul> <li>2 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>2.1 Levantamento Bibliográfico</li> <li>2.2 Campanha de Sondagem</li> <li>2.3 Descrições Macroscópicas</li> <li>2.4 Petrografia</li> <li>2.5 Geoquímica</li> <li>2.6 Modelagem Geológica/Geoquímica</li> <li>3 GEOLOGIA REGIONAL</li> <li>4 GEOLOGIA LOCAL</li> </ul>	18         19         19         19         19         20         20         20         20         20         21         23
<ul> <li>2 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>2.1 Levantamento Bibliográfico</li> <li>2.2 Campanha de Sondagem</li> <li>2.3 Descrições Macroscópicas</li> <li>2.4 Petrografia</li> <li>2.5 Geoquímica</li> <li>2.6 Modelagem Geológica/Geoquímica</li> <li>3 GEOLOGIA REGIONAL</li> <li>4 GEOLOGIA LOCAL</li> <li>5 RESULTADOS</li> </ul>	18         19         19         19         19         20         20         20         20         20         20         20         21         23         25
<ul> <li>2 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>2.1 Levantamento Bibliográfico</li> <li>2.2 Campanha de Sondagem</li> <li>2.3 Descrições Macroscópicas</li> <li>2.4 Petrografia</li> <li>2.5 Geoquímica</li> <li>2.6 Modelagem Geológica/Geoquímica</li> <li>3 GEOLOGIA REGIONAL</li> <li>4 GEOLOGIA LOCAL</li> <li>5 RESULTADOS</li> <li>5.1 PETROGRAFIA</li> </ul>	18         19         19         19         20         20         20         20         20         20         20         20         20         21         21         23         25         25
<ul> <li>2 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>2.1 Levantamento Bibliográfico</li> <li>2.2 Campanha de Sondagem</li> <li>2.3 Descrições Macroscópicas</li> <li>2.4 Petrografia</li> <li>2.5 Geoquímica</li> <li>2.6 Modelagem Geológica/Geoquímica</li> <li>3 GEOLOGIA REGIONAL</li> <li>4 GEOLOGIA LOCAL</li> <li>5 RESULTADOS</li> <li>5.1 PETROGRAFIA</li> <li>5.2 MODELAGEM GEOLÓGICA</li> </ul>	18         19         19         19         19         20         20         20         20         20         20         20         21         21         23         25         35
<ul> <li>2 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>2.1 Levantamento Bibliográfico</li> <li>2.2 Campanha de Sondagem</li> <li>2.3 Descrições Macroscópicas</li> <li>2.4 Petrografia</li> <li>2.5 Geoquímica</li> <li>2.6 Modelagem Geológica/Geoquímica</li> <li>3 GEOLOGIA REGIONAL</li> <li>4 GEOLOGIA LOCAL</li> <li>5 RESULTADOS</li> <li>5.1 PETROGRAFIA</li> <li>5.2 MODELAGEM GEOLÓGICA</li> <li>5.3 GEOQUÍMICA</li> </ul>	18         19         19         19         19         20         20         20         20         20         20         20         21         21         23         25         35         36

6 DISCUSSÕES	42
7 CONCLUSÕES	44
8 REFERÊNCIAS	45
CAPÍTULO III – CONCLUSÃO	49
1 Conclusão	50
ANEXO 1	51

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

# 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 APRESENTAÇÃO

O alto crescimento populacional tem causado preocupações principalmente quando relacionado à produção de alimentos e geração de energia. Com isso, o setor da agroindústria e o setor energético serão diretamente afetados, devido à necessidade de acompanhar o ritmo de crescimento da população, visando o abastecimento da demanda mundial.

O Alvo Fósforo-Uranífero Mandacarú (Alvo Mandacarú), objeto de estudo desse trabalho, está localizado na Fazenda Mandacarú, no município de Irauçuba, neste ocorre uma anomalia de urânio com valores em torno de 12,50 ppm, com largura de 1.146 m, comprimento de 618 m, além de 1.100 contagens por segundo no cintilômetro e teste colorimétrico positivo com molibdato de amônio, positivando assim para fosfato (Cavalcanti & Bessa 2011).

Sabendo que as *commodities* fósforo e urânio são de grande valia para o mercado de alimentos e energético, devido à produção de fertilizantes e geração de energia nuclear respectivamente, sabendo também dos resultados anômalos para as *commodities* supracitadas no alvo em questão, o presente trabalho focou no estudo do Alvo Mandacarú. A mineralização do Alvo Mandacarú está encaixada em rochas metamórficas paraderivadas, com condições semelhantes as observadas na Jazida Fósforo-Uranífera Itataia (Jazida Itataia), que contém, segundo a INB (2021), uma reserva de 8,9 milhões de toneladas de minério de fosfato, com teor médio de 26,35% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 80 mil toneladas de urânio, com teor médio de 0,19% de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. O Alvo Mandacarú, assim como a Jazida Itataia e os depósitos Serrotes Baixos e Taperuaba, são pertencentes a Província Fósforo-Uranífera do Centro-Norte do Ceará, o que sugere um potencial econômico para a área estudada (Figura 1).



**FIGURA 1:** Mapa da Província Borborema Norte, evidenciando a localização das principais ocorrências da Província Fósforo-Uranífera do Centro-Norte do Ceará (retirado de Araújo *et al.*, 2014).

Com o intuito de contribuir com novos dados e novas interpretações sobre o Alvo Mandacarú e a mineralização nele presente, estudos petrográficos foram realizados em macro e microescala, além de processamentos de dados químicos, buscando colaborar para um maior entendimento sobre a geologia e o controle da mineralização existente na região. Aliados a esses estudos, foram construídos modelos de caráter geológico e geoquímico, contribuindo para compreensão das disposições das rochas e mineralizações presentes na área.

O capítulo 2 desta dissertação de mestrado está organizado no formato de artigo, intitulado "Petrografia, Geoquímica e Modelagem Geológica/Geoquímica da Porção Central do Alvo Fósforo-Uranífero Mandacarú, Irauçuba-CE". Este artigo será submetido à revista científica "*Journal of South American Earth Sciences*", avaliada pela CAPES com o nível B1. As normas de submissão da revista supracitada se encontram no Anexo I.

No capítulo 3 são elencadas as conclusões do trabalho de mestrado desenvolvido.

#### **1.2 OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é a caracterização estrutural, mineralógica e química das rochas testemunhadas de furos de sondagem, através de descrições macroscópicas e microscópicas, estudo geoquímico, além de montagem de um modelo geológico/geoquímico que melhor represente o Alvo Mandacarú, quantificando as litologias e melhorando o entendimento sobre as rochas da região, tanto no que se refere as rochas encaixantes, adjacentes as mineralizações, como também as rochas que possuem teores consideráveis das *commodities* fósforo e urânio, evoluindo assim no entendimento da mineralização e seus controles.

O objetivo específico é identificar e caracterizar a mineralogia, os aspectos texturais e as macro/microestruturas dos diferentes grupos de rocha presentes, buscando entender a natureza e as condições preexistentes dos eventos geológicos aos quais elas foram submetidas, além de contribuir para o modelo metalogenético da mineralização e crescer sobre o entendimento da disposição do minério na região.

## 1.3 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O Alvo Mandacarú, objeto de estudo desse trabalho, está localizado na Fazenda Mandacarú, inserida no município de Irauçuba, na porção centro-norte do Estado do Ceará. O município de Irauçuba possui a quarta maior área da região norte do estado, totalizando 1.146,223 km<sup>2</sup>. O acesso à Fazenda Mandacarú partindo de Fortaleza, capital estadual, é realizado pela rodovia BR-222, que liga esta capital ao Estado do Piauí. Essa estrada é pavimentada e com condições de tráfego durante todo o ano. O trajeto continua no sentido oeste, rumo a sede municipal de Irauçuba. A partir da sede municipal é necessário deslocar-se no sentido sul, seguindo por estradas estaduais e municipais sem pavimentação, até alcançar a Fazenda Mandacarú (Figura 2). A área de estudo está inserida na Folha Irauçuba (SA.24-Y-D-V), com escala de 1:100.000, elaborada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) no ano de 2018.



FIGURA 2: Mapa de localização e vias de acesso da Fazenda Mandacarú (Fonte: SGB/CPRM 2020).

## 1.4 MÉTODOS DE TRABALHO

## 1.4.1 Levantamento Bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi realizado através da busca de dados da região de estudo, relacionados ao contexto geotectônico, à geologia regional e local, à dados petrográficos, geoquímicos e geocronológicos, além de dados ligados a geologia econômica. As bibliografias pesquisadas compreenderam livros, artigos científicos, teses, dissertações, monografias, anais de congressos e relatórios pertencentes ao Projeto Mandacarú da Empresa *Rio Verde Minerals*, que executou estudos na área no ano de 2013.

### 1.4.2 Campanha de Sondagem

A campanha de sondagem no Alvo Mandacarú foi planejada e executada no ano de 2013 pela Empresa *Rio Verde Minerals*, com o intuito de interceptar a mineralização fósforo-uranífera na região. A empresa supracitada contratou uma segunda empresa, denominada *Eco Sondagem*, para fazer as perfurações dos furos. Foram feitos 32 furos de sondagem, totalizando 2.141,80 m, gerando testemunhos nos diâmetros HQ (63,5 mm) e NQ2 (50,7 mm). Entretanto, nesse trabalho foram escolhidos 12 testemunhos de sondagem, de acordo com a localização e análise prévia da geoquímica, que totalizaram 744,48 m.

### 1.4.3 Descrições Macroscópicas

As descrições macroscópicas efetuadas nos testemunhos de sondagem contaram com o auxílio de lupa de mão, ácido clorídrico, escala, canivete e fita métrica. As descrições foram realizadas buscando caracterizar e quantificar as litologias presentes nos testemunhos, mediante observação das estruturas, texturas, mineralogia, graus de alteração e disposição dos contatos, com o intuito de entender os diferentes grupos de rocha e suas relações com a mineralização.

### 1.4.4 Petrografia

No total foram confeccionadas 17 lâminas delgadas, 7 delas no Laboratório de Laminação da Universidade Federal do Ceará (Lamin) e 10 na Oficina de Laminação do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará. Os aspectos mineralógicos e texturais foram descritos com o auxílio do microscópio petrográfico Olympus BX41, do Laboratório de Microscopia e Lupas do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

## 1.4.5 Geoquímica

Os dados litoquímicos dos testemunhos foram cedidos pelo detentor das informações referente ao Projeto Mandacarú, a antiga *Rio Verde Minerals*. As análises foram realizadas no *Laboratório SGS Geosol*, pelos métodos ICP-AES e ICP-MS. Tendo em vista que as análises foram feitas por metragem, independentemente da litologia, as amostras foram utilizadas de forma numérica, levando em conta principalmente os teores de fósforo e urânio, encontrando e dividindo as zonas mineralizadas dos furos de sondagem estudados.

A química mineral foi obtida no CLGeo/UFS, onde foram obtidas as análises em Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS), da marca *Oxford Instruments*, modelo *X*-*Act*, acoplado a um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), de marca *Tescan*, modelo *Vega 3*.

### 1.4.6 Modelagem Geológica/Geoquímica

A modelagem geológica/geoquímica foi realizada, assim como os perfis de sondagem confeccionados, com o intuito de construir um modelo completo, podendo ilustrar e melhorar a visualização das correlações encontradas entre os dados geológicos obtidos na descrição macroscópica e petrográfica, com os dados geoquímicos.

As modelagens foram obtidas no *Software Leapfrog Geo 6.0.4*, onde os dados de entrada são provenientes das descrições dos testemunhos, além de dados químicos de rocha. A licença do programa é vinculada a empresa *Seequent Limited*, disposta na categoria Acadêmica (*Token*: 9a07eed4-650c-4304-a2c0-644215eec161).

## 1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, C. E. G., Cordani, U. G., Weinberg, R. F., Basei, M. A., Armstrong, R., & Sato, K. (2014). Tracing Neoproterozoic subduction in the Borborema Province (NE-Brazil): Clues from U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotopes on granitoids and migmatites. Lithos, 202, 167-189.

CAVALCANTI, J.A.D., BESSA, M.D.M.R.. A pesquisa de Fosfato na área do Ceará Central. In: Abram, M.B., Bahiense, I.C., Porto, C.G., Brito, R.S.C. (Eds.), Projeto Fosfato do Brasil e Parte I, Capítulo IX. 1ed. Salvador: CPRM, Programa Geologia do Brasil. Informe de Recursos Minerais, Série Insumos Minerais para a Agricultura, 13, pp. 487 e 518, 2011.

INB, Industria Nuclear Brasileira. Disponível em: <a href="https://www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Santa-Quiteria/LSMode/detail">https://www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Santa-Quiteria/LSMode/detail</a>> Acesso em 11/03/2021.

CAPÍTULO II – PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E MODELAGEM GEOLÓGICA/GEOQUÍMICA DA PORÇÃO CENTRAL DO ALVO FÓSFORO-URANÍFERO MANDACARÚ, IRAUÇUBA-CE

## PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E MODELAGEM GEOLÓGICA/GEOQUÍMICA DA PORÇÃO CENTRAL DO ALVO FÓSFORO-URANÍFERO MANDACARÚ, IRAUÇUBA-CE

Alan Dantas Cardoso <sup>a\*</sup>, Luiz Alberto Vedana <sup>ab</sup>, Joaquim Daniel de Liz <sup>b</sup>,

Cristine Lenz<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias, Universidade Federal de Sergipe. Avenida Marechal Rondon, s/n – Bairro Jardim Rosa Elze. CEP 49100-000. São Cristóvão – SE, Brasil.

b Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe. Avenida Marechal Rondon, s/n – Bairro Jardim Rosa Elze. CEP 49100-000. São Cristóvão – SE, Brasil.

