



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EXPLORAÇÃO PETROLÍFERA E MINERAL

THAÍLA RAVENA SANTANA CARVALHO

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E ANÁLISE DO POTENCIAL CUPRÍFERO  
EM OCORRÊNCIAS NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA**

CAMPINA GRANDE, PB

2023

THAÍLA RAVENA SANTANA CARVALHO

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E ANÁLISE DO POTENCIAL CUPRÍFERO  
EM OCORRÊNCIAS NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Mario Echeverri Misas  
Coorientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

CAMPINA GRANDE, PB

2023

C331c

Carvalho, Thaíla Ravena Santana.

Caracterização geológica e análise do potencial cuprífero em ocorrências na Província Pegmatítica da Borborema / Thaíla Ravena Santana Carvalho – Campina Grande, 2024.

113 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos Mario Echeverri Misas, Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves."

Referências.

1. Cobre. 2. Província Pegmatítica da Borborema. 3. Minerações Cupríferas. 4. Pegmatitos. I. Misas, Carlos Mario Echeverri. II. Neves, Gelmires de Araújo. III. Título.

CDU 669.3(043)

THAÍLA RAVENA SANTANA CARVALHO

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E ANÁLISE DO POTENCIAL CUPRÍFERO  
EM OCORRÊNCIAS NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA**

Aprovada em: 15/12/2023

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Carlos Mario Echeverri Misas  
**Orientador**

---

Prof. Dr. Guilherme dos Santos Teles  
**Examinador Interno**

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino  
**Examinador Externo**

CAMPINA GRANDE, PB

2023



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EXO. PETROLÍFERA E MINERAÇÃO**  
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

### REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO PARA CONCENSSÃO DO GRAU DE MESTRE EM EXPLORAÇÃO PETROLÍFERA E MINERAL, REALIZADA EM 15 DE DEZEMBRO DE 2023.

**CANDIDATA: THAÍLA RAVENA SANTANA CARVALHO**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Mario Echeverri Misas (UAMG/PPGEPM/UFCG).

Coorientador: Dr. Gelmires de Araújo Neves (UAEMa – UFCG)

#### **BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Carlos Mario Echeverri Misas (Presidente – UAMG/PPGEPM/UFCG).

Prof. Dr. Guilherme dos Santos Teles – (Examinador Interno – UAMG/PPGEPM/UFCG).

Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino – (Examinador Externo – CETEM – MCTI – UERJ).

#### **TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E ANÁLISE DO POTENCIAL CUPRÍFERO EM OCORRÊNCIAS NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA**

Em sessão pública, realizada em sala virtual na Plataforma *Google Meet*, às 14:00h, iniciou-se a defesa da dissertação. Após exposição de cerca de 50 minutos, a candidata foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora. Por ter demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua dissertação, a candidata foi considerada **APROVADA**. Face à aprovação, o presidente da Comissão informou que a candidata terá até 30 (trinta) dias para providenciar as alterações solicitadas pela Comissão Examinadora, e que após o cumprimento das referidas exigências, estará legalmente habilitada a receber o Grau de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral, cabendo à Universidade Federal de Campina Grande, como direito, providenciar a expedição do Diploma, ao qual a mesmo faz jus. Nada mais havendo a tratar, na forma regulamentar, o Presidente da Comissão Examinadora lavrou a presente ata, que é assinada por mim, Prof. Dr. Carlos Mario Echeverri Misas, pelos membros da Comissão Examinadora e pela Discente.

Campina Grande, 15 de dezembro de 2023.

**Recomendações:**

DR. CARLOS MARIO ECHEVERRI MISAS

Coordenador, Orientador e Presidente da Comissão Examinadora

DR. GELMIRES DE ARAÚJO NEVES

Coorientador

DR. GUILHERME DOS SANTOS TELES

Examinador Interno

DR. LUIZ CARLOS BERTOLINO

Examinador Externo

THAÍLA RAVENA SANTANA CARVALHO

Candidata

**2 – APROVAÇÃO**

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata **Thaíla Ravena Santana Carvalho**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários certificam que os examinadores acima identificados participaram da defesa da dissertação e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **THAÍLA RAVENA SANTANA CARVALHO, USUÁRIO EXTERNO**, em 15/12/2023, às 18:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUIZ CARLOS BERTOLINO, USUÁRIO EXTERNO**, em 15/12/2023, às 19:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS MARIO ECHEVERRI MISAS, COORDENADOR(A)**, em 15/12/2023, às 20:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **GUILHERME DOS SANTOS TELES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2023, às 20:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4083401** e o código CRC **2B39F953**.

“Seja forte e corajoso. Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor vai estar contigo por onde você andar”. (Js 1,9)

## AGRADECIMENTOS

Todo sucesso profissional e pessoal é fruto do nosso esforço, mas também é obra da nossa fé. Agradeço primeiramente a Deus, que me guiou com sua força e me concedeu tantas bênçãos ao longo desta jornada. A Nossa Senhora dos Humildes, por ser minha intercessora e escutar minhas preces.

Agradeço a toda minha família pelo carinho e apoio, em especial aos meus pais, Teresa Rodrigues e Calixto Temístocles, que com seus ensinamentos sempre me incentivaram na busca pela concretização dos meus sonhos, mesmo que isso me levasse a ficar a alguns quilômetros distantes deles. Ao meu irmão, Cláudio Santana, pela solicitude e orações. Obrigada pela confiança e apoio de todos. Amo vocês!

Sou grata aos amigos que fazem parte da minha trajetória, em especial a Mariana Teixeira e Daniel Silva pelo incentivo e irmandade desde o início desta trajetória. Aos amigos que a vida e a academia me concederam, aqui não caberia citar o nome de todos, mas deixo registrada minha admiração e gratidão pela contribuição de todos vocês.

Aos companheiros de trabalho do Cimatec e da casa Sacramentinas, por me acolherem neste último ano e fazerem parte da minha família, pelas inúmeras risadas e por compartilharem comigo momentos únicos.

Ao Professor Carlos Mario, pela orientação, ensinamentos e paciência, principalmente pela sua grandiosidade como ser humano e profissional. Obrigada pela confiança depositada e incentivo desde a graduação, sem sua contribuição não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Professor Gelmires de Araújo pela coorientação, disponibilidade e auxílio nos trabalhos junto ao LTM-UFCG.

Ao Professor Guilherme Teles pelo apoio nos trabalhos de campo e colaboração que foram fundamentais para engradecerem este trabalho. A Professora Suédina Maria pela contribuição com o MEV e Mestre William Souza pelo auxílio durante as análises do MEV no Certbio.

Ao Professor Bertolino por aceitar o convite de compor a banca examinadora e contribuições dadas ao longo do mestrado.

Ao programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande, a FAPESQ e CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Por fim, sem todos vocês essa caminhada teria se tornado ainda mais árdua, dispenso minha eterna admiração e consideração por vocês.

Muito Obrigada!

## RESUMO

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB) é reconhecida por compreender um complexo arcabouço geológico, abrangendo diversas litologias contendo um conjunto de pegmatitos mineralizados de interesse industrial e gemológico. No entanto, mesmo com o aumento nas atividades exploratórias e de pesquisa, poucas são as informações relativas às ocorrências de mineralizações cupríferas na PPB, visto que, não é comum a presença deste metal em pegmatitos e em suas rochas encaixantes. Dessa forma, este trabalho teve por intuito a realização de estudos geológicos através da caracterização de amostras coletadas na região, bem como a análise, tanto do ponto de vista petrográfico como de caracterização mineral, a fim de mapear, compreender o modo de ocorrência e padrão associado aos minerais portadores deste metal presentes na PPB. O estudo macroscópico e petrográfico identificou a presença majoritária de minerais de cobre de origem secundária, como malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ), azurita ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ), crisocola  $\text{Cu}_{2-x}\text{Al}_x(\text{H}_{2-x}\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  e, ocasionalmente, sulfetos primários como bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) e digenita ( $\text{Cu}_9\text{S}_5$ ), hospedados principalmente nos pegmatitos na forma de pátinas ou como infiltrações, resultantes de possíveis alterações supergênicas, ou ao longo das foliações nas rochas encaixantes da Formação Seridó ou Equador. Algumas dessas ocorrências foram confirmadas por meio da análise das fases minerais por DRX, incluindo minerais formadores de rochas. A análise por FRX evidenciou o teor de cobre alcançando 24,94% de CuO. Por meio do MEV-EDS, foi identificado a presença de sulfetos primários de cobre cortado por vênulas de malaquita, além da predominância de minerais de origem secundária preenchendo fraturas, na forma de cristais anédricos inclusos na matriz dos pegmatitos, ou ainda acompanhando a foliação ou fraturas em xistos e encaixantes aos pegmatitos. Foram gerados mapas magnetométricos e gamaespectrométricos da área investigada que, contando com o auxílio do mapa litológico, evidenciaram variações locais que permitiram delinear o contato entre grandes estruturas e segmentos orientados ao levar em consideração os altos e baixos valores de anomalias presentes. Ao integrar os resultados obtidos neste estudo, foram notadas semelhanças no padrão das mineralizações cupríferas, onde as fases minerais deste metal nos pegmatitos e encaixantes são resultados de processos químicos complexos e controles composicionais que depositaram às ocorrências na forma, principalmente, de minerais secundários. Os resultados obtidos nesta pesquisa são relevantes, visto que poderão ser tomados como base para trabalhos futuros de prospecção mineral relacionadas ao cobre na PPB.

**Palavras-Chave:** Província Pegmatítica da Borborema; Cobre; Pegmatitos.

## ABSTRACT

The Borborema Pegmatite Province (PPB) is recognized for comprising a complex geological framework, encompassing several lithologies containing a set of mineralized pegmatites of industrial and gemological interest. However, even with the increase in exploratory and research activities, there is little information regarding the occurrences of cupriferous mineralization in the PPB, since the presence of this metal in pegmatites and their surrounding rocks is not common. Therefore, this work aimed to carry out geological studies through the characterization of samples collected in the region, as well as analysis, both from a petrographic and mineral characterization point of view, in order to map, understand the mode of occurrence and pattern associated with minerals that carry this metal present in PPB. The macroscopic and petrographic study identified the majority presence of copper minerals of secondary origin, such as malachite ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ), azurite ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ), chrysocolla  $\text{Cu}_{2-x}\text{Al}_x(\text{H}_{2-x}\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  and, occasionally, primary sulfides such as bornite ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) and digenite ( $\text{Cu}_9\text{S}_5$ ), hosted mainly in pegmatites in the form of patinas or as infiltrations, resulting from possible supergene alterations, or along the foliations in the surrounding rocks of the Formation Seridó or Ecuador. Some of these occurrences were confirmed through XRD analysis of mineral phases, including rock-forming minerals. The XRF analysis showed the copper content reaching 24.94% CuO. Using SEM-EDS, the presence of primary copper sulfides cut by malachite venules was identified, in addition to the predominance of minerals of secondary origin filling fractures, in the form of anhedral crystals included in the pegmatite matrix, or even accompanying the foliation or fractures in schists and pegmatites. Magnetometric and gamma spectrometric maps of the investigated area were generated, with the help of the lithological map, highlighting local variations that made it possible to delineate the contact between large structures and oriented segments by taking into account the high and low values of anomalies present. When integrating the results obtained in this study, similarities were noted in the pattern of cupriferous mineralizations, where the mineral phases of this metal in pegmatites and emplacements are the result of complex chemical processes and compositional controls that deposited the occurrences in the form, mainly, of secondary minerals. The results obtained in this research are relevant, as they can be taken as a basis for future mineral prospecting work related to copper in PPB.

**Key-Words:** Pegmatitic Province of Borborema; Copper; Pegmatites.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Mapa de localização da área de estudo (delimitada pelo retângulo vermelho). ....	14
<b>Figura 2</b> - Fluxograma das etapas metodológicas adotadas neste trabalho. ....	15
<b>Figura 3</b> - Mapa indicando a localização dos afloramentos visitados. ....	16
<b>Figura 4</b> - Fluxo do processamento de dados de magnetometria e produtos associados. ....	18
<b>Figura 5</b> - Fluxo de processamento de dados gamaespectrométricos e produtos associados..	19
<b>Figura 6</b> - Fluxograma esquematizando as técnicas de caracterização usadas nesta pesquisa. ....	20
<b>Figura 7</b> - Seção esquemática contendo modelo genético para formação de depósitos porfíricos de Cu em ambientes de zona de subducção. ....	26
<b>Figura 8</b> - Principais origens e arquiteturas hidrotermais para sistemas IOCG. ....	28
<b>Figura 9</b> - Diagrama esquemático de um depósito do tipo SSC. ....	29
<b>Figura 10</b> - Perfil esquemático de um depósito cuprífero de acordo com suas zonas de alteração hidrotermal e mineralogia associada. ....	31
<b>Figura 11</b> - Aplicações do cobre. (a) tubos para climatização. (b) revestimento de nanocobre em maçaneta. ....	34
<b>Figura 12</b> - Histograma de valores médios de susceptibilidade magnética das rochas. a) Dobrin e Savit (1988); b) Oliveira et al. (2019). ....	35
<b>Figura 13</b> - Variação das concentrações de K, U e Th nas rochas ígneas em relação ao aumento do teor de sílica. ....	37
<b>Figura 14</b> - Ilustração da Lei de Bragg. ....	39
<b>Figura 15</b> - Partes de um Microscópio Eletrônico de Varredura. ....	41
<b>Figura 16</b> - Compartimentação tectônica da Província Borborema e delimitação de acordo com seus Domínios. ....	42
<b>Figura 17</b> - Mapa geológico regional, com as principais unidades litoestratigráficas e zonas de cisalhamento Domínio OS. ....	44
<b>Figura 18</b> - Mapa geológico destacando a PPB. ....	46
<b>Figura 19</b> - Estratigrafia do Grupo Seridó. ....	47
<b>Figura 20</b> - Estratigrafia do pré-cambriano do sul do RN e da parte centra da PB. ....	48
<b>Figura 21</b> - Classificação estrutural e mineralógica dos pegmatitos. ....	50
<b>Figura 22</b> - Perfil e vista esquemática mostrando zonas de um pegmatito heterogêneo. ....	51
<b>Figura 23</b> - Localização da Faixa Cuprífera do RN-PB. ....	53
<b>Figura 24</b> - Linha de tempo com trabalhos que citam ocorrência de cobre na PPB. ....	54
<b>Figura 25</b> - Mapa do campo Magnético Anômalo Total (CMA) da área de estudo. ....	56
<b>Figura 26</b> - Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA). ....	57
<b>Figura 27</b> - Mapa de Inclinação do Sinal Analítico (ISA). ....	59
<b>Figura 28</b> - Mapa de concentração do elemento Potássio (K). ....	60
<b>Figura 29</b> - Mapa de concentração do elemento Urânio (eU). ....	61
<b>Figura 30</b> - Mapa de concentração do elemento Tório (eTh). ....	62
<b>Figura 31</b> - Mapa de composição Ternária (RGB). ....	64
<b>Figura 32</b> - Arcabouço geológico da área estudada. ....	66
<b>Figura 33</b> - Micaxisto da Formação Seridó contendo cristais bem formados de granada. ....	68
<b>Figura 34</b> - Zona de falha (345/30°) que afeta o metaconglomerado, o qual em alguns pontos está em contato com o Pegmatito Capoeira (a linha tracejada amarela cerca a zona de contato). ....	69

<b>Figura 35</b> - Corte de estrada mostrando o caráter intrusivo de diques de aplito ao longo dos planos de foliação de micaxistos da Formação Seridó. ....	70
<b>Figura 36</b> - Feições observadas no Pegmatito Salgadinho. a) bolsões de muscovita e biotita intercrescidas em vários tamanhos com ocorrências pontuais de quartzo fumê. b) contato irregular do pegmatito com encaixante de estrutura xistosa (linha amarela tracejada marca a zona de contato). ....	71
<b>Figura 37</b> - Bolsão preenchido por quartzo leitoso (Pegmatito Capoeira). ....	72
<b>Figura 38</b> - Ocorrências de cobre no Pegmatito Capoeira. Cobre secundário na forma de pátinas (a). Cobre secundário associado com ocorrências de Manganês com hábito dendrítico (b). ...	74
<b>Figura 39</b> - Ocorrências de cobre no Pegmatito Mufumbo. Evidência de pátinas de cobre de origem secundária sobre o pegmatito (a). Malaquita associada a pirolusita de hábito dendrítico (a). ....	75
<b>Figura 40</b> - Tipologias das ocorrências de minerais secundários de cobre nos afloramentos. Concordante à foliação em rochas xistosas (a); Entre boudins de veios de quartzo (b); Disseminado próximo a núcleos de quartzo (c); no contato entre o pegmatito e rochas metassedimentares (d). ....	76
<b>Figura 41</b> - Amostra de micaxisto (a), encaixante do Pegmatito Salgadinho. Contato entre xisto e pegmatito contendo minerais secundários de cobre (b) (Pegmatito Mufumbo). ....	77
<b>Figura 42</b> - Aspectos macroscópicos de cobre secundário. Acompanhando a foliação em rochas xistosas (a) (Pegmatito Mufumbo); Disseminado em xistos (b); disseminados em metabásicas e veios de quartzo (c); Como preenchimento de fraturas no pegmatito (d) (Pegmatito Mufumbo). ....	78
<b>Figura 43</b> - Feições macroscópicas de cobre em rochas foliadas. (a) malaquita e azurita em xisto com boudin de quartzo. (b) malaquita em quartzo-biotita-xisto. ....	79
<b>Figura 44</b> - Rocha com estrutura gnáissica contendo malaquita e cristais de digenita. ....	80
<b>Figura 45</b> - Rocha com bandas de actinolita com infiltrações de gipso e pátinas de malaquita (a). Bandamento gnáissico característico com pátinas de malaquita (b). ....	80
<b>Figura 46</b> - Aspectos macroscópicos de mineralizações de cobre secundário (Malaquita e azurita) em pegmatito (a). Impregnações de Malaquita em pegmatito (b). ....	81
<b>Figura 47</b> - Ocorrências de cobre secundário em pegmatitos como infiltrações de malaquita e crisocola em pegmatito (a) constituído de microclínio, muscovita e biotita; Infiltração de cobre secundário em pegmatito (b), a faixa branca é constituída por quartzo, feldspato e biotita; Mineral de cobre secundário infiltrado em pegmatito (c), próximo a zona de contato com mica xisto gnáissico; Infiltração de malaquita em pegmatito granítico (d); Ocorrências de cobre secundário na forma de pátinas (e, f). ....	82
<b>Figura 48</b> - Ocorrências de cobre de origem primária; bornita associada a malaquita, crisocola em rocha pegmatítica (a); Veio de quartzo com ocorrência de digenita com borda esverdeada de minerais secundários de cobre (b, c). ....	83
<b>Figura 49</b> - Ocorrência de malaquita encrustada em muscovita em amostra de pegmatito. ...	84
<b>Figura 50</b> - Características microscópicas das mineralizações de cobre em pegmatitos. a) Fratura de pegmatito preenchida por digenita (Dg) e Malaquita (Mlc). b) Malaquita preenchendo fratura em rocha pegmatítica bordejando e cortando minerais opacos. ....	85
<b>Figura 51</b> - Infiltrações de cobre em pegmatitos. a) Infiltrações de Malaquita (Mlc). b) Fotomicrografia a luz refletida com Crisocola (Ccl) preenchendo borda no pegmatito. ....	85
<b>Figura 52</b> - Fotomicrografias de malaquita em pegmatito. a) Malaquita (Mlc) bordejando cristais aglomerados de Granada (Grt). b) Associação de Malaquita (Mlc) e cristais de Biotita (Bt). ....	86

<b>Figura 53</b> - Malaquita em rochas xistosas. a) Quartzo-biotita-xisto com microinfiltrações de malaquita (Mlc). b) Fotomicrografia com luz refletida de malaquita (Mlc) preenchendo clivagens em cristais de biotita (Bt). .....	87
<b>Figura 54</b> - Cobre em rochas metamórficas de estrutura foliada. a) Malaquita (Mlc) preenchendo espaço entre cristais. b) Malaquita como cristal de substituição em rocha tipo actinolítico.....	87
<b>Figura 55</b> - Paragênese de carbonatos de cobre. a) Fotomicrografia de malaquita (Mlc) e azurita (Az) como preenchimento de fratura regular. b) Rocha metamórfica com ocorrências de cobre secundário.....	88
<b>Figura 56</b> - Ocorrências de cobre em pegmatitos. a) Infiltração de malaquita (Mlc) em veio de quartzo. b) Sulfeto com borda de malaquita (Mlc) e crisocola (Ccl). c) Malaquita (Mlc) e/ou crisocola (Ccl) em “grãos” isolados e infiltrações nas clivagens de cristais de biotita (Bt). d) Amostra com actinolita (Act) e porções que correspondem a minerais secundários de Cu.....	89
<b>Figura 57</b> - Difratoograma ilustrando as fases minerais da amostra de Quarto-biotita-xisto A01 “CuSer1BtXt”.....	91
<b>Figura 58</b> - Difratoograma ilustrando as fases minerais da amostra de Pegmatito A02 “CuSer1PegMal”.....	91
<b>Figura 59</b> - Difratoograma ilustrando as fases minerais da amostra de Pegmatito A03 “CuSer4Peg”.....	92
<b>Figura 60</b> - Difratoograma ilustrando as fases minerais da amostra de Actinolítico A04 “CuSer01Act”.....	92
<b>Figura 61</b> - Difratoograma ilustrando as fases minerais da amostra de Pegmatito A05 “CuSer4Peg2”.....	93
<b>Figura 62</b> - Ocorrências cupríferas em rocha pegmatítica. a) Imagem por elétrons retroespalhados (BSE) mostrando digenita cortada por vênulas de malaquita. b) Mapeamento químico dos elementos via EDS. c) Espectrogramas dos pontos 19, 20 e 21 evidenciando picos associados a elementos presentes em ocorrências que correspondem a digenita e malaquita.	96
<b>Figura 63</b> - Associação de cobre secundário em pegmatitos. a) Imagem por elétrons retroespalhados (BSE) mostrando região contendo malaquita inserida em matriz de albita. b) Magnificação de 500x da área que corresponde ao grão de malaquita com localização dos pontos mapeados por EDS. c) Mapeamento químico dos elementos via EDS. d) Espectrogramas dos pontos 77, 80 e 89, evidenciando picos associados a mineralizações de malaquita e à presença de albita.....	98
<b>Figura 64</b> - Associação de cobre secundário em encaixantes aos pegmatitos. a) Imagem por elétrons retroespalhados (BSE) mostrando preenchimento de cobre secundário entre as clivagens de biotita. b) Mapeamento químico dos elementos via EDS. c) Espectrogramas dos pontos 36, 46 e 51, respectivamente, confirmando a presença de elementos químicos associados à biotita e malaquita.....	99
<b>Figura 65</b> - Mineralizações de cobre na forma de bandas milimétricas em rochas encaixantes aos pegmatitos. a) Magnificação de 500x da região analisada. b) Mapeamento dos elementos químicos via EDS. ....	100
<b>Figura 66</b> - Associação de cobre secundário em encaixantes dos pegmatitos, preenchendo espaços e fraturas nas rochas xistosas e análise por EDS dos pontos 62 e 63.....	101
<b>Figura 67</b> - Ocorrência de cobre secundário preenchendo fraturas e na forma de impregnações. a) Imagem por elétrons retroespalhados (BSE) de fratura preenchida por cobre secundário em rocha metamórfica. b) Mapeamento de elementos via EDS. c) Espectrogramas dos pontos 19, 40 e 46, confirmando a presença de cobre secundário e plagioclásio. ....	102

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Concentração média dos elementos em rochas crustais (valores em ppm).....	22
<b>Tabela 2</b> - Principais países produtores de cobre e suas respectivas reservas. ....	32
<b>Tabela 3</b> - Resultados da Análise por DRX das amostras contendo cobre.....	93
<b>Tabela 4</b> - Resultados das análises por FRX das amostras selecionadas em ocorrência de óxidos. ....	94

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Parâmetros do levantamento aerogeofísico 1092 do projeto Paraíba-Rio Grande do Norte. ....	17
<b>Quadro 2</b> - Características gerais dos principais depósitos de cobre. ....	24
<b>Quadro 3</b> - Classificação do tipo de intrusão porfírica com base nos metais dominantes. ...	26
<b>Quadro 4</b> - Características das zonas internas de um pegmatito .....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ab	Albita
ASA	Amplitude do Sinal Analítico
Az	Azurita
Be	Berilo
Bt	Biotita
Ccl	Crisocola
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CMA	Campo Magnético Anômalo
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
Cs	Césio
Cu	Cobre
Dg	Digenita
DRX	Difração de raios X
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva
eTh	Equivalente Tório
ETR	Elementos Terras Raras
eU	Equivalente Urânio
FRX	Fluorescência de raios X
Grt	Granada
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICA	<i>International Copper Association</i>
IOCG	<i>Iron Oxide Copper Gold</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISA	Inclinação do Sinal Analítico
K	Potássio
Li	Lítio
MDT	Modelo Digital do Terreno
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Mlc	Malaquita
Nb	Nióbio
PGB	Programa de Geologia do Brasil
PPB	Província Pegmatítica da Borborema
Ppm	Partes por milhão
PSD	<i>Piranhas Serido Domain</i>
Qz	Quartzo
Rb	Rubídio
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
Sc	Escândio
Si	Sílica
Sn	Estanho
Ta	Tântalo
Th	Tório
U	Urânio
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	<i>Universal Transversa Mercator</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	Apresentação .....	12
1.2	Objetivos .....	13
1.3	Localização da Área de Estudo .....	14
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA EMPREGADA</b> .....	<b>15</b>
2.1	Levantamento Bibliográfico.....	15
2.2	Compilação de Mapas e Planejamento de Campo .....	15
2.3	Trabalhos de Campo e Amostragem .....	16
2.4	Tratamento de Dados Aerogeofísicos .....	17
2.5	Caracterização Geológica.....	19
2.6	Caracterização Petrográfica .....	19
2.7	Caracterização Mineral .....	20
2.8	Processamento e Interpretação .....	21
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
3.1	Aspectos gerais do cobre.....	22
3.2	Principais depósitos hospedeiros de Cobre .....	23
3.2.1	Depósitos do tipo Pórfiro.....	24
3.2.2	Depósitos do tipo IOCG .....	27
3.2.3	Depósitos Sedimentares de Cobre (SSC) .....	28
3.3	Minério hipogênico e supergênico .....	30
3.4	Produção Mundial e Reservas .....	32
3.5	Principais aplicações do Cobre .....	33
3.6	Métodos Aerogeofísicos.....	34
3.6.1	Método Magnetométrico .....	35
3.6.2	Método Gamaespectrométrico.....	36
3.7	Caracterização Mineral .....	38
3.7.1	Difração de Raios X .....	38
3.7.2	Fluorescência de Raios X .....	40
3.7.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	40
<b>4</b>	<b>CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL</b> .....	<b>42</b>
4.1	Província Borborema .....	42
4.2	Domínio Rio Piranhas-Seridó .....	43
4.3	Província Pegmatítica da Borborema.....	45

4.3.1	Pegmatitos .....	48
4.3.2	Ocorrências de Cobre na PPB .....	52
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
5.1	Mapeamento Aerogeofísico .....	55
5.1.1	Mapas Magnetométricos.....	55
5.1.1.1	Campo Magnético Anômalo Total (CMA) .....	56
5.1.1.2	Amplitude do Sinal Analítico (ASA) .....	57
5.1.1.3	Inclinação do Sinal Analítico (ISA) .....	58
5.1.2	Mapas Gamaespectrométricos.....	59
5.1.2.1	Elemento Potássio (K).....	59
5.1.2.2	Elemento Urânio (eU) .....	61
5.1.2.3	Elemento Tório (eTh).....	62
5.1.2.4	Mapa Ternário (RGB) .....	63
5.2	Caracterização Geológica.....	64
5.2.1	Litotipos do Grupo Seridó .....	67
5.2.2	Feições dos Pegmatitos.....	70
5.2.3	Ocorrências de Cobre .....	73
5.3	Petrografia e mineralogia das ocorrências de cobre.....	76
5.3.1	Descrição macroscópica .....	77
5.3.2	Petrografia .....	84
5.4	Caracterização Mineral das Ocorrências de Cobre na PPB .....	90
5.4.1	Análises por Difração de Raios X .....	90
5.4.2	Análise por Fluorescência de Raios X.....	94
5.4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	95
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>104</b>
	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>106</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>106</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

A demanda pelo aproveitamento de substâncias minerais estratégicas tornou-se ainda mais intensiva, principalmente nos últimos anos, em decorrência da progressiva busca por bens minerais que atendam às necessidades da indústria e que são estratégicos no ponto de partida para a transição energética do país.

O cobre e suas ligas possuem papel fundamental em diferentes setores da economia brasileira, ocupando o terceiro lugar de metal mais consumido mundialmente em virtude de suas propriedades singulares e diversas aplicações industriais, atuando principalmente no armazenamento e distribuição de energia limpa.

É estimada uma crescente demanda por cobre nos próximos anos, em torno de 3% ao ano até 2033 (INFORMAQ, 2023), impulsionada pela dificuldade de replicação das propriedades deste metal e, conseqüentemente, pela sua substituição por materiais alternativos. Outra característica que distingue o cobre de outras substâncias metálicas é sua potencialidade de ser reciclado sem que haja perda do desempenho e propriedades úteis do metal, além de ser ideal para distribuição de energia limpa devido sua excelente condutividade elétrica (65% mais condutor que o alumínio) (ABCOBRE, 2020).

Parte do cobre que é consumido mundialmente é advindo da mineração, outra parte é proveniente da reciclagem de sucatas. Com relação as fontes do metal, os depósitos cupríferos são responsáveis por 60% do suprimento mundial de cobre (Brito *et al.*, 2010), são depósitos característicos por apresentarem grandes volumes e baixos teores. Outras fontes de cobre comumente conhecidas são advindas dos depósitos do tipo IOCG (*Iron Oxide Copper Gold*), depósitos sedimentares de cobre (SSC), associados a sulfetos maciços hospedados em rochas vulcânicas (VHMS), entre outros menos comuns.

De acordo com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2023), o Chile é considerado como o principal produtor mundial de cobre, seguido pelo Peru e China. O Brasil também é destaque mundial em virtude da Província Mineral de Carajás, a qual contém depósitos de cobre do tipo IOCG, além de ser uma importante fonte de ferro.

No Brasil, a Província Pegmatítica da Borborema (PPB) abrange os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, sendo considerada uma importante província metalogenética constituída por um conjunto de pegmatitos graníticos, mineralizados em Tântalo-Nióbio (Ta-

Nb), Berílio (Be) e Lítio (Li), além de outros elementos e minerais de interesse econômico e industrial (feldspatos e caulim), rochas para fins ornamentais e gemas preciosas (turmalina paraíba).

Nas últimas décadas, os pegmatitos da PPB tem sido alvos de atividades exploratórias e estudos incentivados, principalmente, pela busca de espécies minerais de significativo valor econômico para a indústria de alta tecnologia, além do interesse pelas suas gemas exuberantes e relativamente raras.

Todavia, poucas são as informações bibliográficas relativas à ocorrência, gênese e potencial econômico do cobre na PPB, deixando aberta a lacuna a respeito do conhecimento sobre o potencial metalogenético da região, uma vez que este metal possui grande demanda e aplicabilidade industrial.

Neste contexto, esta dissertação apresenta um estudo acerca das ocorrências de cobre presentes na região e que ainda não foram devidamente estudadas, através de caracterização geológica para trabalhos iniciais de prospecção mineral, análise de dados oriundos de levantamentos aerogeofísicos, coleta e descrição de amostras das principais unidades aflorantes de alguns pegmatitos, além da caracterização macroscópica e microscópica das amostras.

Com o auxílio de estudos geológicos, aerogeofísicos, petrográficos e de caracterização mineral, é pretendido entender inicialmente o tipo de ocorrência dos minerais portadores de cobre na PPB e seus principais modos de ocorrências, rochas hospedeiras e encaixantes, integrado com os resultados das análises laboratoriais e tendo como base trabalhos anteriores que abordam a presença do metal.

É esperado, através deste estudo, que as informações acerca da presença de cobre na PPB sejam incrementadas, dando a possibilidade para futuras pesquisas e complementação dos conhecimentos metalogenéticos deste metal na região.

## **1.2 Objetivos**

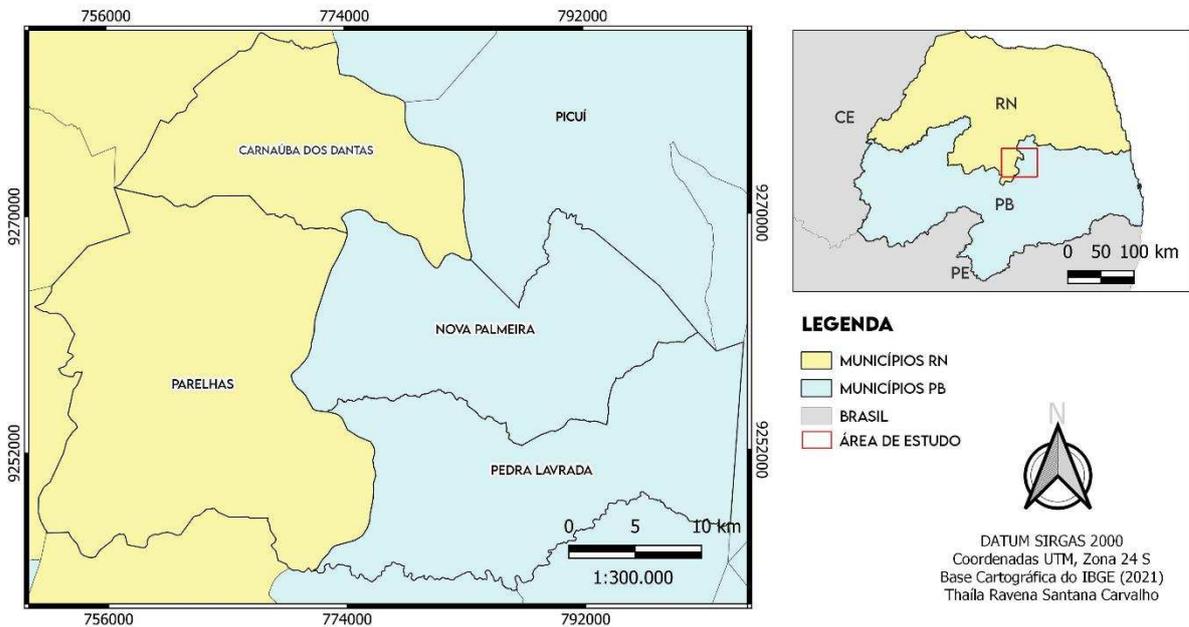
O principal objetivo desta pesquisa consiste no estudo e caracterização geológica das ocorrências de cobre na PPB, tendo como principal escopo o conhecimento das principais zonas de ocorrências (rochas hospedeiras e encaixantes), estilo da mineralização e caracterização do ponto de vista petrográfico e mineralógico de amostras onde foram identificados cobre, com a finalidade de se avaliar o potencial deste metal presente nos pegmatitos da região, além de

contribuir com os conhecimentos sobre o assunto. Por meio desta pesquisa também pretende-se realizar levantamentos geológicos básicos e apresentar novos dados acerca da geologia regional dos pontos estudados, além da identificação de padrões estruturais de produtos oriundos do tratamento de dados aerogeofísicos e produção de mapas magnetométricos e gamaespectrométricos, a fim de se estabelecer possíveis correlações entre as anomalias e possíveis acumulações de cobre e outros metais.

### 1.3 Localização da Área de Estudo

A área de estudo está localizada na região Nordeste do Brasil, contemplando parte do Estado do Rio Grande do Norte (Municípios de Parelhas, Equador e Carnaúba dos Dantas) e da Paraíba (Municípios de Pedra Lavrada e Nova Palmeira). A localização do polígono para o mapeamento aerogeofísico também contempla os municípios citados anteriormente e áreas circunvizinhas. A delimitação da área selecionada para a realização deste estudo pode ser observada no mapa da Figura 1.

**Figura 1** - Mapa de localização da área de estudo (delimitada pelo retângulo vermelho).



Fonte: autoria própria a partir de dados do IBGE (2023).

## 2 METODOLOGIA EMPREGADA

Com o intuito de atingir os objetivos propostos, buscou-se o cumprimento de algumas etapas metodológicas, as quais, para melhor exemplificação, foram subdivididas em três principais grupos que consistem em: Atividades Pré-Campo, Trabalhos de Campo e Atividades Pós-Campo, conforme apresentado no fluxograma esquemático (Figura 2).

**Figura 2** - Fluxograma das etapas metodológicas adotadas neste trabalho.



Fonte: autora (2023).

### 2.1 Levantamento Bibliográfico

O levantamento do estado da arte sobre ocorrências de cobre na PPB visou obter informações relacionadas a geologia, composição mineralógica e classificação dos pegmatitos da região, bem como de suas rochas encaixantes e outros litotipos aflorantes. O levantamento consistiu na análise de artigos científicos, livros, relatórios de projetos de pesquisa, teses, dissertações e projetos de mapeamento. Foram utilizados sistemas de busca de dados, incluindo *Scopus*, *ScienceDirect*, *SciELO* e *Web of Science*, bem como portal CAPES e sistemas integrados de bibliotecas de várias universidades.

Nesta etapa, também foram levantadas informações sobre aspectos metalogenéticos e características do cobre (principais depósitos hospedeiros, mineralogia, reservas e produção) visando dar sustentação teórica para a interpretação dos dados obtidos nas etapas posteriores.

### 2.2 Compilação de Mapas e Planejamento de Campo

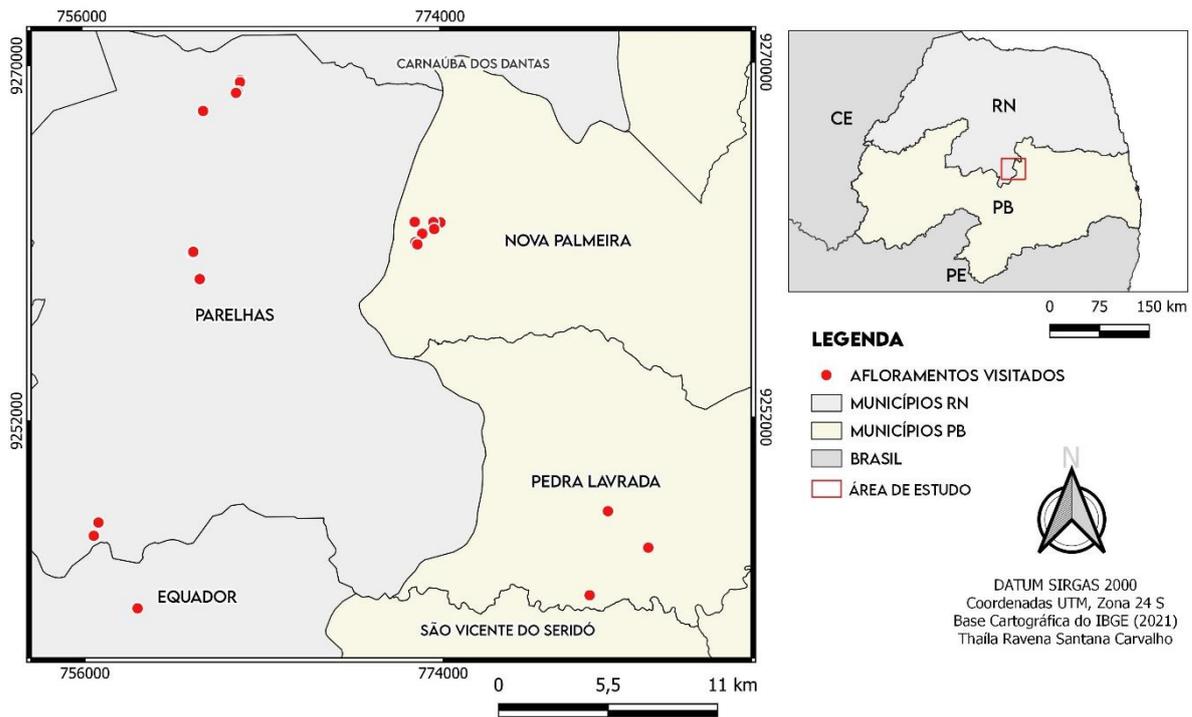
Esta etapa consistiu no levantamento de mapas disponíveis em trabalhos anteriores, bem como sua correlação com informações disponibilizadas em relatórios e cartas produzidas pela

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Mesmo com o grande número de pegmatitos documentados na literatura, foram definidos quais seriam considerados como alvos para a posterior etapa de campo com base em mapeamentos realizados anteriormente.