\* Endereço de e-mail do autor: alancardoso\_geologo@hotmail.com

#### **RESUMO**

O Alvo Mandacarú (Iraucuba-CE) está inserido na Província Fósforo-Uranífera do Centro-Norte do Ceará, em conjunto com as ocorrências Serrotes Baixos, Taperuaba e a Jazida Itataia. As rochas estudadas estão localizadas no Domínio Ceará Central, na Subprovíncia Norte da Província Borborema, formada como resultado da convergência e colisão dos crátons Amazônico, São Luís-Oeste África e São Francisco-Congo, durante a Orogenia Brasiliana/Pan-Africana, formadora do Gondwana Oeste. O trabalho realizou uma caracterização mineralógica, química e das estruturas das rochas testemunhadas de furos de sondagem, buscando entender os processos geológicos aos quais as rochas foram submetidas, além de classificar e quantificar a mineralização de fósforo e urânio presente. O estudo petrográfico identificou que as rochas exibem metamorfismo na fácies anfibolito, com grande interferência do hidrotermalismo. Fica evidente o processo de metassomatismo sódico, evidenciado pela cloritização de biotita, albitização dos feldspatos, riebeckitização dos anfibólios e hematitização, além de posterior sericitização e saussoritização da albita. O estudo geoquímico identificou 35 zonas mineralizadas, com espessura variando entre 60 cm e 18 m, com valores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> chegando a 15,11 % e U a 8.380,39 ppm. Destacam-se zonas com espessura superior a 10 m e teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e U superior ou próximo a 10% e 1.000 ppm, respectivamente. A química mineral evidenciou que o colofano, mineral minério das rochas estudadas, quimicamente trata-se de flúorapatita de natureza amorfa, com conteúdo de P2O5 entre 36,46 e 42,18 %, CaO entre 50,56 e 56,69 % e F entre 1,23 e 2,22 %. Foi identificado um mineral de SiO<sub>2</sub> e UO<sub>3</sub> que variam de 13,90 a 26,49 % e 55,12 a 77,47 %, respectivamente. Acredita-se tratar de coffinita, entretanto é necessária utilização de outra técnica mais adequada para uma melhor classificação. A modelagem geológica/geoquímica mostrou que a área estudada possui 67,08 % de material considerado estéril e 32,92 % de material mineralizado para fósforo, com teor superior a 4 %. No que diz respeito ao volume, 90,88 % são compostos por rochas estéreis, enquanto 9,12 % são compostos por rochas mineralizadas. As mineralizações se encontram geograficamente concentradas na parte centro-leste da área estudada, além de estarem dispostas próximas das superfícies, o que são pontos positivos para uma possível abertura de mina a céu aberto. As rochas do Alvo Mandacarú possuem semelhanças com as rochas do Depósito Itataia, visto que ambas estão situadas num contexto geológico/geográfico similar, onde em ambos a mineralização está vinculada a albitização (metassomatismo sódico), ligados a fluidos hidrotérmicos. Entretanto, maiores conteúdos de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e U em Itataia podem ser explicados por melhores condições estruturais para concentração do minério, além de uma possível baixa efetividade de algumas das fases mineralizantes no Alvo Mandacarú.

Palavras-chave: Mineralização; Metassomatismo Sódico, Hidrotermalismo.

#### ABSTRACT

The Mandacaru target (Irauçuba-CE), besides the Serrotes Baixos, Taperuaba occurrences and the Itataia deposit are part of the Uranium-Phosphorus Province which occurs in the Center-Northen part of the Ceará state. Those rocks are part of the Central Ceará Domain, northern part of the Borborema Province, mostly a result of the convergence and collision of Archean and Paleoproterozoic crust and major adjacent cratonic areas during the Brazilian/Pan-African Orogeny. We present new structural, mineralogical and chemical data from the Mandacaru target rocks, using drillhole samples, aiming to understand the main geological processes registered in the rocks and to classify and quantify the phosphorus and uranium mineralization. Seven groups of rocks were identified: (1) paragneisses, (2) impure marbles, (3) quartzites (4) cataclasites/breccias; (5) hydrothermalites; (6) colofanites and (7) ground cover and saprolite with vein quartz. Amphibolite facies mineral assemblage was identified, although intense retrometamorphism interfere in a more accurate determination. Retrometamorphism and sodium metasomatism is evidenced by biotite chloritization, albitization of feldspars, riebeckitization of amphiboles and hematitization, in addition to subsequent sericitization and saussortization of albite. Whole rock geochemical analysis led to the identification of 35 mineralized zones, with thickness of the zones varying between 60 cm and 18 m, with P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and U values reaching 15.11% and 8380.39 ppm respectively. Zones that stand out, have thickness greater than 10 meters and a P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and U content greater than, or close to 10% and 1000 ppm, respectively. The mineral chemistry showed that the ore mineral colophane, chemically is fluorine-apatite of amorphous nature, with P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO and F content ranging from 36.46 to 42.18%, 50.56 to 56 .69%, 1.23 to 2.22% respectively. A mineral of SiO<sub>2</sub> and UO<sub>3</sub> was identified, ranging from 13.90 to 26.49% and 55.12 to 77.47% respectively. It is believed to be coffinite, however more accurate techniques are necessary to identification and classification. The geological/geochemical modeling showed that the studied area has 67.08% of sterile material and 32.92% of mineralized phosphorus material, with a content greater than 4%. With regard to volume, 90.88% is composed of sterile rocks, while 9.12% is composed of mineralized rocks. The mineralization is geographically concentrated and arranged close to the surface, which are positive points for a future open pit mine. The Mandacarú target rocks have similarities with the Itataia Deposit rocks,

since both are located in a similar geological/geographic context, and in both the mineralization is linked to albitization (sodic metasomatism), associated to hydrothermal fluids. However, higher  $P_2O_5$  and U contents in Itataia can be explained by better structural conditions for ore concentration, in addition to a possible low effectiveness of some of the mineralizing phases in the Mandacarú target. Further studies on mineral chemistry, fluid inclusions and isotopic geochemistry are recommended, aiming to improve the understanding of the mineralization processes and disparities between deposits.

Keywords: Mineralization; Sodium Metasomatism, Hydrothermalism.

#### 1 INTRODUÇÃO

O alto crescimento populacional tem causado preocupações em decorrência das incertezas sobre o futuro, principalmente quando relacionado à produção de alimentos e geração de energia. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas (ONU, 2012), a população mundial em 2024 será superior a 8 bilhões de pessoas e, em 2050, superior a 9,5 bilhões. Com isso, o setor da agroindústria e o setor energético serão diretamente afetados, devido à necessidade de acompanhar o ritmo de crescimento da população, visando o abastecimento da demanda mundial.

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de alimentos, sendo considerado uma das maiores fronteiras agrícolas do planeta. Esse fato está intimamente ligado com a tentativa constante de aumento de produtividade, utilizando técnicas mais sofisticadas de plantio. O uso de fertilizantes é fundamental para atingir esse aumento e o fosfato é um insumo essencial na produção de fertilizantes, tornando-se estratégico para qualquer país agrícola. Apesar de um pequeno aumento na produção de fosfato nos últimos anos, o Brasil continua sendo um grande importador desse material no mercado internacional (Oliveira *et al.*, 2019).

A necessidade de aumento da produção de energia e o crescente entendimento sobre os impactos dos gases de efeito estufa, relacionados com a produção de energia por combustíveis fósseis, tornou o urânio uma importante mercadoria no mercado global de recursos minerais. Novas usinas nucleares estão sendo consideradas para a futura produção global de energia. Seguindo essa realidade mundial, o Brasil anunciou a construção de novas usinas nucleares, o que deixa claro a necessidade de um aumento da produção nacional de urânio.

Entendendo a importância nacional das *commodities* fósforo e urânio para o mercado energético e de alimentos, esse trabalho focou no estudo do Alvo Fósforo-Uranífero Mandacarú (Alvo Mandacarú), localizado na Fazenda Mandacarú, no município de Irauçuba-Ce. A mineralização do Alvo Mandacarú está encaixada em rochas metamórficas paraderivadas, com condições semelhantes as observadas na Jazida Fósforo-Uranífera Itataia (Jazida Itataia), que contém, segundo a INB (2021), uma reserva de 8,9 milhões de toneladas de minério de fosfato, com teor médio de 26,35% de  $P_2O_5$  e 80 mil toneladas de urânio, com teor médio de 0,19% de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. O Alvo Mandacarú, objeto de estudo desse trabalho, assim como a Jazida Itataia, são pertencentes a importante Província Fósforo-Uranífera do Centro-Norte do Ceará, o que sugere um potencial econômico para a área estudada.

O objetivo deste trabalho é fazer uma caracterização mineralógica, química e das estruturas das rochas testemunhadas de furos de sondagem, através de descrições

macroscópicas e microscópicas, além de montar um modelo geológico/geoquímico, que melhor represente o Alvo Mandacarú, quantificando as litologias e teores das *commodities* fósforo e urânio, melhorando o entendimento sobre a mineralização e sua relação com as rochas encaixantes, contribuindo assim para o entendimento da metalogênese, além de identificar e entender as condições preexistentes dos eventos geológicos aos quais as rochas foram submetidas.

O Alvo Mandacarú, está localizado na Fazenda Mandacarú, inserida no município de Irauçuba, na porção centro-norte do Estado do Ceará (Figura 1).



Figura 1: Mapa de localização e vias de acesso da Fazenda Mandacarú, Irauçuba-CE

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

## 2.1 Levantamento Bibliográfico

O levantamento bibliográfico buscou dados referentes ao contexto geotectônico, à geologia regional e local, à dados petrográficos, geoquímicos, geocronológicos e de geologia econômica da área estudada, em livros, artigos científicos, teses, dissertações, monografias, anais de congressos e relatórios empresariais.

## 2.2 Campanha de Sondagem

A campanha de sondagem foi executada em 2013 pela Empresa *Rio Verde Minerals*. A empresa contratou uma segunda empresa, denominada *Eco Sondagem*, para fazer as perfurações dos furos. Foram feitos 32 furos de sondagem, totalizando 2.141,80 m, nos diâmetros HQ (63,5 mm) e NQ2 (50,7 mm). Entretanto, nesse trabalho foram utilizados 12 testemunhos de sondagem, de acordo com a localização e análise geoquímica, totalizando 744,48 m. Dados da perfuração podem ser vistos na Tabela 1.

ID/Furo	UTM E	UTM N	Altitude (m)	Azimute	Mergulho	Profundidade (m)
MDD-001	411.949,46	9.572.603,68	204,89	110,0	-55,00	50,65
MDD-002	412.023,20	9.572.500,59	215,70	360,0	-55,00	54,27
MDD-007	412.010,60	9.572.526,40	222,91	130,0	-55,00	53,30
MDD-008	411.978,79	9.572.571,92	210,41	110,0	-55,00	65,60
MDD-009	411.947,00	9.572.458,00	211,00	130,0	-55,00	49,36
MDD-014	411.972,00	9.572.595,00	208,00	110,0	-55,00	50,25

Tabela 1: Resumo das informações técnicas das sondagens utilizadas no trabalho.

MDD-015	411.986,00	9.572.612,00	207,00	110,0	-55,00	51,20
MDD-016	411.929,00	9.572.566,00	207,00	110,0	-55,00	77,80
MDD-020	411.850,77	9.572.491,01	202,24	110,0	-70,00	69,25
MDD-029	411.947,18	9.572.499,14	218,34	110,0	-70,00	69,55
MDD-031	411.979,25	9.572.620,26	239,49	200,0	-55,00	91,75
MDD-032	411.889,00	9.572.693,00	208,00	110,0	-70,00	61,50

### 2.3 Descrições Macroscópicas

As descrições foram realizadas buscando caracterizar e quantificar as litologias presentes nos testemunhos, mediante observação das estruturas, texturas, mineralogia, graus de alteração e disposição dos contatos, com o intuito de entender os diferentes grupos de rocha e suas relações com a mineralização.

Os resultados dessa fase compuseram tabelas no *Software Microsoft EXCEL* 2016, servindo de base para a construção do modelo geológico da área. Também foram construídos perfis litológicos para os diferentes furos de sondagem, utilizando os *Softwares Leapfrog Geo 6.0.4* e *Adobe Illustrator CS5*. Nessa fase foram escolhidas amostras representativas para a laminação e posterior estudo petrográfico.

## 2.4 Petrografia

No total foram confeccionadas 17 lâminas petrográficas, 7 delas no Laboratório de Laminação da Universidade Federal do Ceará (Lamin) e 10 na Oficina de Laminação do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará. Os aspectos mineralógicos e texturais foram descritos com o auxílio do microscópio petrográfico Olympus BX41, do Laboratório de Microscopia e Lupas do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Foram realizadas contagens modais nas lâminas analisadas, o método utilizado foi o de contagem de pontos, totalizando 300 pontos por lâmina.

### 2.5 Geoquímica

Os dados litoquímicos foram analisados por metragem, independentemente da litologia, as amostras foram utilizadas de forma numérica, levando em conta principalmente os teores de fósforo e urânio, identificando e dividindo as zonas mineralizadas dos furos de sondagem estudados.

As análises químicas foram realizadas pela empresa *SGS-Geosol Laboratórios Ltda*, que utilizou os pacotes ICP95A/IMS95A, que constitui na análise de 48 elementos por fusão com metaborato de lítio. Os elementos maiores foram medidos por espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado (ICP-AES), enquanto os elementos traços e ETR (Elementos Terras Raras) foram analisados por espectrometria de massa com fonte de plasma (ICP-MS). A determinação de óxidos totais foi realizada por cálculo estequiométrico, a partir da determinação elementar + elementos traços + ETR. Os elementos e limites de detecção analisados podem ser visualizados nos anexos.