### 2.3 Trabalhos de Campo e Amostragem

Foram realizadas campanhas de campo de caráter descritivo com o intuito de reconhecimento da região, a fim de descrever às principais características dos pegmatitos e rochas encaixantes aflorantes, além de realizar a coleta de amostras para posterior estudo mineralógico, onde foi dado ênfase aos minerais portadores de cobre e suas relações texturais com os demais minerais presentes. Esta etapa foi vista como fundamental para o entendimento dos aspectos geológicos e caracterização dos corpos pegmatíticos e encaixantes que contém cobre. Os pontos visitados foram representados em mapa esquemático (Figura 3).

**Figura 3** - Mapa indicando a localização dos afloramentos visitados.



Fonte: autoria própria a partir de dados do IBGE (2023).

Nos pontos onde foram coletadas amostras, foram realizados registros fotográficos dos afloramentos, coleta de dados estruturais (por meio do auxílio de bússolas dos modelos *Clar* e *Bruton*), georreferenciamento (com uso de GPS), lupas 10x e 20x, além do auxílio do aplicativo como o *Avenza Maps* utilizados nos *smartphones* para a localização das unidades geológicas e dos pontos de interesse.

## 2.4 Tratamento de Dados Aerogeofísicos

O tratamento dos dados oriundos de levantamentos aerogeofísicos foi realizado tendo em vista a sua contribuição na identificação de anomalias e informações geológicas da área definida. Nesta etapa foram obtidos como resultados mapas magnetométricos e gamaespectrométricos.

Os dados foram obtidos por meio de levantamentos aerogeofísicos realizados pela CPRM e que estão disponíveis em sua plataforma digital. Foram utilizados os dados referentes ao Projeto (1092) Paraíba – Rio Grande do Norte, realizado no ano de 2009, pois tal projeto recobre a área deste estudo e circunvizinhas. Para o projeto 1092, foram programadas 777 linhas de voo e 45 linhas de controle, a altura do voo foi fixada em 100 m sobre o terreno, segundo informações apresentadas em relatório da CPRM (2010). As informações sobre o levantamento estão esquematizadas no Quadro 1.

**Quadro 1** - Parâmetros do levantamento aerogeofísico 1092 do projeto Paraíba-Rio Grande do Norte.

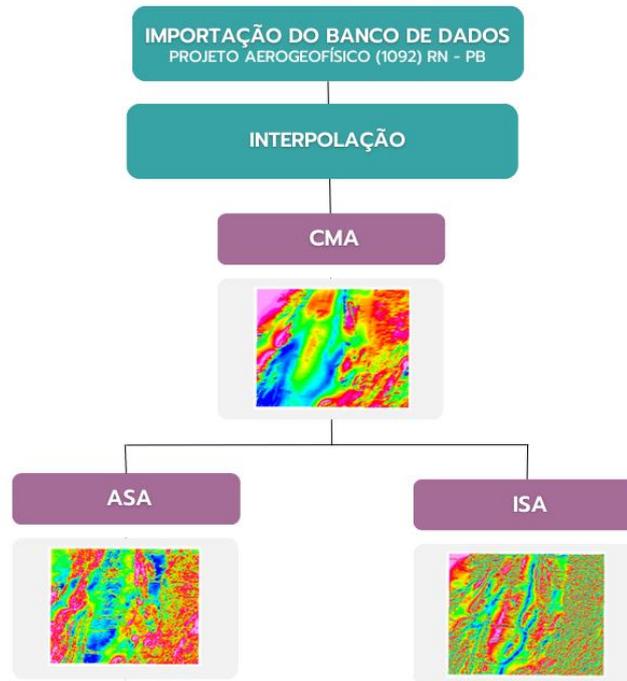
MAGNETOMETRIA	GAMAESPECTROMETRIA
Equipamento: <i>Scintrex</i> CS-3	Equipamento: <i>Exploranium</i> GR-820
Direção e espaçamento das linhas de voo (LV): N-S, 500 m	
Direção e espaçamento das linhas de controle (LC): E-W, 10 km	
Período do levantamento: 31/01 a 10/09 de 2009	
Intervalo de amostragem: 1 segundo	

Fonte: CPRM (2010).

O pré-processamento dos dados “brutos” e aplicação das correções (correção do erro de paralaxe, remoção da variação magnética diurna, nivelamento e micronivelamento dos perfis e remoção do IGRF), já haviam sido realizados e os dados corrigidos foram disponibilizados no formato XYZ, sendo necessário a interpolação dos dados e geração dos produtos geofísicos. Para a interpolação dos dados em malha regular (125m x 125m) foi utilizada a técnica de interpolação bidirecional. Para a definição da célula de interpolação, foi necessário determinar o valor que corresponda a  $\frac{1}{4}$  do espaçamento entre as linhas de voo para a célula unitária do *grid*, o que corresponde a 125 m.

Os produtos magnetométricos gerados foram o mapa do Campo Magnético Anômalo Total (CMA), o mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e o mapa de Inclinação do Sinal Analítico (ISA), conforme descrito na Figura 4, os quais apresentam resultados de anomalias magnéticas de acordo com a resposta de susceptibilidade magnética das rochas na área.

**Figura 4** - Fluxo do processamento de dados de magnetometria e produtos associados.

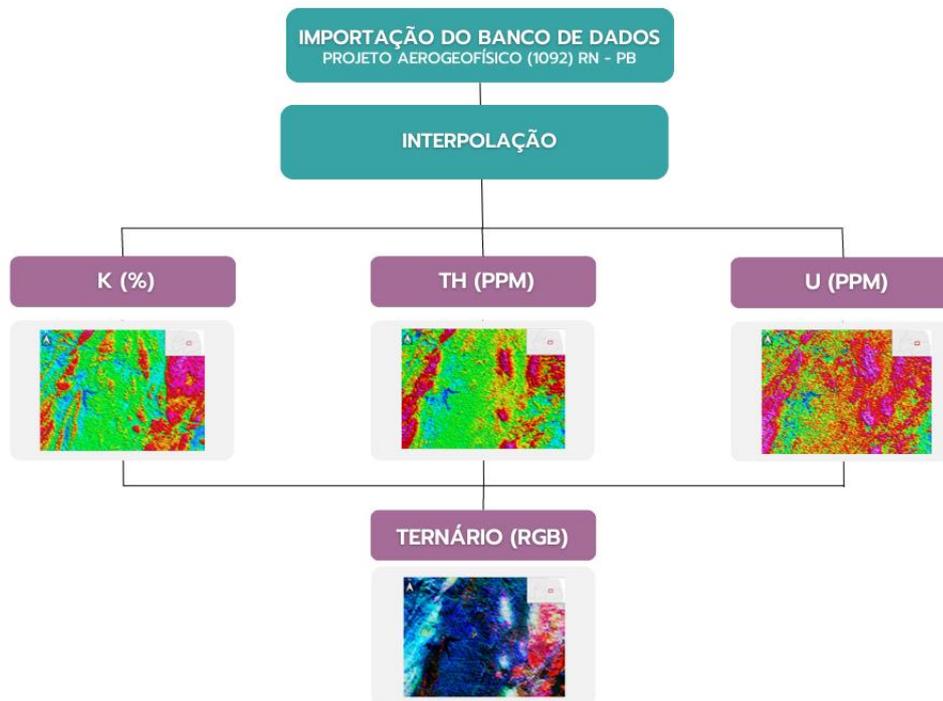


Fonte: autora (2023)

O pré-processamento dos dados brutos gamaespectrométricos e aplicação das correções (correção do tempo morto, correção do erro paralaxe, remoção do *background* da aeronave, entre outros), já haviam sido realizadas e os dados corrigidos foram disponibilizados no formato XYZ, sendo necessário a interpolação dos dados no *software* e geração dos produtos geofísicos. Para a interpolação dos dados em malha regular foi utilizada a técnica da mínima curvatura, com valor de  $\frac{1}{4}$  do espaçamento entre as linhas de voo para a célula unitária do *grid*, correspondendo a 125 m.

Como produtos gamaespectrométricos, foram gerados mapas dos canais de Potássio (K), Urânio (U) e Tório (Th), e a partir da combinação destes canais, o mapa de composição Ternária (RGB), conforme descrito na Figura 5. Essas imagens auxiliaram no mapeamento litológico e análise da distribuição dos radioelementos na superfície terrestre.

**Figura 5** - Fluxo de processamento de dados gamaespectrométricos e produtos associados.



Fonte: autora (2023)

## 2.5 Caracterização Geológica

Esta etapa envolveu a produção de mapas de localização da área e mapa das unidades geológicas presentes na região onde foram identificados os pontos visitados. Foram utilizados dados disponibilizados na plataforma digital da CPRM, além de dados estaduais e municipais disponíveis no *site* do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para processamento dos dados e produção dos mapas foi utilizado o *software* QGIS (versão 3.22.10).

Vale ressaltar que a região é escassa em mapas geológicos de maior detalhe que apontam ocorrências minerais de cobre. Logo, para a elaboração dos mapas e andamento desta pesquisa, cerca de 30 afloramentos, incluindo os pontos de controle, foram visitados durante as campanhas de campo.

## 2.6 Caracterização Petrográfica

Esta etapa consistiu na seleção e preparação das amostras coletadas na fase de campo, realizada no laboratório da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAMG/UFCG), onde também foram realizadas descrições macroscópicas, visando a caracterização mineralógica e textural das amostras.

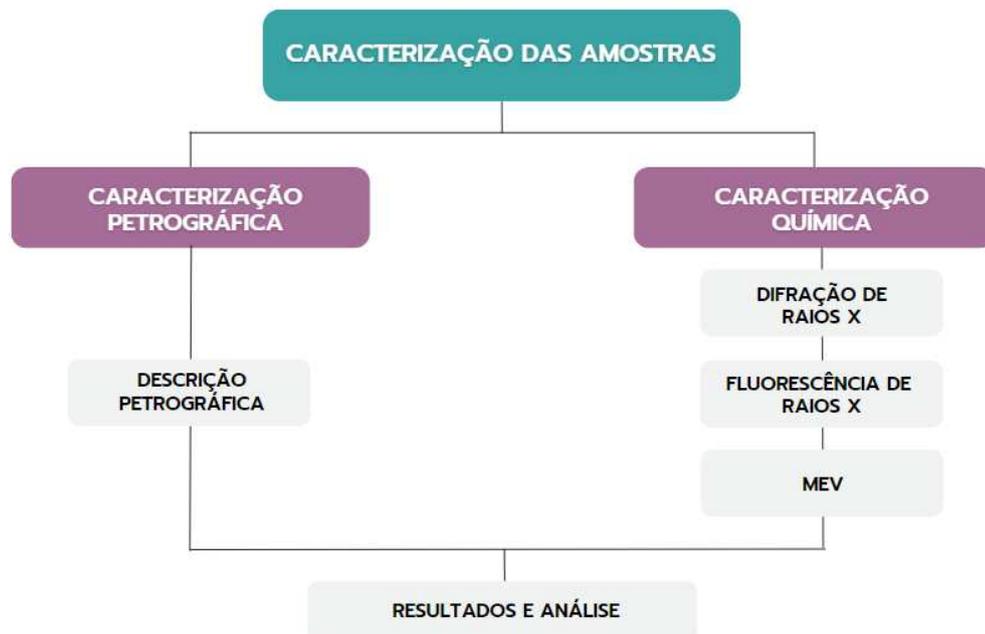
Como produto da amostragem em campo, foram confeccionadas doze (12) lâminas delgadas para análise petrográfica que foram analisadas no laboratório de Petrografia da UAMG/UFCG, por meio do auxílio do microscópio petrográfico binocular Zeiss, modelo *Axio Scope A1*.

No estudo petrográfico foram realizadas descrições mineralógicas detalhadas e de texturas visando o reconhecimento das fases minerais, suas relações de contato, presença de inclusões, intercrescimentos (exsolução e substituição), identificação de minerais essenciais e acessórios, bem como do mineral-minério, entre outras análises que são possíveis através do estudo petrográfico.

## 2.7 Caracterização Mineral

Para a etapa de caracterização tecnológica as amostras foram selecionadas, britadas e moídas em granulometria adequada para os ensaios de caracterização. Como métodos escolhidos foram utilizados a Difração de raios X, Fluorescência de raios X e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Figura 6).

**Figura 6** - Fluxograma esquematisando as técnicas de caracterização usadas nesta pesquisa.



Fonte: autora (2023)

As análises por Difração de raios X e Fluorescência de raios X foram realizados no laboratório de Tecnologia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (LTM – UAEMa/UFCG). A análise foi realizada pelo método do pó, no qual as amostras foram

reduzidas para granulometria adequada e, em seguida, preparadas para a análise no Difrátômetro. Com as análises realizadas e banco de dados obtidos foram gerados os difratogramas por meio do auxílio do *software Origin Microcal 8.0*. O intervalo de varredura ocorreu entre  $5^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ , com passo de 0,02/seg, fendas do tipo Soller e *step* de 2°/min.

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas no Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO) da UFCG. O equipamento utilizado é da marca TESCAN, modelo VEJA 4, com tensão variável de até 30 kV, com alto vácuo (7 a 150 Pa), equipado com detectores para elétrons secundários e elétrons retro espalhados. O MEV do laboratório possui acoplamento de EDS (Detector de Energia Dispersiva) auxiliando no mapeamento dos elementos presentes.

## **2.8 Processamento e Interpretação**

Como etapa conclusiva do processo metodológico adotado para a realização desta pesquisa de mestrado, a etapa de processamento e interpretação de dados consistiu em sintetizar todas as informações obtidas e adquiridas durante cada etapa, além de realizar a análise e interpretação dos dados. Para o processamento e ilustração das informações foram utilizados os *softwares: Origin 8.0, CorelDraw X9, QGis (versão 3.22.10)*. O conjunto de dados foram discutidos e os resultados apresentados em seção específica neste trabalho.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Aspectos gerais do cobre

A descoberta e utilização do cobre é documentada desde os povos pré-históricos, sendo citado como um dos primeiros metais a ser utilizado pelo homem e moldado de acordo com a forma desejada, estando presente em joias, instrumentos de guerra, decoração e em utensílios de maneira geral. Com o passar dos anos, o interesse pelo cobre cresceu, tornando-se um dos metais mais consumidos mundialmente em decorrência de suas propriedades singulares e aplicabilidade.

Segundo Batista (2003), o cobre é considerado um elemento vestigial, ou seja, que está fortemente disperso na crosta terrestre. Sua concentração em *Clarke* é em torno de 0,007% na crosta terrestre (Damasceno, 2017). Em rochas crustais, a concentração média do cobre é maior nos litotipos máficos e ultramáficos, seguido das rochas graníticas (12 ppm), nas quais seriam incluídos os pegmatitos (Tabela 1).

**Tabela 1** - Concentração média dos elementos em rochas crustais (valores em ppm).

Elemento	Rochas Ultramáficas	Rochas Máficas	Rochas Graníticas	Calcários	Arenitos
<b>Al</b>	21.100	76.300	73.300	6.800	22.200
<b>As</b>	1,0	1,5	2,1	1,1	1,2
<b>Ba</b>	0,4	330	840	92	170
<b>Be</b>	0.x	0.x	3	0.x	0.x
<b>Cr</b>	2.980	170	4,1	11	35
<b>Co</b>	110	48	1	0,1	0,33
<b>Cu</b>	42	72	12	5	10
<b>Fe</b>	94.300	86.500	14.200	3.800	9.800
<b>Pb</b>	1	4	18	5	10
<b>Mg</b>	34.200	63.400	5.200	20.000	7.000
<b>Mn</b>	1.040	1.500	390	1.100	170
<b>Ni</b>	2.000	130	4,5	20	2
<b>Na</b>	0.x	8.300	42.000	2.700	10.700
<b>K</b>	34	8.300	42.000	2.700	10.700
<b>Zn</b>	58	94	51	21	40
<b>Ti</b>	3.000	9.000	2.300	400	0.x
<b>V</b>	40	250	44	20	20
<b>Sc</b>	5	35	2,8	1,5	1

Fontes: (Rose *et al.*, 1979; Levinson, 1974; Wedepohl, 1978)

0.x representa um intervalo de valores de 0.1 a 0.9 ppm.

Fonte: modificado de Cocker (1998)

Assim como outros metais básicos, o cobre oxida-se na presença do ar, é um metal de transição de número atômico 29, além de ser um elemento calcófilo (apresenta alta afinidade com o enxofre). O cobre nativo (em estado puro) é raramente encontrado na superfície, estando geralmente associado a outros elementos químicos, são reconhecidas mais de 170 espécies minerais que contém este metal (Ribeiro, 2001).

Dentre as propriedades físicas do cobre que despertam interesse econômico, pode ser citada a sua alta capacidade de conduzir eletricidade, o que o torna aplicável na fabricação de cabos, fios e outros dispositivos elétricos. Este metal também apresenta boa maleabilidade e ductibilidade, sendo facilmente moldado de acordo com a forma desejada.

O cobre também é utilizado em sistemas de troca de calor e água em decorrência de sua boa condutividade térmica, se destacando por conduzir calor oito vezes mais rápido quando comparado com os demais metais (ABCOBRE, 2019). O cobre também apresenta boa resistência a corrosão, é um metal que pode ser reciclado sem que suas propriedades físicas sejam perdidas, além de apresentar excelentes propriedades antimicrobianas.

### **3.2 Principais depósitos hospedeiros de Cobre**

Depósitos cupríferos são conhecidos por apresentarem grandes volumes e baixos teores, pois geralmente as ocorrências estão associadas a diversos litotipos formados em ambientes geológicos diversos.

Garcia (2013), associa a diversidade de ambientes geológicos (Quadro 2) no qual o cobre está presente em virtude de sua alta mobilidade geoquímica, ressaltando que o cobre pode migrar e precipitar sob a forma de minerais em situações geológicas variáveis.

**Quadro 2** - Características gerais dos principais depósitos de cobre.

Processos	Modelos	Depósitos Representativos	Ambiente Geotectônico	Rochas Hospedeiras	Tipo da Mineralização
<b>ORTOMAGMÁTICOS</b>	Ni-Cu em rochas Ultramáficas-máficas	Sudbury (Canadá), Jinchuan (China), Mirabela (Brasil)	Intrusões anorogênicas	Peridotitos, piroxenitos, gabros, noritos, anortositos	Disseminações
	Ni-Cu, EGP em Komatiitos	Kambalda (Austrália), Morro do Ferro (Brasil)	<i>Greenstone Belts</i>	komatiitos	Bolsões maciços, disseminações
	Ni-Cu associados a intrusões em platôs basálticos	Noril'sk-Talnakh (Rússia)	LIP ( <i>Large Igneous Provinces</i> )	diabásios, basaltos	Bolsões maciços subhorizontais, disseminações
<b>HIDROTERMAIS</b>	Cu (-Mo) porfírico	La Escondida, Chuquibambilla (Chile), Bingham (EUA) Chapada (Brasil)	Arcos Magmáticos	Granodioritos pórfiro, dioritos	<i>Stockworks, stringers</i>
	Cu tipo manto	El Soldado (Chile), Punta del Cobre (Chile)	Arcos Magmáticos	andesitos, basaltos	<i>Stratabound, disseminações</i>
	VHMS ( <i>Volcanic Hosted Massive Sulfide</i> )	<i>Kidd Creek</i> (Canadá), Kuroko (Japão)	Dorsais, Arcos de Ilha, <i>Greenstone Belts e Hotspots</i>	basaltos, andesitos, riolitos	Lentes maciças, disseminações
	Sin orogênico em <i>Greenstone Belts</i>	<i>Singhbhum Copper Belt</i> (Índia)	<i>Greenstone Belts</i>	komatiitos, basaltos, metapelitos	Filões
	IOCG ( <i>Iron Oxide Copper Gold</i> )	<i>Olympic Dam</i> (Austrália), Salobo (Brasil), Candelaria (Chile)	Intrusões anorogênicas ou pós-orogênicas	Diversos litotipos	Disseminações em brechas, veios
<b>SEDIMENTARES</b>	SSC em metassedimentos proterozóicos	<i>African Copperbelt</i> (Zambia e Congo)	Orógeno Intracratônico	(meta)arenitos, - arcóseos, - grauvacas, - dolomitos	Disseminações estratiformes e estratoligado
	SSC em folhelhos sobre <i>redbeds</i>	Kupferschiefer (Polônia), <i>White Pine</i> (Canadá)	Bacias de <i>Rifte</i> , Margem Passiva	Folhelhos	Disseminações estratiformes e estratoligado

Fonte: adaptado de Biondi (2003), Robb (2005), Laznicka (2006, 2010), Garcia (2013).

A seguir, serão descritos os principais depósitos de cobre mais comumente conhecidos na literatura e que são responsáveis pelas maiores produções mundiais deste metal, os quais abrangem os do tipo pórfiro, IOCG e depósitos sedimentares de cobre (SSC).

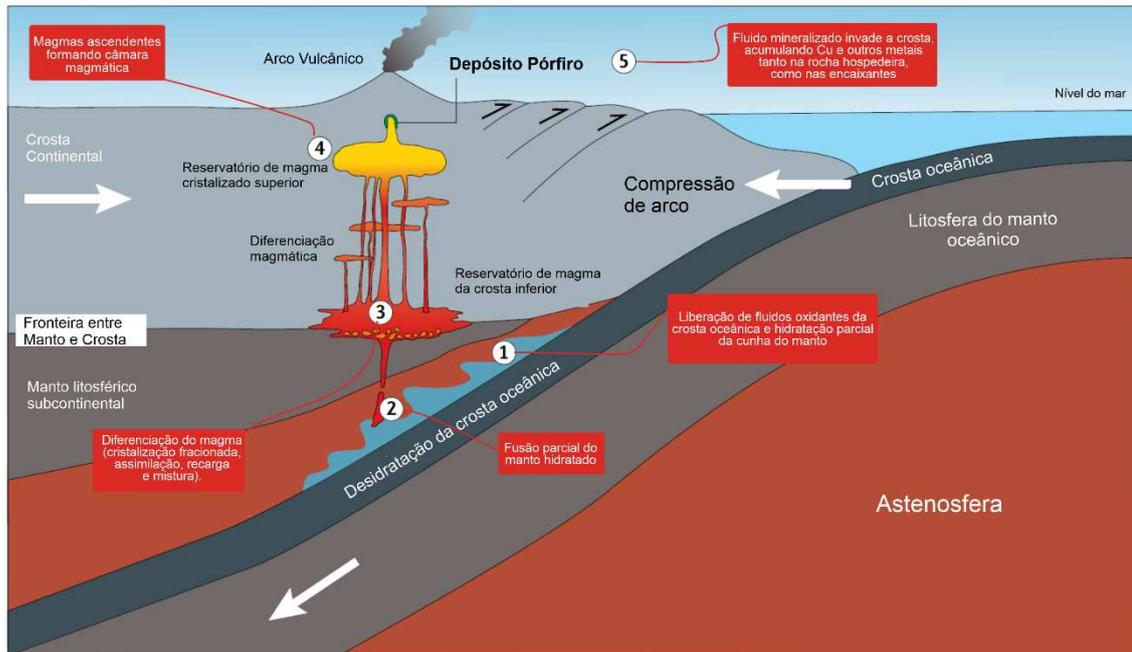
### 3.2.1 Depósitos do tipo Pórfiro

De acordo com Berger *et al.* (2008), depósitos do tipo pórfiro são formados predominantemente em arcos magmáticos continentais, ao longo de limites convergentes de placas tectônicas ou em ambientes de arco de ilha (convergência entre placas oceânicas). Estes depósitos estão comumente associados a centros vulcânicos relacionados a subducção, embora em alguns casos estejam associados a vulcanismo pós-colisional.

Park *et al.* (2021), ressaltaram uma série de condições magmáticas e as dividiram em etapas que favorecem a formação de um depósito do tipo pórfiro. Eles descreveram detalhadamente um modelo genético proposto para este tipo de depósito, conforme descrito e ilustrado (Figura 7), respectivamente a seguir.

- 1) Com o deslizamento da placa oceânica (maior densidade) em relação a crosta continental, fluidos oxidantes são liberados da crosta oceânica (principalmente H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>), causando a hidratação de parte da cunha do manto em contato.
- 2) A água liberada por reações metamórficas na placa oceânica que mergulha, provoca a fusão parcial da cunha do manto, promovendo o enriquecimento metassomático do manto pelo aporte de elementos solúveis. Este enriquecimento produz magmas oxidados e hidratados, que devido a menor densidade dos fluidos basálticos e andesíticos produzidos, ascendem e se acumulam ao redor do limite manto-crosta, formando reservatórios com várias profundidades (podem variar de 30 a 70 km) na base da crosta continental.
- 3) O magma passa por uma intensa diferenciação (a profundidade média na qual ocorre a diferenciação depende da espessura crustal e do ambiente tectônico), no qual ocorrem processos que acarretam mudanças na composição do magma (cristalização fracionada, assimilação crustal, recarga e mistura).
- 4) O magma, após passar pelos processos de diferenciação, ascende formando uma câmara magmática localizada a profundidades que pode variar de 5 a 15 km. A câmara é, regularmente, alimentada pelos magmas que estão em níveis inferiores. A ascensão do magma irá depender de sua composição e regime tectônico regional, além do estado térmico da crosta superior. O magma logo se torna um fluido saturado devido a uma combinação de cristalização fracionada e baixa solubilidade de H<sub>2</sub>O em baixa pressão.
- 5) O fluido saturado (constituído por água e outros voláteis) invade a crosta rasa (1 a 7 km de profundidade) por meio da intrusão de plutões, distribuindo e acumulando mineralizações contendo cobre pela precipitação de sulfetos (calcopirita, bornita) tanto na rocha hospedeira, como nas suas encaixantes. A forma dos plutões geralmente se assimila a de um cone invertido.

**Figura 7** - Seção esquemática contendo modelo genético para formação de depósitos porfíricos de Cu em ambientes de zona de subducção.



Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2021)

Depósitos porfíricos são assim denominados por, geralmente, se associarem a rochas ígneas intrusivas com fenocristais de feldspatos em uma massa cristalina de granulação fina. São frequentemente encontrados a profundidades menores que 10 km (até 5 km, em geral), associados a intrusões de plutões em níveis relativamente rasos (Maksaev, 2004).

Os grandes volumes de rochas em depósitos do tipo pórfiro são dados em função da deposição das mineralizações tanto na rocha hospedeira, quanto nas rochas encaixantes, no qual, segundo Sillitoe (2010), isto é dado devido os efeitos da alteração hidrotermal que ocorre tanto na intrusão porfírica, estendendo-se em um grande volume de rocha nas regiões circunvizinhas.

A alteração hidrotermal resulta em um conjunto de processos metassomáticos que modificam não só a composição, mas também a mineralogia das rochas. Pirajno (2009) faz uma associação do tipo de intrusão do pórfiro e sua conexão com metais dominantes que estão presentes em cada gênero (Quadro 3).

**Quadro 3** - Classificação do tipo de intrusão porfírica com base nos metais dominantes.

Metal (s)	Cu±Au±Mo	Cu±Au	Cu±Mo±Au	Cu±Au
Tipo da Intrusão	Tonalito-granodiorito-Pórfiro	Quartzo - monzodiorito - granito - Pórfiro	Pórfiro Monzonítico	Pórfiro Sienítico

Fonte: Pirajno (2009).

A composição das rochas hospedeiras juntamente com a reologia podem influenciar fortemente a dimensão, grau e tipo de mineralizações geradas em depósitos do tipo pórfiro. Os depósitos são hospedados por uma variedade de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (Sillitoe, 2010).

Vale salientar que neste tipo de depósito, os minerais que contém cobre, ocorrem em quantidades muito variáveis, seja na forma disseminada na rocha alterada, preenchendo fraturas e/ou em brechas associadas, distribuídos de maneira heterogênea ou em grandes volumes de rocha, em vista disso, os teores de cobre podem variar entre 0,3 - 2%, que são compensados devido ao grande volume de rochas mineralizadas (Goyzueta, 2013).

### **3.2.2 Depósitos do tipo IOCG**

Os depósitos do tipo IOCG (*Iron Oxide Copper Gold*) foram assim denominados inicialmente por Hitzman *et al.* (1992), como acrônimo usado para intitular um número crescente de depósitos de óxido de ferro, cobre e ouro. Este termo é útil pelo fato de unificar um grupo amplo de depósitos que compartilham características químicas e geológicas distintas, além de ressaltar uma série de depósitos os quais antes eram mal definidos (Barton, 2014).

Groves *et al.* (2010), relacionam os depósitos do tipo IOCG como uma variedade de depósitos que são enquadrados nesta categoria, sendo comum mineralizações epigenéticas, formadas por remobilização hidrotermal associada a granitogênese de origem mantélica (anorogênica ou pós-orogênica), inserida em regiões cratônicas ou extensões de arcos magmáticos, normalmente indicada como fonte de metais e de calor remobilizador dos fluidos.

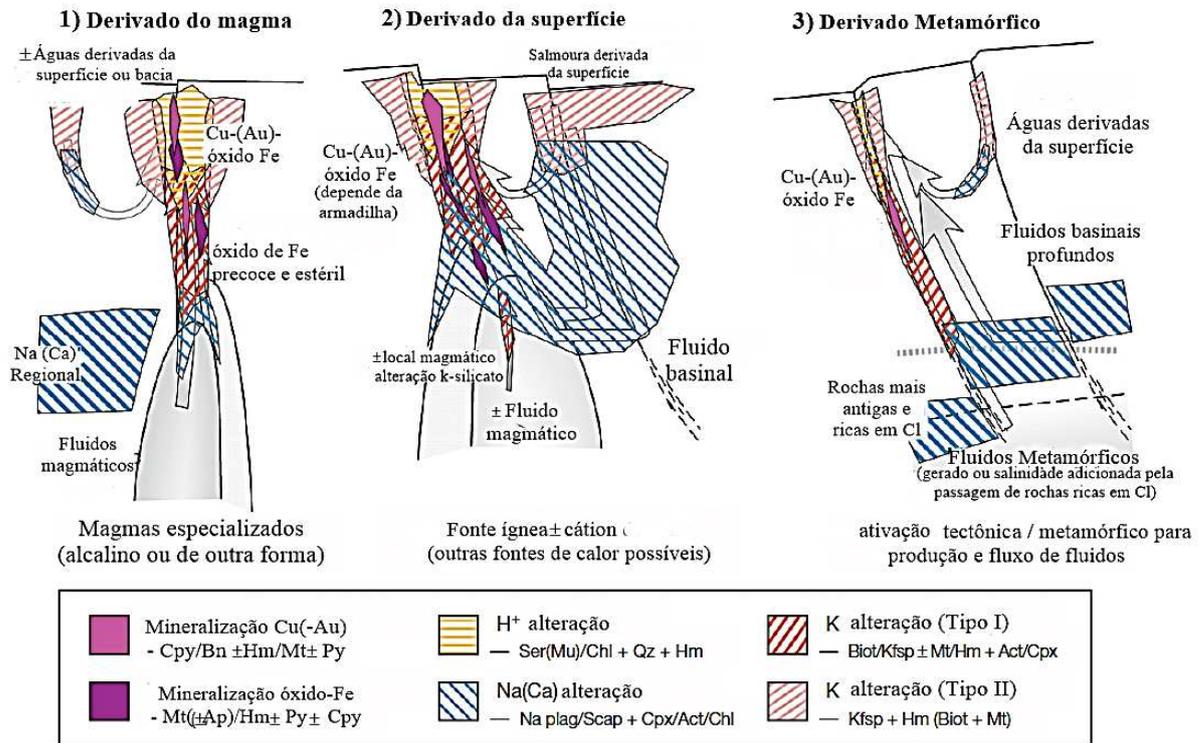
Os depósitos IOCG podem estar associados a um amplo número de recursos minerais, incluindo Fe, Cu, Au, U, ETR, F e quantidades menores de Ag, Nb, P, Bi, Co, bem como recursos menos essenciais de EGP, Ni, Se, Te, Zr, As, B, Ba, Cl, Co, Mo, Mn e W. Estes depósitos, assim como os do tipo pórfiro, geralmente apresentam alta tonelagem e minério com baixo teor (Kolb e Stensgaard, 2009).

As configurações geológicas em depósitos do tipo IOCG são tectonicamente diversas. Os terrenos hospedeiros são constituídos por rochas que variam de moderadamente a altamente oxidadas, compostas por magnetita e hematita, a maioria apresenta evidências de materiais evaporíticos coevais ou mais antigos, isto é, salmouras de superfície/sedimentar e/ou metaevaporitos. Muitas configurações tectônicas continentais podem hospedar uma

mineralização economicamente significativa do tipo IOCG, a diversidade geológica (em contraste com a similaridade geoquímica) contribuem para várias hipóteses relacionadas a gênese desses depósitos.

Barton (2014) sugere três tipos de configurações tectônicas para depósitos do tipo IOCG (Figura 8), bem como as possíveis fontes de fluidos e distribuição das alterações hidrotermais além dos minérios.

**Figura 8 - Principais origens e arquiteturas hidrotermais para sistemas IOCG.**



Fonte: modificado de Barton (2014).

Há um considerável número de estudos acerca de depósitos do tipo IOCG, no entanto, percebe-se que ainda há algumas divergências entre pesquisadores, principalmente quando se trata das hipóteses de origem do fluido mineralizante. Outro ponto a ser destacado é com relação a diversidade de características presentes nesses depósitos, sugerindo distintos processos geológicos para sua gênese e formação.

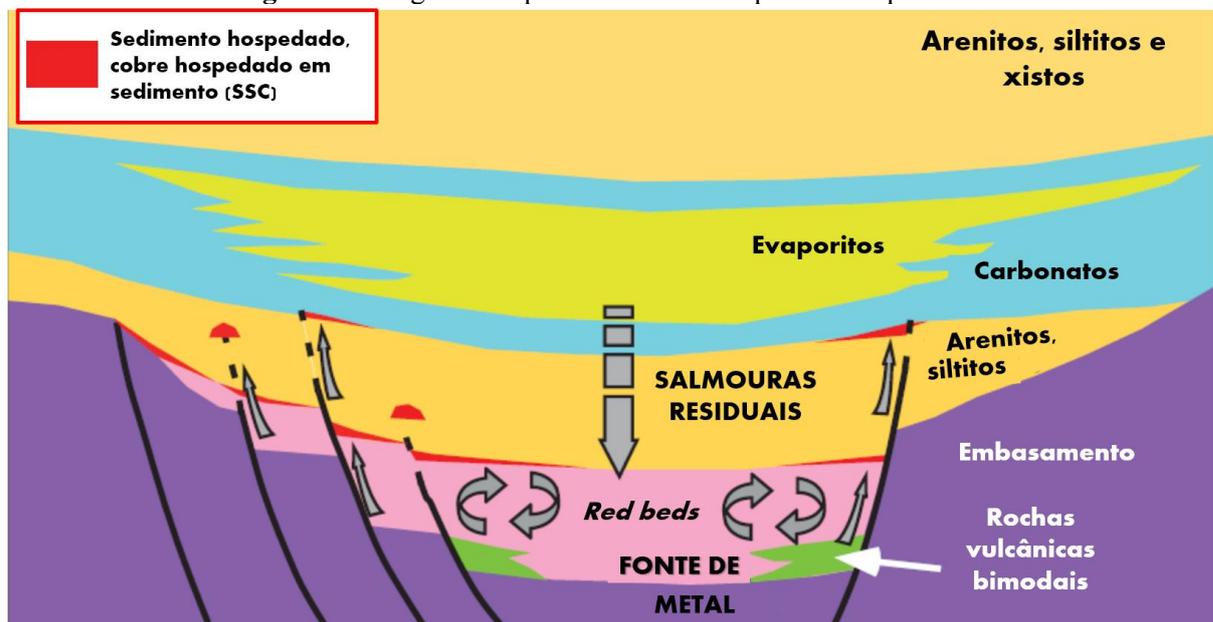
### 3.2.3 Depósitos Sedimentares de Cobre (SSC)

Também conhecidos como *Sediment-Hosted Stratabound Copper* (SSC), esta classe de depósitos é a segunda fonte mais importante de cobre do mundo (a primeira são os depósitos

do tipo pórfiro), cerca de 20% do metal é produzido a partir deste grupo de depósitos, além de também ser a principal fonte de cobalto, prata e outros metais associados (Hayes *et al.*, 2015).

De acordo com o *United States Geological Survey* (2014), estes depósitos consistem em sedimentos que contêm mineralizações de cobre na forma disseminada, cimentada e, menos comumente, em veios. Geralmente são hospedados em rochas sedimentares siliciclásticas ou dolomíticas (Figura 9). Esses depósitos são classificados por um forte zoneamento dos minerais de minério, podendo apresentar minerais como pirita, calcopirita, bornita, calcocita e hematita, cujas concentrações se apresentam de acordo e seguindo a estratificação das rochas hospedeiras.

**Figura 9** - Diagrama esquemático de um depósito do tipo SSC.



Fonte: Modificado de Hitzman *et al.* (2010) e Jones (2020).

Os depósitos do tipo SSC requerem leitos fontes de metais oxidados (*red-beds*), rochas em fácies reduzidas que servem como armadilhas de metal, além de salmouras salinas capazes de lixiviar e transportar metais (Hitzman *et al.*, 2010).

Maghfouri *et al.* (2020), destacam que os depósitos do tipo SSC ocorrem na forma de três subtipos distinguíveis por litotipo de rocha hospedeira e pelo tipo correspondente de redutor que precipitou enxofre e cobre de salmouras quentes (75 - 220 °C), oxidadas e metalíferas que migraram através de sequências de rochas sedimentares. Os três subtipos, seus litotipos de rocha hospedeira típicos e seus redutores correspondentes são:

(1) rochas clásticas de fácies reduzidas, de baixa energia, como siltito, folhelho, lamito ou dolossiltilito carbonáceo contendo matéria orgânica sólida e pirita;

(2) arenito bem selecionado, de granulação fina a grossa (semelhante à Formação *Revelt* no noroeste de Montana, EUA) que contém hidrocarbonetos; e

(3) *Red-beds*, arenitos mal a moderadamente selecionados e comumente conglomeráticos contendo fragmentos de plantas carbonizadas.

### 3.3 Minério hipogênico e supergênico

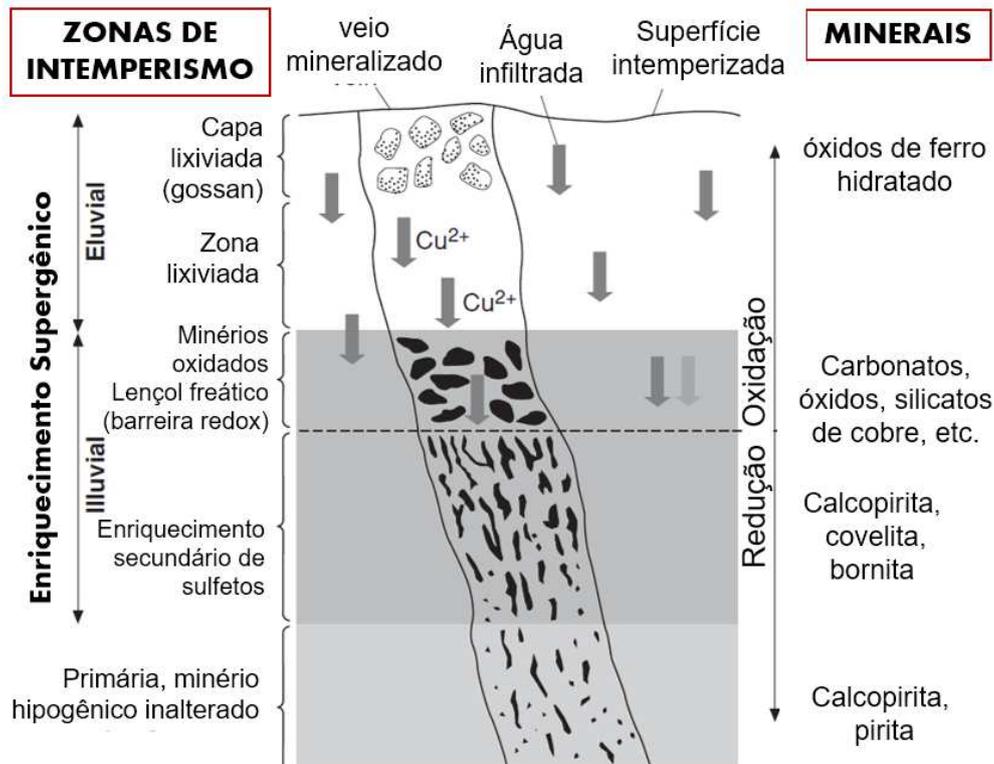
O cobre nativo (metal puro) é raramente encontrado na crosta terrestre em decorrência de geralmente o metal estar associado a outros elementos químicos. Os minerais portadores de cobre são divididos em dois principais grupos, minério hipogênico (ou de origem primária) e minério supergênico (ou de origem secundária).

Segundo John *et al.* (2010), os minerais de cobre que predominam no minério hipogênico são representados majoritariamente pela calcopirita e bornita, que são encontrados em 75% dos depósitos do tipo pórfiro.

Outros minerais que acompanham o minério hipogênico e são considerados como ganga são: quartzo, pirita, sericita, clorita, epidoto, biotita, feldspato potássico, magnetita, anidrita e minerais acessórios (óxidos de ferro-titânio, apatita e zircão). A ganga ocorre junto ao minério hipogênico, seguindo o mesmo padrão do zoneamento dos minerais contendo cobre e das alterações.

Downing (2009), propôs um perfil esquemático que ilustra as zonas de um depósito do tipo pórfiro bem como a localização do minério hipogênico e supergênico, um perfil esquemático semelhante também foi proposto por Robb (2005) (Figura 10), no qual é ilustrado os princípios envolvidos quando se trata de enriquecimento supergênico em depósitos cupríferos.

**Figura 10** - Perfil esquemático de um depósito cuprífero de acordo com suas zonas de alteração hidrotermal e mineralogia associada.



Fonte: Modificado de Robb (2005).

A parte superior de depósitos do tipo pórfiro tem seu enriquecimento devido a um processo supergênico, no qual a concentração residual de substâncias químicas é dada pelo intemperismo de depósitos minerais preexistentes. Dessa forma, o enriquecimento supergênico resulta em uma reconcentração substancial de metais pela substituição seletiva de minerais primários de sulfeto de ferro-cobre por minerais secundários de sulfeto de cobre.

Vale destacar que o enriquecimento supergênico ocorre quando os fluidos ácidos oxidantes dissolvem íons metálicos do minério hipogênico e os redepõem em áreas de redução com pH mais altos, resultando na sequência de uma zona lixiviada superior oxidada (*Gossan* ou chapéu de ferro), conforme ilustrado no perfil da figura anterior.

Os minerais de cobre predominantes na região de alteração supergênica em sistemas pórfiro incluem minerais de cuprita, malaquita, crisocola, azurita e tenorita. Os minerais de ganga supergênica consistem em minerais primários formadores de rocha, minerais hidrotermais e óxidos de manganês (John *et al.*, 2010).

### 3.4 Produção Mundial e Reservas

A maior parte do cobre que é consumido mundialmente é oriundo da produção mineral, comumente denominada como cobre de origem primária. Outra parcela é proveniente da reciclagem de sucatas que contém o metal. É importante destacar que o cobre pode ser reciclado inúmeras vezes, sem que suas propriedades úteis sejam perdidas ou reduzidas (Silva, 2011).

As reservas conhecidas de cobre alcançam em torno de quase 1 (um) bilhão de toneladas, no entanto, é estimado que os recursos deste metal ainda não conhecidos superem os até então conhecidos. Segundo dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2023), o Chile é considerado como principal produtor e detentor da maior reserva de cobre do mundo, seguido pelo Peru e outros países (Tabela 2).

**Tabela 2** - Principais países produtores de cobre e suas respectivas reservas.

Países	Produção Mina (t)		Reservas Inferidas (t)
	2021	2022	
<b>Chile</b>	5.620	5.200	190.000
<b>Peru</b>	2.300	2.200	81.000
<b>China</b>	1.910	1.900	27.000
<b>Estados Unidos</b>	1.230	1.300	44.000
<b>Outros países</b>	10.140	11.400	548.000
<b>Total mundial</b>	<b>21.200</b>	<b>22.000</b>	<b>890.000</b>

Fonte: Adaptado de USGS (2023).

Conforme apresentado, o Chile é o país detentor do maior número de reservas e que, conseqüentemente, apresenta maior produção de cobre, isso é dado pelo fato de estar localizado no Cinturão do Fogo do Pacífico, região do planeta que abriga as maiores reservas de cobre do tipo pórfiro (Groves *et al.*, 2010).

Os principais produtos resultantes do cobre comercializado, são o cobre fundido e o refinado. O primeiro é produto da fundição e conversão do concentrado para eliminar as impurezas como enxofre e ferro, resultando no cobre *blister* (98,5% em cobre) e, posteriormente, refinado a fogo para a obtenção de anodos de cobre (99,7 % em cobre). Já o cobre refinado é oriundo do refino dos anodos por eletrólise, resultando em catodos de elevada pureza (cerca de 99,99% em cobre) (Silva, 2011).

A produção brasileira de cobre é realizada predominantemente nos estados do Pará (68,35%) e Goiás (16,14%). A Bahia também tem sua participação na produção nacional, com cerca de 12,98% (ANM, 2023).

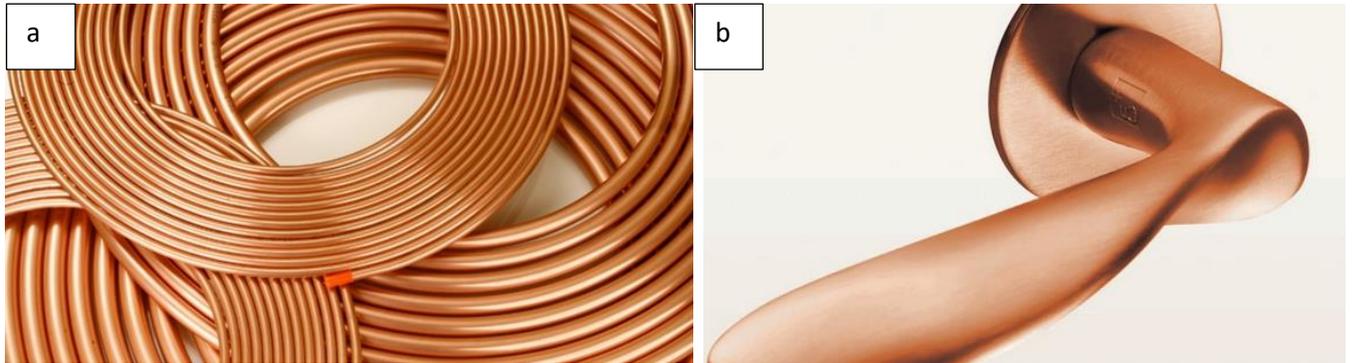
### 3.5 Principais aplicações do Cobre

Com os recentes avanços tecnológicos na produção e utilização de minerais metálicos, as inovações e, conseqüentemente, substituições também sofreram notáveis avanços nos últimos tempos. Com o cobre não foi diferente, devido a sua variedade em propriedades físicas de interesse, o mesmo vem sofrendo transformações e novas aplicações. O cobre pode ser utilizado, principalmente em:

- **Tubulações:** Os tubos de cobre apresentam grande resistência química, mecânica e à corrosão, além de possuir excelente condutibilidade térmica e elétrica. São aplicados em grandes proporções em aparelhos de ar-condicionado (Figura 11a), condensadores, compressores, conectores elétricos, entre outros.
- **Energias Renováveis:** Usado nas transformações de calor a partir da condução, convecção e radiação, nos quais utilizam-se coletores, que são compostos por tubulações ou superfícies de cobre unidas entre si por canais paralelos de menor diâmetro. Um estudo realizado pelo ICA (*Internacional Copper Association*, 2020) no Brasil, aponta que os geradores de energia renovável levam, em média, oito a doze vezes mais cobre que os geradores tradicionais, fazendo do metal um insumo indispensável para o desenvolvimento de energia limpa.
- **Indústria Automobilística:** O cobre é usado nos fios, conectores freios, rolamentos, radiadores e até mesmo no próprio motor. Outra aplicação bastante promissora é a utilização do cobre em motores elétricos, o qual utiliza uma porcentagem muito maior de cobre que os motores convencionais, estimando-se uma maior demanda adicional para este bem mineral.
- **Nanocobre:** o cobre possui poder antimicrobiano, comprovado por diversos estudos realizados pela Cecil Laminação de Metais e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), sendo ainda mais intensificados nos últimos anos devido à pandemia da covid-19. Quando um micro-organismo entra em contato com uma superfície do metal (ou uma de suas ligas), têm sua membrana exterior destruída por íons que são naturalmente liberados pelo cobre. O nanocobre, em forma líquida ou em pó, pode ser utilizado no ramo hospitalar, na construção civil, na indústria automobilística, no setor têxtil, entre outros segmentos (Figura 11b) (ABCOBRE, 2021).

- **Outros usos:** construção civil, cunhagem de moedas, fabricação de armas e munições, indústria alimentícia, embalagens, bebidas, farmacêutica, galvanização, produtos agrícolas, tintas e pigmentos, joalherias, entre outros usos.

**Figura 11** - Aplicações do cobre. (a) tubos para climatização. (b) revestimento de nanocobre em maçaneta.



Fonte: ABCOBRE (2021).

Vale destacar que um dos quesitos que torna favorável a utilização do cobre diz respeito ao fato do metal não liberar gases tóxicos quando em contato com temperaturas elevadas, além disso é um material reciclável, podendo ser reutilizado por diversas vezes sem que haja perda em suas propriedades úteis. Dessa forma, parte do cobre utilizado hoje em dia é proveniente da reciclagem.

### 3.6 Métodos Aerogeofísicos

A realização de levantamentos geofísicos para aquisição de dados pode ser realizada por meio de levantamentos terrestres, marinhos ou aéreos. Os produtos gerados por meio da geofísica aérea é uma ferramenta auxiliar para caracterização de áreas ainda não exploradas e que, devido as dificuldades de acesso, é impossibilitada à pesquisa direta em campo. Outra vantagem diz respeito ao recobrimento de grandes áreas a serem pesquisadas em uma menor intervalo de tempo. Os métodos magnetométrico e gamaespectrométrico em escala aérea são relevantes no levantamento de dados geológicos devido à facilidade de geração dos produtos, sobretudo em pesquisas realizadas em escala regional.

A seguir, serão descritos os princípios que envolvem estes dois tipos de métodos geofísicos, com a finalidade de que se entenda como cada um pode auxiliar nas atividades de mapeamento geológico e de exploração mineral, tratando-se de levantamentos aéreos.

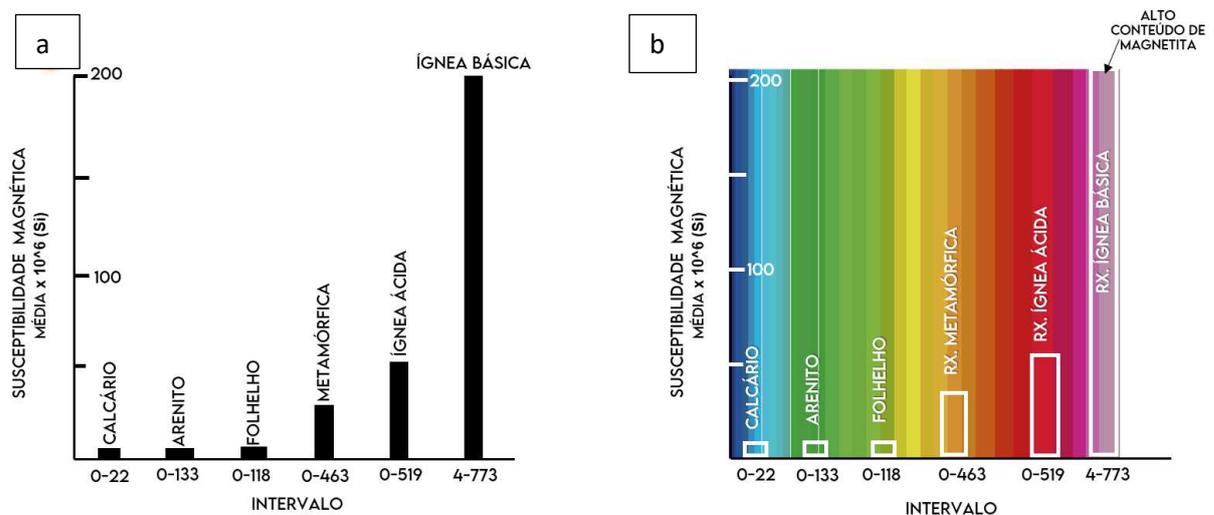
### 3.6.1 Método Magnetométrico

A magnetometria é um método de investigação geofísica utilizado na determinação de profundidades de fontes ou identificação de anomalias magnéticas (Correia *et. al.*, 2010). É aplicado principalmente no estudo de depósitos minerais metálicos, sobretudo àqueles portadores de ferro (magnetita, ilmenita, goethita).

A magnetometria baseia-se no estudo das variações locais do campo magnético terrestre, provenientes da existência de materiais de origem geológica ou antrópica, que apresentam contrastes de amplitude do campo magnético. O método magnetométrico é usualmente aplicado em trabalhos de pesquisa mineral, cobrindo grandes áreas por meio de aerolevantamentos (escala regional) ou levantamentos terrestres (escala de detalhe) (Pereira, 2014).

Nos levantamentos, as anomalias magnéticas são causadas por minerais que apresentam alta susceptibilidade magnética, a exemplo da magnetita (Figura 12a, b). A susceptibilidade magnética depende da quantidade e do modo de distribuição dos minerais magnéticos contidos na rocha. De acordo com Luiz e Silva (1995), minerais com forte susceptibilidade (como magnetita, ilmenita e pirrotita), podem fornecer informações sobre a distribuição de minerais não magnéticos, mas que são economicamente importantes, tais como calcopirita, calcocita e galena.

**Figura 12** - Histograma de valores médios de susceptibilidade magnética das rochas. a) Dobrin e Savit (1988); b) Oliveira *et al.* (2019).



Fonte: adaptado de Dobrin e Savit (1988); Oliveira *et al.* (2019).

Levantamentos aeromagnéticos normalmente compreendem uma série de linhas paralelas e linhas de controle dispostas na área a ser pesquisada. O espaçamento entre as linhas,

suas direções e altura do voo são parâmetros que influenciam diretamente na aquisição dos dados e, conseqüentemente, na resolução e apresentação dos resultados.

Durante os levantamentos, o magnetômetro na aeronave registra a magnitude do campo magnético, incluindo também influências mais internas na Terra que alteram os resultados dos dados. Em vista disso, há a necessidade de aplicação de correções e filtragem dos dados, objetivando-se estudar apenas às anomalias presentes na crosta terrestre. A aplicação de filtros é imprescindível por contribuir em evidenciar anomalias magnéticas, de acordo com o objetivo e alvo da pesquisa.

No processamento dos dados obtidos nos aerolevantamentos é essencial que o tratamento ocorra de acordo com a finalidade do estudo. Tratando-se de estudos com fins prospectivos e de pesquisa de depósitos metálicos, é essencial a análise de anomalias rasas, sendo necessário a remoção de influências profundas que possam interferir nos resultados das anomalias magnéticas.

### **3.6.2 Método Gamaespectrométrico**

A gamaespectrometria, assim como a magnetometria, é usada como apoio ao mapeamento geológico regional, pode atuar como ferramenta de auxílio em trabalhos geológicos e de prospecção mineral. Segundo Dantas (2020), este método geofísico se baseia na medição do contraste entre as principais fontes de radiação gama detectadas na superfície terrestre.

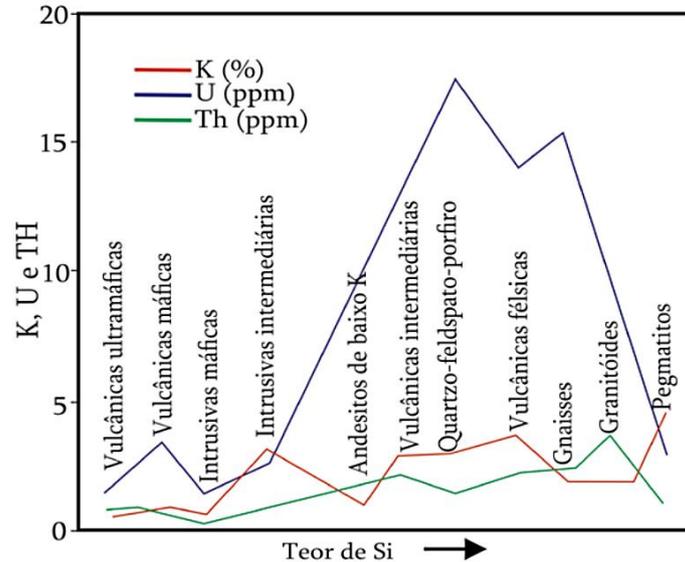
A instabilidade dos núcleos de átomos radioativos em condições naturais causa a liberação de energia espontânea a partir da desintegração de seus núcleos. Com isso, são emitidas radiações que podem ocorrer na forma de partículas carregadas alfa ( $\alpha$ ) e/ou beta ( $\beta$ ) ou como radiação gama ( $\gamma$ ), apresentando baixo poder de penetração em diferentes materiais, já as emissões alfa e beta causam estado de excitação na matéria e a energia em excesso é liberada na forma de radiação gama (IAEA, 2003 *apud* Conego Júnior, 2019).

A aquisição dos dados durante o levantamento gamaespectrométrico é realizado por meio de um espectrômetro. Os dados são adquiridos em contagens por segundo (cps), mas são transformados em concentrações mediante procedimentos de calibração (Ferreira *et al.*, 2016).

A gamaespectrometria mede as concentrações de Potássio (K), Urânio (U) e Tório (Th) presentes nas rochas aflorantes por meio da detecção da radiação emitida por esses elementos.

Nas rochas ígneas os teores dos três elementos aumentam com o incremento do teor de sílica (Figura 13).

**Figura 13** - Variação das concentrações de K, U e Th nas rochas ígneas em relação ao aumento do teor de sílica.



Fonte: Dickson e Scott, 1997 *apud* Ferreira *et al.*, 2016.

A interpretação dos dados obtidos requer a compreensão dos princípios físicos, a inserção de correções e procedimentos de calibração dos dados, para que os espectros adquiridos possam ser analisados com relação a sua concentração na crosta

Segundo Ferreira *et al.* (2016), os produtos gamaespectrométricos utilizados como apoio ao mapeamento geológico são, essencialmente, mapas coloridos das variáveis básicas (CT, K, eU, eTh) e de suas razões (eU/K, eU/Th, eTh/K). Outro mapa importante é o Ternário, no qual cada cor está vinculada a um radioelemento, normalmente no padrão RGB (*Red, Green, Blue*). Frequentemente, a cor vermelha (R) é associada ao elemento potássio (%), a verde (G) ao tório equivalente e a azul (B) ao urânio equivalente, e estão dispostas nos vértices de um triângulo equilátero, geralmente apresentado nas legendas dos mapas.

Os resultados gerados pela gamaespectrometria podem muitas vezes adicionar informações importantes sobre a composição das rochas de uma determinada região, assim como sobre a localização de regiões com maior ou menor concentração de um elemento, o que pode ajudar na delimitação de áreas de interesse (Ribeiro *et al.*, 2013).

### 3.7 Caracterização Mineral

Na maioria dos casos, somente os resultados de análises macroscópicas são não suficientes ou eficazes para a identificação de minerais, nesses casos torna-se necessária a aplicação de técnicas instrumentais que auxiliem na identificação específica das fases minerais e sua proporção na amostra estudada.

A caracterização mineralógica fornece uma gama de informações a respeito das espécies minerais que constituem uma amostra, quantificando tanto os minerais de interesse como os de ganga além de auxiliar na determinação de suas propriedades físicas e químicas. A geração destas informações contribui não só para o conhecimento da espécie mineral, como também influencia em seu aproveitamento, pois a partir delas é que serão tomadas decisões com relação a melhor rota de beneficiamento a ser adotada para a liberação e concentração do mineral de interesse (Porphírio *et al.*, 2010).

A identificação de um mineral e de sua composição química pode ser determinada por meio de técnicas instrumentais como a Difração de raios X, Fluorescência de raios X e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

#### 3.7.1 Difração de Raios X

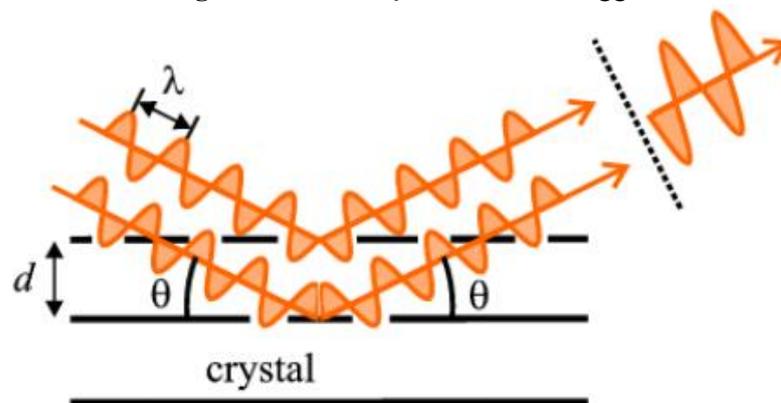
A Difração de raios X (DRX) possui por intuito a identificação de minerais e quantificação das fases a partir da distribuição de seus átomos. Nesta técnica, os átomos de um cristal, em virtude de seu espaçamento uniforme, causam um padrão de interferência nas ondas presentes em um feixe incidente de raios X. Esta técnica determina o arranjo dos átomos nos compostos sólidos, comprimentos e ângulos de ligação (Atkins e Jones, 2012 *apud* Teixeira, 2019), sendo comumente utilizada para análise estrutural e microestrutural identificando diferentes minerais.

De acordo com Queiroz *et al.* (2013), para obter o espectro de emissão característica de um elemento, é preciso separar os diversos comprimentos de onda da radiação incidente. No caso dos raios X, esses comprimentos de onda são muito pequenos, logo os materiais não conseguem realizar a separação do feixe através da refração (os índices de refração para esse regime de comprimentos são próximos de 1). Tendo em vista isso utiliza-se, então, a técnica de difração.

O pesquisador William Laurence Bragg verificou, estudando a difração de raios X em cristais, que para certas direções e comprimentos de onda eram observados picos (máximos de intensidade) bem pronunciados de radiação espalhada (conhecidos atualmente como picos de Bragg), com isso o mesmo supôs que as ondas incidentes eram refletidas especularmente por planos paralelos de átomos do cristal, e que os raios refletidos a partir dos sucessivos planos produziriam interferência construtiva sob certas condições (Lima, 2006).

Para que os raios refletidos de dois planos cristalinos paralelos tenham uma interferência construtiva, a diferença de caminho óptico deve ser múltiplo inteiro do comprimento de onda da radiação (Figura 14).

**Figura 14** - Ilustração da Lei de Bragg



Fonte: Queiroz *et al.* (2013).

A condição para que ocorra a difração é dada pela lei de Bragg, dada por:

$$n \lambda = 2d \sin \theta$$

em que  $n$  é número inteiro positivo (1, 2,3...),  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação X,  $d$  é distância entre camadas adjacentes de átomos e  $\theta$  é ângulo entre o raio incidente e os planos refletidos.

Os difratogramas são gráficos gerados pelo difratômetro (instrumento para medida por DRX), que representam a intensidade do sinal de difração captado pelos detectores para configurações de ângulos durante a coleta de dados (Santos, 2018). Estes gráficos (intensidade *versus* ângulo  $2\theta$ ) expressam o feixe difratado detectado, geralmente expresso através de picos que se destacam da linha de base. Cada pico do difratograma representa a reflexão, segundo a lei de Bragg, dos raios X nos planos do retículo cristalino das fases componentes da amostra, cada qual com índices de Miller, apresentando uma determinada altura (intensidade), área e posição angular (Antoniassi 2010, *apud* Silva, 2013).

### 3.7.2 Fluorescência de Raios X

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica utilizada na identificação dos elementos químicos de uma amostra e quantificação de suas concentrações. Esta técnica se baseia na emissão, captação e interpretação de espectros de raios X dos elementos constituintes da amostra. A análise por FRX é capaz de identificar todos os elementos desde o Boro (número atômico 5) ao Urânio (número atômico 92), bem como elementos traços em concentrações na amostra entre 1,0 e 1000 ppm.

A excitação dos raios X da amostra é provocada pela irradiação de um feixe de raios X primários gerados em um tubo de raios X. Os elementos da amostra absorvem os raios X primários e emitem suas próprias linhas de raios X ou um espectro de raios X característico dos elementos que a compõe. Os raios X emitidos pela amostra são direcionados para um sistema de detecção e interpretação dos dados (Santos, 2018).

De acordo com Luz *et al.* (2018), a FRX é uma das técnicas instrumentais mais versáteis, dado vista o fato de permitir a análise de amostras em estado líquido ou sólido. Sua capacidade de detecção de elementos químicos geralmente ocorre de forma rápida, sem destruir a matriz. Outro ponto destacado pelos autores, diz respeito ao fato desta técnica abranger elementos para os quais a espectroscopia óptica de emissão se mostra ineficiente.

### 3.7.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Óptica (MO) por luz transmitida permite identificar as fases minerais de interesse, como também sua forma de associação com outras ocorrências presentes na amostra analisada. A Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) permite um nível de detalhamento maior quando comparado com a MO. As imagens geradas com detector de elétrons retroespalhados permitem a distinção entre as espécies minerais pela diferença de número atômico médio dos elementos constituintes através de tons de cinza (Uliana; Kahn; Braz, 2009). A Microscopia Eletrônica de Varredura consiste em uma técnica muito poderosa de caracterização microestrutural, sendo amplamente aplicada tanto na mineralogia, metalurgia e ciência dos materiais.

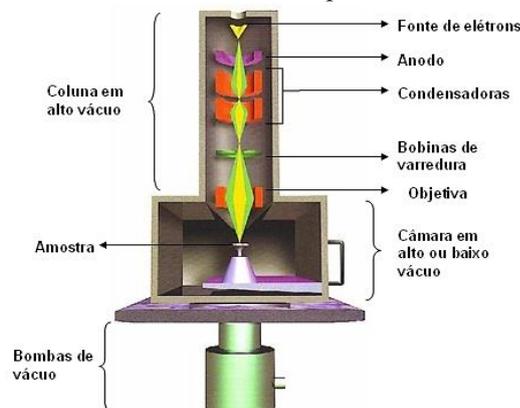
Este método consiste basicamente em um feixe de elétrons primários que varrem a amostra. A interação das microestruturas com elétrons produz elétrons secundários, os quais fornecem informações relacionadas a topografia da superfície da amostra analisada,

identificação de minerais com granulação extremamente fina, análise da distribuição dos minerais, entre outras funções. Dessa forma, o MEV fornece uma imagem correspondente ao resultado da interação de um feixe de elétrons com a amostra, permitindo aumentos de 30 a 100.000 vezes.

Para a efetivação das análises por esse recurso, às amostras precisam ser recobertas por uma película condutora, as quais podem ser observadas diretamente sob a forma de grãos ou partículas coladas a um suporte. O MEV, quando associado com detectores de elétrons retroespalhados, permite a distinção entre espécies minerais pela diferença do número atômico médio dos elementos constituintes, que permite um maior contraste nas imagens através de tons de cinza. A identificação de minerais por esse processo é auxiliada pela determinação da sua composição química, através de sistemas de microanálises ou análises pontuais (Dedavid; Gomes; Machado, 2007).

O MEV tem seu potencial ainda mais desenvolvido com a adaptação na câmara da amostra de detectores de raios X, permitindo a realização de análise química na amostra em observação. Através da captação pelos detectores e da análise dos raios X característicos emitidos pela amostra, é possível obter informações qualitativas e quantitativas da composição da amostra na região sub-micrométrica de incidência do feixe de elétrons. Este procedimento facilita a identificação de precipitados e de variações de composição química dentro de um grão. Atualmente, quase todos os equipamentos que fazem uso do MEV são equipados com detectores de raios X, devido a confiabilidade e a facilidade de operação a grande maioria faz uso do detector de energia dispersiva (EDX), (Maliska, *s.d.*). O MEV é composto por uma coluna óptico-eletrônica (canhão de elétrons) e uma câmara com porta amostra, sistema eletrônico, detectores e sistema de vácuo (Figura 15).

**Figura 15** - Partes de um Microscópio Eletrônico de Varredura



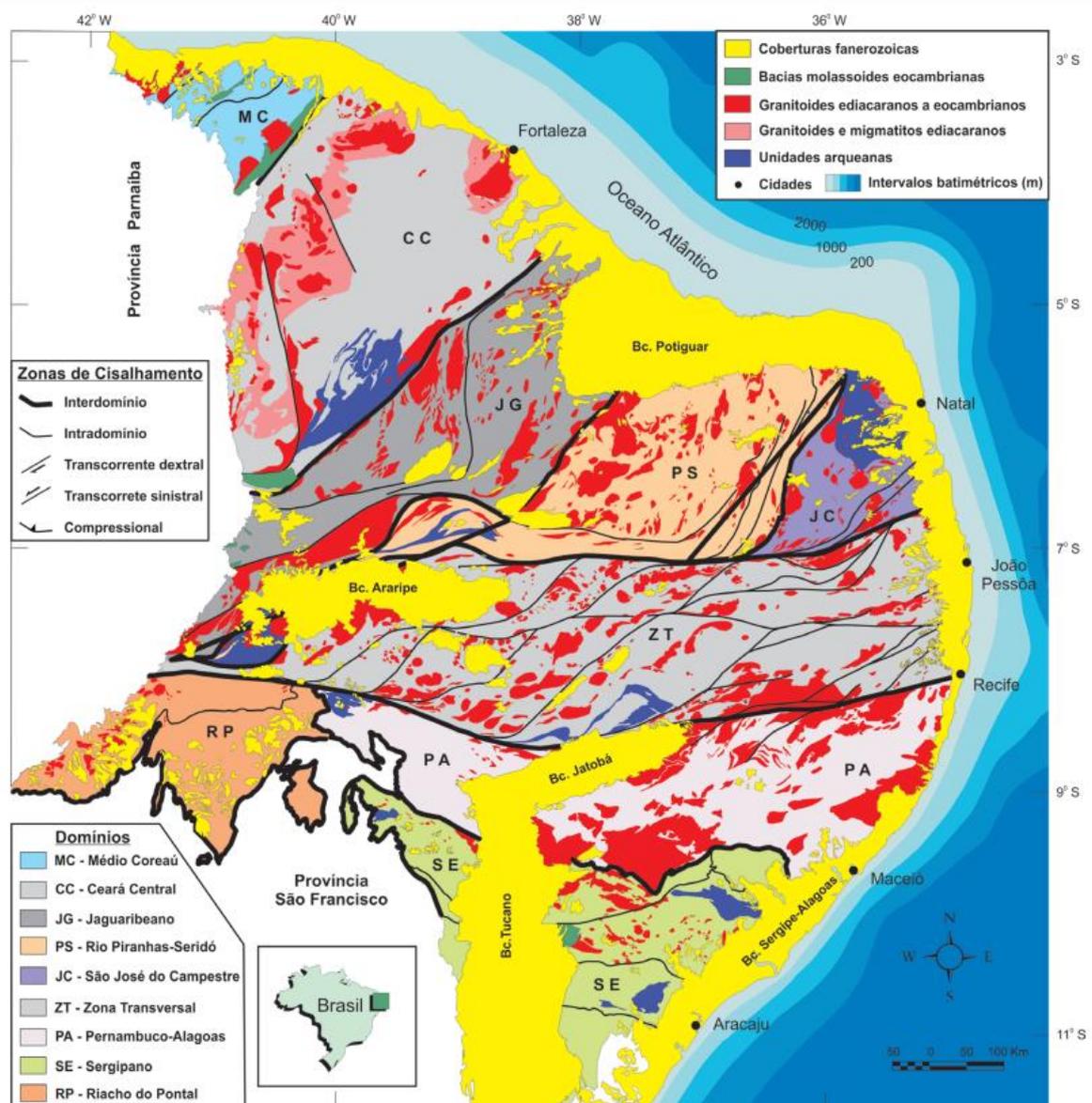
Fonte: Mora (2010).

## 4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

### 4.1 Província Borborema

A Província Borborema está localizada na região Nordeste do Brasil e representa uma das dez províncias estruturais brasileiras que foram definidas inicialmente por Almeida *et al.* (1977; 1981). A Província está limitada a oeste pelos sedimentos Fanerozoicos da Bacia do Parnaíba, a norte e a leste pela Margem Continental Atlântica e a sul e noroeste pelos Crátons São Francisco e São Luiz, respectivamente (Figura 16).

**Figura 16** - Compartimentação tectônica da Província Borborema e delimitação de acordo com seus Domínios.



Fonte: Medeiros *et al.* (2017).

Ao longo dos anos, alguns autores propuseram divisões para a Província Borborema, elaborando modelos diversos de compartimentação tectônica. Van Schmus *et al.* (1997) dividiram a província em três domínios estruturais: i) Domínio Norte (localizado a norte da Zona de Cisalhamento de Patos); ii) Domínio Central (compreende as zonas de cisalhamento de Patos, a norte, e a zona de cisalhamento do Pernambuco, a sul); e o iii) Domínio Sul (entre o Lineamento Pernambuco e o Cráton São Francisco).

Santos *et al.* (2000) e Brito Neves *et al.* (2000), reconhecem que a província Borborema está subdividida em cinco subprovíncias, sendo elas: i) Médio Coreau, ii) Ceará Central, iii) Rio Grande do Norte, iv) Transversal e v) Meridional.

Um dos modelos mais recentes, apresentado na vasta literatura sobre a Província Borborema, advém de Medeiros *et al.* (2017), onde a Província Borborema é compartimentada em nove domínios tectônicos (conforme apresentado na Figura 16), sendo eles: i) Médio Coreau (MC); ii) Ceará Central (CC); iii) Jaguaribeano (JG); iv) Rio Piranhas-Seridó (PS); v) São José do Campestre (JC); vi) Zona Transversal (ZT); vii) Pernambuco-Alagoas (PA); viii) Sergipano (SE) e o domínio ix) Riacho do Pontal (RP).

Ao longo do tempo, há um aperfeiçoamento dos modelos de compartimentação propostos, cada um de acordo com a integração de mais pesquisas e descobertas acerca da Província Borborema. A província pode ser facilmente compartimentada devido à sua estruturação geral, realçada por zonas de cisalhamento regionais, o que contribui para a divisão da província em domínios, subdomínios dados em função das características litoestruturais e geocronológicas.

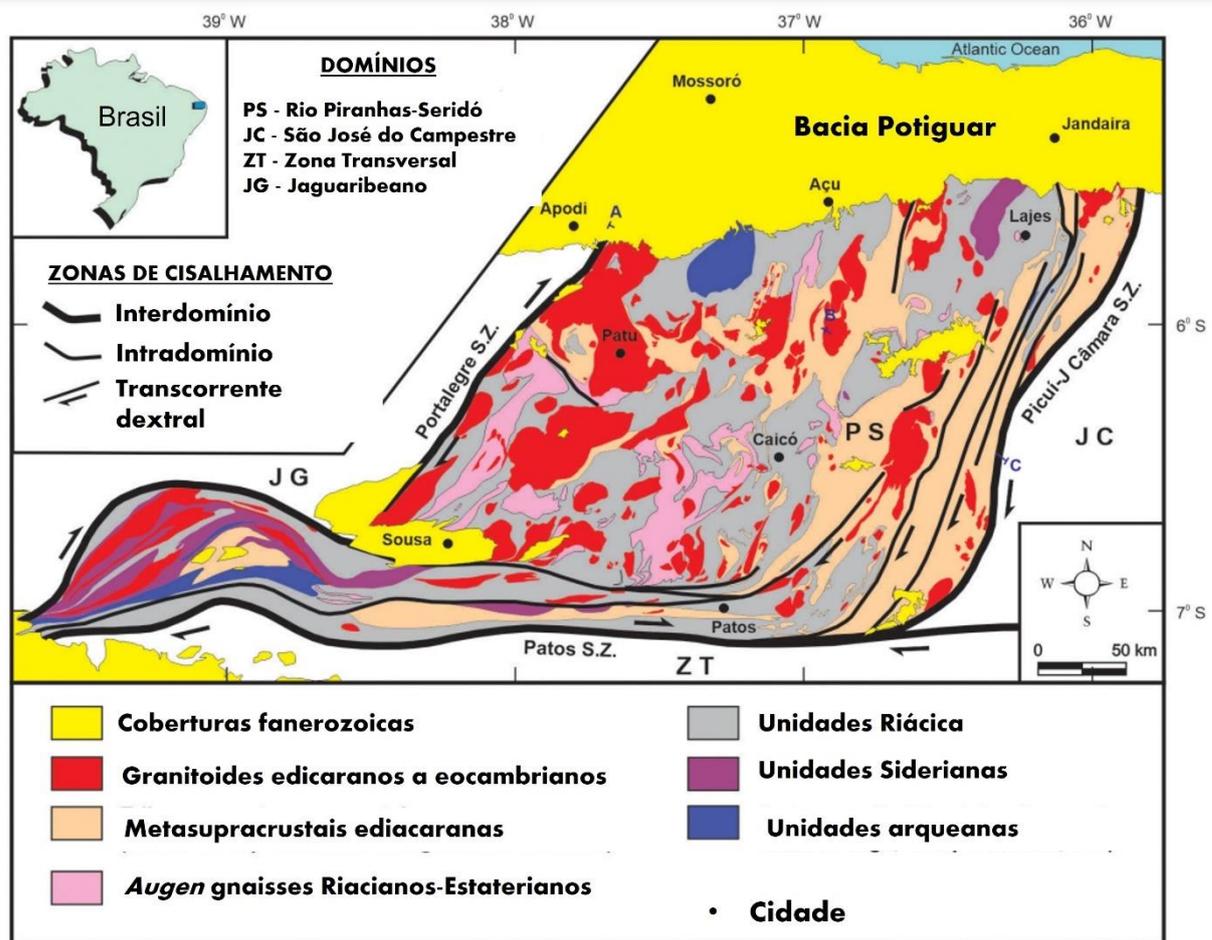
A área de estudo está inserida no Domínio Rio Piranhas-Seridó (PS), localizado na porção NE da Província Borborema. Neste domínio está inserida a Província Pegmatítica da Borborema (PPB), a qual será discutida em tópico específico mais à frente.

## **4.2 Domínio Rio Piranhas-Seridó**

O Domínio Rio Piranhas-Seridó (PS) abrange os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, localizados no Nordeste do Brasil, no extremo nordeste da Província Borborema. O domínio PS está limitado a leste com o Domínio São José do Campestre por meio da zona de cisalhamento Picuí-João Câmara, a oeste com o Domínio Jaguaribeano pela

zona de cisalhamento Portalegre, a norte com as rochas sedimentares da Bacia Potiguar e a sul com o Domínio Zona Transversal através da zona de cisalhamento de Patos (Figura 17).

**Figura 17** - Mapa geológico regional, com as principais unidades litoestratigráficas e zonas de cisalhamento Domínio OS.



Fonte: Modificado de Medeiros *et al.* (2021).

É comum a presença de corpos graníticos distribuídos ao longo do PS, intrudindo-se em várias unidades estratigráficas, além de pegmatitos graníticos. É estimado cerca de aproximadamente 750 pegmatitos mineralizados em Be, Ta-Nb, Li, Sn (Beurlen *et al.*, 2008).

O Domínio PS é composto por um embasamento gnáissico-migmatítico de idade paleoproterozoica, com possíveis remanescentes arqueanos, o Complexo Caicó, e por *augen* gnaisses graníticos Riácianos e Estaterianos da Suíte Poço da Cruz. Sobreposto a este embasamento, encontra-se a sequência de rochas metasupracrustais do Grupo Seridó (da base para o topo: Formações Jucurutu, Equador e Seridó) de idade neoproterozoica. Intrudindo toda a sequência ocorrem batólitos, *stocks* e diques associados a um intenso plutonismo granítico decorrente do ciclo brasileiro (Jardim de Sá, 1994; Jardim de Sá e Salim, 1980; Van Schmus *et al.*, 2003).