A química mineral foi realizada no CLGeo/UFS, com análises em Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS), da marca *Oxford Instruments*, modelo *X-Act*, acoplado a um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), de marca *Tescan*, modelo *Vega 3*. Os dados obtidos pelo EDS, são tratados pelo software *AztecEnergy 4.0* (2018), com rotina *Quant* e correção adotada *ZAF*. As condições da análise foram, tensão de 20 kV e corrente

de 17 nA, o diâmetro do feixe foi de 0,4  $\mu$ m, com tempo médio de contagem de 60 segundos e distância de análise de 15 mm.

#### 2.6 Modelagem Geológica/Geoquímica

A modelagem geológica realizada no *Software Leapfrog Geo 6.0.4*, confecciona modelos utilizando interpolação dos contatos entre uma rocha e sua encaixante. Os dados para a interpolação são provenientes das descrições dos testemunhos, tornando possível montar uma delimitação parcial das bordas dos corpos individualmente. Após todas as litologias terem seus limites definidos, de acordo com estratigrafia e controles estruturais, ocorre a interpolação das superfícies, que gera um sólido para cada litologia, a união de todos os sólidos forma um bloco diagrama em 3D. A partir desse modelo foram confeccionadas seções geológicas.

A modelagem geoquímica também foi confeccionada no *Software Leapfrog Geo* 6.0.4, utilizando como dados de entrada os valores litoquímicos de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Assim, quatro superfícies diferentes foram geradas, agrupando as rochas em diferentes grupos de acordo com os teores de fósforo: Limite 1 (<4,00 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); Limite 2 (4,00-7,00 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); Limite 3 (7,00-10,00 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); Limite 4 (>10,00% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Posteriormente ocorre a interpolação, gerando um sólido para cada grupo, que unidos formam um bloco diagrama em 3D da área estudada

A licença do programa é vinculada a empresa *Seequent Limited*, disposta na categoria Acadêmica (Token: 9a07eed4-650c-4304-a2c0-644215eec161).

#### **3 GEOLOGIA REGIONAL**

O Alvo Mandacarú está localizado no Domínio Ceará Central, na Subprovíncia Norte da Província Borborema. Essa província consiste em uma unidade geotectônica localizada no nordeste do Brasil, limitada a norte, oeste e leste por bacias sedimentares fanerozoicas, e a sul, pelo Cráton São Francisco. A província é formada por cinturões de rochas supracrustais, vulcanossedimentares e graníticas de idades Greenvilianas (Orogenia Cariris Velho) e Brasiliano/Pan-Africanas, além de rochas do embasamento Arqueano a Paleoproterozoico (Brito Neves *et al.*, 1995).

A estrutura tectônica da Província Borborema se desenvolveu aproximadamente a 600 Ma, como resultado da convergência e colisão dos crátons Amazônico, São Luís-Oeste África e São Francisco-Congo, durante a Orogenia Brasilina/Pan-Africana, formadora do Gondwana Oeste, (Figura 2A) (Brito Neves & Cordani, 1991; Trompette 1994; Arthaud *et al.*, 2008).

As zonas de cisalhamento Patos e Pernambuco dividem a província supracitada em três subprovíncias: Borborema Norte, Borborema Central e Borborema Sul (Figura 2B). Segundo Arthaud *et al.* (2007) e Medeiros & Jardim de Sá (2009), a Borborema Norte está delimitada a sul, pela Zona de Cisalhamento Patos, podendo ser dividida em cinco domínios: Médio Coreaú, Ceará Central, Orós-Jaguaribe, Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre (Figura 2C). Os mesmos autores afirmam que os domínios são separados, respectivamente, pelas zonas de cisalhamento Sobral-Pedro-II, Senador Pompeu, Porto Alegre e Picuí-João Câmara.

O Domínio Ceará Central, que abriga o Alvo Mandacarú, está dividido em 7 compartimentos: (1) embasamento arqueano de sequência tonalito-trondhjemitogranodiorito (TTG) denominado Complexo Cruzeta (Oliveira & Cavalcante, 1993); (2) Terrenos Acrescionários Paleoproterozoicos, que englobam o Complexo Canindé (Torres *et al.*, 2008), Unidade São José de Macaoca e Algodões, Ortognaisses Cipó e Sítios dos Bois, além da Suíte Madalena (Cavalcante *et al.*, 2003); (3) sequência metassedimentar de alto grau de margem passiva, com idade neoproterozoica, denominada Complexo Ceará, onde estão inseridas as unidades Independência, Canindé e Quixeramobim (Castro, 2005; Arthaud, 2007); (4) arco magmático neoproterozoico Tamboril-Santa Quitéria (Fetter *et al.*, 2003); (5) Granitoides Anorogênicos datados do neoproterozoico/cambriano/ordoviciano (Castro *et al.*, 2012); (6) Bacias Molássicas paleozoicas associadas a zona de cisalhamento (Teixeira *et al.*, 2005); e (7) magmatismo cretáceo representado principalmente, pelo Enxame de Diques Rio Ceará Mirim (Hollanda *et al.*, 2006).

O Complexo Ceará é formado por rochas pelíticas e semi-pelíticas metamorfizadas, com algumas contribuições de quartzitos, mármores, rochas calcissilicáticas, além de raros corpos metavulcânicos básicos e ácidos (Cavalcante *et al.*, 2003). A idade de deposição desses sedimentos permanece em discussão. Análises de U-Pb em zircões detríticos de metatexitos da Unidade Canindé indicam idades de deposição máxima entre 728 e 692 Ma (Naleto, 2013). Também foi datado um metariolito da Unidade Independência, que apresentou idade de 772  $\pm$  31 Ma, sendo interpretado com magmatismo associado a desbaste e extensão da crosta, que desencadeou a abertura de uma bacia oceânica, fechada durante a colisão Brasiliana (Fetter, 1999).

O Complexo Tamboril-Santa Quitéria é uma associação de rochas gnáissicas, graníticas e migmatíticas (Campos *et al.*, 1979; Braga *et al.*, 1981; Fetter, 1999), que registra uma história de magmatismo convergente e anatexia crustal, entre 880 Ma e 600 Ma, podendo ser dividido em diferentes estágios. O estágio inicial compreende um magmatismo de arco essencialmente juvenil, iniciado em aproximadamente 880-800 Ma continuando até 650 Ma; o segundo estágio é caracterizado por um arco maduro de idade entre ~660 Ma até 630 Ma, que produziu rochas magmáticas híbridas (manto-crosta); o terceiro estágio compreende a anatexia crustal, que iniciou entre 625-618 Ma, continuando até ~600 Ma; o fim da orogenia é datado em 532 Ma (Fetter *et al.*, 2003; Araújo *et al.*, 2014). Araújo *et al.* (2014) afirmam que a idade do metamorfismo de ultra alta pressão/alta pressão (UHP/HP) marca o momento da colisão continental, portanto, a anatexia das rochas do arco magmático aconteceu em um cenário colisional do tipo continente-continente, entre 625 Ma e 618 Ma. O mesmo autor propõe que a migmatização continuou até aproximadamente 600 Ma, sendo em parte síncrona com a exumação de rochas a níveis crustais mais rasos.

Os granitoides anorogênicos estão inseridos na Suíte Taperuaba, e são representados pelos granitos São Paulo e Serra do Pagé, além do Complexo de Anéis Quintas (Castro *et al.*, 2012). O mesmo autor afirma que o complexo citado é um estoque de natureza semicircular, onde diques quartzo-monzodioríticos, granodioríticos e graníticos se destacam, com idade de 470 Ma obtida pelo método U-Pb, interpretada como de cristalização do granito.

O enxame de diques Rio Ceará Mirim exibe composição básica de natureza toleítica, estando orientado predominantemente na direção Leste-Oeste. Esse enxame de diques foi rastreado com auxílio de interpretação geofísica, que identificou que os diques estão presentes em boa parte da Borborema Norte (CPRM, 2009). Segundo Hollanda *et al.* (2006), os diques Rio Ceará Mirim são resultado de um *hotspot* de escala global, aliado a atividades tectônicas, que ocorreram durante a abertura do Oceano Atlântico Sul e Equatorial.



**Figura 2:** A- Principais blocos cratônicos e cinturões móveis do Gondwana Oeste (retirado de Araújo *et al.*, 2014). B- Divisão da Província Borborema em três subprovíncias: Norte, Central e Sul. (LT-Lineamento Transbrasiliano), (retirado de Araújo *et al.*, 1994). C- Divisão tectônica da Subprovíncia Norte da Província Borborema (Domínios: DNC-Noroeste do Ceará ou Médio Coreaú; DCC- Ceará Central; DOJ-Orós Jaguaribe; DPS- Rio Piranhas Seridó; DJC- São José do Campestre. Zonas de Cisalhamento: ZCP-Patos; ZCPJC-Picuí-João Câmara; ZCPA–Porta Alegre; ZCFB-Farias Brito; ZCA-Aiuaba; ZCJ-Jaguaribe; ZCSP-Senador Pompeu; ZCSI-Sabonete-Inharé; ZCO-Orós; ZCT-Tauá; ZCSPII-Sobral-Pedro-II. FRG-Falha Groaíras. CTSQ-Complexo Tamboril Santa Quitéria. G-Granitóides Brasilianos. Bacias Molássicas: a-Bacia Jaíbaras. b-Bacia Cococi. Maciços Arqueanos: 1-São José do Campestre; 2-Complexo Granjeiro; 3-Complexo Cruzeta (retirado de Naleto, 2013).

### **4 GEOLOGIA LOCAL**

O Alvo Mandacarú foi estudado pela *Empresa Nucleobrás*, na década de 1980, que mapeou a área numa escala de 1:2.500, englobando num mapeamento regional de

1:25.000 (Figura 3). A área demonstrou ser um alvo economicamente em potencial, por aliar anomalias de urânio a mineralização de fosfato, equivalente a outros alvos nas proximidades, como a Jazida Itataia.

O alvo, quando visualizado em escala regional, está inserido dentro da Unidade Metatexito, pertencente ao Complexo Tamboril Santa-Quitéria, como sugerido por Abram *et al.* (2011). Entretanto, numa escala de trabalho mais detalhada, é explícito pelas características litológicas encontradas, que o Alvo Mandacarú é pertencente a Unidade Independência, do Complexo Ceará. Essa diferença é explicada pela ocorrência de gigantescos blocos rochosos da Unidade Independência, inseridos dentro do Complexo Tamboril Santa-Quitéria, quanto mais próximo do contato entre essas unidades, maior é a interação de blocos de uma unidade adentrando a outra (Araújo *et al.*, 2014), dificultando a possibilidade de limitar de forma contundente, o limite entre os diferentes grupos rochosos, talvez devido à proximidade com uma zona de cisalhamento (Figura 3).



**Figura 3:** A) Mapa simplificado da porção sul da Folha Irauçuba (ca: Lente de Mármores; q: lentes de quartzito e muscovita quartzito; af: lentes de anfibolito; qx: quartzitos e xistos; cs: rochas calcissilicáticas) (Naleto., 2018). B) Mapa geológico do Alvo Mandacarú (compilado de Leal *et al.*, 1984), com a localização dos furos de sondagens estudados no presente trabalho. A'-B' mostram a extensão da seção "A", C'-D' mostram a extensão da seção "B", E'-F' mostram a extensão da seção "C". *Datum*- SAD 69, Zona 24 Sul.

A área do Alvo Mandacarú é constituída pelos migmatitos (anatexitos, diatexitos e metatexitos) do embasamento, sendo sobrepostos por gnaisses de natureza sedimentar (paragnaisses), por vezes migmatizados, intercalados da base para o topo, por lentes de anfibolitos, rochas calcissilicáticas, mármores, quartzitos, além de um depósito de quartzo leitoso, que sobrepõe todos os grupos de rochas (Leal *et al.*, 1984). O mesmo autor afirma que o pacote rochoso sofreu intensa atividade cataclástica, que favoreceu o desenvolvimento de retrometamorfismo, metassomatismo sódico e episienitização. Esses processos podem possuir íntima relação com a mineralização, além de formar cataclasitos, albititos e episienitos. A sequência supracitada ainda sofreu a injeção de veios pegmatíticos e veios de quartzo, concordantes com a foliação regional. Os falhamentos normais que possivelmente são relacionados à fase de distensão do final do Ciclo Brasiliano, gerou brechas com fragmentos de diversos tipos litológicos, por vezes mineralizadas, e posteriormente, todo o pacote rochoso foi sobreposto por um depósito de quartzo leitoso de idade quaternária, que estão associados a solos de alteração, com origem gnáissica e quartizítica (Leal *et al.*, 1984).

No que diz respeito a estrutural, evidenciou-se quatro fases deformacionais (D1-D4). A primeira (D1) é representada por dobras isoclinais recumbentes, que afetou apenas os migmatitos do embasamento; a segunda (D2) afetou os migmatitos, transpondo sua foliação anterior, e também a sequência gnáissica, originando um sistema de dobramentos recumbente e coplanar com D1; A terceira fase (D3) é coaxial com D2, sendo responsável pela ondulação da sequência, gerando dobras abertas de plano axial sub-vertical; a quarta e última fase (D4), possui compressão N20°-30°L, é responsável pelo recurvamento de toda a sequência (Leal *et al.*, 1984).

A tectônica rúptil está provavelmente associada a última fase deformacional, visto que as fraturas de alívio e tensão se encontram preenchidas por quartzo, sendo mais comuns que os falhamentos transcorrentes (Leal *et al.*, 1984). O mesmo autor afirma que as falhas e fraturas foram reativadas como falhas de gravidade (normais), durante a tectônica do final do Brasiliano, além de outras que foram provavelmente posteriores ao Brasiliano, visto que não possuem correlação com nenhuma das quatro fases deformacionais anteriormente citadas.