### 4.3 Província Pegmatítica da Borborema

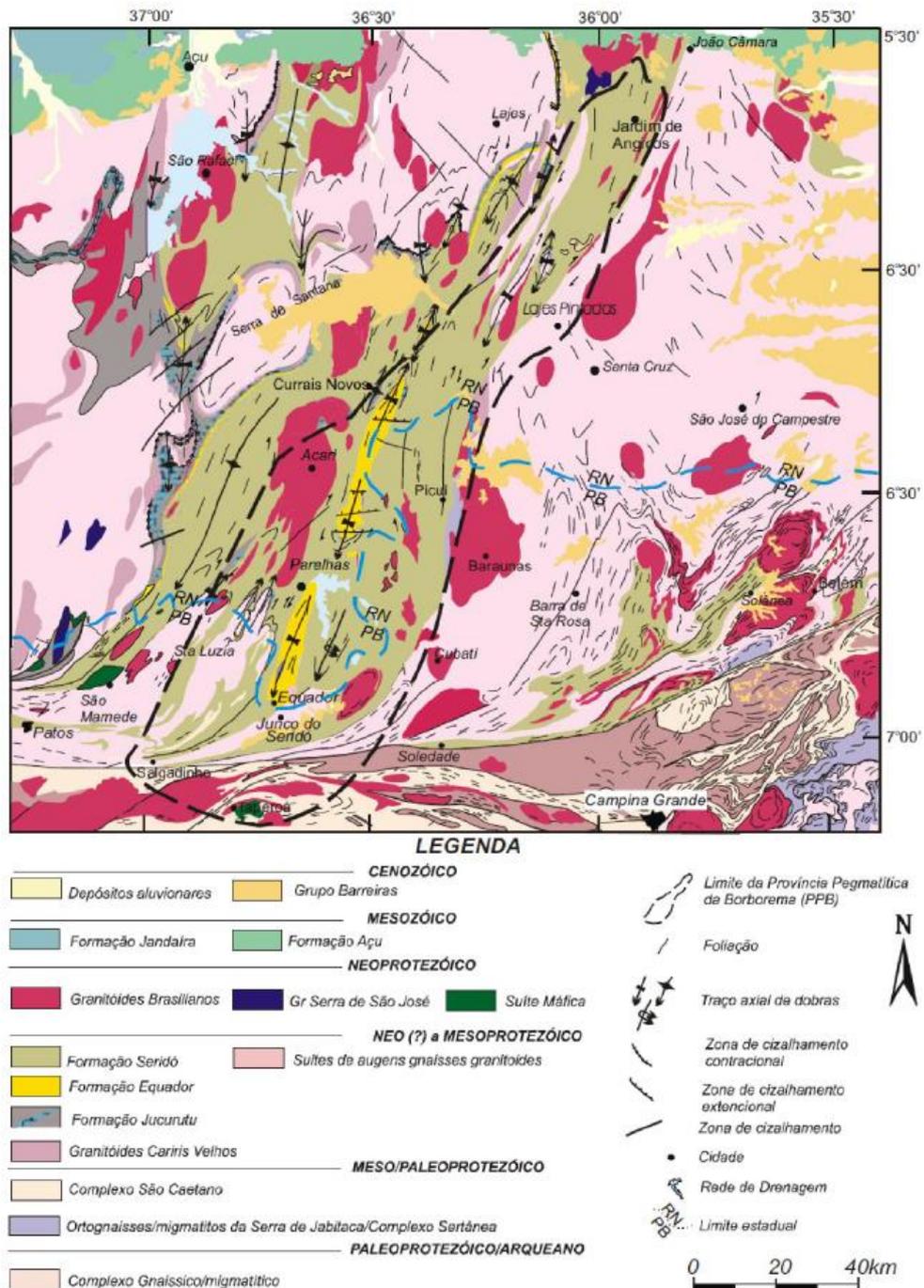
A Província Pegmatítica da Borborema (PPB), ganhou visibilidade durante a II Guerra Mundial, visto a necessidade e aumento da demanda por berilo e tantalita com o afim de suprir a necessidade de países aliados. Esta província foi originalmente denominada de “Pegmatítica da Borborema” por Scorza (1944), com o intuito de designar a principal área de ocorrência de pegmatitos mineralizados na região Nordeste do Brasil.

A PPB está localizada no Sudeste da Faixa Seridó, entre os Estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba (Figura 18). Constitui uma província metalogenética brasileira que agrupa um conjunto de pegmatitos graníticos mineralizados em Tântalo-Nióbio (Ta-Nb), Berílio (Be), Estanho (Sn) e Lítio (Li), além de outros elementos de interesse econômico; minerais industriais (feldspatos, quartzo, caulim e muscovita), rochas para fins ornamentais, gemas (Turmalina Paraíba), dentre outros minerais de interesse econômico (Soares, 2004).

Vale ressaltar que é comum encontrarmos na literatura a referida província sendo designada de Província Pegmatítica do Seridó (PPS), conforme citado por Silva (2014), em decorrência de sua distribuição ao longo da Faixa Seridó.

Os pegmatitos da PPB, além de serem portadores de minerais comuns em pegmatitos mineralizados em elementos raros (berilo, turmalina e tantalita), também podem conter em sua paragênese minerais de ocorrência restrita, como simpsonita, parabariomicrolita, alumotantita, entre outras espécies (Soares, 2004).

Figura 18 - Mapa geológico destacando a PPB.

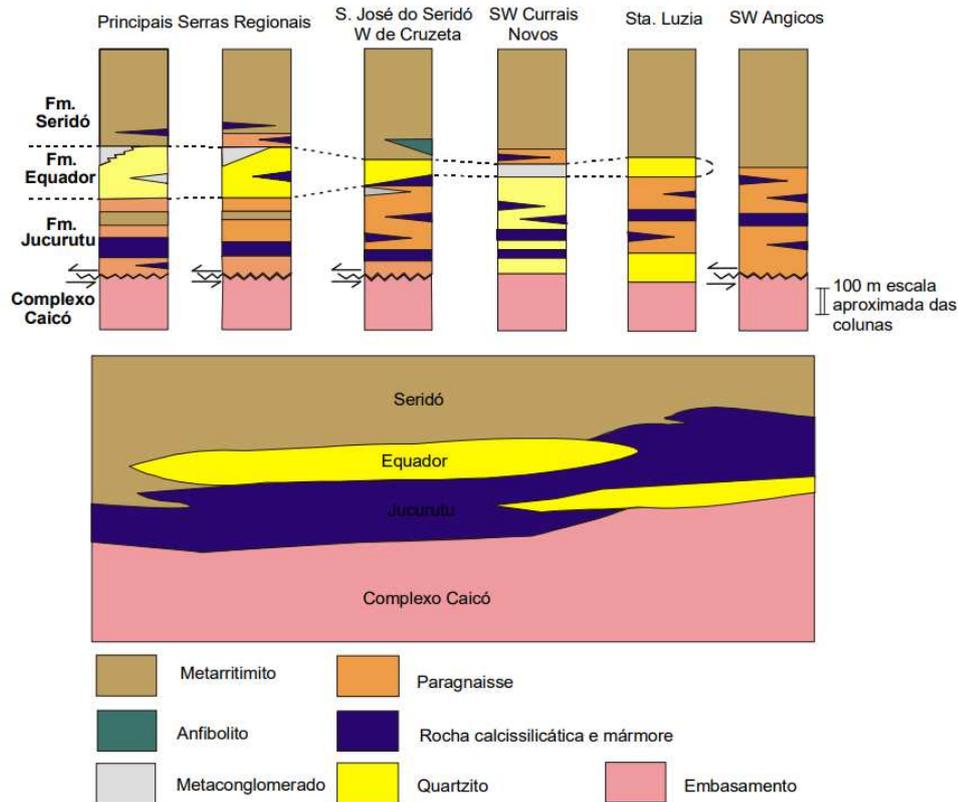


Fonte: Sales (2020).

A PPB possui como embasamento cristalino as rochas do Complexo Caicó, representadas por metassedimentos, migmatitos e ortognaissos granodioríticos, tonalíticos e graníticos, com idades arqueanas e paleoproterozóicas (Beurlen *et al.*, 2002; CPRM, 2008; Silva e Crósta, 2011).

As rochas supracrustais estão reunidas no denominado Grupo Seridó. Jardim de Sá (1994) propôs uma coluna litoestratigráfica (Figura 19), tomando como base critérios litoestratigráficos, datações geocronológicas e agrupamentos geotectônicos, integrados a modelos já propostos.

**Figura 19 - Estratigrafia do Grupo Seridó.**



Fonte: compilado de Jardim de Sá, 1994 *apud* Santos e Ferreira, 2002.

Alguns autores propuseram subdivisões para as supracrustais do Grupo Seridó. Jardim de Sá e Salim (1980), subdividiram o Grupo Seridó em três formações, descritas resumidamente, a seguir:

- Formação Jucurutu (unidade inferior, formada de paragnaises com intercalações de mármore e calciossilicáticas);
- Formação Equador (unidade intermediária constituída de quartzitos com intercalações de metaconglomerados e paragnaises), e
- Formação Seridó (unidade superior, dominante na região do Seridó, constituída de micaxistos com intercalações subordinadas de mármore e calciossilicáticas).

A maior parte dos pegmatitos mineralizados em elementos raros presentes na PPB são intrusivos em micaxistos da Formação Seridó, subordinadamente nos quartzitos e

metaconglomerados da Formação Equador, e os demais, nos gnaisses da Formação Jucurutu, nos granitos pós-tectônicos ou nos gnaisses e migmatitos paleoproterozoicos do embasamento (Beurlen *et al.*, 2009).

Dantas e Caula (1982), propuseram um modelo estratigráfico do pré-cambriano do sul do Rio Grande do Norte e da parte central da Paraíba (Figura 20), o qual apresenta as relações entre as formações, embasamento e onde os pegmatitos estão inseridos.

**Figura 20** - Estratigrafia do pré-cambriano do sul do RN e da parte centra da PB.

<b>Precambriano</b>	<b>Superior</b>	<b>Rochas filonianas:</b> sienitos, dacitos, riolitos, pegmatitos, etc.
		<b>Rochas plutônicas granulares:</b> Granitóides (granitos, granodioritos, tonalitos, monzonitos, sienitos); Gabróides (ultrabásicas serpentinizadas); Dioritóides (quartzo-dioritos).
		<b>Grupo Cachoeirinha:</b> filitos, xistos de baixo grau metamórfico, metassiltitos, calcários cristalinos e quartzitos.
	<b>Grupo Seridó</b>	<b>Formação Seridó:</b> biotita xistos granadíferos..
		<b>Formação Jucurutu:</b> gnaisses diversos, calcário cristalino, calciossilicáticas com scheelita.
		<b>Formação Equador:</b> quartzo moscovítico, quartzito feldspático, magnetita sillimanita quartzito.
	<b>Indiviso</b>	<b>Complexo Caicó</b>
<b>Complexo Gnáissico-Migmatítico:</b> gnaisses, gnaisses migmatizados, migmatitos, rochas graníticas e afins, gabros, intercalações de calcário, anfíblitos e leptinitos.		
	<b>Complexo Migmatítico-Granitoide:</b> migmatitos oftálmicos e flebiticos com núcleos graníticos indiferenciados.	

Fonte: modificado de Dantas e Caula, 1982 *apud* Moura, 2013.

Beurlen *et al.* (2014) estimam que, aproximadamente, 80% dos pegmatitos mineralizados na PPB, estão inseridos na Formação Seridó, 10% na Formação Equador e os 10% restantes, em outras litologias presentes na região.

#### 4.3.1 Pegmatitos

Pegmatitos são rochas ígneas de composição geralmente granítica distinguidas das demais rochas ígneas devido a sua textura grosseira e pela abundância de cristais com textura gráfica (intercrescimento entre quartzo e feldspato alcalino por cristalização simultânea ou por substituição) (London, 2008).

Segundo Freitas (2014), os pegmatitos são constituídos principalmente por quartzo, feldspatos (incluindo ortoclásio, microclínio e plagioclásio sódico) e micas, porém, alguns podem estar associados a minerais raros (lepidolita, espodumênio, turmalina, topázio, cassiterita, berilo, tantalita, columbita, zircão, uraninita, apatita, entre outros) em abundância com grande variedade de minerais devido aos processos que ocasionaram o enriquecimento de elementos incompatíveis.

Os pegmatitos se cristalizam a partir de massas ricas em água provenientes de magmas félsicos que são enriquecidos com voláteis e elementos incompatíveis (Pohl, 2011). Geoquimicamente, a interação entre voláteis com OH, F, B, Cl e elementos incompatíveis que frequentemente são Be, Li, Sn, Rb, Cs, Nb Ta, REE e U é de extrema importância para a formação dos pegmatitos, pois a interação entre esses elementos químicos, estando sob condições físico-químicas adequadas, favorece o desenvolvimento de uma mineralogia diversificada (Freitas, 2014).

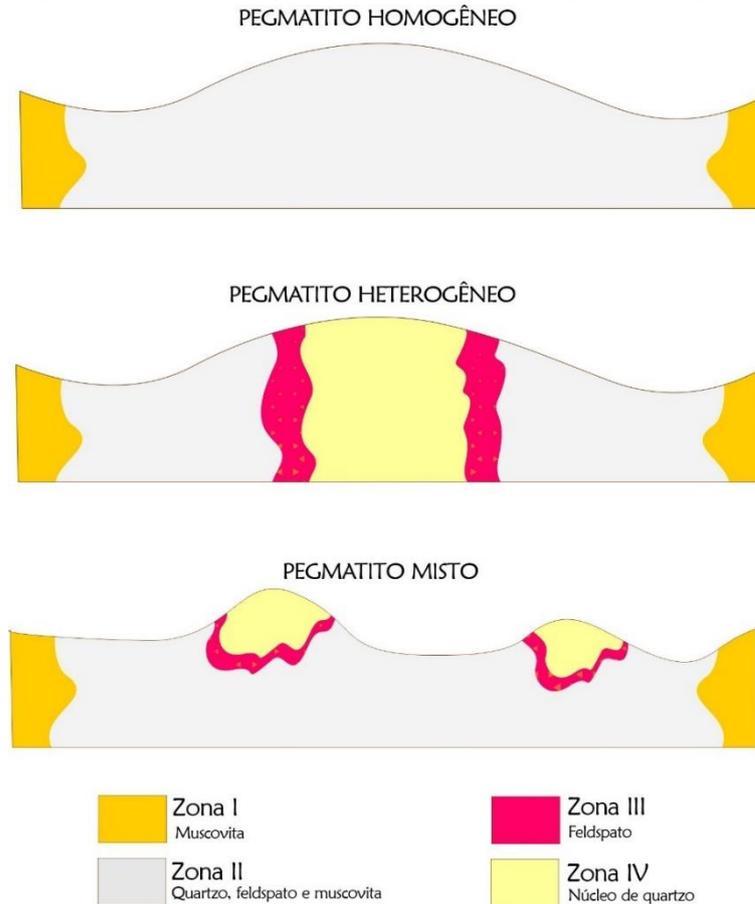
Ao longo dos últimos anos, muitas foram as classificações propostas para os pegmatitos. Cerný (1991) propôs a divisão de pegmatitos ricos em elementos raros em dois grupos (LCT e NYF), distinguidos pela composição total e assembleias de elementos traços presentes em cada um.

Os pegmatitos pertencentes ao grupo LCT possuem essa denominação atribuída devido o enriquecimento de elementos como Cs (césio), Li (lítio), Ta (tântalo), no entanto também é identificada abundância de elementos como Rb, Be, Ga, Sn, Ta > Nb, B, P e F, contidos em minerais de berilo, columbita, espodumênio, petalita, lepidolita e ambligonita etc. A ocorrência de pegmatitos do tipo LCT corresponde a corpos mais amplamente distribuídos, com zoneamento bem desenvolvido, intrudidos em xistos, gnaisses ou corpos ígneos já consolidados, geralmente associados a granitos peraluminosos.

O outro grupo de pegmatitos é denominada de NYF devido à presença abundante de Nb (nióbio), Y (ítrio) e F (flúor). Geralmente contém Nb > Ta, Y, Terras Raras, Sc, Ti, Be, Th, U e F, presentes em minerais como allanita, monazita, gadolinita, fergusonita e euxenita. Pegmatitos pertencentes a este grupo são menos frequentes e ocorrem por muitas das vezes no interior do próprio granito parental, que apresenta caráter metaluminoso a peralcalino.

Os pegmatitos presentes na PPB são classificados e comumente descritos na literatura como pertencentes a três principais tipos: homogêneos, heterogêneos e mistos (Figura 21). Esta classificação foi dada levando-se em consideração a estruturação interna, mineralogia e modo de ocorrência destes corpos rochosos (Johnston Jr. 1945a, 1945b; Rolff 1945).

**Figura 21** - Classificação estrutural e mineralógica dos pegmatitos.



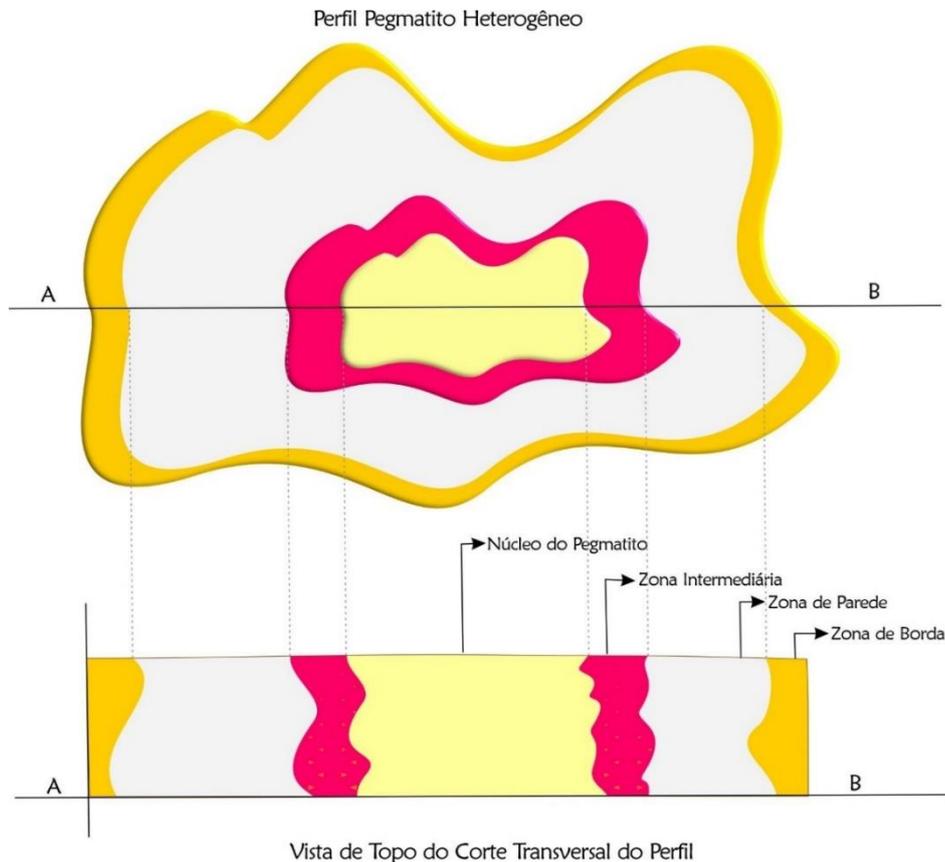
Fonte: autora (2023).

Pegmatitos homogêneos são constituídos principalmente por quartzo, feldspato, muscovita, biotita, schorlita e almandina, podendo conter berilo, columbita-tantalita e cassiterita associada, geralmente apresentam forma tabular, sendo mais abundantes que os pegmatitos heterogêneos (Sales, 2020).

O termo pegmatito misto foi proposto inicialmente por Rolff (1945), para definir pegmatitos intermediários entre os do tipo homogêneos e heterogêneos. Geralmente ocorrem em pequeno número. Estes pegmatitos podem ainda ser divididos em litiníferos, tantalíferos, cupríferos e gluciníferos (berilíferos), ocorrem em pequeno número, possuem textura equigranular (exceto em faixas de mega crescimento de cristais) e geralmente são rodeados por massas de quartzo.

De modo geral, pegmatitos heterogêneos são divididos em quatro zonas distintas (Figura 22), são economicamente mais importantes que os pegmatitos homogêneos e podem apresentar forma lenticular.

**Figura 22** - Perfil e vista esquemática mostrando zonas de um pegmatito heterogêneo.



Fonte: autora (2023).

O zoneamento do pegmatito heterogêneo pode indicar a presença de determinadas mineralizações e configura-se como uma importante informação tratando-se da busca por minerais de interesse econômico. Uma descrição simplificada da mineralogia predominante nas zonas de um pegmatito de acordo com Pohl (2011) e Bradley *et al.* (2017) é apresentada no Quadro 4.

**Quadro 4** - Características das zonas internas de um pegmatito

ZONAS	CARACTERÍSTICAS
<b>I) Zona de Borda</b>	Zona aplítica de granulação muitas vezes fina; Geralmente composta por camadas centimétricas de muscovita;
<b>II) Zona de Parede</b>	Grosseiramente cristalina, pode conter berilo explorável; Possui minerais essenciais como quartzo, feldspatos e muscovita;
<b>III) Zona Intermediária</b>	Zona que contém a maioria dos minerais valiosos, como cassiterita, columbita, espodumênio e berilo;
<b>IV) Núcleo do Pegmatito</b>	Geralmente é constituído de uma massa sólida de quartzo, mas pode conter feldspato, turmalina e espodumênio.

Fonte: Modificado de Pohl (2011); Bradley *et al.*, 2017 *apud* Santos *et al.*, 2020.

### 4.3.2 Ocorrências de Cobre na PPB

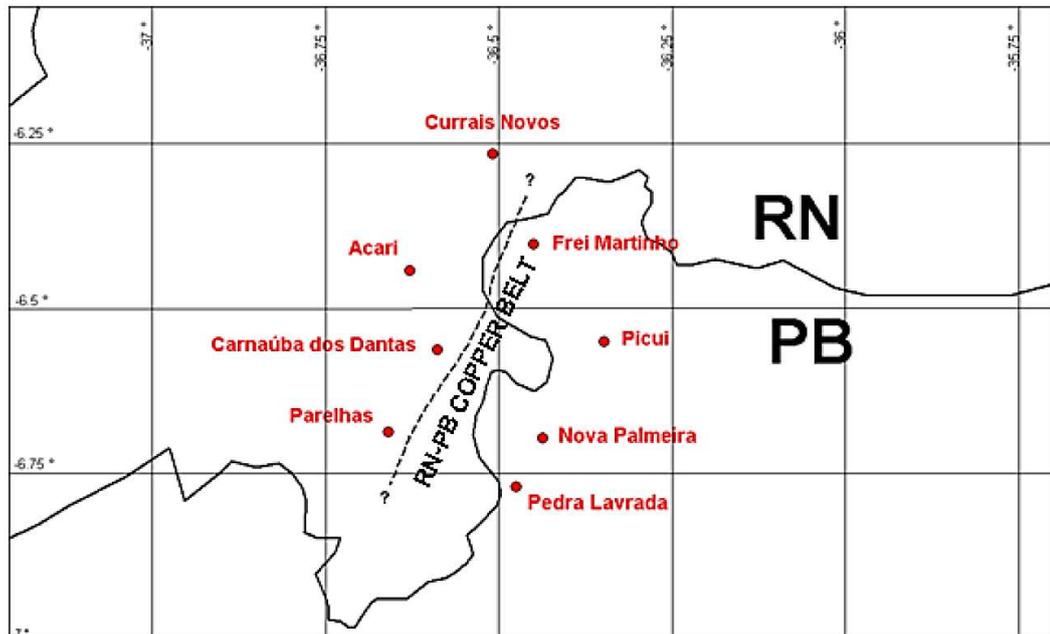
Poucas são as informações relativas à ocorrência de cobre na PPB. No levantamento de estado da arte, constam alguns trabalhos exploratórios, como o relatório do geólogo francês Jules Destrod (Destrod 1899, *apud* Oliveira, 1981), no qual é citada a presença de cobre no Distrito de Picuí.

Em trabalhos de expedição pelo Seridó realizadas pelo alemão Luetzelburg (1923), foram feitas observações sobre a presença de cobre, estanho e chumbo encontrados nas regiões de Picuí (PB) e Pedra Lavra (PB). Almeida (1941), cita a ocorrência de cobre em sulfetos (calcopirita, bornita, calcosina), em carbonatos (malaquita), anfíbolitos, pegmatitos e veios de quartzo na região de Pedra Branca (PB), por sua vez os autores Rolff (1946) e Chaves (1947) também citam ocorrências cupríferas na região de Pedra Branca (PB), no entanto, nenhum desses autores descreve às características das ocorrências ou informações mais detalhadas em seus estudos.

Cavalcanti Neto (2008), reconheceu a partir de trabalho oriundo de intenso programa de prospecção, pesquisa regional e de detalhe executado em conjunto com várias empresas de mineração, uma extensa faixa mineralizada em cobre e outros metais associados (W, Mo, Au, Ag, Bi), denominada pelo próprio autor como “Faixa Cuprífera do RN-PB”, com direção N-S, a qual ocorre entre os limites das formações Equador e Seridó, ocupando uma extensão não contínua de aproximadamente 54 km (Figura 23).

A faixa se estende desde a região de Apertados (em Currais Novos/RN) até sul da localidade Trigueiro (em Parelhas/RN). A Faixa perpassa os Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, no entanto não foi devidamente estudada em decorrência da ausência de trabalhos mais aprofundados. Segundo Cavalcanti (2008), tanto os *skarns*, quanto as rochas metamáficas são enriquecidas em ocorrências de cobre.

**Figura 23** - Localização da Faixa Cuprífera do RN-PB.



Fonte: Cavalcanti Neto (2008).

Silva (2014), cita pequenos depósitos de cobre na parte setentrional da Província Borborema, o qual pode ser distinguido em três tipos genéticos de mineralização: estratiforme metassedimentar, estratiforme vulcanogênico-metassomático e hidrotermal.

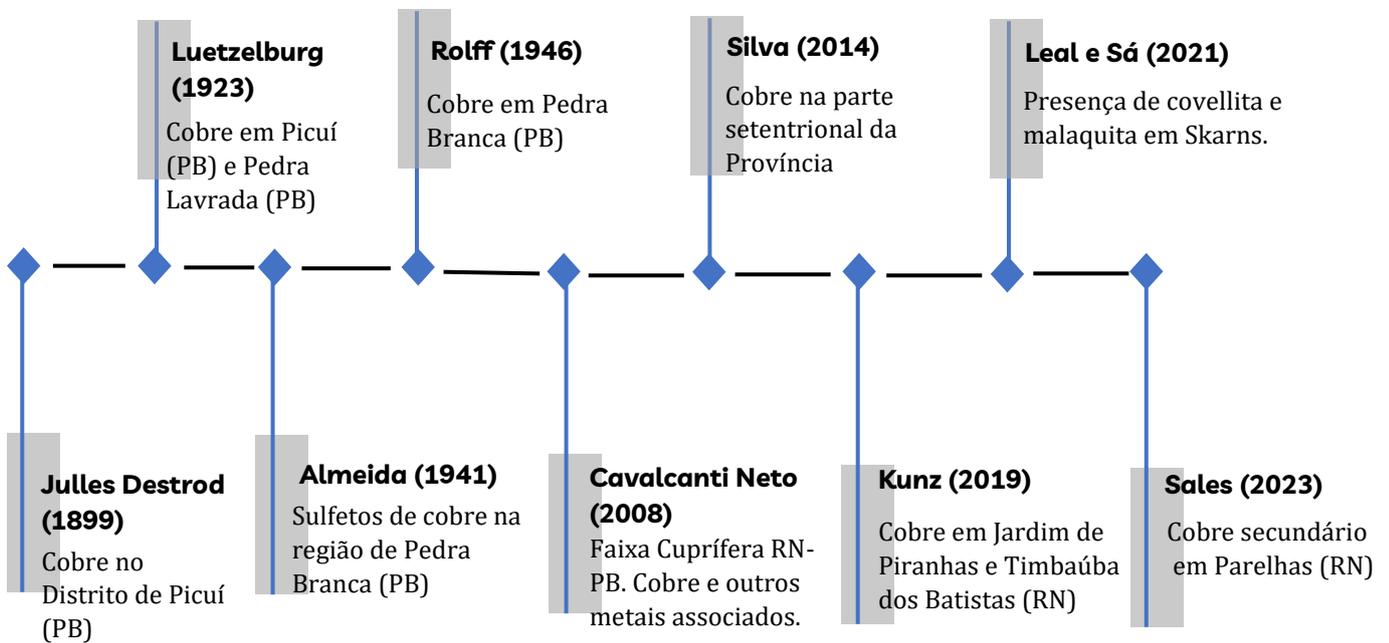
Oliveira *et al.* (2019), realizaram trabalhos de caracterização preliminar, entre os municípios de Nova Palmeira (PB) e Parelhas (RN), os autores identificaram algumas ocorrências de cobre na região, sendo destacado a presença de minerais secundários de cobre (malaquita, azurita e crisocola), resultantes de processos de alteração supergênica.

Kunz (2019), realizou estudos em uma área inserida dentro da faixa cuprífera (entre os municípios de Jardim de Piranhas e Timbaúba dos Batistas-RN). O autor relatou em seu trabalho não encontrar evidências de cobre na área mapeada, apenas cobre em rejeitos de uma cava garimpada. O autor atribuiu a influência de zonas de cisalhamento como estruturas hospedeiras de minerais contendo cobre, ouro e scheelita na Faixa Seridó.

Leal e Sá (2021), realizaram estudos na Faixa Cuprífera RN-PB, e destacaram que teores consideráveis de cobre estavam presentes em *skarns* mineralizados que foram formados pelo metassomatismo entre fluidos magmáticos em contato com rochas que perfazem a Faixa Seridó. Os autores denotaram a predominância de mineralizações cupríferas presentes na forma de covelita proveniente da alteração da pirita e malaquita provenientes da alteração da covelita.

Trabalhos mais recentes, como o de Sales (2023), reconheceu ocorrências de cobre secundário, principalmente na forma de malaquita, no pegmatito Mufumbo-Trigueiro, localizado em Parelhas (RN). As ocorrências foram encontradas em rochas calciossilicáticas intercaladas entre quartzitos da Formação Equador e os micaxistos da Formação Seridó. Segundo o autor, os fluidos pegmatíticos foram responsáveis pela remobilização tanto do cobre, como de urânio contido em amostras de uraninita, para o interior do corpo pegmatítico e sua posterior precipitação. A figura 24 a seguir, esquematiza de maneira resumida as ocorrências cupríferas citadas em trabalhos de outros autores que as relacionam com a PPB.

**Figura 24** - Linha de tempo com trabalhos que citam ocorrência de cobre na PPB.



Fonte: autora (2023).

Mesmo sendo citada a presença de cobre na PPB, os autores e trabalhos relacionados apresentam apenas informações superficiais sobre as ocorrências, maiores detalhes e estudos voltados para sua gênese, modo de ocorrência e descrição sob ponto de vista microscópico ainda não foram publicados em trabalhos relacionados ao tema.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O estudo do processo gerador de um depósito geralmente é iniciado a partir do exame da situação geológica regional e, posteriormente, de maneira local das unidades litoestratigráficas que compõem a área, além do estudo do ponto de vista macroscópico e microscópico de amostras coletadas em campo.

Nesta seção, serão apresentados e discutidos resultados desta pesquisa que contemplam produtos obtidos por meio de tratamento de dados geofísicos em escala regional (mapas magnetométricos e gamaespectrométricos), mapa geológico local em escala para trabalhos de pesquisa de carácter regional (1:250.000), sendo evidenciadas as unidades litoestratigráficas e localização dos afloramentos visitados, descrição de algumas das amostras coletadas em campo, sendo abordadas características composicionais, texturais e sua correlação com os pontos onde foram encontradas, além dos resultados e discussão das caracterizações por meio das técnicas de FRX, DRX e MEV.

### **5.1 Mapeamento Aerogeofísico**

Além da caracterização geológica da região, esta pesquisa também contemplou o estudo de mapas obtidos através do tratamento de dados e geração de produtos aerogeofísicos, oriundos de levantamentos realizados e disponibilizados pela CPRM. Esta etapa foi importante por permitir a comparação das áreas anômalas com os afloramentos visitados na etapa de campo.

Para todos os mapas foi estabelecido um polígono que englobou a área objetivada neste estudo e suas proximidades. De posse dos dados dos aerolevantamentos, executou-se o recorte para o polígono estabelecido e a projeção para o sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 24 Sul.

Para fins de comparação, somente os pontos onde foram encontradas ocorrências de cobre foram projetados sobre os mapas, bem como os citados no estudo de Cavalcanti Neto (2008), referente a faixa cuprífera RN-PB. As imagens processadas com os dados de magnetometria e gamaespectrometria serão mostradas ao longo desta seção, como também uma descrição simplificada de cada mapa.

#### **5.1.1 Mapas Magnetométricos**

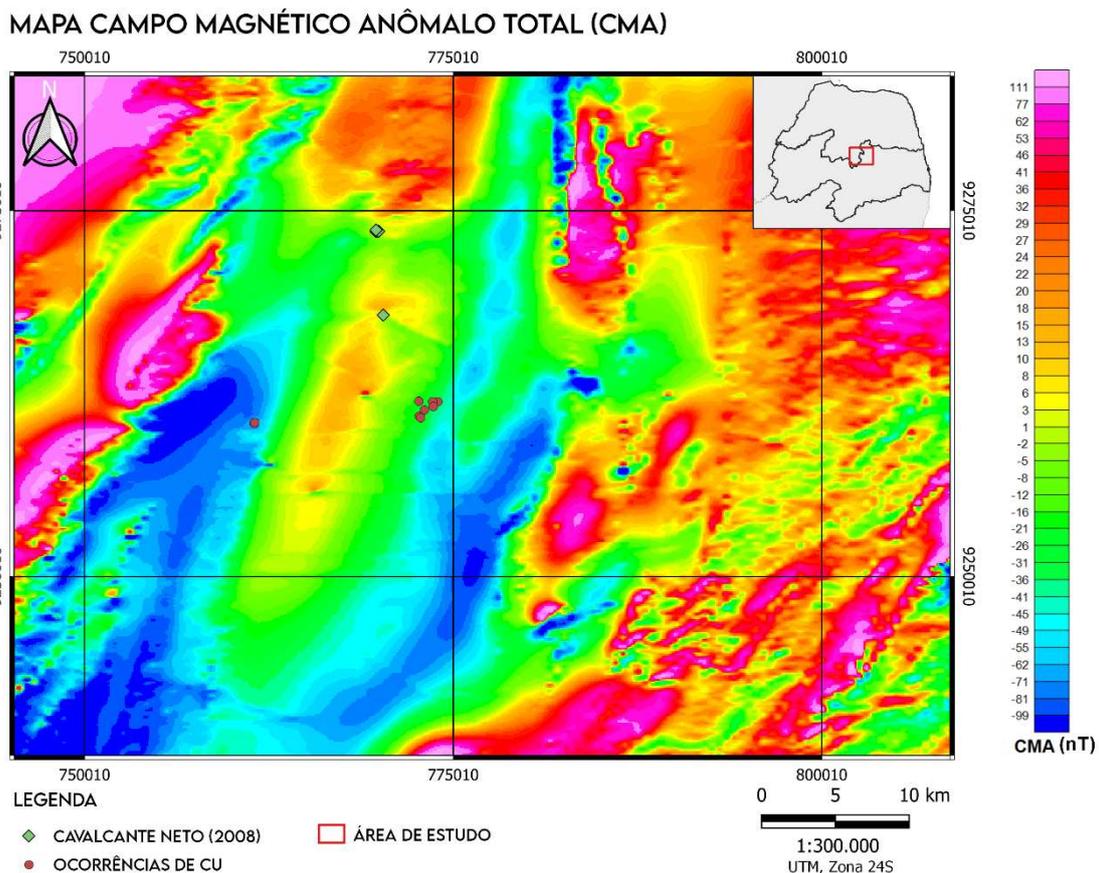
Os resultados obtidos por meio do tratamento de dados magnetométricos, e conforme descrito detalhamento na metodologia, foram os mapas: Campo Magnético Anômalo Total

(CMA), Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Inclinação do Sinal Analítico (ISA). O objetivo consistiu em realçar estruturas ou anomalias magnéticas que ocorrem dentro da área de estudo próximos aos pontos onde foram identificadas ocorrências de cobre.

### 5.1.1.1 Campo Magnético Anômalo Total (CMA)

Mapas de Campo Magnético Anômalo Total (CMA), representam os produtos primordiais em levantamentos aeromagnetométricos. Estes mapas são obtidos a partir da remoção do campo magnético terrestre do campo magnético total medido no aerolevanteamento. O CMA representa anomalias magnéticas localizadas em superfície e subsuperfície, podendo estar localizadas a profundidades mais rasas ou profundas, conforme mostrado (Figura 25).

**Figura 25** - Mapa do campo Magnético Anômalo Total (CMA) da área de estudo.



Fonte: autora a partir de dados da CPRM (2023).

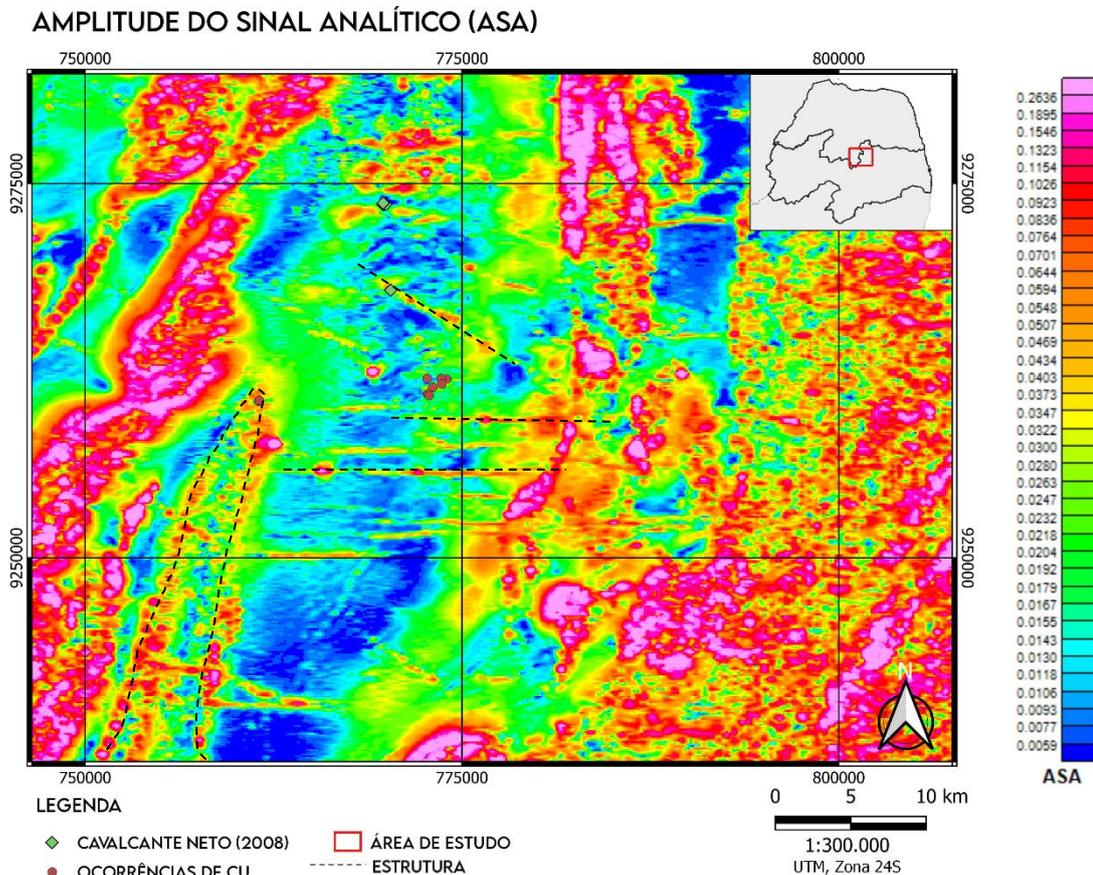
Por meio do processamento das leituras da intensidade do campo magnético, obtidas nos aerolevanteamentos, foi gerado o mapa com valores do campo Magnético Anômalo (CMA) para a área de estudo (Figura 25). Vale ressaltar que os dados de CMA serviram de base para o processamento e geração dos mapas magnéticos posteriores.

O mapa CMA apresentado anteriormente, apresenta prolongamentos localizados principalmente nas porções SE e NW com consideráveis anomalias magnéticas nessas regiões, representando assim locais que apresentam altos valores de susceptibilidade magnética (cores em vermelho e magenta). Os pontos projetados sobre o mapa que correspondem a ocorrências cupríferas, estão localizados em porções que apresentam valores médios de susceptibilidade magnética (verde), com esta tendência variando de SW-NE.

### 5.1.1.2 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

O sinal analítico é formado por uma combinação de gradientes horizontais e verticais de uma anomalia magnética, além de direcionar para os limites do corpo magnético, de determinados parâmetros geométricos, como localização de limites (geológicos e estruturais), profundidades dos corpos, com o realce dessas estruturas (anomalias). O mapa ASA (Figura 26) representa como sua principal característica, o posicionamento das anomalias magnéticas resultantes imediatamente acima dos limites da estrutura (Nabighian *et al.*, 2005 *apud* Pereira, 2014).

**Figura 26** - Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA).



Fonte: autora a partir de dados da CPRM (2023).

O mapa ASA apresentado anteriormente (Figura 26), foi obtido a partir do mapa de Campo Magnético Anômalo (CMA). Observou-se que marcantes anomalias magnéticas estão concentradas na região sudeste e leste do mapa. Na porção sudoeste, foi possível observar orientação de uma grande estrutura e delineá-la, além de alguns lineamentos com orientação preferencial L-W.

O mapa de Amplitude do Sinal Analítico enfatizou anomalias mais rasas e atenuou as mais profundas. Observa-se altos magnéticos em quase todo o mapa circundados por áreas com valores médios, sendo resultantes do posicionamento das anomalias imediatamente acima dos limites estruturais.

Observou-se que nos afloramentos visitados e representados no mapa (pontos em vermelho), observou-se que estão localizados em locais com valores de susceptibilidade magnética médios, e lateralmente, valores baixos. Em um dos afloramentos descritos (Pegmatito Capoeira), este padrão é diferente, pois é observado a localização do ponto em uma região com alto magnético (vermelho), podendo estar relacionado com a presença de ocorrências deste pegmatito.

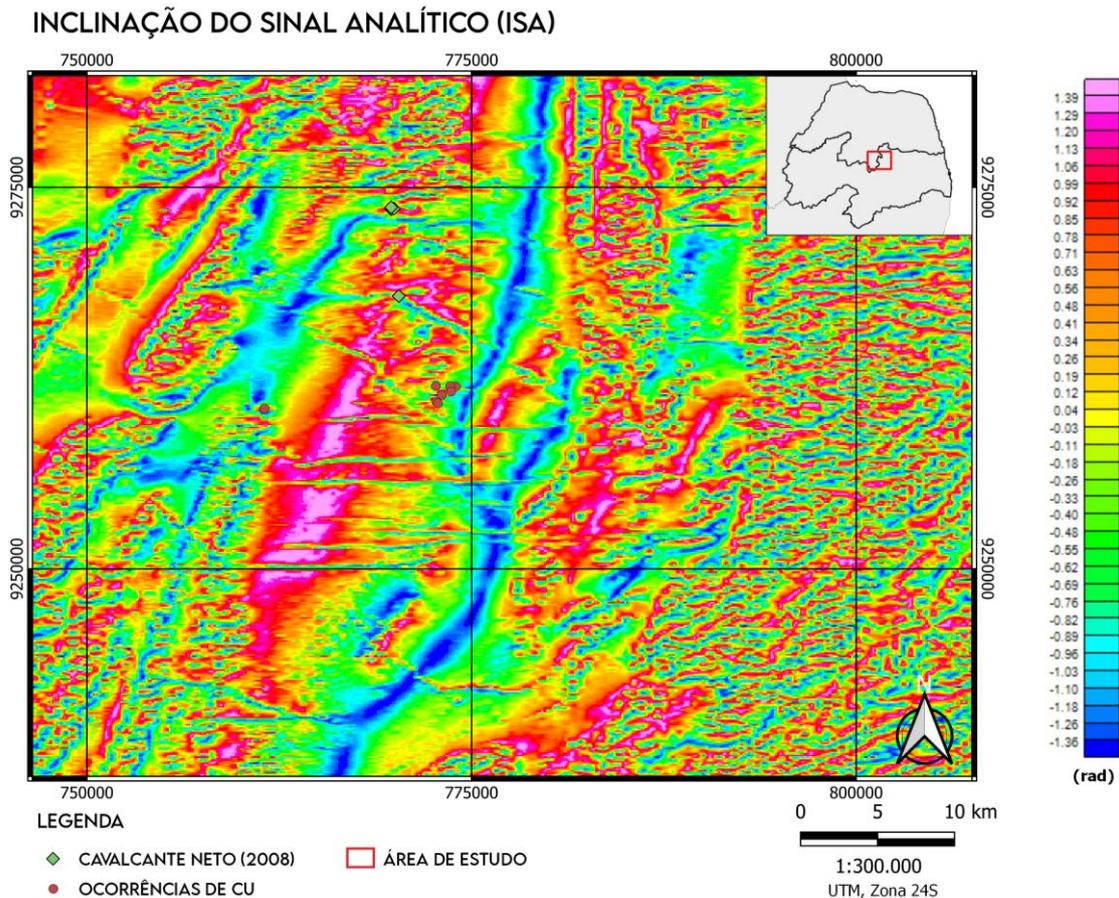
### **5.1.1.3 Inclinação do Sinal Analítico (ISA)**

Para análise dos lineamentos magnéticos foi utilizado o filtro de realce (*Tilt Derivative*), também chamado de Inclinação do Sinal Analítico (ISA). Os resultados correspondem ao mapa ISA (Figura 27), utilizado para detectar fontes magnéticas e fornecer informações sobre suas extensões horizontais, sendo útil no mapeamento de estruturas rasas.

A diferença entre os mapas ASA e ISA é que a inclinação do sinal analítico investiga a fase do sinal, que tende a aparecer constante em uma mesma estrutura, enquanto a amplitude do sinal analítico pode apresentar variações, dificultando assim sua interpretação (Susin, 2019).

No mapa ISA, é notável a predominância de feições lineares em várias direções, com destaque para a estrutura na porção central do mapa, de direção aproximadamente N-S, em tom azulado. Próximo aos pontos projetados, observam-se lineamentos secundários, em direção L-W e NW-SE. A interpretação das estruturas lineares pode ser melhorada ao serem “traçadas” as feições e estruturas lineares representadas no mapa ISA.

**Figura 27 - Mapa de Inclinação do Sinal Analítico (ISA).**



Fonte: autora a partir de dados da CPRM (2023).

### 5.1.2 Mapas Gamaespectrométricos

Os mapas oriundos dos dados obtidos através da aerogamaespectrometria podem exibir respostas da distribuição dos radioelementos e sua contribuição pode acrescentar informações importantes sobre a composição das rochas, assim como regiões com maior ou menor concentração de um elemento.

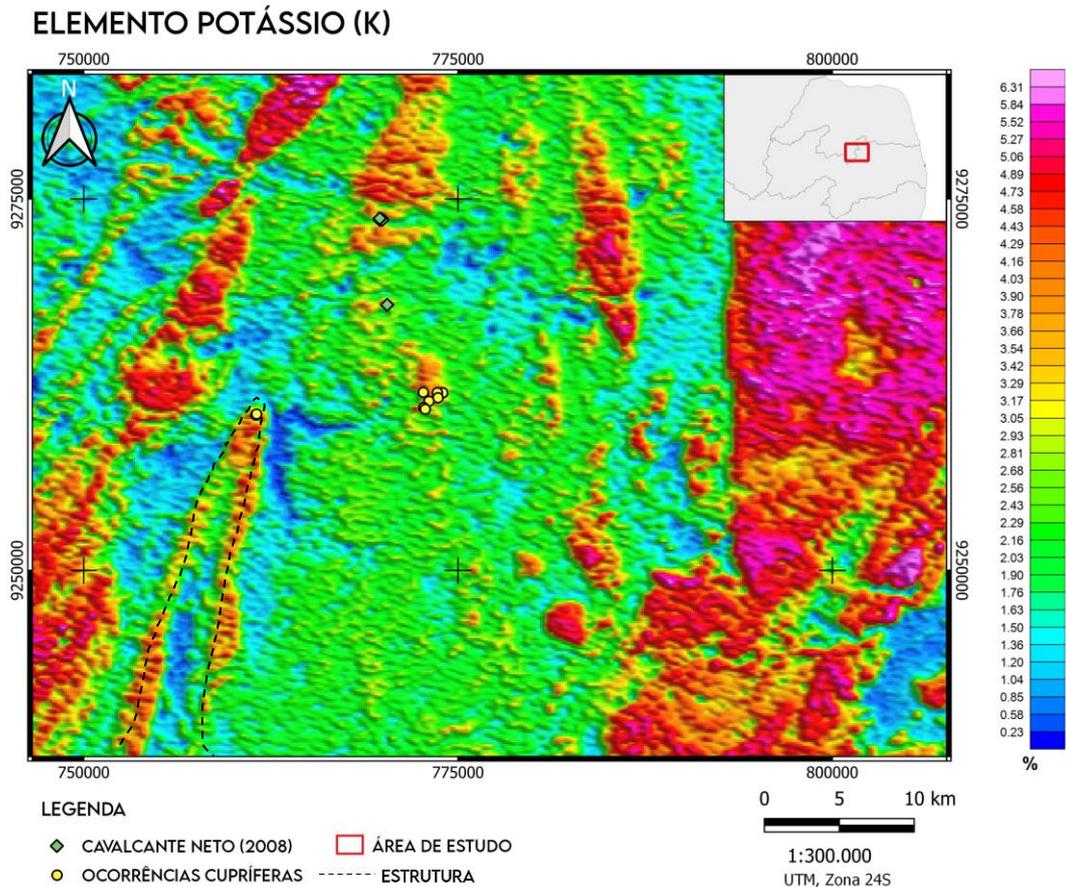
Após o pré-processamento e interpolação dos dados, foram gerados, inicialmente, mapas individuais para os canais de Urânio (eU), de Tório (eTh) e Potássio (K). a partir da gridagem foi possível gerar o mapa de contagem total dos elementos ou composição ternária RGB (*Red, Green, Blue*), conforme apresentados a seguir.

#### 5.1.2.1 Elemento Potássio (K)

O mapa de potássio (Figura 28), apresenta variações significativas deste elemento concentradas na porção leste, ou quando comparadas com as respostas desse elemento na região

oeste. Segundo Ribeiro (2013), ocorrências de potássio, em sua maioria, podem estar associados a feldspatos potássicos, abundantes na região estudada.

**Figura 28** - Mapa de concentração do elemento Potássio (K).



Fonte: autora a partir de dados da CPRM (2023).

No mapa são observados (na porção central), teores baixos de concentração do elemento potássio, no entanto, a porção localizada nos setores leste e nordeste exibe valores consideráveis (representado por tons em vermelho e magenta). No mapa, observa-se no setor sudoeste, a delimitação da estrutura (dobra) de direção NE-SW, pertencente a Formação Equador, com relação aos litotipos da Formação Seridó, um dos pontos onde foram encontradas evidências de cobre está localizado na crista da dobra, conforme delimitado na figura anterior.

Mesmo o potássio sendo um elemento abundante na crosta continental e, portanto, estando presente em diversas rochas, no mapa apresentado anteriormente é observado que a região apresenta valores intermediários deste elemento. No entanto, nos pontos onde foram identificadas mineralizações de cobre, os teores de K exibem valores intermediários, de maneira sutil pode-se delimitar concentrações deste elemento associado com ocorrências cupríferas.

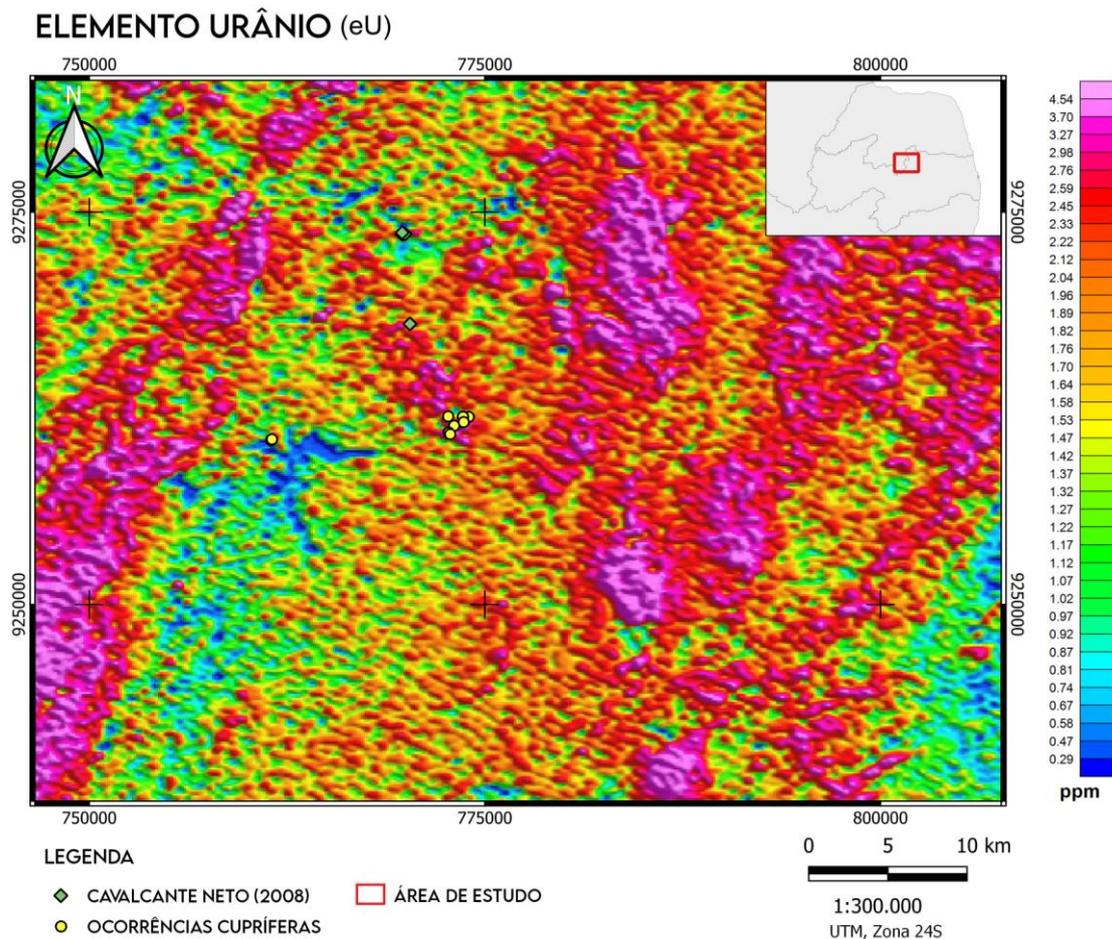
Vale destacar que a presença da concentração do elemento K em pegmatitos pode ser dada em virtude de sua presença em micas, como a flogopita ( $\text{KMg}_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ), biotita

(mica que contém K, Fe e Mg) e muscovita ( $\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$ ), ambas abundantes nos pegmatitos da PPB.

### 5.1.2.2 Elemento Urânio (eU)

O Urânio se comporta de maneira diferente do elemento K, pois geralmente está contido nos minerais acessórios que são estáveis durante o intemperismo (Conego Junior, 2019). O mapa da concentração do elemento Urânio (eU) (Figura 29), exibe valores que refletem fortes anomalias deste elemento em quase toda a região do mapa e de maneira dispersa, não ficando bem definidas algumas estruturas, isto é reflexo de sua alta mobilidade e retenção nos solos. Vale destacar que os valores são apresentados em ppm (partes por milhão), devido a sua menor abundância na crosta terrestre.

Figura 29 - Mapa de concentração do elemento Urânio (eU).



Fonte: autora a partir de dados da CPRM (2023).

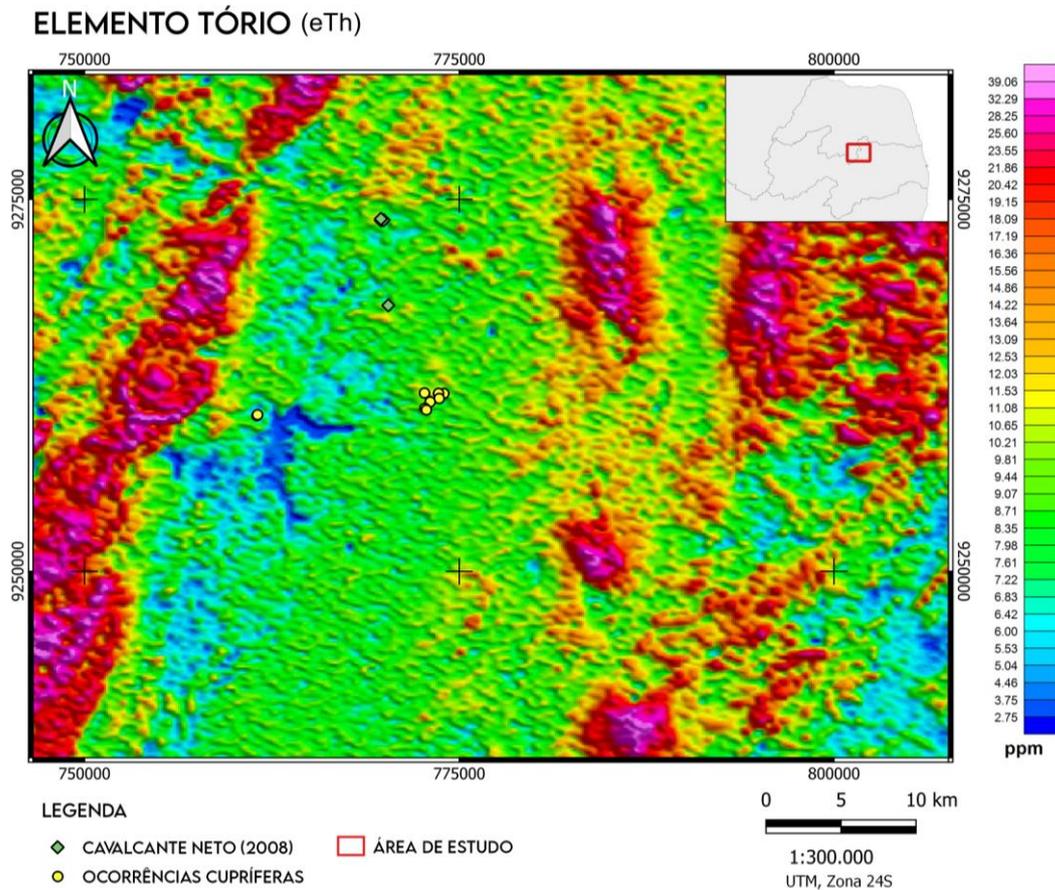
As altas concentrações deste radioelemento, em regiões específicas podem ser dadas pela sua alta mobilidade, pois uma vez retirado de suas respectivas rochas fontes durante o intemperismo, este elemento pode ser facilmente absorvido por argilominerais e co-

precipitados com óxidos de ferro nos solos (Wilford *et al.*, 1997 *apud* Ribeiro, 2013). A região onde estão plotados os pontos das ocorrências de Cu, apresentam valores variando de médio a alto de concentração do equivalente Urânio, o que pode ser resultado da presença deste elemento em pegmatitos.

### 5.1.2.3 Elemento Tório (eTh)

O Tório é um elemento que apresenta pouca mobilidade geoquímica. Na Figura 30, é observada baixas concentrações deste elemento. No entanto, seus valores (em ppm) foram mais consideráveis em alguns locais, quando comparados com os do elemento Urânio.

**Figura 30 - Mapa de concentração do elemento Tório (eTh)**



Fonte: autora a partir de dados da CPRM (2023).

Algumas regiões apresentam expressivas concentrações do radioelemento Tório, como por exemplo a feição linear na parte oeste do mapa, além das porções localizadas na região NE, assim como também pode ser visto no mapa eU, assim como o urânio, o tório também pode se fixar em argilas coloidais e óxidos de ferro.

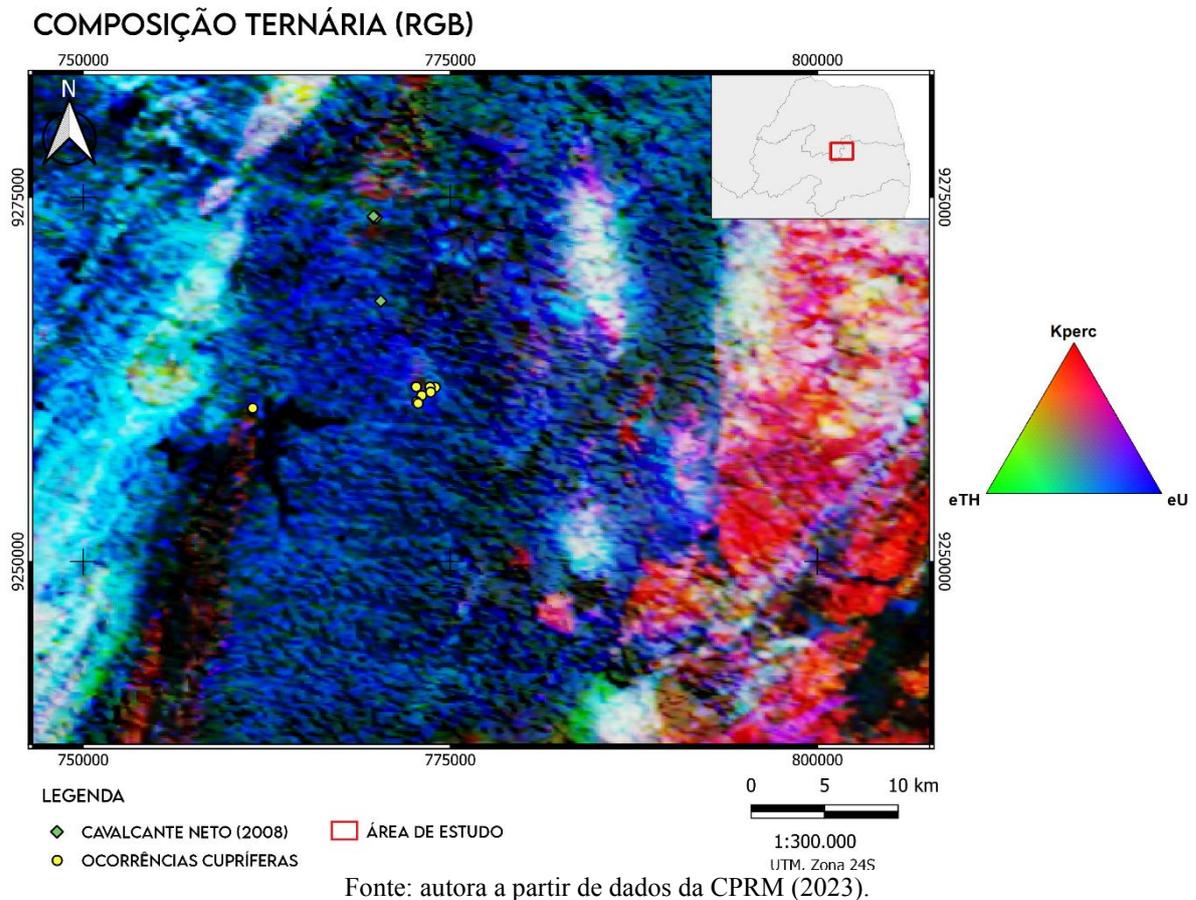
Nas áreas onde estão plotados os pontos relativos a cobre, é observado que em ambas as concentrações de Tório são intermediárias (verde), seguindo o mesmo padrão para as áreas circunvizinhas. Estudos desenvolvidos por Dickson e Scott (1997), revelaram que o teor médio de U e Th nas rochas ígneas são altos e tendem a aumentar em função do teor de sílica, ou seja, rochas félsicas possuem maior concentração desses radioelementos. Os autores ainda chamam atenção para o fato de que em pegmatitos, geralmente são encontrados altos teores de K e menores quantidades de tório e urânio, dado pela ocupação tardia desses elementos em função dos tardios estágios de colocação ígnea dos pegmatitos, o que pode não influenciar no aerolevanteamento e não ser notado nos mapas.

#### **5.1.2.4 Mapa Ternário (RGB)**

O mapa Ternário pode ser utilizado na distinção de unidades geológicas e auxílio no mapeamento geológico de estruturas em áreas aflorantes. Com os mapas de K (%), eU (ppm) e eTh (ppm) foi possível gerar o mapa ternário com a composição RGB (*Red, Green, Blue*) (Figura 31). Os dados gamaespectrométricos foram integrados com informações geográficas (Modelo Digital do Terreno - MDT), para melhor visualização da distribuição dos radioelementos. Para fins de reconhecimento, ao canal de Potássio é atribuída o tom vermelho, ao canal de Tório a cor verde e ao canal de Urânio a cor azul.

A predominância do tom azulado no mapa de composição ternária, pode ser dada devido o enriquecimento de urânio nos micaxistos da Formação Seridó (litotipo predominante na área delimitada). Os tons avermelhados na porção sudeste subindo para nordeste, indicam uma maior concentração de potássio, podendo estar associados a anomalias deste elemento em litotipos do complexo Serrinha – Pedro Velho, localizado na área de acordo com o mapa litológico da região que engloba o polígono.

**Figura 31 - Mapa de composição Ternária (RGB).**



Geralmente, as cores escuras representam baixos teores de K, eU e eTh, estando associados, neste caso, a rochas da formação Equador, bem delimitadas no mapa geológico da área. As tonalidades esbranquiçadas são referentes ao enriquecimento dos três elementos, associados geralmente a intrusões graníticas.

A integração de ferramentas de sensoriamento remoto, aliada a prospecção mineral, pode ser eficiente na identificação de alvos minerais exploratórios. As descrições dos mapas foram realizadas a fim de complementar o entendimento do arcabouço geológico e estrutural da região e de possíveis associações com anomalias onde foram identificadas mineralizações de cobre.

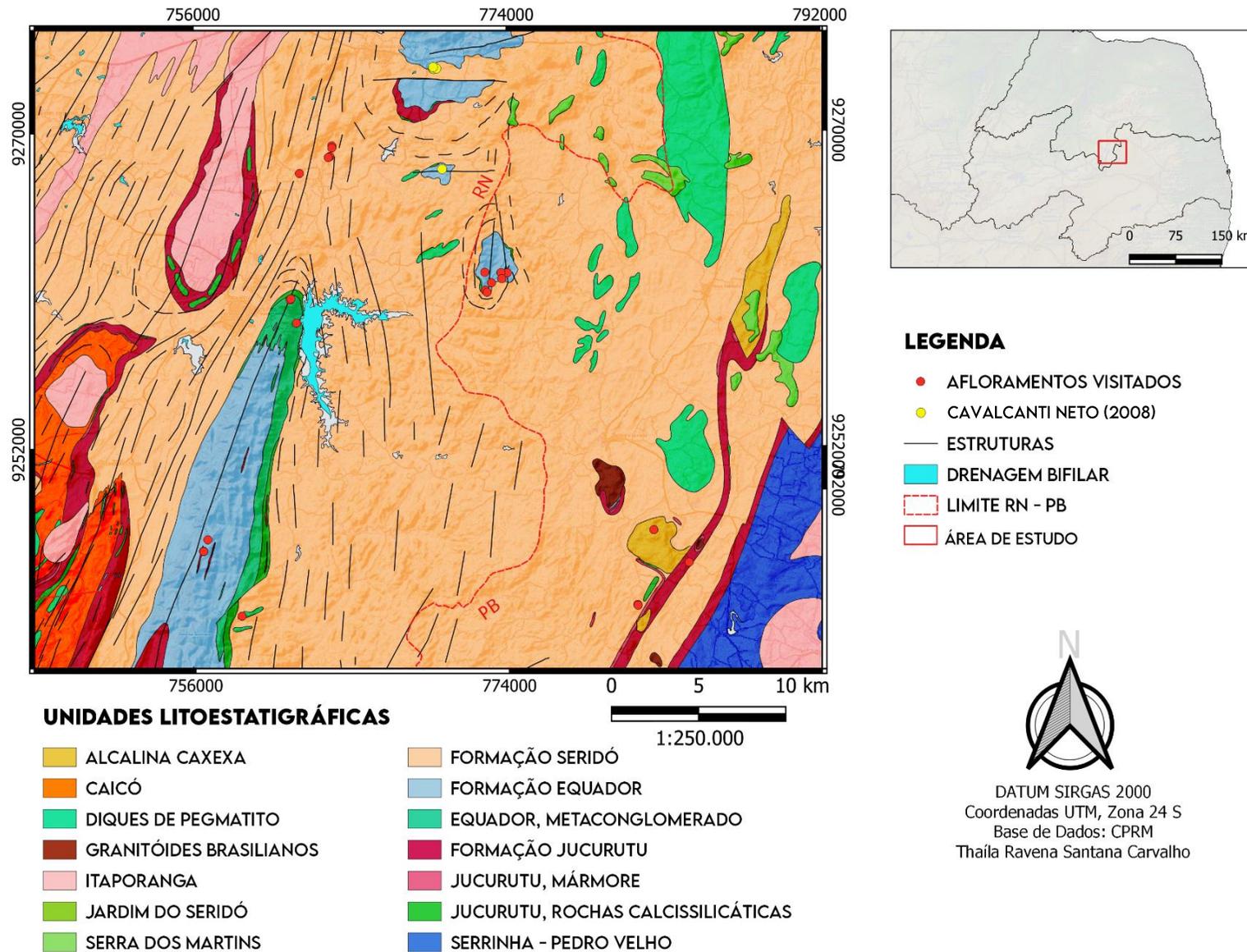
## 5.2 Caracterização Geológica

A área de estudo está localizada na porção Nordeste do Brasil, situada no extremo sul da mesorregião Central do Estado do Rio Grande do Norte e porção extremo Centro-Norte do

Estado da Paraíba. Geologicamente, a região está inserida na porção do extremo NE da Província Pegmatítica da Borborema.

As principais unidades litoestratigráficas são apresentadas no Mapa Geológico (Figura 32), em escala de 1:250.000, resultado da integração de informações geológicas da Folha Jardim do Seridó SB 24. Z-B-V e afloramentos visitados na etapa de campo. Com destaque no mapa geológico, é observado uma série de Faixas de Dobramentos (com direção NE-SW) e a sequência de rochas supracrustais que constituem o Grupo Seridó, abrangendo as Formações: Seridó, Equador e Jucurutu, onde a maioria das ocorrências cupríferas foram identificadas em campo, além das ocorrências citadas no trabalho de Cavalcanti Neto (2008) referentes a faixa cuprífera RN-PB.

Figura 32 - Arcabouço geológico da área estudada.



Fonte: autora a partir dos dados Folha Jardim do Seridó SB 24. Z-B-V (2023).

A série de lineamentos, faixas de dobramentos e arcabouço tectônico que estão presentes na região são creditados ao ciclo Brasileiro, um importante ciclo orogênico que afetou a área como também todo o domínio Rio Piranhas-Seridó (CPRM, 2007).

É notável a diversidade de litologias presentes na área, como por exemplo os sedimentos terciários da Formação Serra dos Martins (porção Leste e Nordeste do mapa geológico), que faz parte da cobertura Fanerozóica da região. Esta formação é representada por arenitos grossos e conglomeráticos, muitas vezes ferruginosos, que ocupam o topo da coluna estratigráfica da região. Destaca-se também algumas intrusões graníticas como a suíte intrusiva de Itaporanga, compreendida por rochas plutônicas de granulação grossa a média (CPRM, 2007).

Foram identificados em campo, algumas das unidades litoestratigráficas apresentadas no mapa geológico (Figura 32), com destaque para as do Grupo Seridó que contempla as formações: Seridó, Equador e Jucurutu. Apesar da área estudada apresentar grande diversidade litológica, será dada ênfase às rochas do grupo Seridó, devido a sua correlação com as amostras coletadas em campo e por abrangerem grande parte da área em estudo.

### 5.2.1 Litotipos do Grupo Seridó

As rochas supracrustais que constituem o grupo Seridó ocorrem em maior predominância na área de estudo, este grupo é formado basicamente por três unidades (Jardim de Sá e Salim, 1980), sendo elas, da base para o topo:

- **Formação Jucurutu:** constituída por paragneisses quartzo-feldspáticos, com biotita, apresentando óxidos de ferro, muscovita, epidoto, apatita e zircão como minerais acessórios. Subordinadamente ocorrem intercalações de anfíbolitos, mármore, quartzitos, micaxistos, calciossilicáticas e formações ferríferas;
- **Formação Equador:** composta predominantemente por muscovita-quartzitos com variação faciológica para muscovita quartzo-xistos. Também ocorrem horizontes de quartzitos feldspáticos com muscovita, quartzitos ferríferos, paragneisses e intercalações de metaconglomerados;
- **Formação Seridó:** composta por micaxistos diversos, ocorrendo localmente níveis enriquecidos nos aluminossilicatos, andaluzita, silimanita e menos frequentemente cianita, sendo comum a presença de cordierita e, por vezes, estauroлита. Nesta formação também ocorrem intercalações subordinadas e localizadas de quartzitos, mármore, metavulcânicas, rochas calciossilicáticas e metaconglomerados.

A predominância de rochas das Formações Seridó e Equador ocorre em maior representatividade na região abordada neste estudo, conforme apresentou o mapa geológico mostrado anteriormente, os afloramentos vistos em campo confirmaram esta predominância e características abordadas no estado da arte acerca da geologia da área.

Nas zonas de contato entre os pegmatitos e as formações do grupo Seridó, foram identificados micaxistos correlatos a Formação Seridó, os quais exibem minerais como quartzo e plagioclásio que, juntamente com a biotita, apresentam textura granolepidoblástica, além de cristais bem formados de granada evidentes em afloramentos (Figura 33). Observou-se que a biotita ocorre na forma de pequenas placas com distribuição bem orientada, seguindo preferencialmente a matriz xistosa.

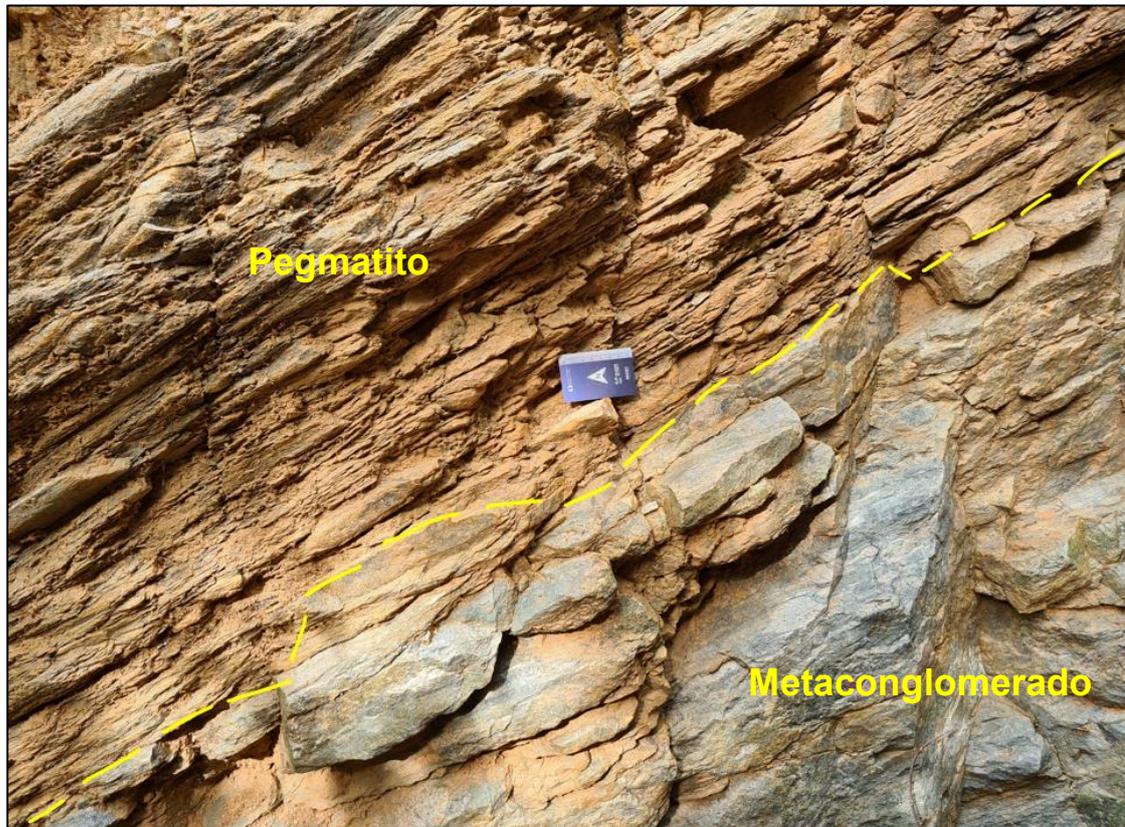
**Figura 33** - Micaxisto da Formação Seridó contendo cristais bem formados de granada.



Fonte: dados desta pesquisa (2023)

Ao observar as zonas de contato, também foram identificados contatos entre os pegmatitos e às rochas relativas a Formação Equador. No Pegmatito Capoeira (localizado próximo a Parelhas/RN), foi observado corpos pegmatíticos encaixados em metaconglomerados (Figura 34).

**Figura 34** - Zona de falha (345/30°) que afeta o metaconglomerado, o qual em alguns pontos está em contato com o Pegmatito Capoeira (a linha tracejada amarela cerca a zona de contato).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Em alguns locais foram observados aplitos intrudidos em micaxistos, concordantes com as rochas encaixantes (Figura 35), os corpos tabulares aparecem, principalmente, intrudidos em rochas da Formação Seridó. A composição granítica, constituída principalmente por quartzo, plagioclásio, k-feldspato e micas confirmaram a homogeneidade da rocha ígnea intrusiva de textura fanerítica, os quais também geralmente exibem-se alongados ou subparalelos às rochas encaixantes, conforme apresenta a figura a seguir.

**Figura 35** -Corte de estrada mostrando o caráter intrusivo de diques de aplito ao longo dos planos de foliação de micaxistos da Formação Seridó.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

As observações realizadas em campo confirmaram a predominância dos litotipos da Formação Seridó e Formação Equador nas áreas visitadas, bem como algumas características marcantes nos pegmatitos estudados discutidas na literatura, e que serão descritos de maneira geral a seguir.

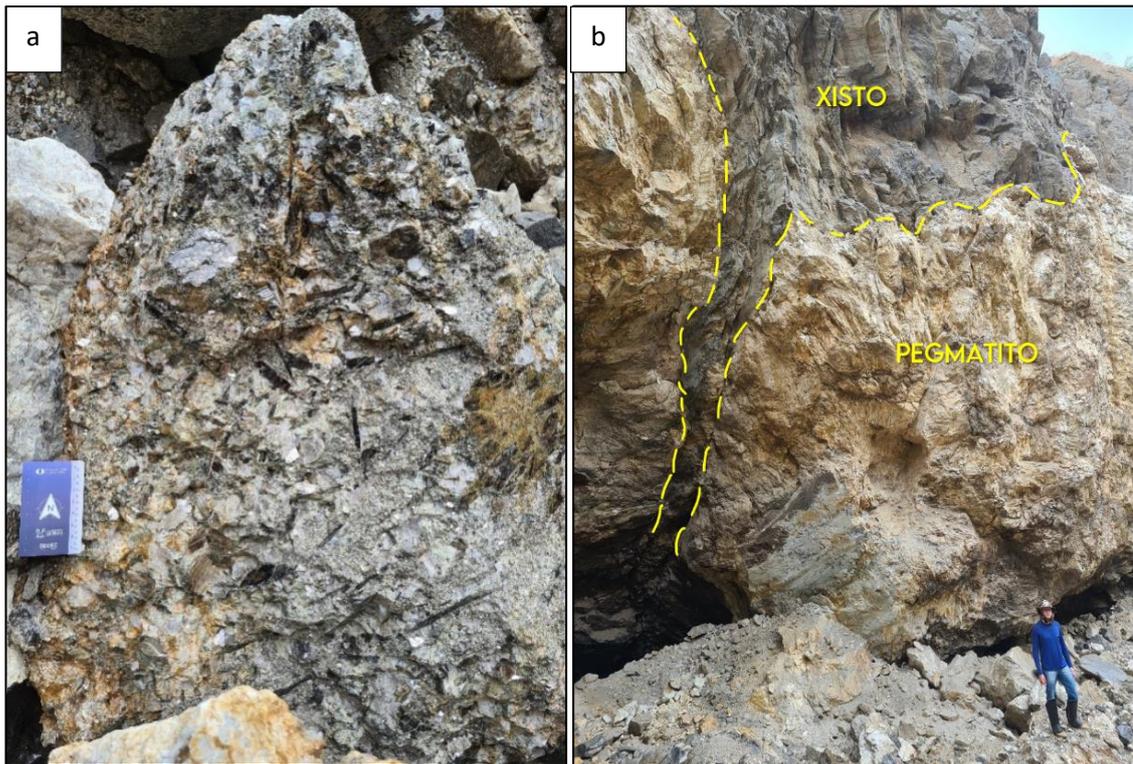
### 5.2.2 Feições dos Pegmatitos

Dentre os afloramentos visitados, os pegmatitos estudados foram: Capoeira (Parelhas/RN), Serra Branca (Pedra Lavrada/PB), Corujinha (Parelhas/RN), Salgadinho (Carnaúba dos Dantas/RN), Mufumbo (Parelhas/RN). Amostras foram coletadas, tanto dos pegmatitos como das rochas encaixantes, para posterior estudo petrográfico e caracterização mineral.