## **5 RESULTADOS**

### **5.1 PETROGRAFIA**

Com o intuito de contribuir com o avanço do conhecimento sobre as rochas encaixantes e a mineralização fósforo-uranífera do Alvo Mandacaru, foi efetuada a descrição das rochas de 12 testemunhos de sondagens, totalizando 744,48 m de rochas descritas. Essa descrição gerou dados para a confecção do perfil litológico de cada furo, além de seções e o modelamento geológico, permitindo assim, a compreensão do comportamento das litologias encontradas na região de estudo.

Os materiais descritos foram divididos em 6 grupos litológicos (COL-Colofanito; HDT-Hidrotermalito; BRH-Brechas Hidrotermais; QTZ-Quartzitos; CC-Mármores Impuros; GNS- Paragnaisses) e 1 grupo de cobertura (COB-Solo, Saprólito e Fragmentos de Rocha), de acordo com as suas características estruturais e mineralógicas, como pode ser visto no perfil litológico de cada testemunho, mostrado na Figura 4. Algumas características relacionadas às disposições dos corpos podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2: Características dos 7 grupos encontradas nas descrições das rochas dos testemunhos.
---

Grupo	Σ (metros)	Percentual (%)	Profundidade Máxima (m)	Profundidade Mínima (m)	Espessura Máxima (m)	Contato
COB	104,08	14,08	30,30	0,00	21,00	COL, BRH, QTZ, CC, GNS.

COL	27,75	3,72	26,62	10,5	9,20	COB, HDT, BRH, QTZ, CC, GNS.
HDT	35,01	4,70	63,60	16,27	11,60	COL, BRH, QTZ, CC, GNS.
BRH	107,28	14,41	86,50	14,40	15,00	COB, COL, HDT, QTZ, CC, GNS.
QTZ	160,72	21,59	68,00	1,25	19,20	COB, COL, HDT, BRH, CC, GNS.
CC	102,04	13,71	76,50	17,75	10,15	COB, COL, HDT, BRH, QTZ, GNS.
GNS	206,82	27,78	91,75	0,40	25,10	COB, COL, HDT, BRH, QTZ, CC.



**Figura 4:** Perfis litológicos dos testemunhos de sondagem descritos no trabalho, evidenciando os diferentes grupos de rocha encontrados. Apenas corpos com tamanho igual ou superior a 1 m foram considerados para a confecção do perfil.

Os contatos entre os grupos podem ser de três tipos: contato retilíneo (abrupto), que possui transição de um grupo para o outro de forma instantânea; contato interativo (correlato), que mostra características mineralógicas e estruturais híbridas próximas ao contato, como uma mistura entre as diferentes litologias; e o contato separado por veios (descontínuo), onde os corpos são separados por veios de natureza silicática, carbonática e feldspática, possuindo variadas espessuras. As intercalações de corpos métricos com grupos preferencias são facilmente identificadas, como as constantes intercalações entre os grupos CC e GNS e dos grupos QTZ e BRH.

Com o intuito de melhorar a visualização dos diferentes corpos rochosos existentes, buscando entender a interação entre estes e a disposição das zonas mineralizadas, foram confeccionadas três seções geológicas localizadas dentro da área de estudo. As seções foram confeccionadas no *Software Leapfrog Geo 6.0*, a partir do modelamento construído. A seção "A" tem sentido noroeste-sudeste, interceptando os furos de sondagem Mdd-032, 001, 008, 007 e 002 (Figura 5A). A seção "B" possui sentido nordeste-sudoeste, interceptando os furos de sondagem Mdd-015, 014, 016 e 020



(Figura 5B). Por fim, a seção "C" possui sentido sul/sudoeste-nordeste, interceptando os furos de sondagem Mdd-009, 029, 014 e 031 (Figura 5C).

**Figura 5:** Seções geológicas localizadas dentro da área de estudo. A- Seção noroeste-sudeste. B- Seção nordeste-sudoeste. C- Seção sul/sudoeste-nordeste. As litologias presentes nas seções são resultado da modelagem geológica construída, além disso estão marcados nas seções os furos de sondagem e suas respectivas zonas mineralizadas, com cor de acordo com teor para  $P_2O_5$ .

Na área de estudo foram identificados sete grandes grupos: (1) paragnaisses; (2) mármores impuros; (3) quartzitos; (4) brechas hidrotermais; (5) hidrotermalitos; (6) colofanitos e (7) cobertura solo e saprólito com quartzo leitoso.

#### (1) Paragnaisses

O grupo em questão foi dividido em três subgrupos, de acordo com as características estruturais e mineralógicas: (1) paragnaisse mineralizado (Figura 6A), (2) (granada) biotita paragnaisse (Figura 6B até 6F) e (3) biotita paragnaisse migmatítico (Figura 6G).

As rochas do subgrupo denominado paragnaisse mineralizado (Figura 6A) possuem cor cinza rosado a cinza avermelhado, com bandamento regular e contínuo, evidenciado por bandas avermelhadas, formadas por colofano, óxido de ferro, quartzo e de bandas cinzas, formadas tremolita 6H). feldspato. além por (Figura Microscopicamente (lâmina F7-26) exibe textura nematoblástica (tremolita), com óxido de ferro e colofano dispostos segundo a direção de foliação e cortando a foliação (Figura 6I), além de possuir muscovita, apatita e granada como minerais acessórios.

As rochas do subgrupo (granada) biotita paragnaisse possuem cor variando em tons de cinza azulado, cinza esverdeado e bege rosado, com listras pretas. O teor de biotita e riebeckita é variável. O bandamento presente é irregular descontínuo, sendo marcado por bandas félsicas formadas dominantemente por feldspato e quartzo, além de bandas máficas formadas por biotita, clorita e riebeckita (Figura 6J). A biotita e a riebeckita não coexistem nas bandas máficas, quando a banda máfica possui biotita, a riebeckita não ocorre na banda, mas sim associada ao quartzo e feldspato, na ausência de biotita na rocha, as bandas máficas são formadas por riebeckita, que possui origem associada ao hidrotermalismo de tremolita e hornblenda. Ocasionalmente, as partes félsicas do bandamento contém crescimento capilar epitaxial de riebeckita (Figura 6K). Microscopicamente, apresenta textura lepidoblástica (biotita) (Figura 6L). nematoblástica (riebeckita), poiquiloblástica (feldspato envolvendo guartzo e biotita; quartzo envolvendo plagioclásio, e carbonato envolvendo feldspato e quartzo) (Figura 6M), granoblástica lobulada (quartzo exibindo migração de limite de grão) (Figura 6N) e mirmequítica (quartzo mirmequítico inserido em plagioclásio). Em lâmina é evidenciada a presença de granada nas lâminas F9-47,80, F32,23,40 e F9-43,25 (Figura 6O) e ocasionalmente foi identificado veio de fluorita na lâmina F9-47,80 (Figura 6P).

As rochas do subgrupo biotita paragnaisse migmatítico possuem cor preta e branca, com bandamento regular contínuo, exibindo bandas máficas formadas por biotita vermelha (alta temperatura), por vezes alterando para clorita e bandas félsicas de quartzo e feldspato (microclina e plagioclásio principalmente). Microscopicamente exibe textura lepidoblástica (biotita), poiquiloblástica (feldspato englobando quartzo e biotita), e mimerquítica (quartzo no feldspato) (Figura 6Q). A biotita vermelha forma lamelas (Figura 6R), por vezes alterada para clorita. O quartzo por vezes ocorre na forma de subgrão e apresenta feição de migração de limite de borda. Os feldspatos se mostram sericitisados e saussoritizado devido ao hidrotermalismo, ocorrendo como plagioclásio e microclina pertítica (macla complexa) (Figura 6S).

Os paragnaisses exibem condições de processo hidrotermal e metassomatismo sódico, caracterizados pela cloritização da biotita (Figura 6L), seritização e saussoritização dos feldspatos (Figura 6K), riebeckitização dos anfibólios (Figura 6J) e presença de microclina pertítica de geminação complexa (Figura 6S).

A contagem modal dessas rochas pode ser observada na Tabela 3. As rochas em questão foram denominadas tremolita paragnaisse (F7-26), granada-biotita paragnaisse (F9-47,80), paragnaisse (F8-24), biotita paragnaisse (F8-64,80), biotita paragnaisse (F9-43,25), biotita paraganisse (F29-21,10) e biotita gnaisse migmatítico (F32-23,40).

MINERAL	F7-26	F9-47,80	F8-24	F8-64,8	F9-43,25	F29-21,1	F32-23,4
FELDSPATO	15 %	29 %	68 %	40 %	25 %	47 %	57 %
QUARTZO	13%	24 %	23 %	11 %	21 %	19 %	15 %
BIOTITA	-	31 %	<1 %	7 %	21 %	5 %	22 %
RIEBECKITA	-	4 %	7 %	-	17 %	27 %	-
TREMOLITA	15 %	1 %	-	-	-	-	<1 %
GRANADA	-	5 %	-	-	1 %	-	<1 %
CLORITA	-	3 %	-	35 %	12 %	<1%	4 %
ZIRCÃO	-	<1 %	<1 %	-	-	-	<1 %
MUSCOVITA	13 %	<1 %	-	-	2 %	-	<1 %
FLUORITA	-	<1 %	-	-	-	-	-
COLOFANO	42 %	-	<1 %	-	1 %	-	-
OPACOS	2 %	-	1 %	5 %	<1%	-	-
CARBONATO	-	-	-	_	-	1 %	-
MICROCLINA	-	_	-	_	_	-	4 %

**Tabela 3:** Tabela de contagem modal das rochas pertencentes ao grupo paragnaisses. Foram feitos 300 pontos de contagem em cada lâmina.



**Figura 6:** Imagens macroscópicas e microscópicas das amostras estudadas (retângulo amarelo) pertencentes ao Grupo Paragnaisses. A) Amostra do subgrupo gnaisse mineralizado. B até F) Amostras do subgrupo (granada) biotita paragnaisse. G) Amostra do subgrupo paragnaisse migmatítico. H) Matriz formada por óxido de ferro e colofano, com presença de granada (tremolita paragnaisse, amostra F7-26). I) Actinolita e veios de óxido de ferro e colofano orientados (tremolita paragnaisse, amostra F7-26). J) Bandamento marcado por quartzo/feldspato e riebeckita (biotita paragnaisse, amostra F29-21,10). K) Bandas de feldspato e banda de quartzo com riebeckita associada (biotita paragnaisse, amostra F8-24). L) Biotita alterando para clorita (biotita paragnaisse, amostra F9-43,25). M) Feldspato envolvendo cristal de quartzo e biotita (biotita paragnaisse, amostra F29-21,10). O) Granada fraturada (biotita paragnaisse, amostra F9-43,25). P) Veio de fluorita cortando biotita (granada-biotita paragnaisse, amostra F9-47,80). Q) Textura mimerquítica em plagioclásio (biotita paragnaisse migmatítico, amostra F32-23,40). R)

lepidoblástica de biotita de alta temperatura (biotita paragnaisse migmatítico, amostra F32-23,40). S) Microclina pertítica (biotita paragnaisse migmatítico, amostra F32-23,40). (Abreviaturas: Whitney & Evans, 2010).

#### (2) Mármores Impuros

O grupo se encontra como lentes nos paragnaisses, e, conforme o sistema de classificação da Subcomissão de Sistematização de Rochas Metamórficas SSRM (Fettes & Desmons, 2007), são classificados como mármores impuros, pois possuem conteúdo de carbonato (calcita) igual ou superior a 50% (Tabela 4).

Os mármores impuros possuem cores variando entre branco e cinza esverdeado, com orientação dos minerais máficos (flogopita e tremolita), formando assim, uma foliação irregular e descontínua (Figura 7A e 7B), e também foliação regular contínua (Figura 7C). Microscopicamente exibem textura granoblástica (calcita) (Figura 7D e 7E), lepidoblástica (flogopita e muscovita) (Figura 7F) e nematoblástica (tremolita) (Figura 7G e 7H). Essas rochas são principalmente formadas por calcita, tremolita (vezes altera para riebeckita, como mostra a Figura 7I), flogopita e colofano (Figura 7J), possuindo também, conteúdos de quartzo, feldspato, apatita (Figura 7K) e clorita. As variações dos conteúdos modais estão dispostas na Tabela 4. As rochas amostradas nesse grupo são denominadas de flogopita-tremolita mármore impuro (F8-22,45) e tremolita mármore impuro (F16-28,3 e F7-47).



**Figura 7:** Imagens macroscópicas e microscópicas dos mármores impuros A) Flogopita-tremolita mármore impuro (amostra-F8-22,45); B) Tremolita mármore impuro (amostra F16-28,30); C) Tremolita mármore impuro (F7-47); D) Carbonato exibindo textura granoblástica, com riebeckita inserida e em contato com feldspato (tremolita mármore impuro, amostra F16-28,30); E) Textura granoblástica nos cristais de carbonato (calcita) (tremolita mármore impuro, amostra F7-47); F) Flogopita e tremolita orientadas em uma matriz carbonática (flogopita-tremolita mármore impuro, amostra F7-47); G) Textura nematoblástica marcada pela tremolita (tremolita mármore impuro, amostra F7-47); H) Tremolita orientada imersa em cristais de carbonato (tremolita mármore impuro, amostra F7-47); I) Tremolita alterando para riebeckita nas bordas, imersos em matriz carbonática (tremolita mármore impuro, amostra F7-47); J) Colofano associado a carbonato (tremolita mármore impuro, amostra F16-28,30); K) Feldspato saussoritizado e

impregnado por colofano, além de cristais de quartzo e apatita (tremolita mármore, amostra F16-28,30). (Abreviaturas: Whitney & Evans, 2010).

MINERAL	F8-22,45	F16-28,30	F7-47
FELDSPATO	-	32 %	16 %
QUARTZO	-	9 %	3%
FLOGOPITA	13 %	-	-
RIEBECKITA	-	2 %	1 %
TERMOLITA	15 %	6 %	21 %
PIROXÊNIO	4 %	-	-
OPACOS	-	1 %	1 %
CARBONATO	68 %	50 %	57 %

Tabela 4: Conteúdo mineral das amostras do grupo mármores impuros.

#### (3) Quartzitos

Os quartzitos são bastante presentes na região, possuindo cor branca (Figura 11A) e cor cinza claro (Figura 11B). Essas rochas exibem cristais de albita imersos, formando bolsões e compondo veios e vênulas. Também são encontrados cristais de quartzo euédricos, inseridos em vacúolos. Essas rochas possuem textura *vuggy*, evidenciadas por vesículas e amígdalas preenchidas por quartzo de segunda geração. Veios e vênulas carbonáticas são comuns, enquanto a presença de colofano é bastante rara.

#### (4) Brecha Hidrotermal

As brechas hidrotermais estão presentes em grande quantidade na área estudada e possuem tamanhos de fragmentos e cores de matriz variadas, ocorrendo na cor verde (Figura 8A), azul (Figura 8B), rosa (Figura 8C) e preto (Figura 8D).

Essas brechas possuem características semelhantes, como isenção de estrutura ou orientação mineralógica, granulometria fina a média, com fragmentos de rochas e cristais inequigranulares imersos em matriz criptocristalina. A assembleia mineralógica é formada por quartzo (formando subgrão e com feição de deslocamento de limite de borda) (Figura 8E), feldspatos que se encontram bastante alterados por sericitização e saussoritização (Figura 8F), muitas vezes impregnados com colofano e óxidos de ferro e com neoformação de albita na borda dos cristais (Figura 8G). Riebeckita azul e marrom presente (Figura 8E), além de colofano (Figura 8H) e minerais opacos (Figura 8I). A matriz é formada por riebeckita e clorita associadas (Figura 8J e 8K), possivelmente formadas por processos hidrotermais a partir de biotita e tremolita, são encontrados também cristais de tremolita, óxido de ferro, apatita, biotita, muscovita e zircão. As variações dos conteúdos modais estão dispostas na Tabela 5.

Existem brechas hidrotermais que apresentam fragmentos litológicos grandes, chegando a 15 cm, sendo comum, a presença de veios carbonáticos, feldspáticos e de quartzo, além de veios mineralizados e cimentação com colofano (Figura 8L).

MINERAL / LÂMINA	F31-69,30	F31-72,80	F9-38,75	F31-74,30
FELDSPATO	66 %	35 %	37 %	23 %
QUARTZO	13 %	7 %	25 %	19 %
BIOTITA	-	-	<1 %	-
RIEBECKITA	-	-	1 %	8 %
ANFIBÓLIO	-	-	<1 %	<1 %
ÓXIDO FERRO	-	4 %	-	1 %
PIROXÊNIO	-	-	-	<1 %

Tabela 5: Conteúdo mineral das amostras do grupo brecha hidrotermal. (RBK- Riebeckita; CHL- Clorita)

MUSCOVITA	2 %	-	-	-
SERICITA	2 %	1 %	6 %	-
COLOFANO	3 %	1 %	-	4 %
OPACOS	4 %	52 %	1 %	<1 %
MATRIZ (RBK + CHL)	-	-	20 %	30 %
MATRIZ (RBK)	6 %	-	9 %	13 %



**Figura 8:** Mosaico com imagens macroscópicas e microscópicas de amostras das rochas do grupo Brecha Hidrotermal. A) Brecha Hidrotermal (amostra F9-38,75); B) Brecha Hidrotermal (amostra F31-74,30); C) Brecha Hidrotermal (amostra F31-69,30); D) Brecha Hidrotermal (amostra F31-72,80); E) Riebeckita associada a quartzo (amostra F9-38,75); F) Quartzo formando subgrão, feldspato saussuritizado e a matriz de clorita e riebeckita (amostra F9-38,75); G) Feldspato impregnado com colofano e óxido de ferro, com neoformação de albita na borda (amostra F31-69,30); H) Presença de colofano, mineral opaco e feldspato sericitizado (amostra F31-72,80); J) Massa esverdeada de clorita e riebeckita, a cristais de quartzo (amostra F31-72,80); J) Massa esverdeada de clorita e riebeckita, além de feldspato saussoritizado com neoformação de albita na borda (amostra F9-38,75); K) Massa esverdeada de riebeckita criptocristalina (amostra F31-74,30); L) Amostra macroscópica de brecha (amostra F8-33,50). (Abreviaturas: Whitney & Evans, 2010).

#### (5) Hidrotermalitos

Os hidrotermalitos são formados por veios hidrotermais e rochas fortemente transformadas por processos de alteração hidrotermal, localizadas em contato com os veios (Figura 9A, 9B, 9C e 9D). Os veios em sua maioria são silicáticos, minoritariamente uma mistura carbonato-silicática, com cor variando de branco a cinza-esverdeado. As

bordas dos veios estão comumente sericitizadas. Nas regiões adjacentes aos veios hidrotermais, é comum encontrar bolsões e veios formados por colofano (Figura 9E, 9F, 9G e 9H) e feldspato, deixando as rochas com cor avermelhada e sem nenhuma estrutura visível, por vezes ocorre colofano preenchendo espaços entre outros minerais nessas rochas (Figura 9I). Ao se afastar dos veios hidrotermais, as rochas exibem, cada vez mais estruturas bandadas, além de diminuir o conteúdo de minerais avermelhados (associado a mineralização), que se mostram disseminados e como *stockworks*. Alguns hidrotermalitos se mostram enriquecidos em minerais opacos e com ausência de colofano (Figura 9J e 9K).

Como os hidrotermalitos são rochas formadas por veios e interações com veios hidrotermais, a contagem modal pode não representar a mineralogia da rocha em si, visto que a mineralogia muda de acordo com uma proximidade ou não de um veio principal. Assim, foi escolhida apenas uma amostra (F2-50,50) para contagem modal, devido à mesma ter um comportamento homogêneo, além de se mostrar importante para o entendimento da mineralização, devido a sua anomalia junto ao elemento urânio, sem ligação com o fósforo. Foi realizada uma contagem modal de 300 pontos na amostra F2-50,50, que se mostrou constituída por: 54% de quartzo, 24% de albita; 21% minerais opacos; <1% Zircão; <1% Muscovita; <1% Óxido de Ferro.



**Figura 9:** A até D imagens macroscópicas das amostras, retângulo amarelo mostra local exato da laminação. E até K fotomicrografias; E- Colofano radial botrioidal inserido no carbonato a nicóis descruzados (amostra F-15-39,80); F- Colofano radial botrioidal inserido no carbonato a nicóis cruzados (amostra F15-39,80); G- Massa de colofano (amostra F1-19); H- Veio de colofano (amostra F15-39,80); I- Colofano localizado entre cristais de carbonato e feldspato impregnado por óxido de ferro (amostra F16-39,30); J- Mineral opaco inserido em matriz quartzo/feldspato (amostra F2-50,50); K- Mineral opaco inserido em matriz quartzo/feldspato (amostra F2-50,50); K- Mineral opaco inserido em matriz de quartzo (amostra F2-50,50); (Abreviaturas: Whitney & Evans, 2010).

#### (6) Colofanitos

Os colofanitos se apresentam maciços a levemente estratificados (Figura 10A, 10B e 10C), com granulometria fina, cor variando entre rosa, roxo e vermelho,

dependendo da cor do seu principal mineral formador, que é a apatita amorfa (colofano). Essas rochas possuem cavidades preenchidas por quartzo, calcita e feldspato alcalino. Essas rochas são formadas principalmente por colofano, albita, quartzo, piroxênio e anfibólio (

Tabela 6). A petrografia evidenciou que o colofano muitas vezes está disposto impregnando outros cristais, principalmente quartzo e feldspato (Figura 10D), formando uma matriz que engloba outros cristais (Figura 10E, 10F, 10G), muitas vezes vizinho a veios de quartzo (Figura 10H e 10I), e formando aglomerados (Figura 10J).



**Figura 10:** A até C imagens macroscópicas das amostras, retângulo amarelo mostra local exato da laminação. D até J fotomicrografias; D- Colofano impregnado em outros minerais (amostra F14-21); E-Colofano formando matriz ao redor de cristais de piroxênio e anfibólio (amostra F02-18); F- Colofano impregnando minerais próximo a cristal de quartzo a nicóis descruzados; G- mesma imagem da "F", porém a nicóis cruzados (amostra F02-18); H- Colofano vizinho a um veio de quartzo a nicóis descruzados (amostra F7-15,50); I- Colofano vizinho a um veio de quartzo a nicóis cruzados (amostra F7-15,50); J- Aglomerado de colofano impregnando minerais (amostra F7-15,50). (Abreviaturas: Whitney & Evans, 2010).

Mineral	F2-18	F17,50	F14-21
Feldspato (Albita)	14%	22%	21%
Quartzo	3%	17%	34%
Biotita	-	-	5%
Riebeckita	1%	1%	1%
Anfibólio	16%	19%	9%
Muscovita	-	1%	<1%
Piroxênio	26%	2%	14%

 Tabela 6: Tabela de contagem modal dos colofanitos (rochas mineralizadas).

Colofano	40%	37%	14%
Óxidos de Ferro	-	-	1%

#### (7) Cobertura

O grupo cobertura representa a camada mais superficial encontrada na região, podendo ser dividida em amostras de solo, saprolito, rocha fragmentada e depósito quartzo leitoso. As amostras de solo possuem granulometria variando da porção silte/argila até a porção cascalho, com cor marrom escuro, marrom avermelhado, bege e cinza. A presença de matéria orgânica é oscilante, vezes bastante, vezes ausente.

Os saprolitos representam boa parte da cobertura e se mostram totalmente alterados, com cor variando entre amarelado, bege, marrom e cinza. Quando sofrem ação mecânica, as rochas muitas vezes esfarelam, se partindo na direção preferencial horizontal.

Os blocos desagregados de quartzo leitoso estão imersos na cobertura superficial e possuem dimensões métricas, estando associados a região de alteração dos paragnaisses e quartzitos (Figura 11C). É evidente o processo de episienitização, conferindo uma textura *vuggy*, que se encontra na maioria das vezes vazia, mas também, com preenchimento, principalmente de quartzo de segunda geração.



**Figura 11:** Montagem mostrando imagens macroscópica de amostra coletadas. A) Quartzito de coloração clara; B) Quartzito de coloração cinza; C) Fragmento de Quartzo Leitoso.

## 5.2 MODELAGEM GEOLÓGICA

Considerando os dados petrográficos e litoquímicos, um modelamento geológico da região foi elaborado, com o objetivo de quantificar a área e o volume ocupados por cada tipo litológico encontrado, identificando assim o volume que cada litologia abrange dentro do modelo e consequentemente, descobrindo o volume dos possíveis corpos totalmente mineralizados em fósforo e urânio na região (Tabela 7 e Figura 12).

GRUPO	ÁREA m <sup>2</sup>	VOLUME m <sup>3</sup>	CORPOS
СОВ	120950 (12,6%)	465120 (9,14%)	1
COL	20848 (2,17%)	102000 (2,00%)	1
HDT	34914 (3,64%)	56280 (1,10%)	1
BRH	131070 (13,64%)	421590 (8,28%)	1
QTZ	183430 (19,10%)	1031600 (20,26%)	12
CC	146380 (15,24%)	699290 (13,74%)	7

Tabela 7: Tabela mostrando a área, volume e divisão de corpos dos diferentes litotipos.

GNS	322960 (33,62%)	2315000 (45,47%)	11
TOTAL	960552 (100,00%)	5090880 (100,00%)	34



Figura 12: Imagens de diferentes orientações do modelo geológico da região de estudo, com ênfase nos corpos de colofanito.

## 5.3 GEOQUÍMICA

Os teores máximos de  $P_2O_5$  e U dos testemunhos estudados são 18,86%, e 8966,68 ppm, respectivamente, mostrando uma importante ocorrência dessas *commodities*. Observa-se uma correlação positiva entre esses dois elementos, porém ocorre uma ampla variação nos teores de urânio, com baixos teores em rochas mineralizadas para fósforo, e ao contrário com rochas muito enriquecidas em urânio, com teores baixos para fósforo, evidenciando que a correlação nem sempre é positiva.

No intuito de entender melhor o padrão da mineralização, interseções mineralizadas foram criadas, considerando o teor de  $P_2O_5$  e de U das rochas (Tabela 8). Para serem consideradas mineralizadas para fósforo, as rochas necessitam possuir mais que 4%  $P_2O_5$ , que é o teor de corte utilizado em várias minas de fosfato no Brasil e para o urânio é necessário possuir mais que 1.000 ppm.

Ao todo foram identificadas 35 zonas mineralizadas, que variam sua espessura de 60 cm até 18 m, com valores máximos para  $P_2O_5$  e U de 15,11% e 8380,39 ppm e mínimos de 0,41 % e 195,49 ppm, respectivamente (Tabela 8). As zonas que se destacaram foram as zona 1 e 4 do furo MDD-002 (z1: espessura total 11,43 m e 10,08 % de  $P_2O_5$ ; z4: espessura total 8,78 m e 2.096,82 ppm de U ), zona 2 do furo MDD-007 (z2: espessura total 12,80 m e 10,85 % de  $P_2O_5$ ), zona 1 do furo MDD-015 (z1: espessura total 17,70 m e 8,73 % de  $P_2O_5$ ) e zona 1 e 4 do furo MDD-031 (z1: espessura total 6,24 m, 12,31 % de  $P_2O_5$  e 847,07 ppm U; z4: espessura total 3,66 m e 8380,39 ppm U).

**Tabela 8:** Resultados de  $P_2O_5$  (%) e U (ppm) dos intervalos mineralizados dos furos estudados. Os teores de  $P_2O_5$  estão destacados pelas cores: amarelo (<4%); marrom (4-7%); vermelho (7-10%) e púrpura (>10%). Os terrores de U estão destacados pelas cores amarelo (<200ppm); marrom (200-1000ppm); vermelho (1000-4000ppm) e púrpura (>4000ppm). (ESP- Espessura; ESP. T.- Espessura Total; T.Z.M.-Teor da zona mineralizada).