Pegmatitos constituem um conjunto de rochas ígneas plutônicas, leucocráticas, compostas essencialmente por quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio, muscovita, por vezes com biotita, além de granadas e turmalina negra (Figura 36a), são importantes economicamente por serem fontes de metais raros (Li, Sn, Ta, Nb, Be, Cs, Rb, Sc, Th, U e ETR) (London, 2008).

As dimensões dos corpos pegmatíticos podem variar de metros ou até centenas de metros de extensão (Figura 36b), no entanto, as dimensões expostas em superfície podem ser bem menores quando comparadas com as que se encontram em profundidade.

**Figura 36** - Feições observadas no Pegmatito Salgadinho. a) bolsões de muscovita e biotita interescudadas em vários tamanhos com ocorrências pontuais de quartzo fumê. b) contato irregular do pegmatito com encaixante de estrutura xistosa (linha amarela tracejada marca a zona de contato).

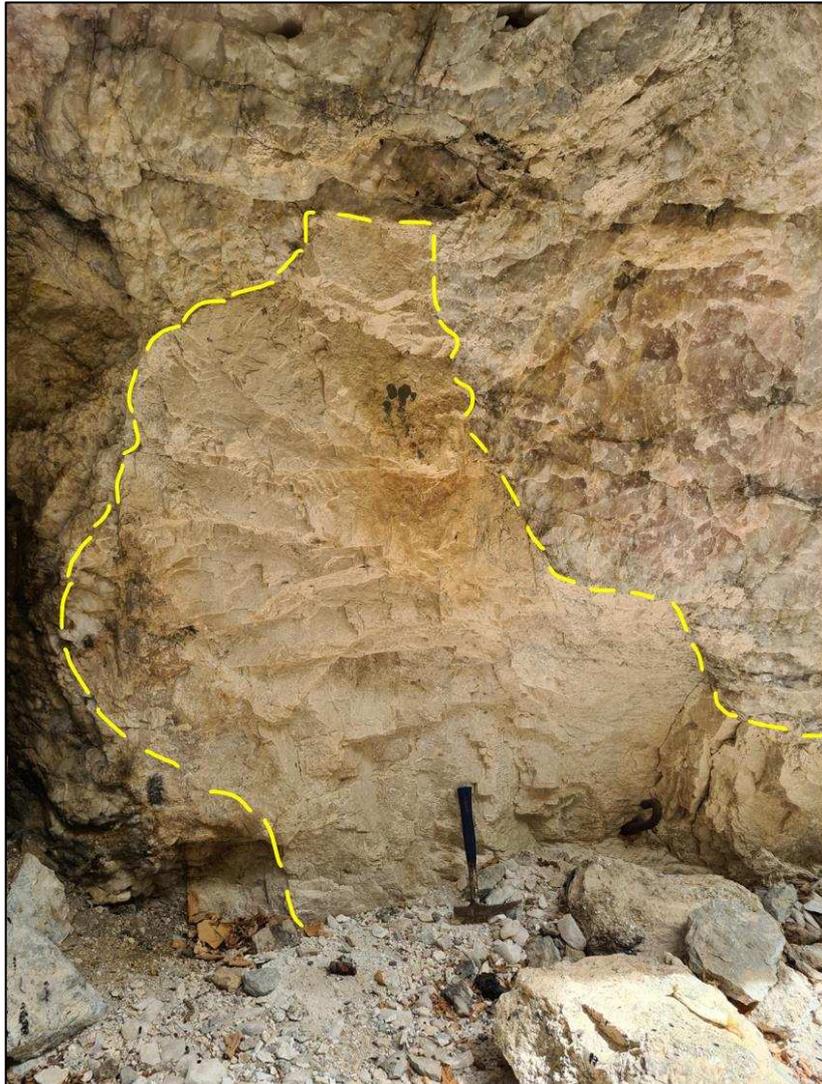


Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Os xistos encaixantes aos pegmatitos (Figura 36b), fazem parte da sequência pelítica da Formação Seridó, geralmente apresentam coloração variando de escura a acinzentada, e são compostos principalmente por quartzo, biotita (em maior volume) e granada.

Durante a análise geológica em escala de afloramento (mesoscópica), foi observada a presença de corpos de substituição (bolsões ou *pockets*), muito evidentes em todos os pegmatitos visitados, revelando a estruturação interna desses corpos (Figura 37). Os minerais que preenchem essas cavidades irregulares são geralmente: quartzo, muscovita e albita. O tamanho dos bolsões pode ocorrer em dimensões variando de centimétricas a métricas.

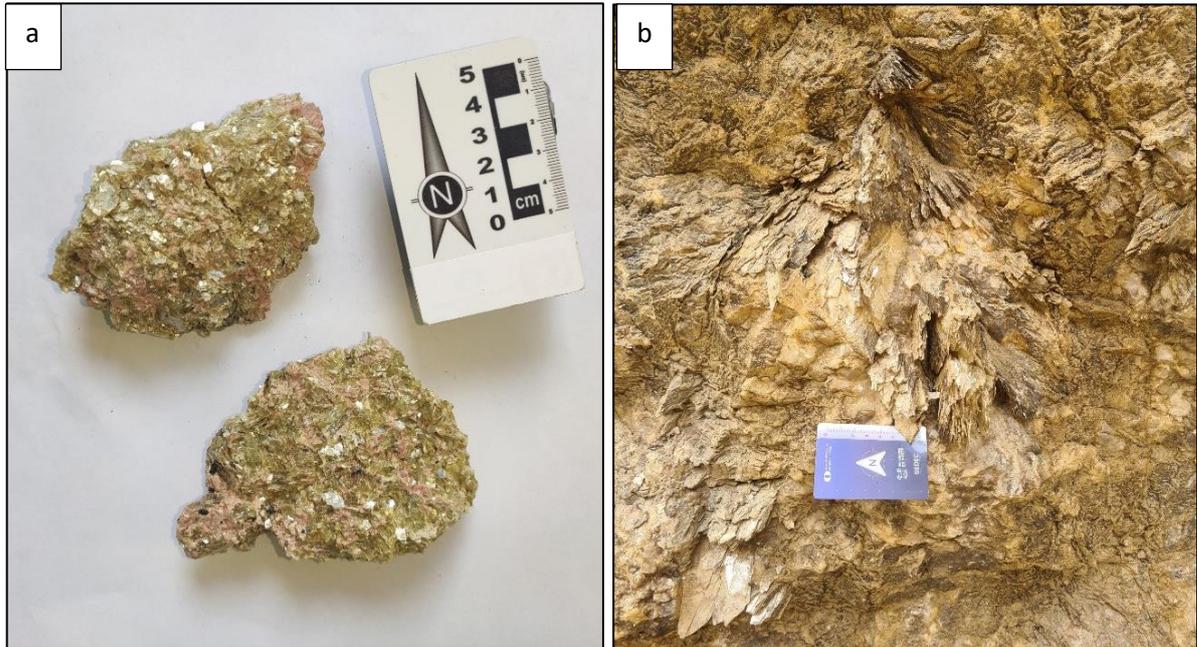
**Figura 37** - Bolsão preenchido por quartzo leitoso (Pegmatito Capoeira).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Foram observadas características marcantes que evidenciaram a diversidade mineralógica nos pegmatitos, como por exemplo a presença de diferentes tipos de muscovita, ocorrendo na forma de pequenas placas de cor esverdeada (Figura 37a), associadas com cristais anedrais de feldspato do tipo ortoclásio (rosa) e quartzo fumê em menor quantidade. Outra característica observada nos cristais de muscovita consistiu na formação de estruturas conhecida como “rabo de peixe” (Figura 37b).

**Figura 37** - Feições de campo nas rochas pegmatíticas. a) pequenos cristais de muscovita esverdeados, b) placas de muscovita formando estrutura conhecida como “rabo de peixe”.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

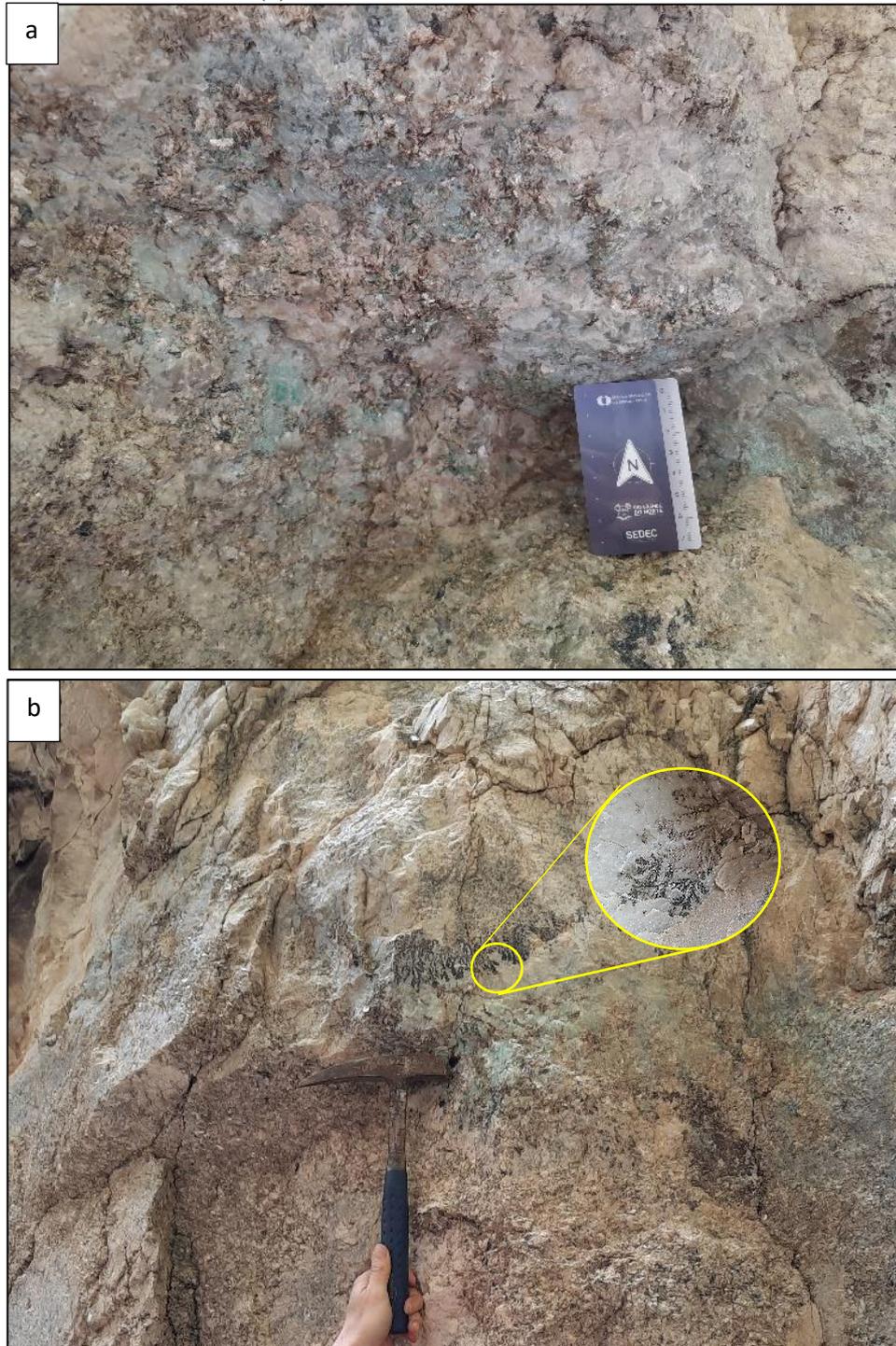
Outras características marcantes dos pegmatitos foram vistas em campo, em sua maioria, encaixados em biotita xistos da Formação Seridó ou em quartzitos da Formação Equador, principalmente com morfologia elíptica sub-vertical.

### 5.2.3 Ocorrências de Cobre

Em campo, foi observado a presença de minerais contendo cobre, tanto de origem primária (como digenita e bornita), e mais comumente de origem secundária (malaquita, azurita e crisocola).

Em um dos afloramentos estudados, minerais de cobre (bornita, malaquita e crisocola) foram encontrados, alguns deles na forma de “pátinas” (Figura 38a), ou seja, na forma de uma fina camada semelhante a uma mancha que podem ter sido produzidas em decorrência de processos supergênicos que contribuíram com a formação dos minerais secundários. Foi observado que algumas ocorrências pontuais de cobre secundário no Pegmatito Capoeira estavam associadas a pirolusita ( $MnO_2$ ), com hábito dendrítico (Figura 38b).

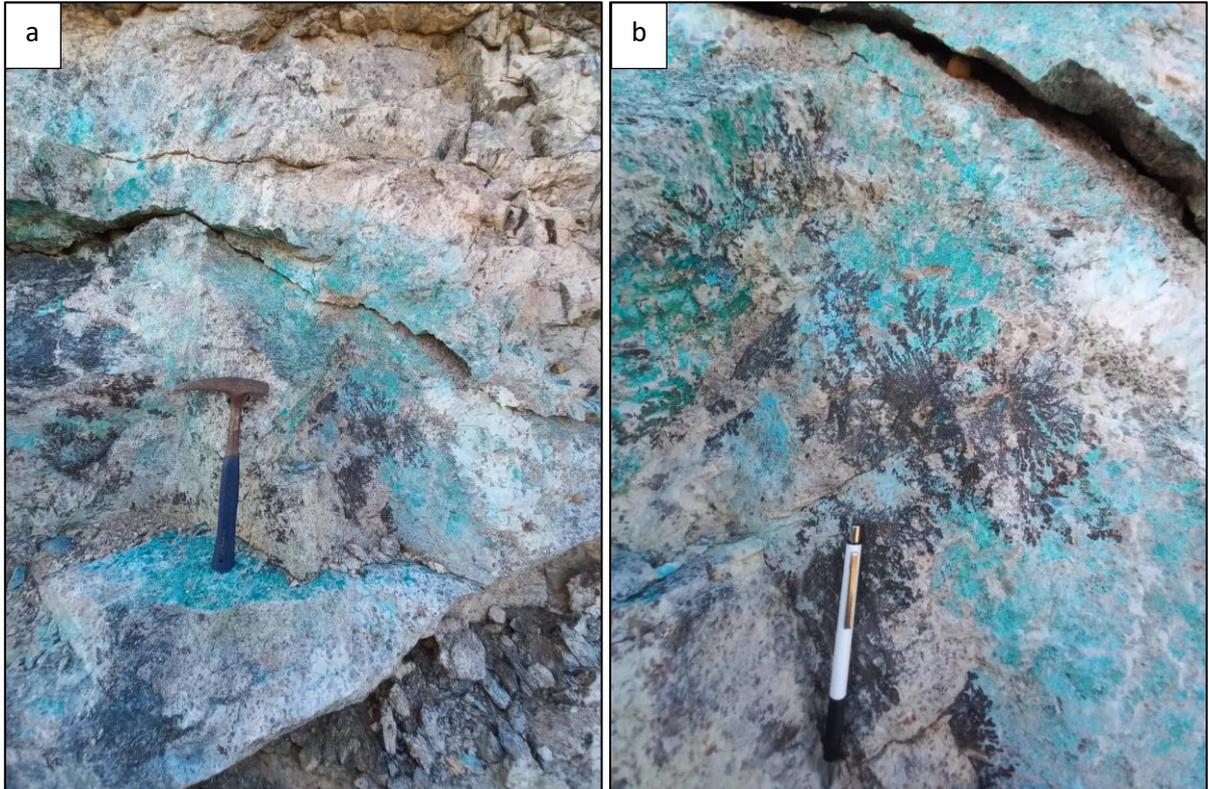
**Figura 38** - Ocorrências de cobre no Pegmatito Capoeira. Cobre secundário na forma de pátinas (a). Cobre secundário associado com ocorrências de Manganês com hábito dendrítico (b).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Outro aspecto a ser ressaltado, e que foi observado no Pegmatito Mufumbo, diz respeito ao fato das mineralizações de cobre também estarem associadas a ocorrências de Manganês de hábito dendrítico (Figuras 39a, 39b), mesmo padrão observado no Pegmatito Capoeira mostrado anteriormente.

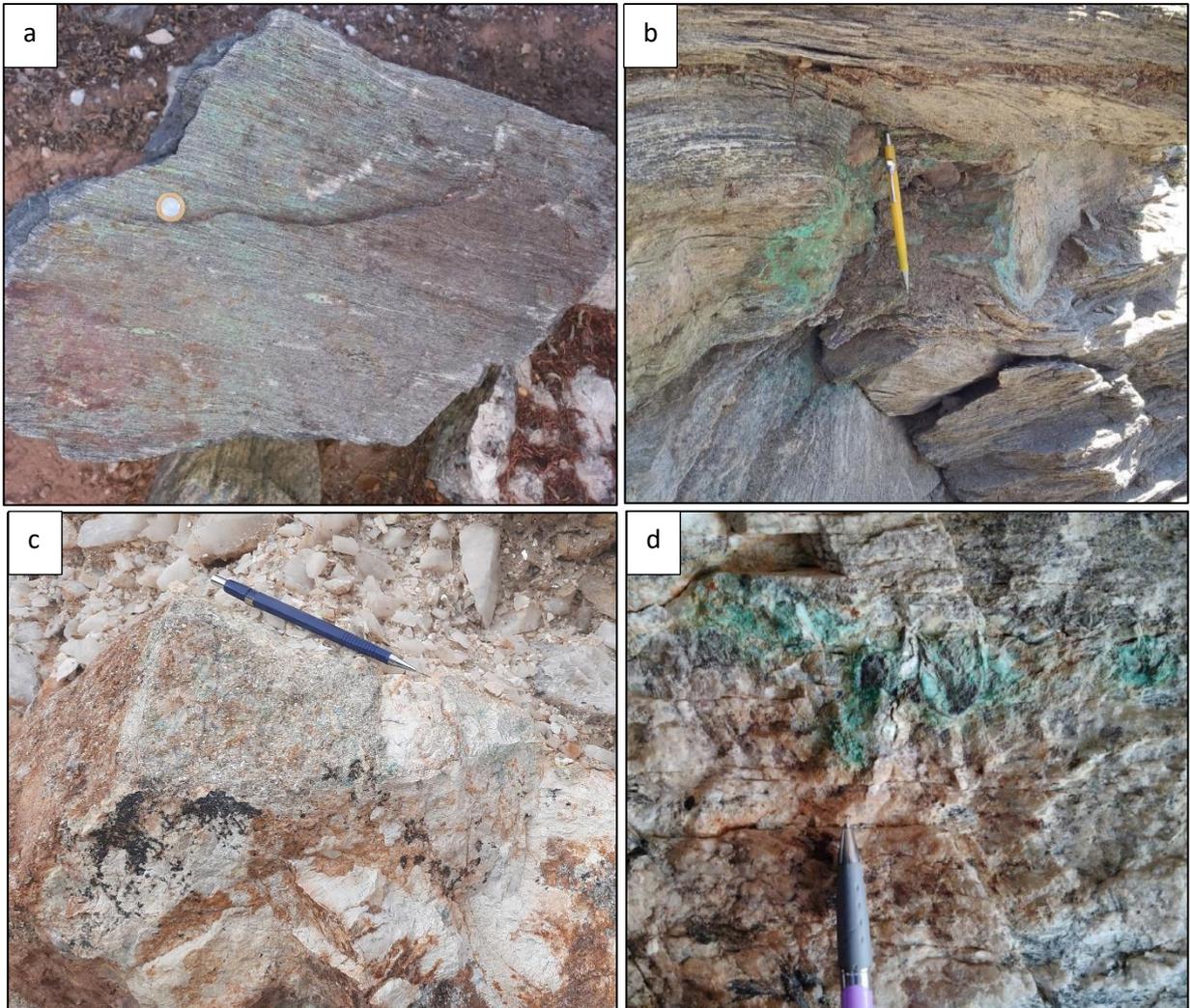
**Figura 39** - Ocorrências de cobre no Pegmatito Mufumbo. Evidência de pátinas de cobre de origem secundária sobre o pegmatito (a). Malaquita associada a pirolusita de hábito dendrítico (a).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

A predominância de minerais secundários de cobre foi representada principalmente pela malaquita, azurita e crisocola, ocorrendo em rochas do Grupo Seridó e em pegmatitos. Um controle estrutural parece ter instigado a presença da mineralização, a qual ocorre concordante à foliação de baixo ângulo de alguns xistos e unidades com estrutura foliada (Figura 40a), como também em veios de quartzo boudinados, preenchendo fraturas (Figura 40b), disseminada (Figura 40c) e na forma de pátinas, contato entre pegmatito e encaixante (Figura 40d).

**Figura 40** - Tipologias das ocorrências de minerais secundários de cobre nos afloramentos. Concordante à foliação em rochas xistosas (a); Entre *boudins* de veios de quartzo (b); Disseminado próximo a núcleos de quartzo (c); no contato entre o pegmatito e rochas metassedimentares (d).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Em cada afloramento onde foi observada ocorrências cupríferas, foram coletadas amostras dos litotipos associados com o intuito de realizar estudos petrográficos através de descrições macroscópicas e de lâminas delgadas, bem como selecionar amostras e prepará-las para a caracterização mineralógica.

### 5.3 Petrografia e mineralogia das ocorrências de cobre

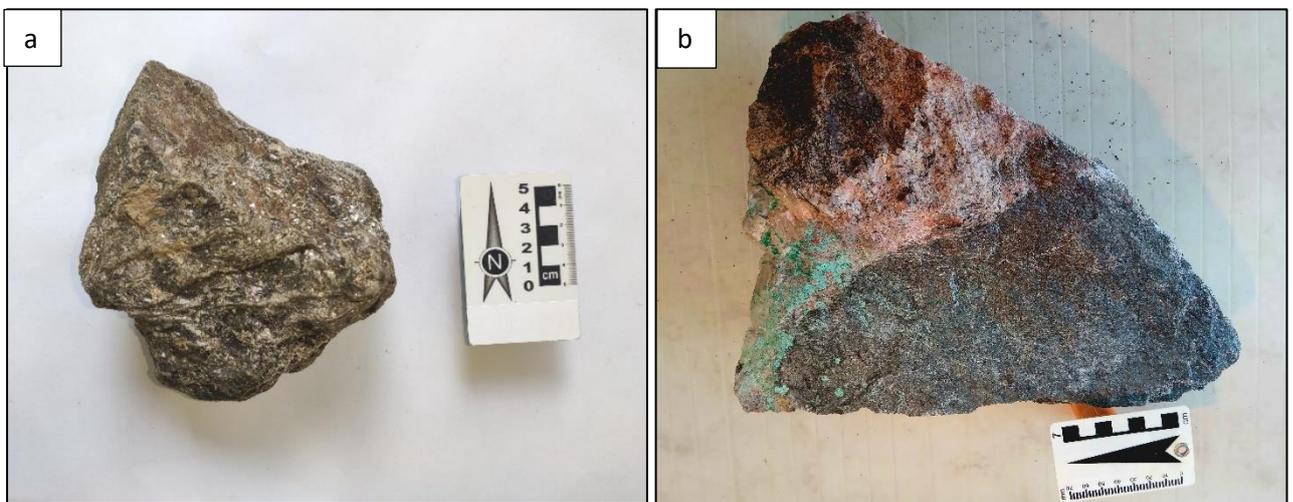
O estudo petrográfico de algumas amostras possibilitou a compreensão, do ponto de vista composicional e textural, permitindo sua identificação e classificação. Nesta seção, serão apresentadas algumas descrições de amostras de mão representativas coletadas na etapa de

campo, bem como fotomicrografias de seções polidas analisadas em microscópio petrográfico, a fim de ilustrar suas feições estruturais, texturais e composicionais.

### 5.3.1 Descrição macroscópica

Foram reconhecidas rochas foliadas do tipo quartzo-biotita-xisto de granulação média, com quartzo e minerais micáceos (principalmente biotita e muscovita), em expressiva quantidade. Alguns litotipos apresentam tons escuros, estrutura levemente bandada, definida pela presença de bandas milimétricas claras, quartzo-feldspáticas (>30%) e bandas escuras, biotíticas, com textura lepidoblástica (Figura 41a).

**Figura 41** - Amostra de micaxisto (a), encaixante do Pegmatito Salgadinho. Contato entre xisto e pegmatito contendo minerais secundários de cobre (b) (Pegmatito Mufumbo).

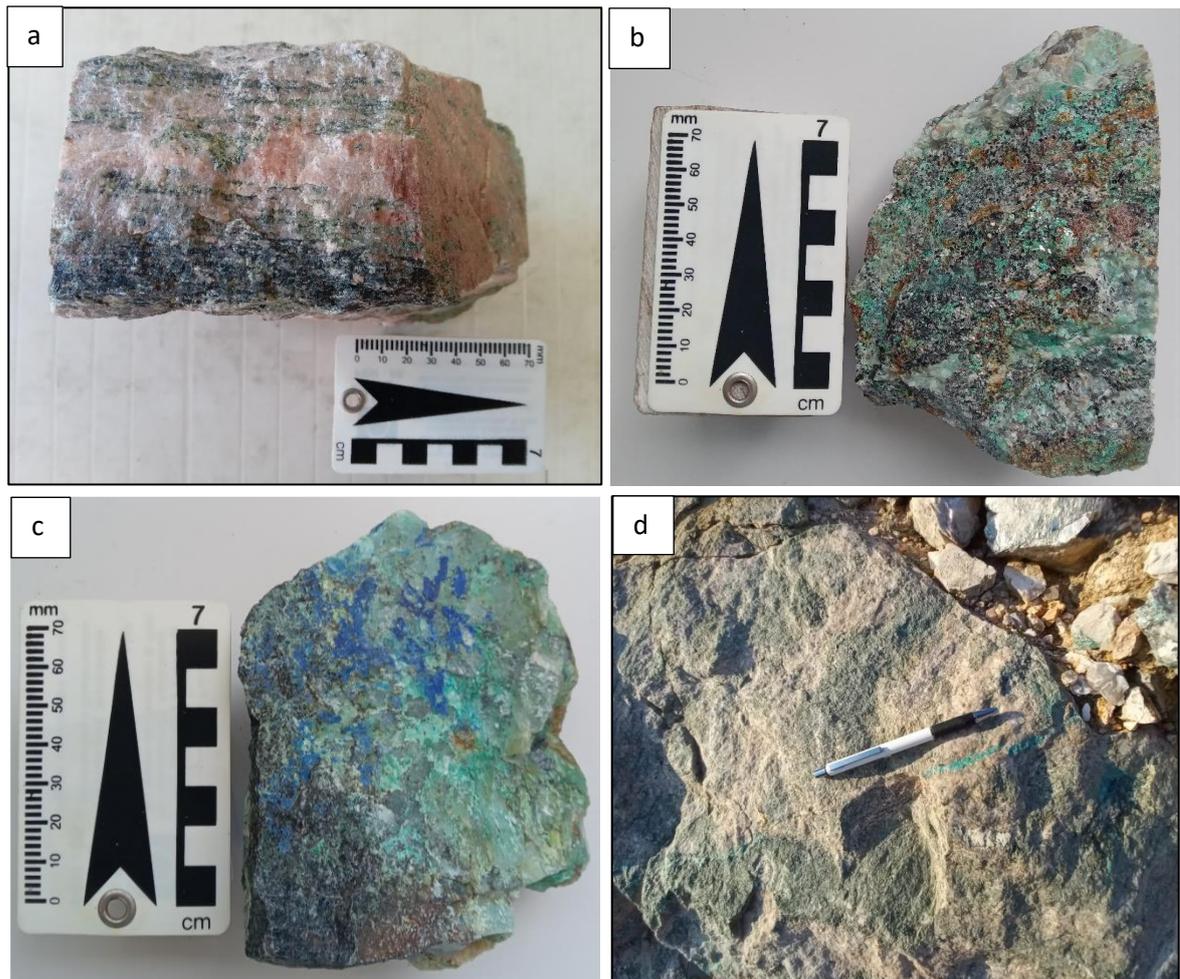


Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Nas zonas de contato entre os pegmatitos e encaixantes, foram identificados litotipos do tipo mica-xisto-gnáissico (maior predominância de quartzo e feldspato), sendo identificada a ocorrência de minerais secundários de cobre (coloração esverdeada) (Figura 41b), correspondente à malaquita.

Foi perceptível a predominância de mineralizações de cobre secundário, em alguns casos acompanhando a foliação nas rochas xistosas (Figura 42a), ou disseminados nos xistos (Figura 42b) e rochas metabásicas contendo quartzo (Figura 42c), gnaisses, metabásicas ou ainda preenchendo fraturas (Figura 42d).

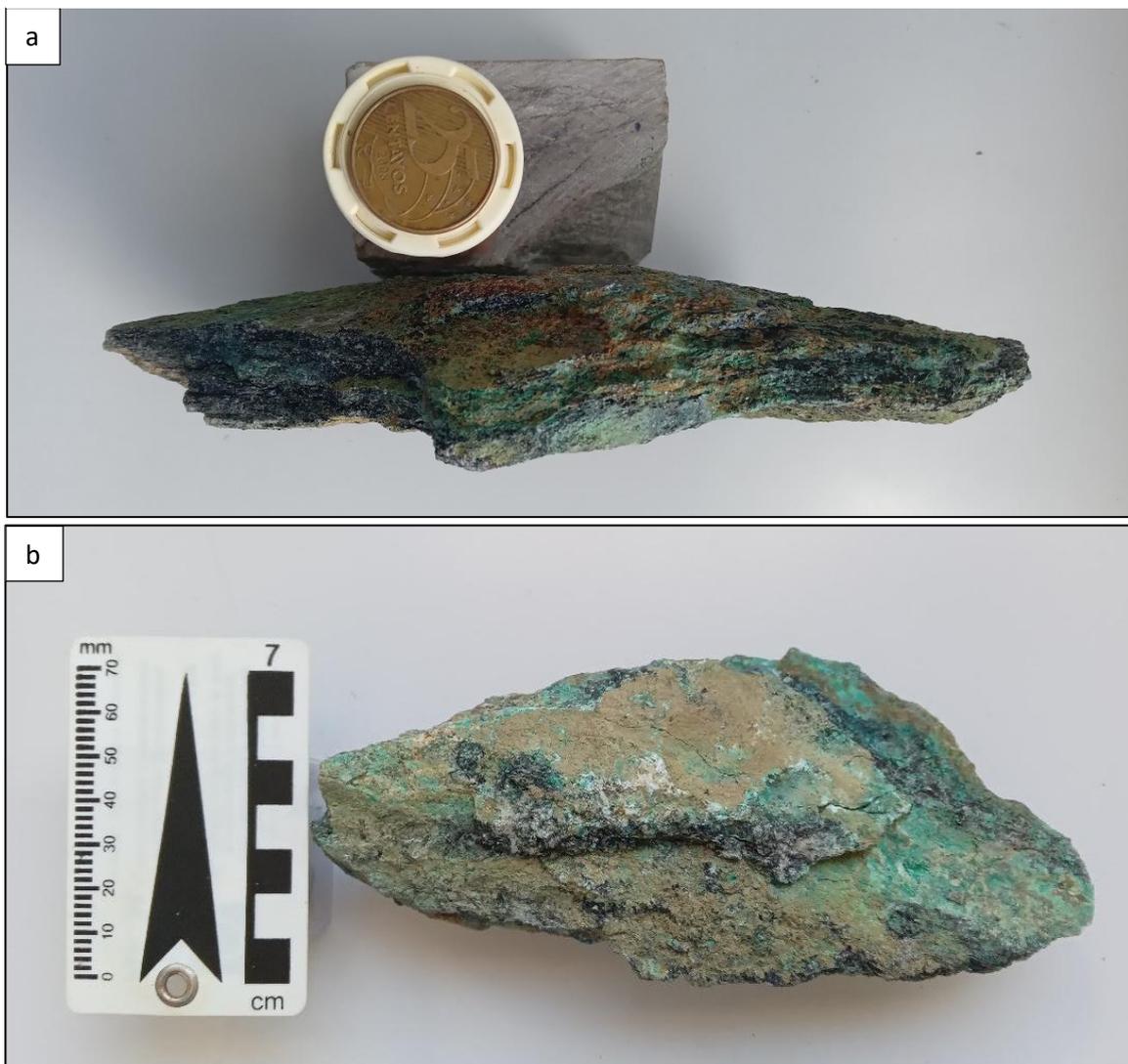
**Figura 42** - Aspectos macroscópicos de cobre secundário. Acompanhando a foliação em rochas xistosas (a) (Pegmatito Mufumbo); Disseminado em xistos (b); disseminados em metabásicas e veios de quartzo (c); Como preenchimento de fraturas no pegmatito (d) (Pegmatito Mufumbo).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Impregnações de minerais secundários de cobre, representados por malaquita e azurita, foram observadas em amostras de xisto com *boudin* de quartzo (Figura 43a), e quartzo biotita xisto (Figura 43b), que acompanham a foliação.

**Figura 43** - Feições macroscópicas de cobre em rochas foliadas. (a) malaquita e azurita em xisto com *boudin* de quartzo. (b) malaquita em quartzo-biotita-xisto.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Além dos pegmatitos, ocorrências de cobre foram identificadas em rochas encaixantes com estrutura gnáissica, como observado na amostra de mão (Figura 44), definida por bandas milimétricas claras, quartzo-fedspáticas, e escuras, biotíticas, com intercalação de bolsões de anfíbolito, com presença de cristais de covelita e pátinas de cobre secundário. Também foram identificadas ocorrências de cristais de digenita sendo transformados em malaquita.

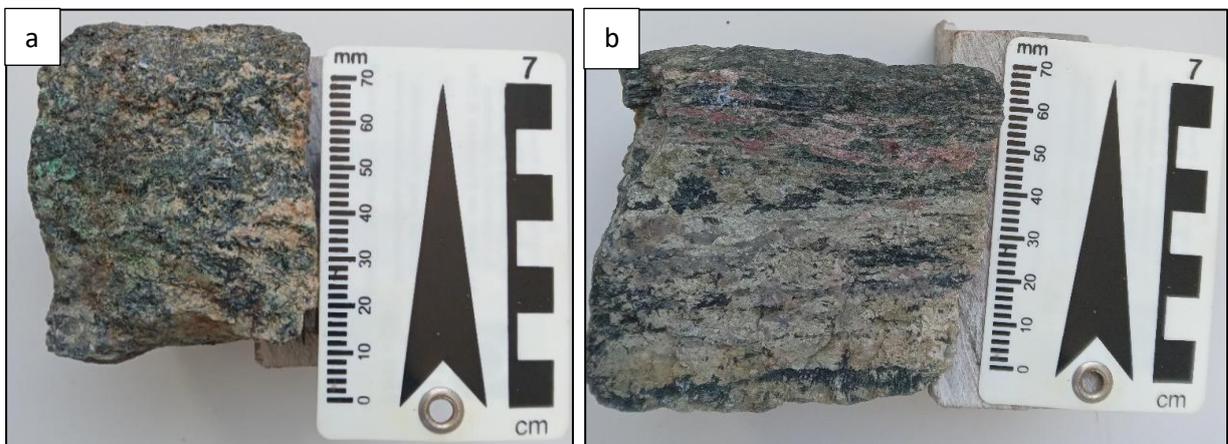
**Figura 44** - Rocha com estrutura gnáissica contendo malaquita e cristais de digenita.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Rochas gnáissicas com bandas de actinolita (escura) intercalada com bandas de infiltrações de cristais de gipso (cor róseo) também foram encontradas (Figura 45a), sendo observadas crescimentos de cristais esverdeados de actinolita perpendiculares a foliação, além de ocorrências de malaquita na forma de pátinas (Figura 45b).

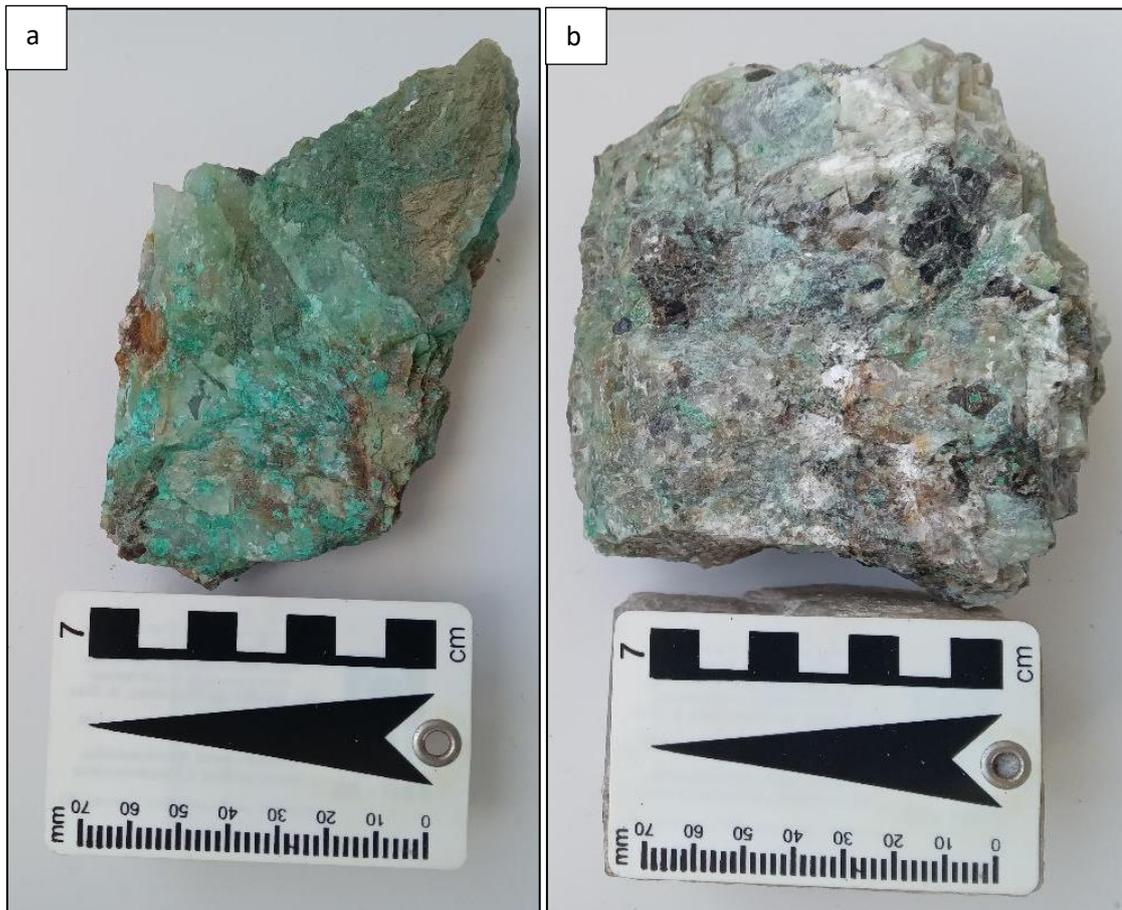
**Figura 45** - Rocha com bandas de actinolita com infiltrações de gipso e pátinas de malaquita (a). Bandamento gnáissico característico com pátinas de malaquita (b).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Pegmatitos graníticos constituídos principalmente por quartzo, feldspato, muscovita e biotita foram observados ocorrendo como intrusivos nos litotipos das formações do Grupo Seridó. Foram identificadas ocorrências de minerais secundários de cobre em algumas amostras de pegmatitos, as mineralizações são compostas basicamente por malaquita, com concentrações pontuais de azurita (Figura 46a), e malaquita na forma de “impregnações” (Figura 46b).