ID FURO	ZONA	INÍCIO	FIM	ESP.	ESP. T.	$P_2O_5(\%)$	T.Z.M. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	U (ppm)	T.Z.M. U (ppm)
	1	18,30	19,69	1,39	2.01	8,94	10.12	189,11	297.96
	1	19,69	21,31	1,62	3,01	11,14	10,12	558,40	387,80
MDD 001									
WIDD-001		29,30	31,30	2,00		5,34		216,68	
	2	31,30	33,30	2,00	6,00	5,43	4,95	277,20	250,41
		33,30	35,30	2,00		4,09		257,35	
		9,85	11,85	2,00		5,99		238,84	
		11,85	13,51	1,66		4,24		123,27	
	1	13,51	15,51	2,00	11 43	10,53	10.08	315,53	359.24
	1	15,51	17,51	2,00	11,15	10,44	10,00	428,07	557,21
		17,51	19,51	2,00		13,42		429,54	
		19,51	21,28	1,77		15,52		608,80	
					r			-	r.
	2	23,75	25,75	2,00	3.90	7,89	12.72	332,94	544.45
MDD-002	-	25,75	27,65	1,90	5,70	17,81	12,72	767,10	011,10
						Ì			
	3	30,36	32,36	2,00	2,00	10,65	10,65	674,93	674,93
		47,82	49,82	2,00		4,10		1149,16	
		49,82	51,82	2,00		1,69	0.50	3553,54	200.002
	4	51,82	53,82	2,00	8,78	2,35	3,53	2119,57	2096,82
		53,82	55,20	1,38		4,81		1627,16	
		55,20	56,60	1,40		5,74		1800,07	
		0.00	1.50	1.50		10.00		226.02	
	1	0,00	1,50	1,50	3,20	10,88	15,12	326,83	464,28
		1,50	3,20	1,70		18,80		282,26	
	1	7.20	0.20	2.00		4.05		116 70	
		7,20	9,20	2,00		4,05		110,78	
		9,20	10,50	1,30		15 44	10,85	574.14	
MDD-007		10,50	14.50	2,00	12.90	10.77		262.72	269 12
		12,30	14,50	2,00	12,60	10,77		<u> </u>	508,42
		14,50	18.50	2,00		13.00		437,10	
		18 50	20.00	1.50		13.09		382.17	
		10,50	20,00	1,50		15,20		502,17	
	2	23 50	25 50	2.00	2.00	9.60	9.60	320.06	320.06
	2	25,50	25,50	2,00	2,00	7,00	9,00	320,00	520,00
		0.00	2.00	2.00		6.63		172 11	
	1	2.00	4 00	2,00	4,00	12.98	9,81	318.52	245,32
		2,00	4,00	2,00		12,70		510,52	
	2	17.00	19.00	2.00	2.00	10.45	10.45	438.27	438 27
	4	17,00	17,00	2,00	2,00	-10,45	10,+5	450,21	430,27
MDD-008	3	24.45	26.45	2.00	2.00	5.21	5.21	259.32	259.32
	5	21,15	20,15	2,00	2,00	3,21	3,21	209,02	20,02
	4	32.30	34.30	2.00	2,00	7.53	7,53	478.40	478.40
		,00	2.,00	_,00	_,00		.,00		
		38.30	40.30	2.00		7.38		760.98	
1	5	40.20	42.20	2.00	4,00	7.53	7,46	880.44	820,71

		-			-				
	6	58,30	60,30	2,00	2,00	2,14	2,14	1253,72	1253,72
								1 1	
	7	62,37	64,63	2,26	2,26	4,42	4,42	771,95	771,95
	1	0.26	1.20	1.04	1.04	11.14	11.14	105 40	105 40
	1	0,20	1,50	1,04	1,04	11,14	11,14	195,49	195,49
	2	17.65	18.70	1.05	1.05	10.72	10.72	461.94	461.94
		-,,	20,10	-,	-,				
		20,60	21,45	0,85		14,33		471,84	
MDD-014	3	21,45	22,30	0,85	3,90	15,13	9,26	628,05	374,92
		22,30	24,50	2,20		5,03		239,67	
				0.54	0.11	C		1	
	4	25,96	26,60	0,64	0,64	5,60	5,60	241,76	241,76
	5	29.84	30.55	0.71	0.71	11.42	11 /2	727.00	727.00
	5	27,04	50,55	0,71	0,71	11,72	11,72	727,00	727,00
		13,10	14,20	1,10		5,87		360,73	
		14,20	15,30	1,10		7,72		309,64	
		15,30	16,35	1,05		11,04		411,95	
		16,35	17,05	0,70		15,93		547,39	
		17,05	18,60	1,55		4,16		300,02	
		18,60	20,15	1,55		6,39		257,07	
MDD-015	1	20,15	21,28	1,13	17,70	17.20	8,73	590,03	392,42
		22.15	22,13	1.10		7 49		324.87	
		23.25	23,25	1,10		13.70		621.02	
		24,85	26,45	1,60		8.11		373,98	
		26,45	28,05	1,60		8,27		380,97	
		28,05	29,55	1,50		7,68		392,05	
		29,55	30,80	1,25		7,34		282,18	
		-	1		1				
		25,39	26,63	1,24		5,76	10,05	692,48	
		26,63	27,67	1,04	5,42	17,26		860,87	702.04
	1	27,07	20,71	1,04		4,40		1622.70	725,24
		29,75	30.81	1,04		5.67		250.88	
		27,70	00,01	1,00	l	5,67		200,00	
	2	31,76	33,00	1,24	1,24	6,10	6,10	517,18	517,18
		38,00	39,90	1,90		6,99	9,37	498,64	
MDD-016	3	39,90	41,80	1,90	5,70	13,05		413,63	439,86
		41,80	43,70	1,90		8,08		407,32	
		44.94	46.18	1.24		5.68	7,00	622.33	
	4	46.18	46,18	0.79	2,03	9.06		600 10	613,68
		10,10	10,57	0,77		7,00		000,10	
		48,23	49,24	1,01		7,46	7,55	500,43	
	5	49,24	50,79	1,55	4,63	7,84		367,68	510,35
		50,79	52,86	2,07		7,37		622,01	
			<b></b>	ج م و					0.000
	6	53,93	55,86	1,93	1,93	9,43	9,43	896,74	896,74
	1	6.17	8.08	1 01	1 01	6.54	6.54	355 50	355.50
MDD-029	1	0,17	0,00	1,71	1,71	- 0,34	0,34	- 333,39	
	2	11,90	13,81	1,91	1,91	9,49	9,49	312,47	312,47
			· · ·						
	-	17,10	19,17	2,07		11,39		1267,86	
	1	19,17	21,24	2,07	6,24	9,78	12,31	532,92	847,07
		21,24	23,34	2,10		15,72		741,95	
		00.17	20.07	1.00		<b>C</b> 11		055 50	
	2	28,15	31.04	1,90	3,79	5,11	6,05	211,12	322,09
MDD-031		50,05	51,94	1,89	1	0,99		- 300,70	
100-051	3	35.70	37.24	1.54	1.54	8.20	8.20	493.81	493.81
	v			-,	-,				
	Λ	70,30	72,13	1,83	24	0,57	0.42	8966,08	8280.20
	4	72,13	73,96	1,83	3,00	0,26	0,42	7794,70	8380,39
		L -			r				
	5	79,58	81,49	1,91	1,91	5,18	5,18	759,25	759,25

As zonas mineralizadas para fósforo possuem características semelhantes, localizadas sempre nos corpos ou muito próximo aos corpos de colofanito e hidrotermalitos, possuindo correlação com veios de quartzo e/ou veios carbonáticos (Figura 5). Ocorrem também zonas mineralizadas nos mármores impuros, principalmente quando próximas de hidrotermalitos. As zonas mineralizadas para urânio, quando não acompanhadas de mineralização de fósforo, se localizam sempre em corpos de brecha hidrotermal, próximas a veios hidrotermais. A petrografia sugere que ocorre um mineral opaco rico em urânio, que não possui correlação direta com a mineralização de fósforo, visto que as respostas químicas apontam para altíssima anomalia de U e baixo valor para  $P_2O_5$  em algumas amostras.

A química mineral evidenciou que o colofano, mineral minério das rochas estudadas, quimicamente trata-se de flúor-apatita, entretanto de natureza amorfa. O conteúdo de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> varia de 36,46 a 42,18 %, com uma média de 40,88 %. O conteúdo de CaO varia de 50,56 a 56,69 %, com uma média de 54,79 % e o conteúdo de F varia de 1,23 a 2,22 %, com média de 1,82 %. Todas as amostras possuem conteúdo de Cl abaixo de 0,2 %. O colofano está disposto em tamanho pequeno, próximo a criptocristalino, porém quando em grande quantidade, forma aglomerados que podem ser facilmente identificados ao microscópio. As Figura 13A e 13B mostram a disposição desses minerais nas rochas, evidenciando que os mesmos não obedecem a nenhuma orientação, nem possuem estrutura definida.

A análise de química mineral também mostrou a ocorrência de um mineral que possui composição química, quase que totalmente formada por urânio e sílica, com pequenas contribuições de tório e cálcio. Esse mineral se mostra abundante e o conteúdo de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nas rochas onde o mesmo está inserido é baixo, evidenciando que existe uma mineralização para urânio independente da mineralização de fósforo, além da mineralização onde as *commodities* se correlacionam. O conteúdo de UO<sub>3</sub> desse mineral varia de 55,12 a 77,47 %, com uma média de 67,88 %, o conteúdo de SiO<sub>2</sub> varia de 13,90 a 26,49 %, com média de 21,46 %, o conteúdo de ThO<sub>2</sub> varia de 0,00 a 4,75 %, com média de 2,51 % e o conteúdo de CaO varia de 1,24 a 4,82 %, com média de 2,43 %. O mineral está disposto em tamanho muito pequeno, criptocristalino, impossibilitando a visualização de qualquer estrutura (Figura 13C e 13D). Acredita-se que o mineral relatado pode ser coffinita, contudo, sugere-se que seja feito um trabalho utilizando microssonda eletrônica ou difração de raio-X, para que o mineral possa ser classificado com maior precisão.



**Figura 13:** A)- imagem eletrônica (MEV) na amostra F7-15,50, evidenciando disposição do mineral minério colofano inserido em uma matriz feldspática (albita); B) imagem eletrônica de mesma posição da imagem "A", com resposta exclusiva para fósforo, quanto maior a reflectância maior a quantidade do elemento na amostra; C)- imagem eletrônica (MEV) na amostra F2-50,50, evidenciando alto conteúdo de mineral muito pequeno rico em urânio e sílica, acredita ser coffinita; D)- imagem eletrônica de mesma posição da imagem "D", com resposta exclusiva para fósforo, quanto maior a reflectância maior a quantidade do elemento na amostra.

### 5.4 PERSPECTIVA DO MINÉRIO

A mineralização fósforo-uranífera do Alvo Mandacarú está condicionada a presença de zonas de falhas e fraturas, que serviram de conduto para fluidos hidrotermais percolarem por entre os corpos rochosos existentes (Leal *et al.*, 1984). As rochas adjacentes as mineralizações evidenciam processos hidrotermais (evidenciado pela cloritização da biotita e da granada), metassomatismo sódico (evidenciado pela albitização total dos feldspatos; pertitização da microclima; riebeckitização dos anfibólios tremolita e hornblenda) e episienitização (evidenciado por vacúolos formados pela lixiviação do quartzo, preenchidos por colofano, carbonato ou quartzo de segunda geração).

O colofano é o mineral minério presente na mineralização estudada, esse mineral forma corpos centimétricos a métricos de colofanito, encaixados geralmente próximo a superfície. Entretanto, a maioria das ocorrências está disseminada nas rochas encaixantes (Figura 10D, 10E, 10F) impregnando paragnaisses e mármores, preenchendo vacúolos nos quartzitos, cimentando fraturas e brechas hidrotermais, além de ocorrer como veios e *stockworks* próximos ou nos próprios hidrotermalitos (Figura 9A, 9B, 9C e 9D).

O colofano possui cor variando em rosa, marrom, dourado e vermelho, com tamanho muito pequeno, tendendo a criptocristalino. Ao microscópio observa-se uma massa geralmente de cor escura (marrom a cinza) em forma de agregados microcristalinos, de baixa birrefringência, com textura botrioidal (Figura 9E e 9F), textura lamelo-radial (Figura 9G), ocorrendo também como veios, entre cristais de diferentes minerais (Figura 9H) e como uma película que recobre outros minerais.

Considerando a química de rocha, os colofanitos são os corpos litológicos de maior expressão de fósforo e urânio, apresentando conteúdo de  $P_2O_5$  superior a 10% e U superior a 300 ppm. Os hidrotermalitos também apresentam conteúdos de fósforo e urânio interessantes, chegando a possuir valores semelhantes aos colofanitos, porém hidrotermalitos estéreis são comuns, não podendo ser considerados como uma litologia totalmente mineralizada, apesar de possuir importância econômica.

Uma modelagem geoquímica do teor de  $P_2O_5$  foi realizada, buscando quantificar a área ocupada por mineralizações de fósforo e urânio, visando identificar as condições econômicas do Alvo Mandacarú (Figura 14). Nessa modelagem, os corpos foram divididos em quatro grupos, de acordo com os padrões litoquímicos. O primeiro grupo compreende as rochas que apresentam teor inferior a 4% de  $P_2O_5$ , estando dispostas na cor amarela. O segundo grupo é composto por rochas com teor variando entre 4% e 7% de  $P_2O_5$ , dispostas na cor marrom. O terceiro grupo é composto por rochas que variam o teor de  $P_2O_5$  entre 7% e 10%, dispostas na cor vermelho. O último grupo disposto na cor púrpura é composto por rochas que apresentam teor de  $P_2O_5$  maior que 10%. As rochas que possuem conteúdo de  $P_2O_5$  inferior a 4% são consideradas estéreis, enquanto as rochas que possuem conteúdo superior são consideradas mineralizadas. Esse teor de corte foi escolhido de acordo com os teores de cortes utilizados em várias minas de fosfato no Brasil, entretanto, não existe uma convenção para isso, e a depender da extensão o teor de corte pode variar.



**Figura 14:** Imagem da modelagem geoquímica realizada no Alvo Mandacarú. Todas as imagens possuem a mesma orientação, SE-NW. A- Modelo geoquímico (numérico) completo, com todos os diferentes corpos para diferentes teores; B- corpo representando as rochas com teor de  $P_2O_5$  inferiores a 4%; C- corpos de rochas com teor acima de 10% de  $P_2O_5$ ; D- corpos de rocha com teor de  $P_2O_5$  entre 7 e 10%; E- corpos com teor de  $P_2O_5$  entre 4 e 7%; F- Imagem em planta com transparência aplicada ao corpo de estéril (teor de  $P_2O_5$  inferior a 4%).

Na modelagem geoquímica foram conhecidas as áreas e volumes ocupados pelos diferentes grupos numéricos, de acordo com os respectivos teores de  $P_2O_5$ , além de conhecer o número de corpos de cada grupo (Tabela 9). Fica claro que as mineralizações se encontram geograficamente concentradas na porção centro-leste da área estudada, assim como posicionadas próximas da superfície, o que é um ponto positivo considerando uma abertura de mina a céu aberto.

**Tabela 9**: Tabela mostrando a área, volume e divisão de corpos em diferentes grupos em relação ao teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

GRUPO	ÁREA m <sup>2</sup>	VOLUME m <sup>3</sup>	N° CORPO
<4,00 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	231.840,00 (67,08 %)	4.449.700,00 (90,88 %)	12
4,00-7,00 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	80.618,00 (23,33 %)	352.470,00 (7,20 %)	23

7,00-10,00 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	28.910,00 (8,36 %)	86.839,00 (1,77 %)	25
>10,00 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.241,90 (1,23 %)	7.186,30 (0,15 %)	15
TOTAL	345.609,90 (100 %)	4.896.195,30 (100 %)	55

## **6 DISCUSSÕES**

Durante o Projeto Fosfato Brasil (Cavalcanti & Bessa 2011) foram mapeadas ocorrências correlacionáveis de mineralização de fósforo e urânio no Domínio Ceará Central, dentre estas Taperuaba, Serrotes Baixos, Mandacarú (objeto de estudo do presente trabalho) e a principal, o Depósito Itataia. No Estado da Paraíba, inseridas no Domínio Rio Grande do Norte, existem ocorrências de mineralizações de urânio, denominadas Pocinhos, Cajá, Pilões, Barra de Santa Rosa e a principal, o Depósito Espinharas (Silveira *et al.*, 1991). Do outro lado do Oceano Atlântico, na porção norte de Camarões, existe um depósito de urânio denominado *Kitong*, associado a corpos de albititos hospedados em granitoides pós-colisionais (Kouske *et al.*, 2012). Todos as ocorrências supracitadas podem ser correlacionáveis, pois possuem relação com processos metassomáticos sódicos, de idades próximas ao final do Ciclo Brasiliano/Pan-Africano, que desencadearam processos de albitização e episienitização. Além disso, as mineralizações possuem íntima correlação com falhas e fraturas de gravidade (normal), vinculados ao processo de rifte responsável pela fragmentação do Pangeia (Cavalcanti *et al.*, 2018).

Vários autores, como Favali & Leal, (1982), Saad *et al.*, (1982), acreditam que as mineralizações U-P do Ceará Central podem ter origem singenética, relacionadas ao contexto geológico composto por rochas pelíticas, semipelíticas e carbonáticas, depositadas em águas rasas e/ou plataforma marinha restrita. Os autores acreditam que o fosfato seria proveniente do reservatório oceânico, ligado a correntes marinhas de ressurgência, que depositavam material rico em fosfato e urânio em depressões na plataforma marinha rasa, dando assim início a formação dos depósitos.

Outra hipótese para a mineralização é o metassomatismo relacionado à fluidos convectivos associados a granitos pós-orogênicos férteis, responsáveis pela albitização e episienitização generalizada das rochas (Angeiras *et al.*, 1978; Angeiras *et al.*, 1981; Angeiras, 1988). Existem várias mineralizações de urânio associadas a metassomatismo sódico ao redor do mundo, como *Kirovograd*, no distrito de *Krivoi Rog*, na Ucrânia, Lagoa Real, no Brasil e *Beaverlodge* no Canadá (Wilde, 2013). Esses depósitos relacionados a metassomatismo sódico podem ter relação com processos metamórficos ou circulação hidrotermal, que ocorre após a colocação de corpos magmáticos (Lobato *et al.*, 1983; Turpin *et al.*, 1988), não possuindo preferência por tipos específicos de composição química ou mineralógica para rochas hospedeiras (Wilde, 2013).

Segundo Santos & Anacleto (1985), as principais reações que ocorrem durante o metassomatismo sódico são a dissolução do quartzo (Figura 11C), alteração da biotita para clorita (Figura 6L), liberando Fe que vai formar outros minerais, como óxido de ferro (Figura 6H e 6I), substituição dos feldspatos potássicos por albita (Figura 8G). Essas reações são comumente encontradas nas rochas do Alvo Mandacarú e também nas rochas do Depósito Itataia (Veríssimo *et al.*, 2016).

Veríssimo *et al.* (2016) afirmam que o metassomatismo sódico está associado a formação de anfibólios alcalinos, pela transformação de actinolita, acompanhada por formação de fluorapatita, minerais opacos e fluorita. Processos semelhantes ocorrem no Alvo Mandacarú, formando riebeckita (Figura 7I) associada a minerais opacos e fluorita (Figura 6P).

Em depósitos de urânio relacionados ao metassomatismo sódico e veios hidrotermais, temperaturas variando de 350 a 550 °C são estimadas para a circulação de grandes volumes de fluidos associados com alteração sódica e lixiviação de sílica (Skirrow *et al.*, 2009; Cuney, 2010). A síntese experimental de albita hidrotérmica conduzida por Martin (1969) sugere que a presença de fluidos peralcalinos (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) é essencial para que a albita neoformada seja gerada. Logo, a alcalinidade dos fluidos explica a lixiviação do quartzo, a formação e estabilidade da albita e da riebeckita.

Segundo Veríssimo et al. (2016), o Depósito Itataia possui processo de dividido em três fases. mineralização multifásico, Α primeira é fase hidrotérmica/metassomática de alta temperatura, caracterizada por circulação de grandes volumes de fluidos, associadas a alteração sódica, episienitização, albitização e hematitização. A segunda fase é hidrotermal, de baixa temperatura, desencadeada por fluidos hidrotermais e meteóricos, que percolam falhas e fraturas extensionais, sendo associada a fraturas e processos cársticos. A terceira está relacionada ao enriquecimento supergênico, vinculado a remobilização por fluídos meteóricos e do lençol freático. O autor ainda afirma que a principal área de mineralização coincide com a zona de encontro entre dobras isoclinais e uma extensa falha regional de direção leste-oeste.

Cavalcanti *et al.* (2018) corroboram com a ideia de mineralização multifásica de Veríssimo *et al.* (2016), com uma ressalva, estes autores afirmam que a fonte primária para a mineralização é singenética, associada a rochas pelíticas, semi-pelíticas e carbonáticas, como afirmaram anteriormente Favali & Leal, (1982) e Saad *et al.*, (1982), evoluindo assim, o modelo metalogenético para quatro fases.

Os dados do presente trabalho apontam que o modelo metalogenético proposto por Cavalcanti *et al.* (2018) para o depósito Itataia, pode ser compatível com a evolução da mineralização no Alvo Mandacarú. Wilde, 2013 afirma que existem vários depósitos de urânio vinculados a metassomatismo sódico, consequentemente vinculados a albitização, entretanto os únicos que apresentam anomalias para fósforo são os da Província Fósforo-Uranífera do Centro Norte do Ceará, com isso, uma fonte primária de fósforo é necessária. Além disso, ambas as mineralizações apresentam as mesmas características de processo metassomático sódico, relacionado a percolação de fluidos hidrotérmicos de origem magmática, associado a corpos graníticos que desencadeiam episienitização, albitização e hematitização, presença de falhas de gravidade controlando a mineralização, além de estarem inseridas no mesmo contexto geológico, porém, o Alvo Mandacarú apresenta maior contato com rochas migmatíticas relacionadas ao Complexo Tamboril Santa Quitéria.

Provavelmente, o que torna o Depósito Itataia mais interessante economicamente, com maiores teores de  $P_2O_5$  e U, é uma maior proximidade com corpos magmáticos, como granitos pós-orogênicos e os diques Rio Ceará Mirim, além de um

controle estrutural, onde dobras isoclinais aumentaram a espessura do corpo de mármore, que foi cortado por uma extensa falha de gravidade de natureza regional. Essa falha serviu de conduto facilitando a percolação de fluidos mineralizados nos mármores, formando os principais corpos de colofanito. No Alvo Mandacarú, as rochas que possuem as melhores condições para serem hospedeiras de uma mineralização vinculada a fluidos hidrotérmicos (de origem carbonática), se apresentam como corpos descontínuos e de pequenas espessuras, acarretando assim, menores condições de percolação de fluidos e consequentemente, menor conteúdo de fósforo e urânio.

## 7 CONCLUSÕES

Na região central do Alvo Mandacarú foram identificados paragnaisses, mármores impuros, brechas hidrotermais, quartzitos, hidrotermalitos e colofanitos. A maioria dos corpos dos diferentes grupos se apresentam intercalados em profundidade, com contatos variando em retilíneo (abrupto), interativo (híbrido) e descontínuo (separado por veios carbonáticos e silicáticos).

As rochas estudadas exibem condições de processo hidrotermal e metassomatismo sódico, caracterizados pela cloritização da biotita, albitização, seritização e saussoritização dos feldspatos, episienitização do quartzo e riebeckitização dos anfibólios. Os paragnaisses possuem assembleia mineralógica representada por feldspatos + quartzo + biotita  $\pm$  granada. Os mármores impuros possuem assembleia mineralógica representados por carbonato + feldspato + tremolita  $\pm$  quartzo  $\pm$  flogopita  $\pm$  anfibólio  $\pm$  muscovita. As brechas hidrotermais encontradas na região são bastante heterogêneas, formadas principalmente, por feldspato, quartzo, riebeckita e clorita, possuindo colofano inserido na matriz, junto com minerais opacos e óxidos de ferro. Os quartzitos possuem cristais de albita imersos.

Foram identificadas 35 zonas mineralizadas, com espessura variando entre 60 cm e 18 m, com valores de  $P_2O_5$  e U chegando a 15,11 % e 8.380,39 ppm, respectivamente. Algumas zonas se destacam mais que outras por possuírem espessura superior a 10 m, teor de  $P_2O_5$  superior ou próximo a 10 % e teor de U superior ou próximo a 1.000 ppm.

A química mineral evidenciou que o colofano, mineral minério das rochas estudadas, quimicamente trata-se de flúor-apatita de natureza amorfa. Com conteúdo de  $P_2O_5$ , CaO e F variando de 36,46 a 42,18 %, 50,56 a 56,69 %, 1,23 a 2,22 %, respectivamente. Foi identificado um mineral de sílica e urânio que variam de 13,90 a 26,49 % e 55,12 a 77,47 %, respectivamente. Provavelmente trata-se do mineral coffinita, entretanto é necessária utilização de outra técnica mais adequada para a identificação deste mineral.

A modelagem geoquímica mostrou que a área estudada possui 67,08 % de material considerado estéril e 32,92 % de material mineralizado em diferentes teores. No que diz respeito ao volume, 90,88 % são compostos por rochas estéreis, enquanto 9,12 % são compostos por rochas mineralizadas. A mineralizações se encontram geograficamente concentradas na parte centro-leste da área estudada, além de estarem dispostas próximas das superfícies.

O Alvo Mandacarú possui semelhanças importantes com o Depósito Itataia, pois estão inseridos em um contexto geológico similar, além de uma proximidade geográfica. A mineralização fósforo-uranífera em ambos está vinculada ao metassomatismo sódico, associado a fluidos hidrotérmicos, episienitização, albitização e hematitização, controlados por falhas. Os conteúdos maiores de  $P_2O_5$  e U em Itataia podem ser explicados por melhores condições estruturais para a concentração do minério, além de uma possível baixa efetividade de algumas das fases mineralizantes no Alvo Mandacarú.

Novos trabalhos utilizando métodos de estudo de química mineral, inclusões fluidas e geoquímica isotópica nas rochas do Alvo Mandacarú podem fornecer novas informações, que expliquem melhor as diferenças com o Depósito Itataia, e consequentemente, a diferença dos conteúdos mineralizados entre os depósitos.

# **8 REFERÊNCIAS**

Abram, M. B., Bahiense, I. C., Porto, C. G., & Brito, R. S. (2011). *Projeto Fosfato Brasilparte I.* CPRM.

Angeiras, A. G., Neto, A. M., & Campos, M. (1978). Mineralização fósforouranífera associada à episienitos sódicos no Pré-cambriano. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 30, No. 3, pp. 159-179).

Angeiras, A. G. (1988). Geology and metallogeny of the northeastern Brazil uraniumphosphorus province emphasizing the Itataia deposit. *Ore Geology Reviews*, *3*(1-3), 211-225.