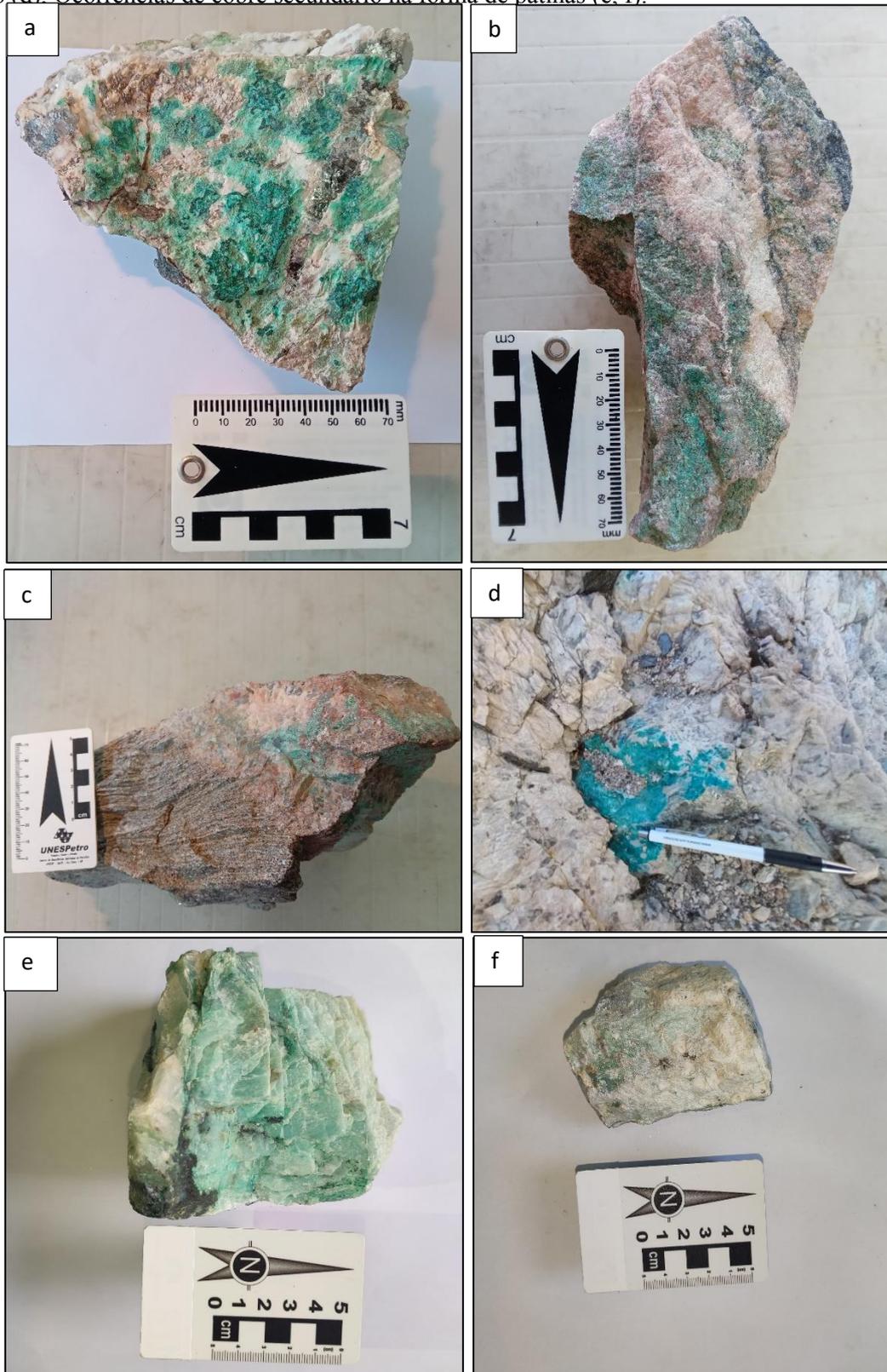
**Figura 46** - Aspectos macroscópicos de mineralizações de cobre secundário (Malaquita e azurita) em pegmatito (a). Impregnações de Malaquita em pegmatito (b).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Adicionalmente, identificou-se a presença de cobre contido em minerais secundários, ocorrendo principalmente na forma de infiltrações nos pegmatitos (Figura 47a, Figura 47b, Figura 47c, Figura 47d), bem como na forma de pátinas (Figura 47e, Figura 47f).

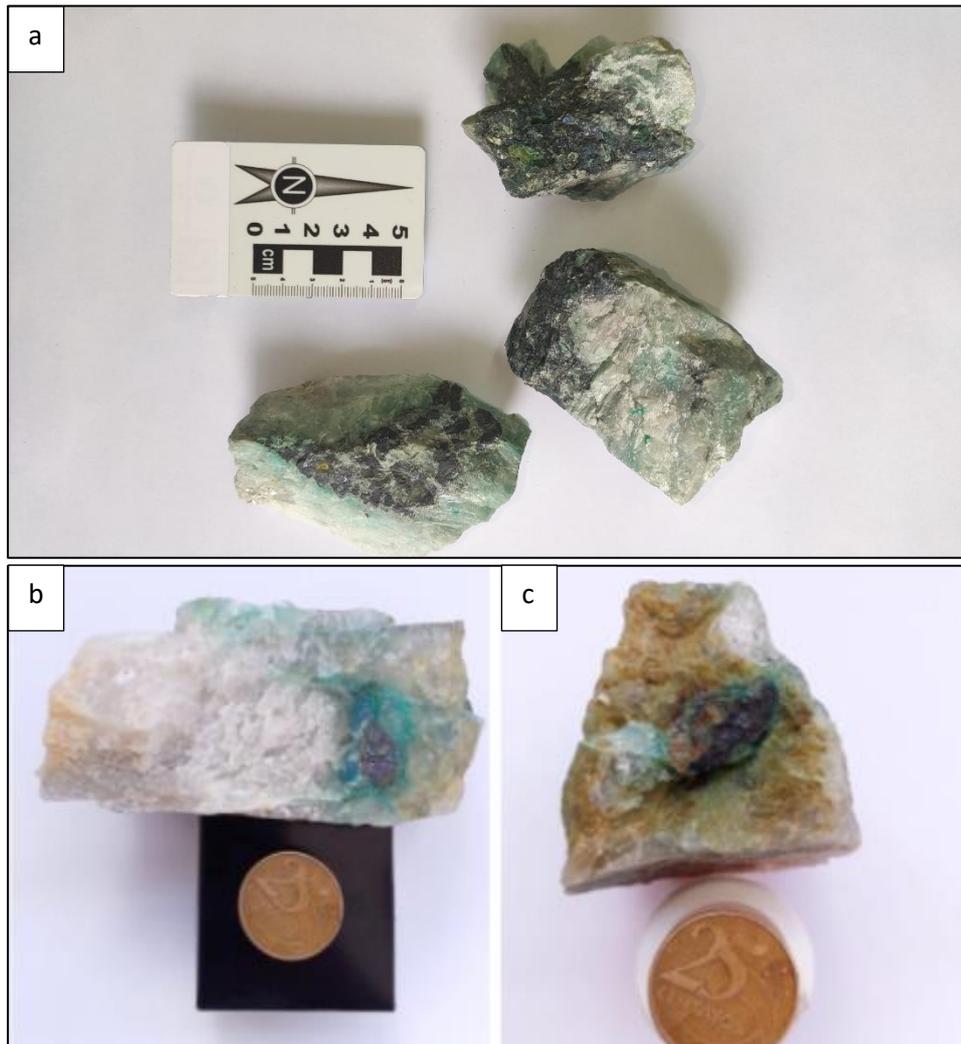
**Figura 47** - Ocorrências de cobre secundário em pegmatitos como infiltrações de malaquita e crisocola em pegmatito (a) constituído de microclínio, muscovita e biotita; Infiltração de cobre secundário em pegmatito (b), a faixa branca é constituída por quartzo, feldspato e biotita; Mineral de cobre secundário infiltrado em pegmatito (c), próximo a zona de contato com mica xisto gnáissico; Infiltração de malaquita em pegmatito granítico (d); Ocorrências de cobre secundário na forma de pátinas (e, f).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Foi identificada a presença de bornita associada a malaquita e crisocola (Figura 48a), assim como cristais de digenita (aproximadamente 2 cm), parcialmente alterados, exibindo bordas compostas por mineral secundário de cobre (Figura 48b, Figura 48c).

**Figura 48** - Ocorrências de cobre de origem primária; bornita associada a malaquita, crisocola em rocha pegmatítica (a); Veio de quartzo com ocorrência de digenita com borda esverdeada de minerais secundários de cobre (b, c).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Associações de cobre de origem secundária encrustado em muscovita foram observadas em amostras oriundas da região de Pedra Lavrada (Figura 49), a associação mineral comum em alguns pegmatitos da PPB é relatada no trabalho de Sales (2023), onde o cobre é apontado como elemento traço, mas em concentrações elevadas, juntamente com outros metais raros como Rb, Cs, Nb, Ta, Li, Ga e Zn.

**Figura 49** - Ocorrência de malaquita encrustada em muscovita em amostra de pegmatito.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Por meio da análise macroscópica, foi observado que as mineralizações de cobre estão hospedadas principalmente nos pegmatitos, e secundariamente nas encaixantes da Formação Seridó. O principal mineral de cobre identificado foi a malaquita (minério de cobre supergênico) e secundariamente azurita, com algumas ocorrências de sulfetos de cobre (digenita e bornita).

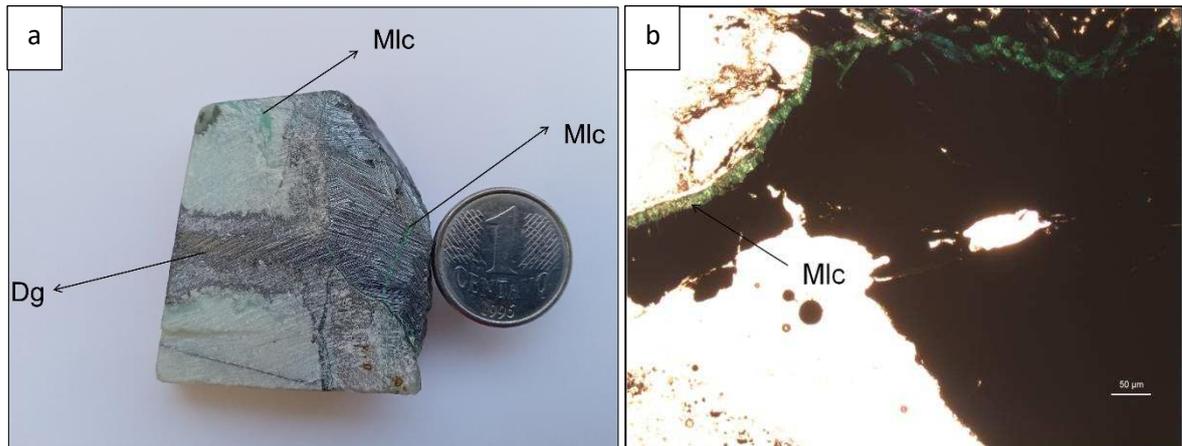
Importantes ocorrências foram mapeadas, evidenciando a associação de mineralizações cupríferas nas rochas pegmatíticas da PPB e suas encaixantes, em vista disso, algumas amostras foram preparadas para um estudo mais minucioso relativo as relações texturais e mineralógicas por meio de microscópio petrográfico e MEV.

### **5.3.2 Petrografia**

Algumas das amostras foram selecionadas e lâminas delgadas confeccionadas, onde posteriormente foram analisadas no Microscópio Petrográfico da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia (UAMG) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A seguir, serão abordadas algumas das principais características texturais observadas no microscópio, complementando assim as informações acerca das ocorrências de cobre.

Ocorrências de cobre foram reconhecidas principalmente em rochas ígneas de estrutura maciça e com textura pegmatítica, contendo cristais anedrais de quartzo, microclínio e biotita. Foram identificados cristais de digenita (Dg) (tom acinzentado com brilho metálico), sendo cortado por vênula de malaquita (Mlc) (tom esverdeado) (Figura 50a). Microscopicamente, malaquita ocorre ao longo de algumas fraturas regulares no pegmatito (Figura 50b).

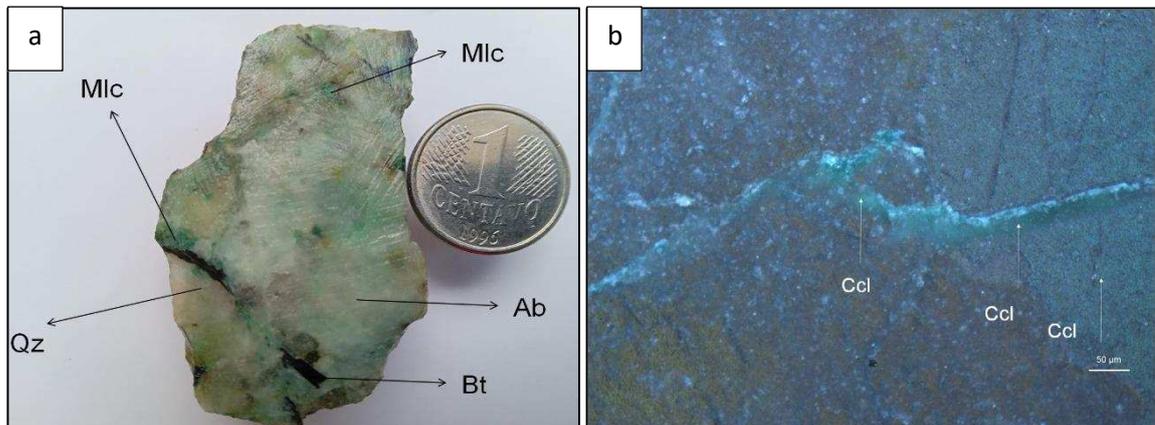
**Figura 50** - Características microscópicas das mineralizações de cobre em pegmatitos. a) Fratura de pegmatito preenchida por digenita (Dg) e Malaquita (Mlc). b) Malaquita preenchendo fratura em rocha pegmatítica bordejando e cortando minerais opacos.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Assim como nas amostras de mão estudadas, foi verificada em algumas lâminas ocorrências de cobre na forma de infiltrações nos pegmatitos. Na amostra da Figura 51a, que corresponde a uma rocha ígnea com estrutura maciça e textura pegmatítica constituída por quartzo (Qz), albita (Ab) e biotita (Bt), verificou-se setores onde há infiltrações de malaquita (tom verde claro). A análise por luz refletida, revelou crisocola (Ccl) como preenchimento de fraturas (Figura 51b).

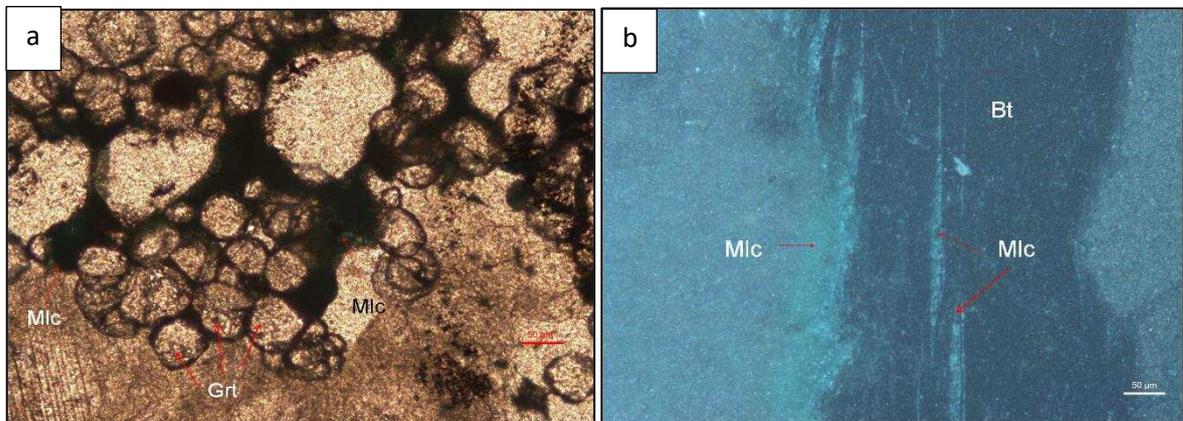
**Figura 51** - Infiltrações de cobre em pegmatitos. a) Infiltrações de Malaquita (Mlc). b) Fotomicrografia a luz refletida com Crisocola (Ccl) preenchendo borda no pegmatito.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Cristais regulares de granada (Grt-espessartina), foram identificados na forma de agregados em rochas pegmatíticas, caracterizados por estarem envolvidos por uma matriz formada por minerais de malaquita (Mlc) (Figura 52a), sugerindo que eventos de alteração supergênica, tenham influenciado na precipitação do mineral secundário de cobre após formação desses agregados. Também foi verificada a presença de malaquita com textura alotriomórfica (sem forma cristalina regular) (Figura 52b), o que pode ter sido resultado de um rápido resfriamento devido as condições de formação do mineral, além de ocorrer ocupando clivagens de cristais de biotita (Bt) (Figura 52b).

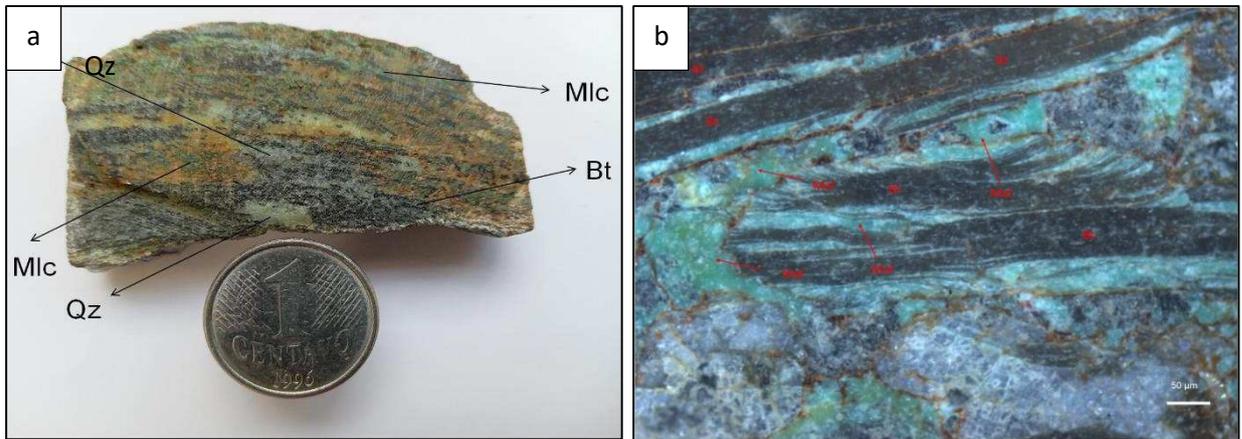
**Figura 52** - Fotomicrografias de malaquita em pegmatito. a) Malaquita (Mlc) bordejando cristais aglomerados de Granada (Grt). b) Associação de Malaquita (Mlc) e cristais de Biotita (Bt).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Ocorrências de cobre também foram observadas em rochas foliadas de estrutura xistosa, constituída por cristais xenoblásticos de quartzo (Qz) em textura granoblástica, subidioblásticos de biotita (Bt) em textura lepidoblástica predominante (Figura 53a). Eventos metamórficos ou químicos como a lixiviação podem ter sido responsáveis pela deposição de cobre nas rochas foliadas. Observou-se cristais de malaquita (Mlc) na forma de micro infiltrações, acompanhando a foliação da rocha xistosa ou ao longo de fraturas (Figura 53b).

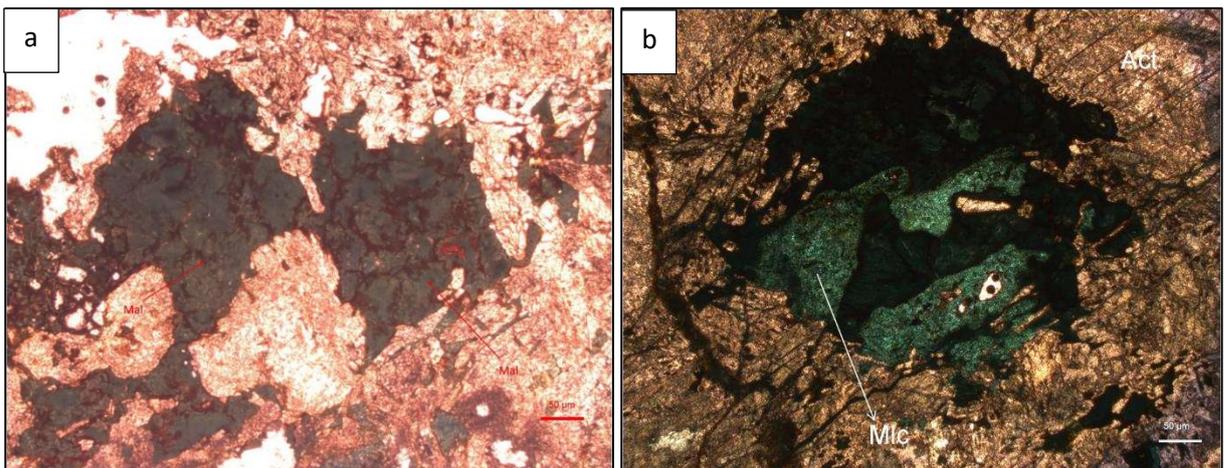
**Figura 53** - Malaquita em rochas xistosas. a) Quartzo-biotita-xisto com microinfiltrações de malaquita (Mlc). b) Fotomicrografia com luz refletida de malaquita (Mlc) preenchendo clivagens em cristais de biotita (Bt).



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Em rochas metamórficas de estrutura foliada, foram observados cristais xenoblásticos e subidioblásticos de anfibólio (Amp) do tipo actinolita. Ocorrência de carbonatos de cobre, identificados como malaquita (Mlc) e azurita (Az), ocorrem ao longo de fraturas irregulares, descontínuas (Figura 54a) e como preenchimento entre cristais, além de impregnações e como substituição (Figura 54b).

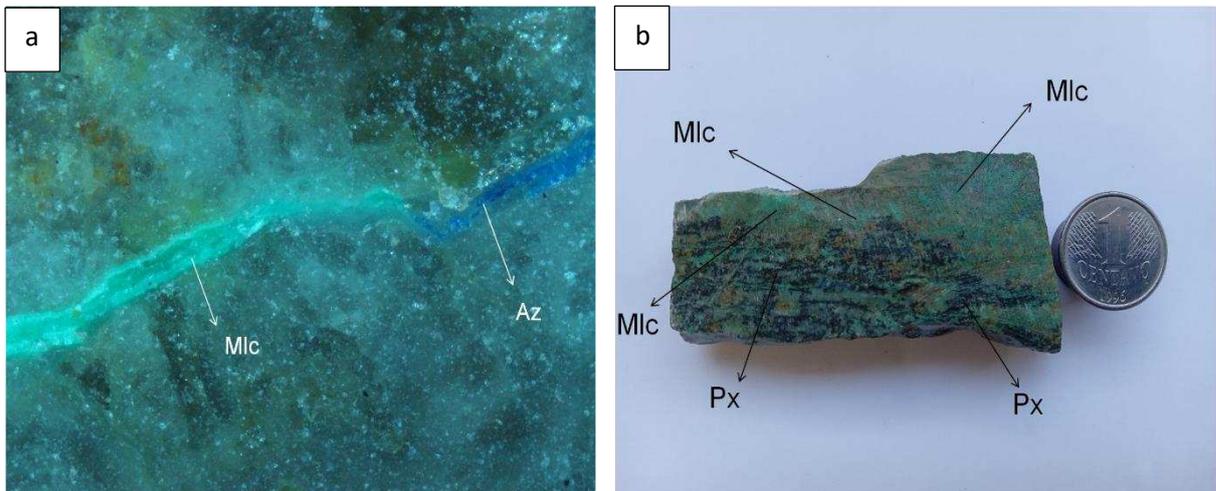
**Figura 54** - Cobre em rochas metamórficas de estrutura foliada. a) Malaquita (Mlc) preenchendo espaço entre cristais. b) Malaquita como cristal de substituição em rocha tipo actinolítico.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Observou-se a coexistência de minerais de malaquita (Mlc) e azurita (Az) preenchendo fraturas regulares (Figura 55a) em rocha metamórfica constituída por cristais de plagioclásio e ferromagnesianos (Figura 55b).

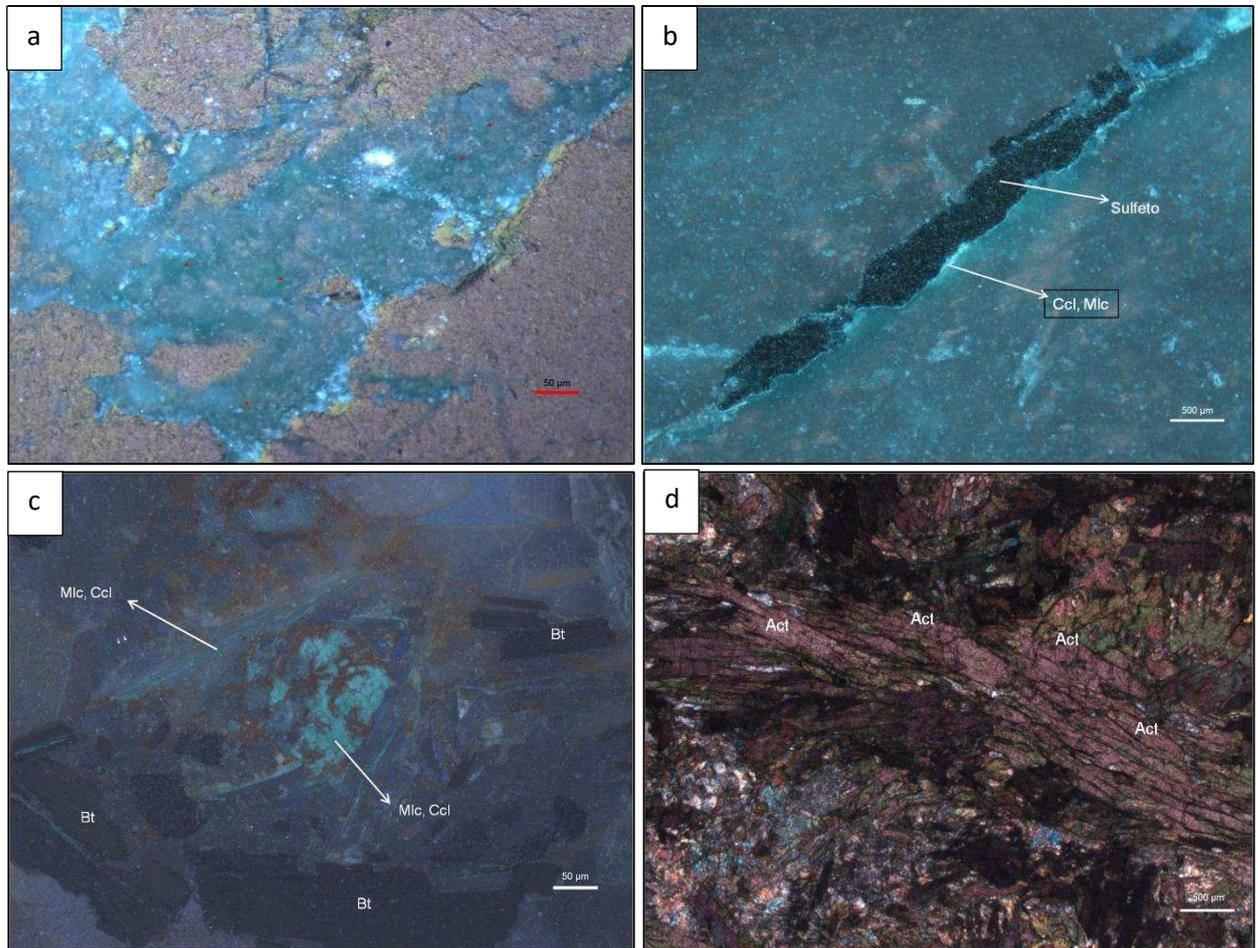
**Figura 55** - Paragênese de carbonatos de cobre. a) Fotomicrografia de malaquita (Mlc) e azurita (Az) como preenchimento de fratura regular. b) Rocha metamórfica com ocorrências de cobre secundário.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Outras associações de cobre nos pegmatitos também foram observadas, como em veios de quartzo, em contato com rocha metabásica, preenchida com malaquita (Mlc) identificada em tons esverdeados (Figura 56a). Malaquita (Mlc) e crisocola (Ccl) na forma de pátinas, infiltrações e vênulas em amostra de textura pegmatítica com presença de sulfeto de tom acinzentado (Figura 56b). Malaquita (Mlc) e crisocola na forma de “grãos” arredondados e como infiltrações ao longo de clivagens de cristais de biotita (Figura 56c) e também em rochas de granulação média constituídas por minerais colunares e aciculares, e com algumas porções esverdeadas, provavelmente constituídas por minerais secundários de cobre (Figura 56d).

**Figura 56** - Ocorrências de cobre em pegmatitos. a) Infiltração de malaquita (Mlc) em veio de quartzo. b) Sulfeto com borda de malaquita (Mlc) e crisocola (Ccl). c) Malaquita (Mlc) e/ou crisocola (Ccl) em “grãos” isolados e infiltrações nas clivagens de cristais de biotita (Bt). d) Amostra com actinolita (Act) e porções que correspondem a minerais secundários de Cu.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Tendo como base as descrições das lâminas e observações petrográficas, observou-se que o padrão das mineralizações de cobre apresenta-se, principalmente, preenchendo fraturas nos pegmatitos, como impregnações ou infiltrações evidentes pelo tom esverdeado em veios de quartzo ou associados às demais ocorrências dos pegmatitos, bordejando cristais de granada anedrais ou ocupando clivagens em cristais de biotita. Os principais minerais que contém cobre identificados nas amostras são principalmente malaquita, seguida por crisocola, azurita e digenita, estas ocorrências foram encontradas majoritariamente em pegmatitos, rochas foliadas (xistos) e metabásicas.

Mineralizações cupríferas preenchendo fraturas em pegmatitos podem sugerir uma forte associação da deposição deste metal com processos de alteração no qual as fraturas nos

pegmatitos e encaixantes desempenharam papel fundamental de canalizador para posterior concentração das espécies minerais contendo cobre.

#### **5.4 Caracterização Mineral das Ocorrências de Cobre na PPB**

No estudo das análises por difração de raios X (DRX), buscou-se a identificação dos minerais presentes nas amostras coletadas em campo, esta técnica foi bastante útil e complementou os dados de caracterização macroscópica e petrográfica. A fluorescência de raios (FRX) permitiu a quantificação dos principais elementos, incluindo conteúdo de cobre, contido nas amostras. Já as análises com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) permitiu a identificação das fases minoritárias não observadas ao microscópio ótico, bem como detalhamento das fases presentes já identificadas.

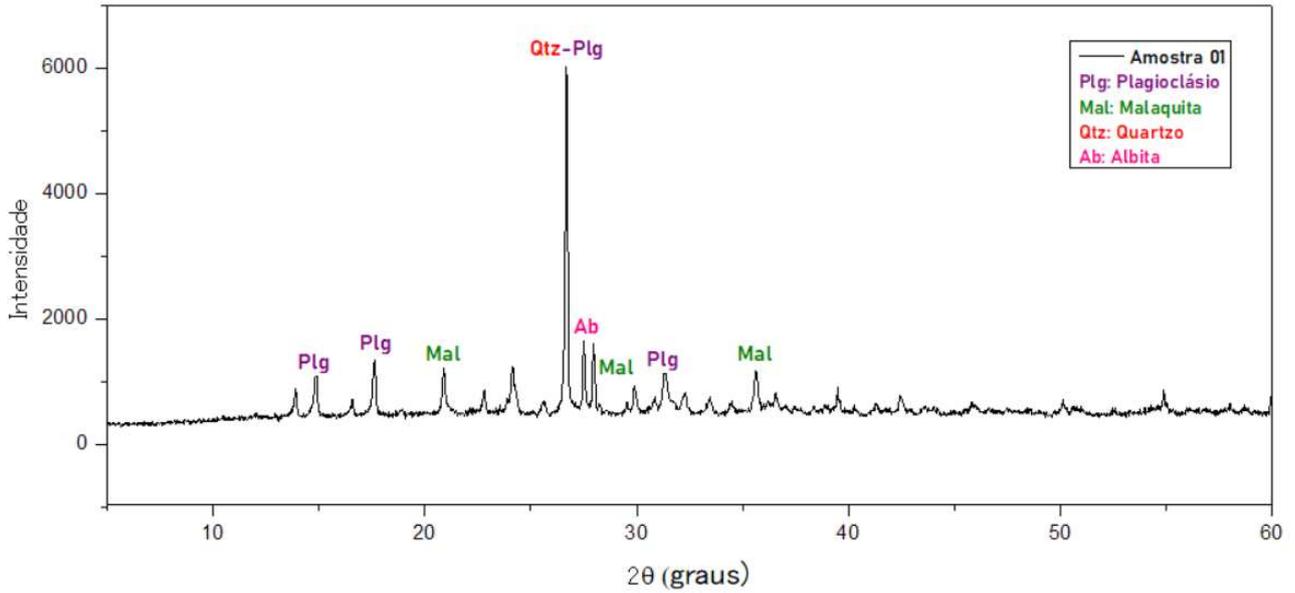
Nesta seção, serão apresentados os resultados de caracterização mineral das amostras coletadas em campo, bem como uma descrição simplificada dos resultados.

##### **5.4.1 Análises por Difração de Raios X**

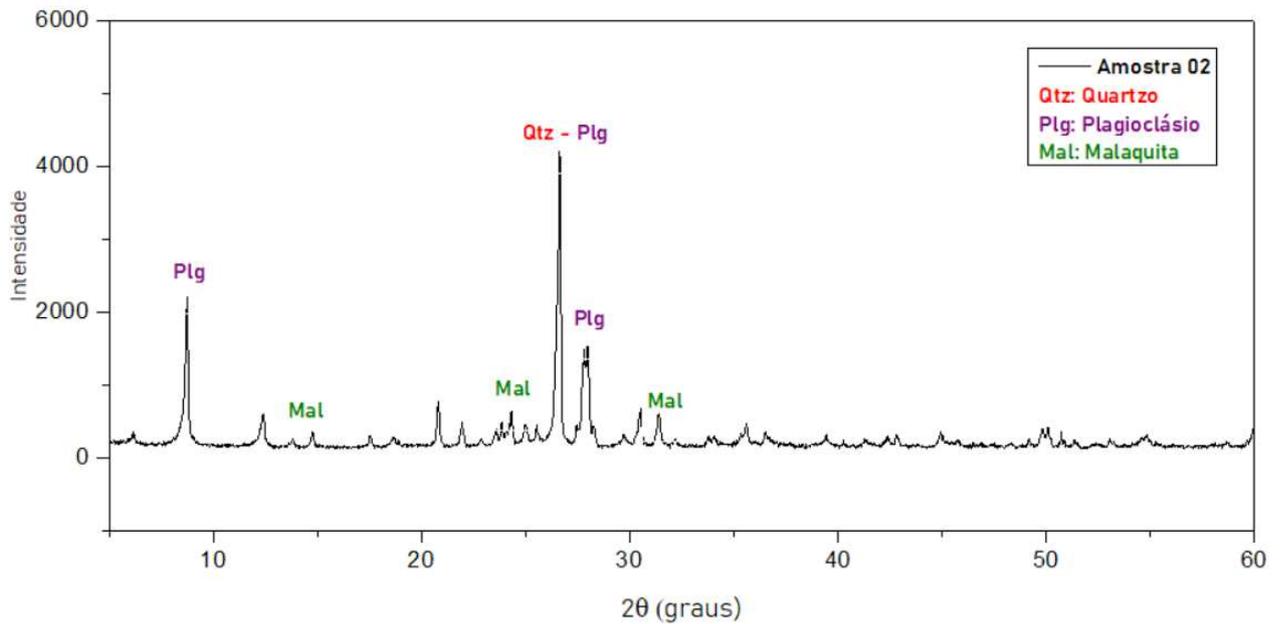
A análise das amostras selecionadas foi realizada por meio da comparação dos seus difratogramas com os padrões de referências que contém informações cristalográficas, sendo assim, picos mais intensos de cada composto cristalino foram comparados aos picos do difratograma. Os resultados apresentados pela máquina (computador) são expressos em ordem decrescente de pontuação, levando a identificação do mineral.

Os difratogramas gerados pelas análises por DRX permitiram identificar ocorrências de cobre nas amostras representativas e minerais identificados pela petrografia. Os gráficos obtidos foram comparados com os padrões de referência, disponíveis no banco de dados *Powder Diffraction File* (PDF). Os resultados para as amostras A01, A02, A03, A04 e A05 e as correspondentes fases minerais que foram identificadas são apresentadas nas Figuras 57, 58, 59, 60 e 61, respectivamente a seguir.

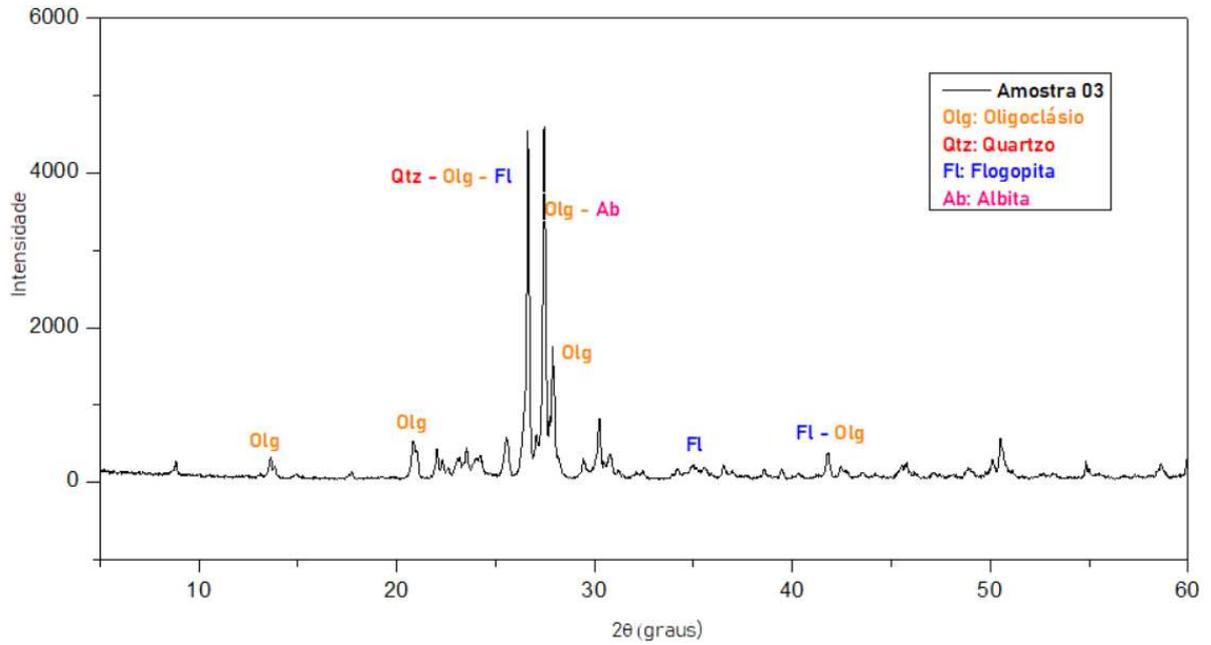
**Figura 57** - Difratoograma ilustrando as fases minerais da amostra de Quarto-biotita-xisto A01 “CuSer1BtXt”



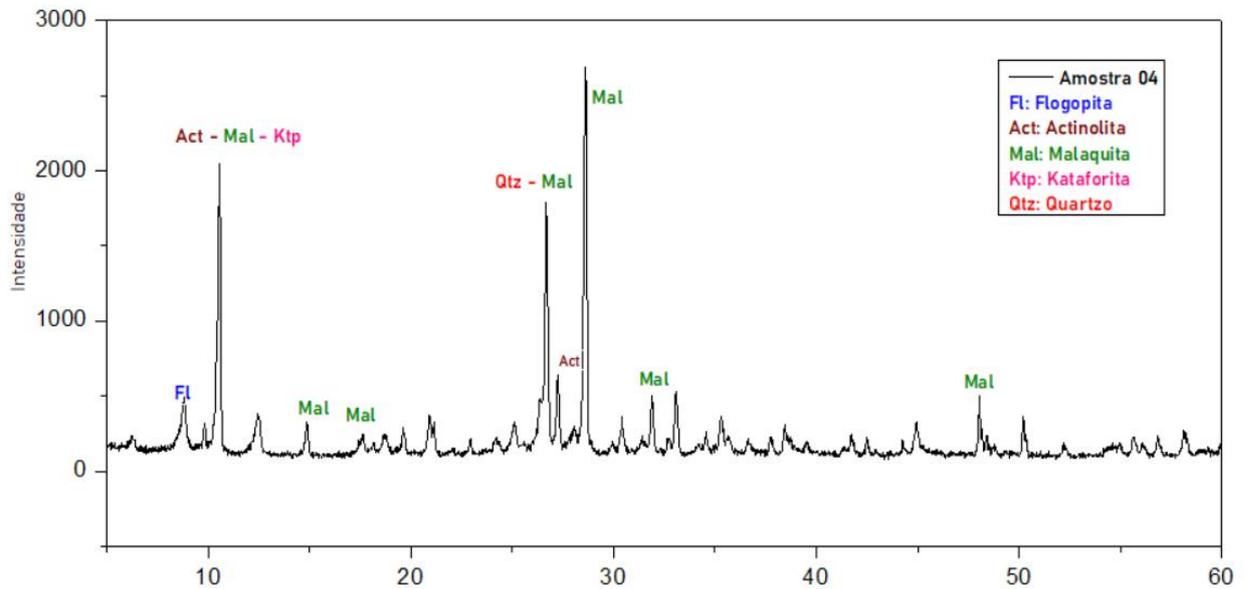
**Figura 58** - Difratoograma ilustrando as fases minerais da amostra de Pegmatito A02 “CuSer1PegMal”

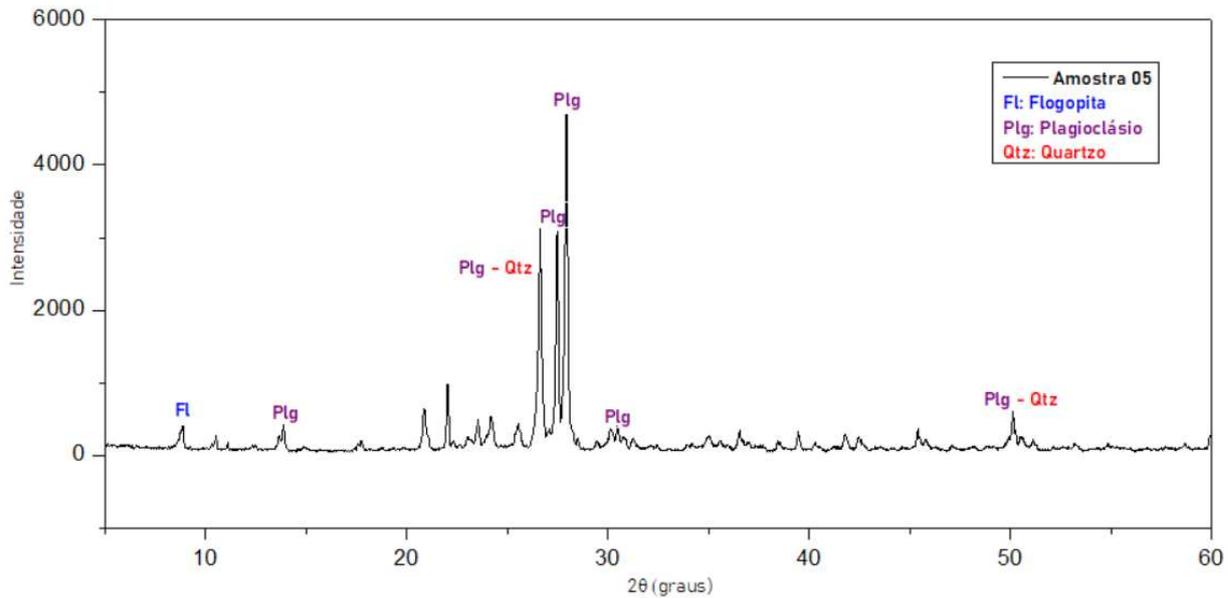


**Figura 59** - Difratoograma ilustrando as fases minerais da amostra de Pegmatito A03 “CuSer4Peg”



**Figura 60** - Difratoograma ilustrando as fases minerais da amostra de Actinolito A04 “CuSer01Act”



**Figura 61** - Difrátograma ilustrando as fases minerais da amostra de Pegmatito A05 “CuSer4Peg2”

Foram observados alguns padrões similares a respeito da composição mineralógica das amostras de cobre analisadas. Os registros das fases de malaquita estão presentes nas amostras A01, A02 e A04 (Figuras 57, 58 e 60), confirmando ser a ocorrência de cobre como fase majoritária tanto em amostra de pegmatitos como de encaixantes. Cabe salientar que não foi determinado a perda por calcinação.