Angeiras, A. G., Netto, A. M., & Campos, M. D. (1981). Phosphoro-uraniferous mineralization associated with sodium episyenites in the Ceará Precambrian (Brazil). In *Uranium deposits in Latin America: Geology and exploration*.

Araujo, C. E. G., Cordani, U. G., Weinberg, R. F., Basei, M. A., Armstrong, R., & Sato, K. (2014). Tracing Neoproterozoic subduction in the Borborema Province (NE-Brazil): Clues from U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotopes on granitoids and migmatites. Lithos, 202, 167-189.

Arthaud, M. H., Caby, R., Fuck, R. A., Dantas, E. L., & Parente, C. V. (2008). Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1), 49-67.

Arthaud, M. H. (2007). Evolução neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasiliana.

Braga, A. D. P. G., Passos, C. A. B., Souza, E. M., França, J. B., Medeiros, M. F., & Andrade, V. A. (1981). Geologia da região nordeste do Estado do Ceará–Projeto Fortaleza. *Série Geológica*, *12*.

Brito Neves, B. B. D., Van Schmus, W. R., Dos Santos, E. J., Campos Neto, M. D. C., & Kozuch, M. (1995). O evento Cariris Velho na Província Borborema: integração de dados, implicações e perspectivas. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(4), 279-296.

Brito Neves, B. B. D., CORDANI, U.G. (1991) Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic. Precambrian Research, v. 53, n. 1-2, p. 23-40.

Campos, M. D. (1979). Projeto Rio Jaguaribe: relatório final de geologia (Vol. 4). Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral.

Castro, G. L., Parente, C. V., Veríssimo, C. U. V., Sial, A. N., Garcia, M. D. G. M., Santos, R. V., Melo, R. C. D., & Santos, A. A. (2005). Isótopos de carbono e oxigênio dos mármores associados com o depósito fósforo uranífero de Itataia, Ceará. *Brazilian Journal of Geology*, *35*(2), 199-208.

Castro, N. A., de Araujo, C. E. G., Basei, M. A., Osako, L. S., Nutman, A. A., & Liu, D. (2012). Ordovician A-type granitoid magmatism on the Ceará Central Domain, Borborema Province, NE-Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 36, 18-31.

Cavalcante, J. C., Vasconcelos, A. M., Medeiros, M. D. F., & Paiva, I. G. (2003). Mapa geológico do Estado do Ceará.

Cavalcanti, J.A.D., Bessa, M.D.M.R.. A pesquisa de Fosfato na área do Ceará Central. In: Abram, M.B., Bahiense, I.C., Porto, C.G., Brito, R.S.C. (Eds.), Projeto Fosfato do Brasil e Parte I, Capítulo IX. 1ed. Salvador: CPRM, Programa Geologia do Brasil. Informe de Recursos Minerais, Série Insumos Minerais para a Agricultura, 13, pp. 487 e 518, 2011.

Cavalcanti, J. A. D., Bessa, M. D. M., Santos, R. V., Veríssimo, C. U., & Parente, C. V. (2018). A hydrothermal karst-hosted UP deposit related to Pangea break-up: Itataia deposit, Borborema Province, Northeastern Brazil-a review.

CPRM, C. S. G. D. B. (2009). Projeto Aerogeofísico Norte do Ceará.

Cuney, M. (2010). Evolution of uranium fractionation processes through time: driving the secular variation of uranium deposit types. *Economic Geology*, *105*(3), 553-569.

Favali, J. C., & Leal, J. R. L. V. (1982). Contribuição ao estudo das mineralizações fosfática e uranífera da jazida de Itataia, Ceará. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 32, pp. 2022-2034).

Fetter, A. H., dos Santos, T. J. S., Van Schmus, W. R., Hackspacher, P. C., de Brito Neves, B. B., Arthaud, M. H., ... & Wernick, E. (2003). Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of west Gondwana. *Gondwana Research*, *6*(2), 265-273.

Fetter, Allen H. (1999) U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal framework and geologic history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the assembly of Gondwana. Tese de Doutorado. University of Kansas, Geology.

Fettes, D., Desmons, J. (2007) Metamorphic Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of IUGS, Subcomissions of the Systematics of Metamorphic Rocks. 2007.

Hollanda, M. H. B. M., Pimentel, M. M., Oliveira, D. C., & de Sá, E. F. J. (2006). Lithosphere–asthenosphere interaction and the origin of Cretaceous tholeiitic magmatism in Northeastern Brazil: Sr–Nd–Pb isotopic evidence. *Lithos*, *86*(1-2), 34-49.

INB, Industria Nuclear Brasileira. Disponível em: <a href="https://www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Santa-Quiteria/LSMode/detail">https://www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Santa-Quiteria/LSMode/detail</a> Acesso em 11/03/2021.

Kouske, A. P., Suh, C. E., Ghogomu, R. T., & Ngako, V. (2012). Na-metasomatism and Uranium mineralization during a two-stage albitization at Kitongo, Northern Cameroon: structural and geochemical evidence. *International Journal of Geosciences*, *3*(01), 258.

Leal, J. R. L., Azevedo, L. F., Castro, G. L., & Alcântara e Silva, J. R. (1984). Mineralização fósforo-uranífera da Fazenda Mandacarú, Irauçuba, Ceará. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 33, pp. 1437-1451).

Lobato, L. M., Forman, J. M., Fuzikawa, K., Fyfe, W. S., & Kerrich, R. (1983). Uranium in overthrust Archean basement, Bahia, Brazil. *The Canadian Mineralogist*, 21(4), 647-654.

Martin, R. F. (1969). The hydrothermal synthesis of low albite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 23(4), 323-339.

Medeiros, V. C. D., & Jardim de Sá, E. F. (2009). O Grupo Cachoeirinha (Zona Transversal, NE do Brasil) redefinição e proposta de formalização. *Revista de Geologia*, 22(2), 124-136.

Naleto, J. L. C. (2018). *Geologia e recursos minerais da folha Irauçuba SA. 24-YDV: estado do Ceará.* CPRM.

Oliveira, J. F. D., & Cavalcante, J. C. (1993). Mombaça: folha SB. 24-VDV-estado do Ceará.

Oliveira, M. P., Malagolli, G. A., & Cella, D. (2019). Mercado de fertilizantes: dependência de importações do Brasil. *Revista Interface Tecnológica*, *16*(1), 489-498.

ONU, United Nations, (2012) department of economic and social affairs The United Nations, Population Division, Population Estimates and Projections Section.

Saad, S.; Munne, A. L.; Tanaka, A. Y. (1982) Proposição de um novo modelo genético para a Jazida de Itataia. Ceará. DIGEO, PM/82.

Santos, L. C. S., & Anacleto, R. (1985). Jazida de uranio de Espinharas. In *Principais depositos minerais do Brasil* (pp. 143-155).

Silveira, C. P.D., Schorscher, H. D., & Miekeley, N. (1991). The geochemistry of albitization and related uranium mineralization, Espinharas, Paraiba (PB), Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 40(1-3), 329-347.

Skirrow, R. G., Jaireth, S., Huston, D. L., Bastrakov, E. N., Schofield, A., van der Wielen, S. E., & Barnicoat, A. C. (2009). Uranium Mineral Systems. *Processes, exploration criteria and a new deposit framework, Geoscience Australia, 20, 1-57.* 

Souza Filho, O. A. D. (1999). Irauçuba: folha SA. 24-YDV: estado do Ceará.

Teixeira, M. D. A. (2005). Integração de dados aerogeofísicos, geológicos e isotópicos do limite norte do Complexo Tamboril-Santa Quitéria–CE (Província Borborema). *Instituto de Geociên cias, Brasília*, 91.

Torres, P. F. M., Cavalcante, J. C., Forgiarini, L. L., Palheta, E. S. M., & Vasconcelos, A. M. (2008). Nota explicativa da Folha Quixadá, escala 1: 250.000. *Serviço Geológico do Brasil–CPRM, Fortaleza*.

Trompette, R. (1994). Geology of Western Gondwana (2000–500 Ma). *Balkema, Rotterdam, 350.* 

Turpin, L., Maruejol, P., & Cuney, M. (1988). U-Pb, Rb-Sr and Sm-Nd chronology of granitic basement, hydrothermal albitites and uranium mineralization (Lagoa Real, South-Bahia, Brazil). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *98*(2), 139-147.

Veríssimo, C. U. V., Santos, R. V., Parente, C. V., de Oliveira, C. G., Cavalcanti, J. A. D., & Neto, J. D. A. N. (2016). The Itataia phosphate-uranium deposit (Ceará, Brazil) new petrographic, geochemistry and isotope studies. *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 115-144.

Whitney, D. L., & Evans, B. W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1), 185-187.

Wilde, A. (2013). Towards a model for albitite-type uranium. *Minerals*, 3(1), 36-48

CAPÍTULO III – CONCLUSÃO

#### 1 Conclusão

O Alvo Mandacarú está dividido em seis grupos de rochas: paragnaisses, mármores impuros, brechas hidrotermais, quartzitos, hidrotermalitos e colofanitos, todos cobertos por camadas de solo, saprolito e depósitos de quartzo leitoso. A maioria dos corpos dos diferentes grupos se apresentam intercalados em profundidade, com contatos variando em retilíneo (abrupto), interativo (híbrido) e descontínuo (separado por veios carbonáticos e silicáticos).

Ficam bem-marcadas evidências de processo hidrotermal e metassomatismo sódico, caracterizados pela cloritização da biotita, albitização, seritização e saussoritização dos feldspatos, episienitização do quartzo e riebeckitização dos anfibólios. Os paragnaisses possuem assembleia mineralógica representada por feldspatos + quartzo + biotita  $\pm$  granada. Os mármores impuros possuem assembleia mineralógica representados por calcita + feldspatos + actinolita  $\pm$  quartzo  $\pm$  biotita  $\pm$ diopsídio  $\pm$  muscovita. As brechas hidrotermais encontradas na região são bastante heterogêneas, formadas principalmente, por feldspato, quartzo, riebeckita e clorita, com colofano inserido na sua matriz, junto com minerais opacos e óxidos de ferro. Os quartzitos possuem cristais de albita imersos.

Foram identificadas 35 zonas mineralizadas, com espessura variando entre 60cm e 18m, com valores de  $P_2O_5$  e U chegando a 15,11% e 8380,39 ppm respectivamente. Algumas zonas se destacam mais que outras por possuírem espessura superior a 10 metros, teor de  $P_2O_5$  superior ou próximo a 10% e teor de U superior ou próximo a 1000 ppm.

A química mineral evidenciou que o colofano, mineral minério das rochas estudadas, quimicamente trata-se de flúor-apatita de natureza amorfa. Com conteúdo de  $P_2O_5$ , CaO e F variando de 36,46 a 42,18 %, 50,56 a 56,69 %, 1,23 a 2,22 % respectivamente. Foi identificado um mineral de sílica e urânio que variam de 13,90 a 26,49 % e 55,12 a 77,47 %, respectivamente. Provavelmente trata-se de coffinita, entretanto é necessária utilização de outra técnica mais adequada para a identificação do mineral.

A modelagem geoquímica mostrou que a área estudada possui 67,08% de material considerado estéril e 32,92 % de material mineralizado em diferentes teores. No que diz respeito ao volume, 90,88 % são compostos por rochas estéreis, enquanto 9,12% são compostos por rochas mineralizadas. As mineralizações se encontram geograficamente concentradas, além de estarem dispostas próximas das superfícies.

O Alvo Mandacarú possui semelhanças importantes com o Depósito Itataia, pois estão inseridos em um contexto geológico similar, além de uma proximidade geográfica. A mineralização fósforo-uranífera em ambos está vinculada ao metassomatismo sódico, associado a fluidos hidrotérmicos, episienitização, albitização e hematitização, controlados por falhas de gravidade. Os conteúdos maiores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e U em Itataia podem ser explicados por melhores condições estruturais para a concentração do minério, além de uma possível baixa efetividade de algumas das fases mineralizantes no Alvo Mandacarú.

# **ANEXO 1**

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01% - 75%	CaO	0,01% - 60%	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01% - 10%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01% - 75%
K <sub>2</sub> O	0,01% - 25%	MgO	0,01% - 30%	MnO	0,01% - 10%	Na <sub>2</sub> O	0,01% - 30%
$P_2O_5$	0,01% - 25%	SiO	0,01% - 90%	TiO <sub>2</sub>	0,01% - 25%	Ba	10ppm - 10%
Cs	0,05ppm - 0,1%	Rb	0,2ppm - 1%	Sr	10ppm - 10%	Hf	0,05ppm - 0,05%
Nb	0,05ppm - 10%	Та	0,05ppm - 1%	Zr	10ppm - 10%	Th	0,1ppm - 1%
U	0,05ppm - 1%	La	0,1ppm - 1%	Ce	0,1ppm - 1%	Pr	0,05ppm - 0,1%
Nd	0,1ppm - 1%	Sm	0,1ppm - 0,1%	Eu	0,05ppm - 0,1%	Gd	0,05ppm - 0,1%
Tb	0,05ppm - 0,1%	Dy	0,05ppm - 0,1%	Но	0,05ppm - 0,1%	Er	0,05ppm -0,1%
Tm	0,05ppm - 0,1%	Yb	0,1ppm - 0,1%	Lu	0,05ppm - 0,1%	Y	10ppm - 10%
Ag	1ppm - 0,1%	Co	0,5ppm - 1%	Cu	5ppm - 1%	Ga	0,1ppm - 1%
Mo	2ppm - 1%	Ni	5ppm - 1%	Sn	0,3ppm - 0,1%	Tl	0,5ppm - 0,1%
v	5ppm - 1%	W	0,1ppm - 1%	Zn	5ppm - 1%	*P.F.	0,01% - 50%
 DD	1 0						

Tabela: Limites de detecção dos elementos químicos analisados.

\*P.F.- perda ao fogo.

## ANEXO 2