Vale destacar que em todas as amostras foram identificadas a presença de minerais formadores de rochas, como quartzo e feldspatos (albita, oligoclásio). A flogopita também está presente como um dos principais minerais constituintes das amostras estudadas. Essas análises confirmam a presença dos principais minerais presentes nos pegmatitos da PPB. Uma relação dos principais minerais identificados por meio da técnica de difração de raios X é apresentado na Tabela 3, a seguir.

**Tabela 3** - Resultados da Análise por DRX das amostras contendo cobre.

MINERAL	ABREVIACÃO	FÓRMULA QUÍMICA
Quartzo	Qtz	SiO <sub>2</sub>
Oligoclásio	Olg	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Albita	Ab	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Anortita	An	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
Malaquita	Mal	Cu <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>
Flogopita	Fl	KMg <sub>3</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ) (F, OH) <sub>2</sub>
Actinolita	Act	Ca <sub>2</sub> (Mg, Fe) <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>
Katoforita	Kfp	Na (CaNa)(Mg <sub>4</sub> Al) [(AlSi <sub>7</sub> O <sub>22</sub> ) (OH) <sub>2</sub>

Fonte: Dados desta pesquisa (2023).

A presença majoritária de minerais formadores de rocha associados com a malaquita, devem-se, provavelmente, da sua associação e presença nos pegmatitos da PPB, onde também estes minerais fazem parte de sua composição. Juntamente com os feldspatos, o quartzo e as micas são minerais que comumente ocorrem em pegmatitos graníticos.

É relevante destacar que outras ocorrências de cobre foram identificadas, no entanto, é provável que esses minerais estão presentes em pequenas quantidades nas amostras representativas analisadas, sendo que seu volume não é suficiente para criar planos de reflexão detectáveis pela DRX.

#### 5.4.2 Análise por Fluorescência de Raios X

A composição química das amostras representativas analisadas, em termos de óxidos equivalentes é apresentada de maneira comparativa na Tabela 4. As amostras permaneceram identificadas como A01, A02, A03, A04 e A05, conforme apresentado anteriormente.

**Tabela 4** - Resultados das análises por FRX das amostras selecionadas em ocorrência de óxidos.

ELEMENTOS	AMOSTRAS				
	A01	A02	A03	A04	A05
SiO <sub>2</sub>	55,13%	50,79%	66,50%	49,44%	69,12%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,12%	9,60%	18,58%	12,40%	19,04%
MgO	3,94%	-	0,66%	10,56%	1,47%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,80%	7,08%	0,33%	10,24%	1,14%
CaO	4,71%	2,47%	0,40%	9,02%	1,05%
CuO	4,79%	24,94%	0,53%	3,84%	1,18%
K <sub>2</sub> O	3,22%	2,78%	9,70%	1,82%	6,02%
MnO	0,34%	0,07%	0,10%	0,92%	0,21%
TiO <sub>2</sub>	0,96%	0,30%	-	0,71%	0,09%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,34%	-	0,29%	0,39%	0,36%
SO <sub>3</sub>	0,18%	1,75%	0,32%	0,29%	0,26%
ZnO	0,07%	-	-	0,16%	0,02%
Rb <sub>2</sub> O	0,04%	-	0,05%	0,02%	0,04%
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01%	-	0,002%	-	0,003%
SrO	0,03%	0,02%	-	-	-
NbO	-	-	0,005%	-	0,02%
Cr <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,07%	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	0,07%	-
NiO	-	-	-	0,03%	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	0,02%	-
BaO	0,33%	-	-	-	-
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-
ThO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-

Fonte: Dados desta pesquisa (2023).

A partir dos valores obtidos, verificou-se que as amostras são compostas predominantemente por  $\text{SiO}_2$  (49,44 - 69,12%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (9,60 - 19,04%), outros óxidos também estão presentes, mas em quantidades variáveis.

Os valores encontrados para diversos elementos químicos são compatíveis com os principais componentes presentes nos pegmatitos e nas encaixantes da formação Seridó, aqui vale destacar os altos teores de  $\text{SiO}_2$  em todas as amostras analisadas.

Ressalta-se a presença de  $\text{CuO}$  em todas as amostras, com valores variando entre 1,18 a 24,94%, com destaque para a amostra “A02” referente a pegmatito da região de Nova Palmeira/PB, onde a análise por DRX identificou picos relativos à malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ), mineral de origem secundária que pode ter sido resultado do produto da alteração de calcocita. Verificou-se que os resultados das análises por DRX são consistentes com a composição química das amostras fornecida pelas análises químicas quantitativas pela FRX.

A variação dos teores de Fe e Mg podem estar associados com a presença de micas, como a flogopita (mica rica em Mg) e ocasionalmente biotita (mica rica em Fe), ambas identificadas durante as análises petrográficas, principalmente associados às ocorrências cupríferas.

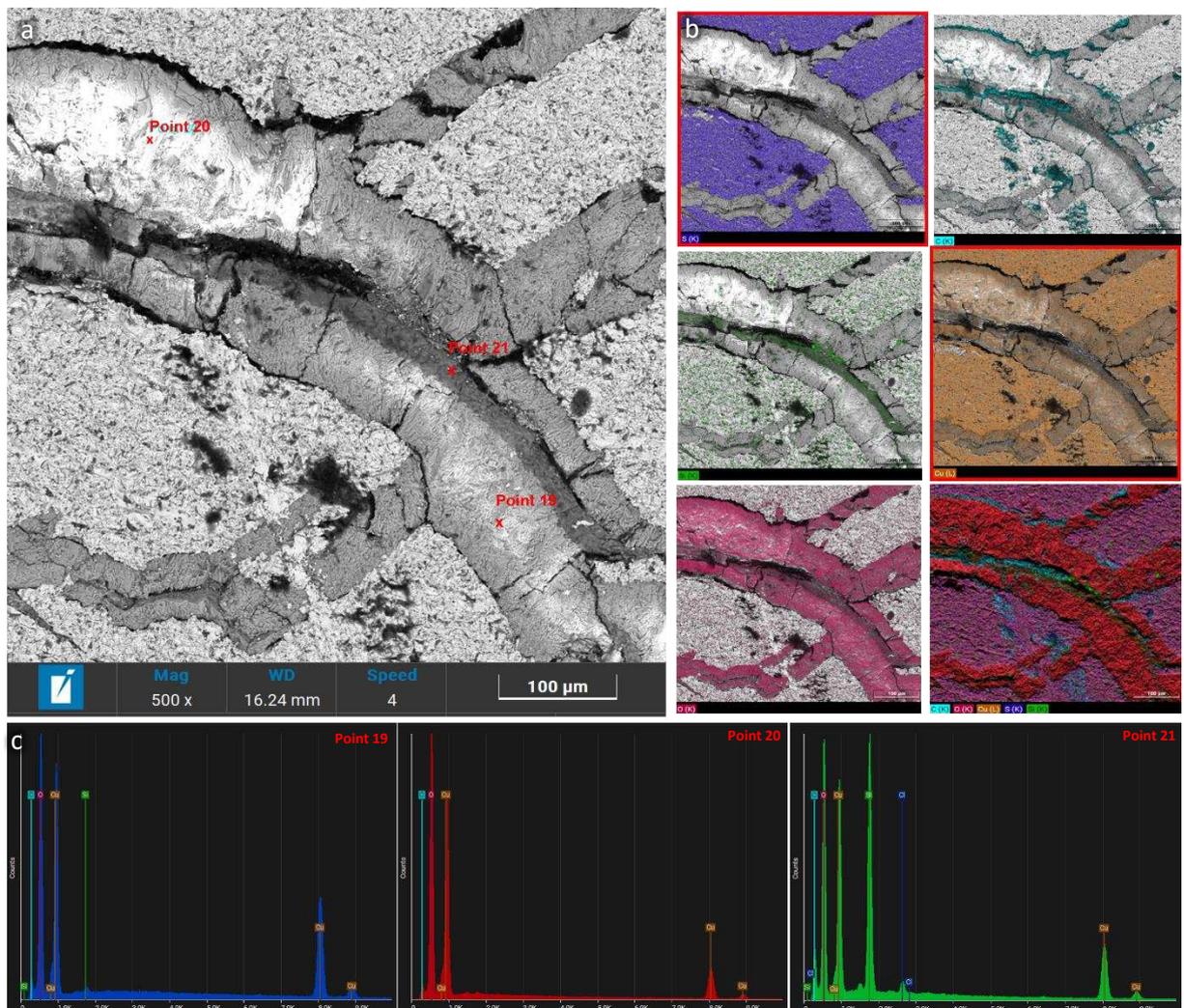
A actinolita (hidróxido de silicato de ferro, magnésio e cálcio) é um mineral portador de Mg e Fe que também foi identificado nas análises pela DRX. Elementos traços como Rb, Y, Zn ocorrem nas amostras em proporções parecidas. O elemento Ba, que é comum em alguns feldspatos, foi identificado apenas em umas das amostras (Amostra 01).

#### **5.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

As imagens geradas por meio do MEV, foram utilizadas como complemento ao estudo macroscópico e caracterização petrográfica das lâminas delgadas confeccionadas. O objetivo desta etapa consistiu em identificar o modo de ocorrência dos minerais portadores de cobre e sua associação com as rochas hospedeiras das mineralizações cupríferas.

Com o auxílio do Espectrômetro de Dispersão de Energia (EDS) e da delimitação de áreas de interesse na lâmina visando um estudo mais detalhado, foi possível identificar a presença de cobre primário na forma de digenita ( $\text{Cu}_9\text{S}$ ), sendo cortado por vênulas de malaquita ( $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ) (Figura 62a). A análise dos elementos químicos representativos para a amostra em questão (Figura 62b), leva a considerar uma significativa concentração de enxofre (S) e cobre (Cu) na amostra, apontando a presença de sulfeto de cobre primário, a qual foi confirmada durante trabalhos de campo conduzidos no pegmatito Capoeira (Parelhas/RN).

**Figura 62** - Ocorrências cupríferas em rocha pegmatítica. a) Imagem por elétrons retroespalhados (BSE) mostrando digenita cortada por vênulas de malaquita. b) Mapeamento químico dos elementos via EDS. c) Espectrogramas dos pontos 19, 20 e 21 evidenciando picos associados a elementos presentes em ocorrências que correspondem a digenita e malaquita.



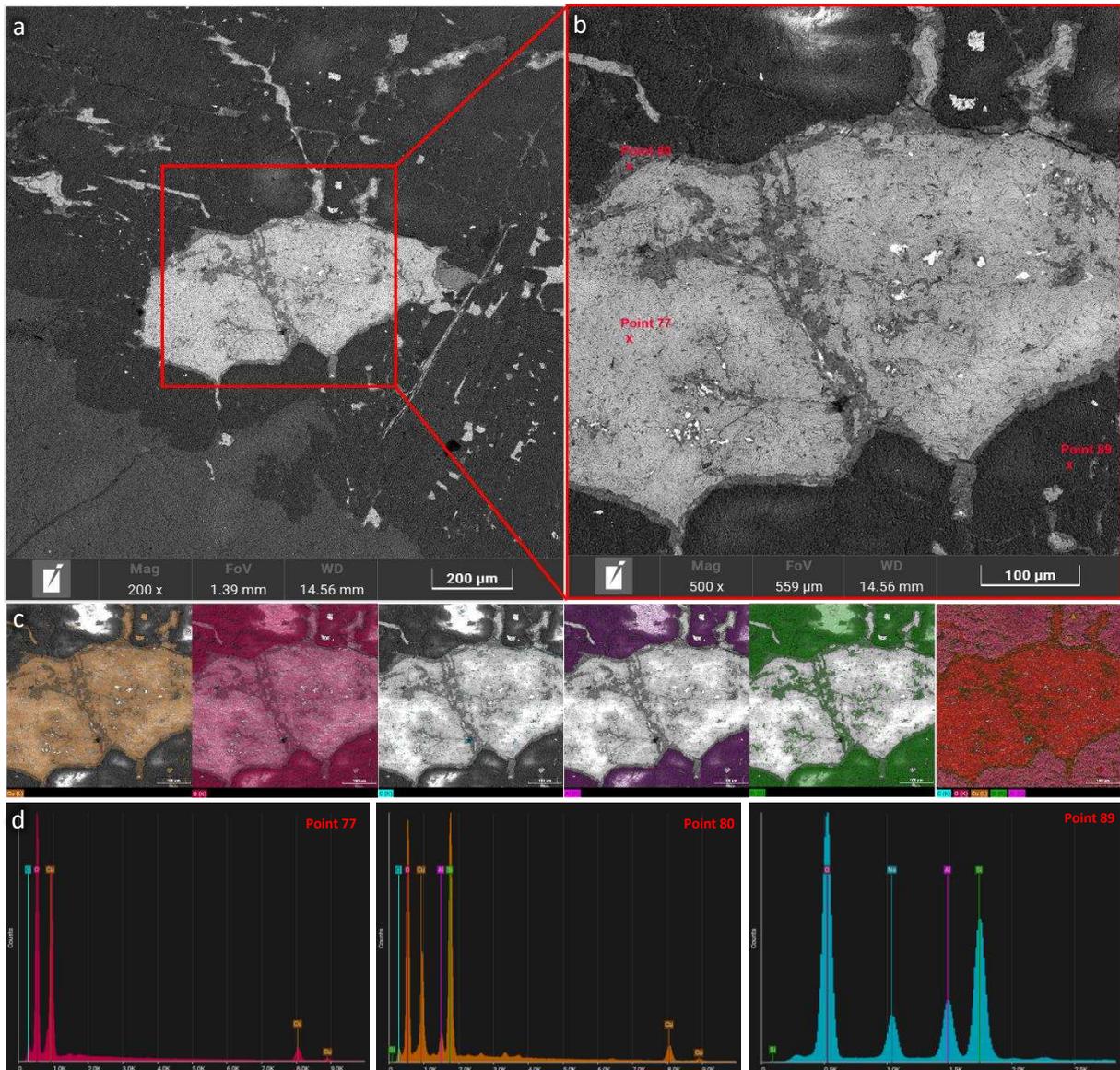
Fonte: Dados desta pesquisa (2023).

Os espectrogramas obtidos por EDS relativos aos pontos 19, 20 e 21 (Figura 62c), identificou picos característicos dos elementos oxigênio (O), cobre (Cu) e carbono (C), que confirmam às evidências da presença de cobre secundário. Essas observações corroboraram com as constatações realizadas ao microscópio petrográfico, que apontavam para a associação entre digenita e malaquita preenchendo fraturas em rochas pegmatíticas.

Grãos subédricos de malaquita foram observados inclusos na matriz opaca da rocha pegmatítica constituída por albita (Figura 63a), segundo observações e dados obtidos por EDS. A presença de albita em pegmatitos graníticos da região do Seridó é comum segundo Soares (2004), no entanto, a presença de malaquita associada ao feldspato pode representar processos de alteração química posterior o qual depositou o metal na rocha pegmatítica.

A interação entre o cristal de malaquita e a albita é marcada por uma evidente alteração nas zonas de contato, observáveis por meio da análise por EDS que apontam a presença de concentrações consideráveis de sílica (Si) e alumínio (Al), além de cobre e carbono. Os espectros de EDS (Figura 63d) dos pontos 77, 80 e 89 e mapeamento dos elementos químicos (Figura 63c), mostraram uma alta porcentagem de elementos, como sódio (Na), sílica (Si), alumínio (Al) e oxigênio (O) referentes a albita e outros elementos associados ao carbonato de cobre (Mlc).

**Figura 63** - Associação de cobre secundário em pegmatitos. a) Imagem por elétrons retroespalhados (BSE) mostrando região contendo malaquita inserida em matriz de albita. b) Magnificação de 500x da área que corresponde ao grão de malaquita com localização dos pontos mapeados por EDS. c) Mapeamento químico dos elementos via EDS. d) Espectrogramas dos pontos 77, 80 e 89, evidenciando picos associados a mineralizações de malaquita e à presença de albita.

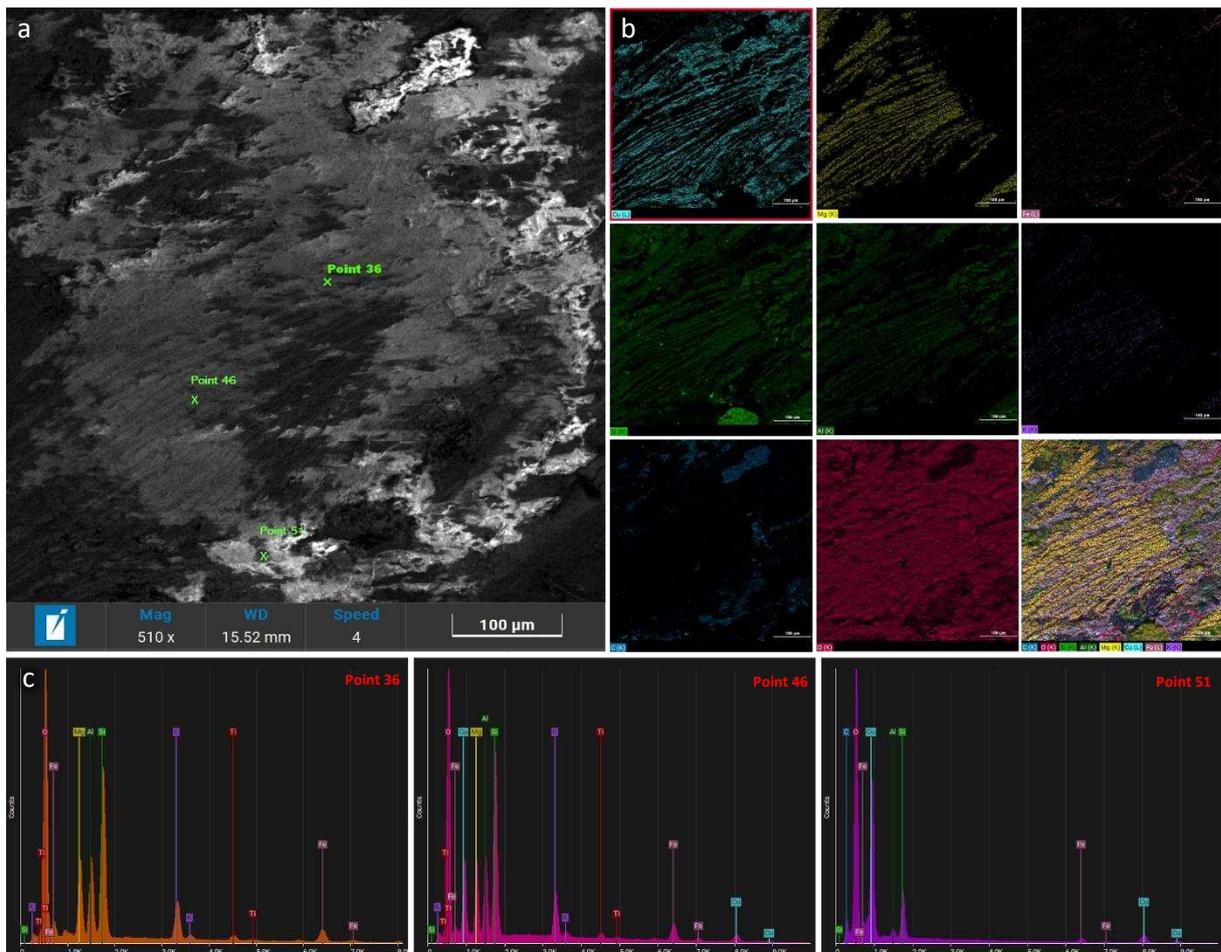


Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Através da análise por MEV, também foi possível identificar a presença de minerais secundários de cobre acompanhando a foliação de rochas com textura xistosa encaixantes aos pegmatitos (Figura 64a). O mapeamento químico dos elementos mostrou alternância de bandas constituídas por elementos que compõem minerais de cobre secundário com bandas compostas por filossilicatos ferromagnesianos (Figura 64b), levando a considerar a associação de malaquita e biotita, conforme observações realizadas em microscópio petrográfico. A análise dos pontos 36 e 46 e espectros de EDS (Figura 64c) possibilitou identificar a existência de

elementos que correspondem ao mineral biotita, bem como quartzo na amostra, confirmando a classificação da amostra estudada como quartzo-biotita-xisto, de acordo com discussões realizadas durante a análise petrográfica.

**Figura 64** - Associação de cobre secundário em encaixantes aos pegmatitos. a) Imagem por elétrons retroespalhados (BSE) mostrando preenchimento de cobre secundário entre as clivagens de biotita. b) Mapeamento químico dos elementos via EDS. c) Espectrogramas dos pontos 36, 46 e 51, respectivamente, confirmando a presença de elementos químicos associados à biotita e malaquita.

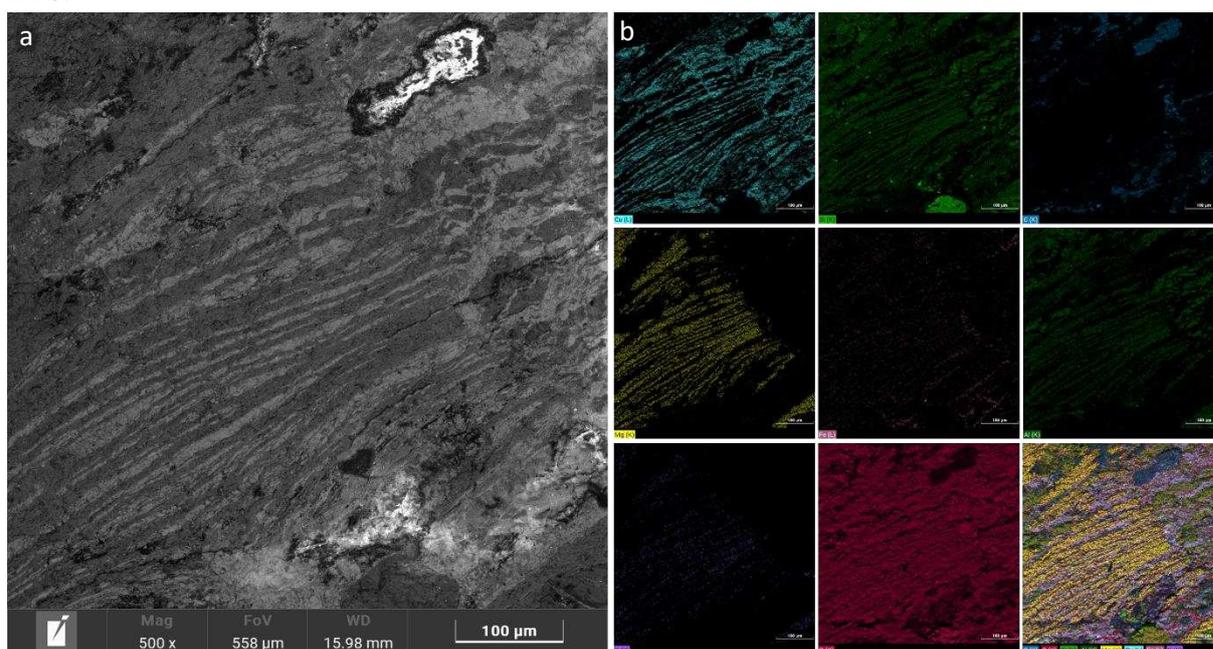


Fonte: dados desta pesquisa (2023).

A presença de minerais secundários de cobre preenchendo clivagem de minerais micáceos, pode evidenciar processos de deposição de cobre subsequente a formação das micas nas rochas encaixantes ou alteração química de minerais pré-existentes. Forte associação de malaquita, proveniente da alteração de calcopirita, ocorrendo habitualmente entre as clivagens de micas também foi observado por Leal e Sá (2021) em pegmatitos da Faixa Seridó.

Carbonato de cobre disposto de forma concordante com a foliação ou fraturas em xistos foi evidente em amostras de mão e também foram observadas microscopicamente (Figura 65a). O mapeamento dos elementos químicos por EDS (Figura 65b), evidenciaram concentrações de cobre (Cu) alternado com magnésio (Mg), sílica (Si), alumínio (Al), ferro (Fe) e potássio (K), referentes a ocorrências de silicatos ferromagnesianos na amostra.

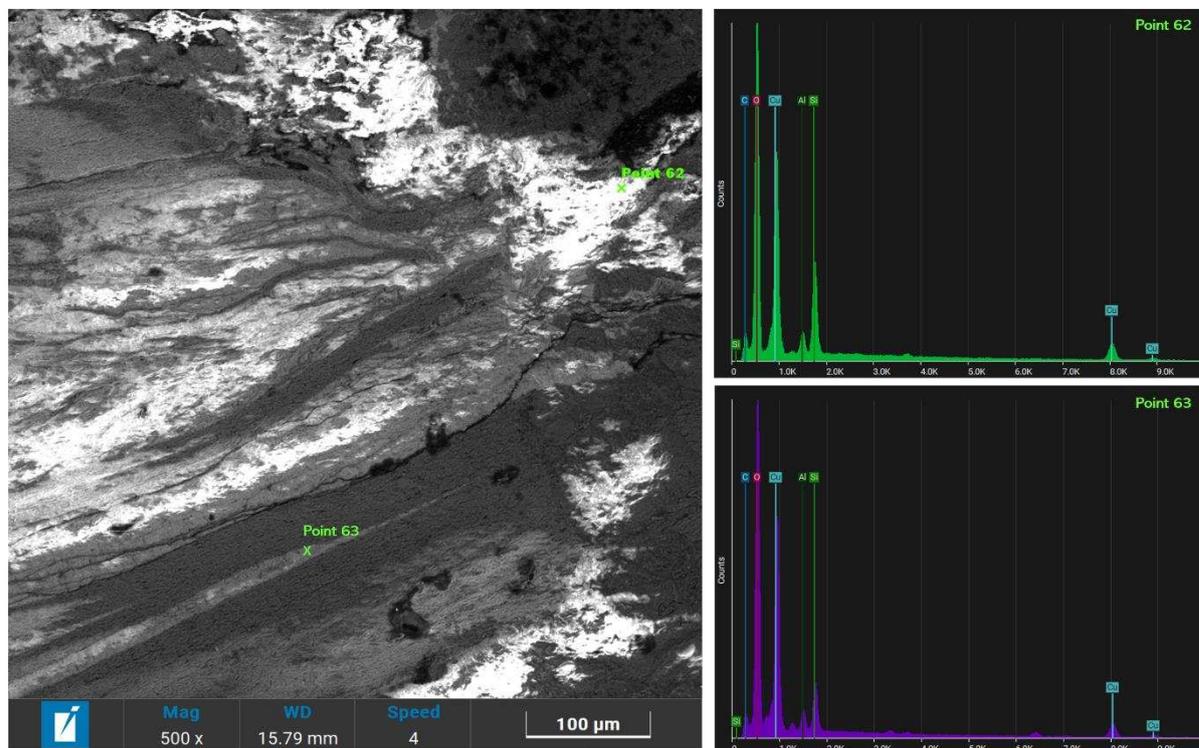
**Figura 65** - Mineralizações de cobre na forma de bandas milimétricas em rochas encaixantes aos pegmatitos. a) Magnificação de 500x da região analisada. b) Mapeamento dos elementos químicos via EDS.



Fonte: dados dessa pesquisa (2023).

Além da ocorrência de cobre entre clivagens de micas, também foi observado como material de preenchimento de fraturas e espaços entre cristais em rochas xistosas, no primeiro caso, por exemplo, evidenciando um fator tectônico como gerador de fraturas para canalizar os fluidos contendo cobre. A análise por EDS dos pontos 62 e 63, mostraram uma alta percentagem de elementos que correspondem a carbonatos de cobre, associado a sílica e alumínio (Figura 66).

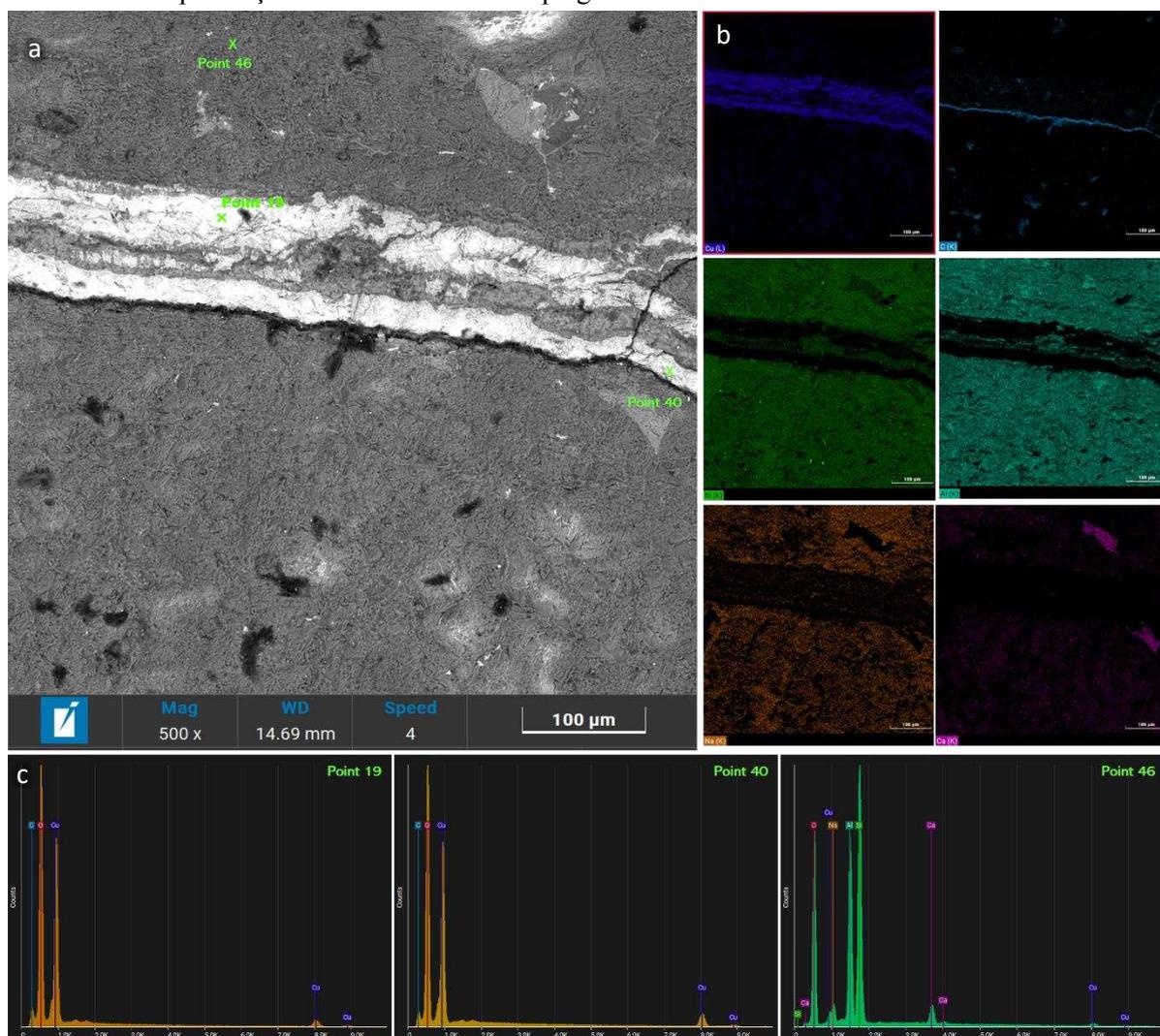
**Figura 66** - Associação de cobre secundário em encaixantes dos pegmatitos, preenchendo espaços e fraturas nas rochas xistosas e análise por EDS dos pontos 62 e 63.



Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Ocorrências de cobre preenchendo fraturas regulares (Figura 67a), também foram observadas em rochas metamórficas constituídas principalmente por cristais de plagioclásio e minerais ferromagnesianos, conforme observado nas análises petrográficas. Cobre secundário na forma de impregnações ou disseminado também foi observado, conforme confirmada sua presença com a análise por EDS do ponto 63 (Figura 67c).

**Figura 67** - Ocorrência de cobre secundário preenchendo fraturas e na forma de impregnações. a) Imagem por elétrons retroespalhados (BSE) de fratura preenchida por cobre secundário em rocha metamórfica. b) Mapeamento de elementos via EDS. c) Espectrogramas dos pontos 19, 40 e 46, confirmando a presença de cobre secundário e plagioclásio.



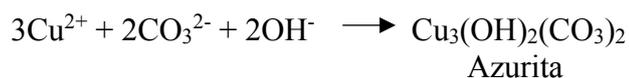
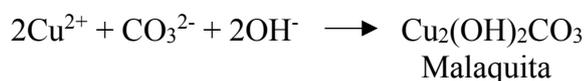
Fonte: dados desta pesquisa (2023).

Microscopicamente, as principais mineralizações de cobre estudadas ocorrem majoritariamente na forma de carbonatos e, ocasionalmente, de sulfetos de cobre. As análises realizadas via EDS foram relevantes ao identificar fases de elementos pertencentes a minerais de cobre observados durante análises petrográficas das amostras coletadas, sendo verificada ocorrências cupríferas principalmente nos pegmatitos da região estudada e, de maneira secundária, nas encaixantes da formação Seridó e Equador.

Vale ressaltar que a presença de cristais de digenita ( $\text{Cu}_9\text{S}_5$ ) parcialmente alterados e bordejados por minerais secundários de cobre, identificados como malaquita ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ),

pode ter sido influenciada por processos supergênicos de transformação de uma ocorrência de mineral primário de cobre e sua posterior deposição como mineral secundário.

Transformações de mineralizações cupríferas primárias em carbonatos de cobre é discutida por diversos autores, como Fernandes (2012), Medeiros e Paula (2019), os quais apontam a lixiviação como processo responsável pela transformação das ocorrências por meio da precipitação de minerais secundários que ocorreu perante um fluido saturado em íons de carbonato favorecido para condições de pH neutras ou alcalinas. A predominância de malaquita como principal mineral secundário encontrado nos pegmatitos e encaixantes, pode ser dada devido a concentrações mais baixas de  $\text{Cu}^{2+}$  liberado no sistema e com a presença de fluidos com pressões parciais de  $\text{CO}_2$  mais baixas do que as necessárias para a formação de azurita, conforme pode ser visualizado nas reações apresentadas nas equações a seguir.



Com as observações realizadas por meio do MEV, destacou-se a presença de cristais subédricos de malaquita nas lâminas estudadas, ocorrendo em rochas xistosas na forma de finas bandas milimétricas alternadas com filossilicatos que compõem a amostra, ao passo que acompanham a orientação preferencial das micas seguindo a mesma foliação dada em decorrência das condições geológicas nas quais essas mineralizações foram submetidas.

A presença de carbonatos de cobre preenchendo fraturas nos pegmatitos e em suas encaixantes pode estar associado a processos tardios de deposição dessas mineralizações ou processos químicos de alteração, podendo ser até hidrotermais, que tenham sido responsáveis pela formação e deposição de mineralizações cupríferas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração de informações obtidas, associadas aos conhecimentos geológicos da região e observações realizadas em campo, permitiram uma visão regional das principais unidades litoestratigráficas, sendo constatada a predominância de rochas supracrustais que fazem parte do Grupo Seridó, onde foi recorrente a identificação de micaxistos pertencentes a Formação Seridó e metaconglomerados e quartzitos oriundos da Formação Equador, ambos encaixantes aos pegmatitos que afloram na PPB.

O estudo de alguns pegmatitos conhecidos, juntamente com a identificação de ocorrências cupríferas, possibilitou constatar a representatividade de alguns minerais comumente encontrados nesses litotipos e algumas feições estruturais presentes nos pegmatitos. Cabendo destacar os pegmatitos Capoeira (Parelhas/RN), Serra Branca (Pedra Lavrada/PB), Corujinha (Parelhas/RN), Salgadinho (Carnaúba dos Dantas/RN) e Mufumbo (Nova Palmeira/PB).

A integração de mapas aerogeofísicos magnetométricos e gamaespectrométricos, associados ao mapa geológico da região e informações acerca dos litotipos regionais, contribuíram como ferramentas auxiliares de investigação da área que este estudo abrange, além de fornecer mapas em escala regional para futuros trabalhos de prospecção mineral. Foi possível obter uma visão geral das principais estruturas presentes, lineamentos estruturais bem como a disposição de domínios e anomalias localizadas próximas aos pontos onde foram encontradas ocorrências de cobre.

No que diz respeito às ocorrências de cobre, foi observado que a maioria estão hospedadas, principalmente, nos pegmatitos e, secundariamente, nas rochas encaixantes correlatas a Formação Seridó ou a Formação Equador. As amostras coletadas e analisadas permitiram identificar minerais de cobre e sua associação com outros minerais formadores de rochas, com destaque para a presença de minerais de cobre de origem supergênica, como a malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ), azurita ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ) e crisocola  $\text{Cu}_{2-x}\text{Al}_x(\text{H}_{2-x}\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , bem como a identificação de minerais de origem primária relativos à digenita ( $\text{Cu}_9\text{S}_5$ ) e bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) na forma de cristais parcialmente alterados contendo bordas de minerais secundários de cobre.

As mineralizações apresentaram-se em diversos estilos, com destaque para a presença de malaquita na forma de pátinas, como infiltrações ou ainda nas zonas de contato entre os pegmatitos e encaixantes da PPB, resultante de possíveis processos de alteração supergênica.

Nas rochas encaixantes aos pegmatitos, foram observadas ocorrências concordantes à foliação de baixo ângulo de xistos e outras rochas com estrutura foliada, assim como preenchimento de cobre secundário nas clivagens de algumas micas nas rochas xistosas, e de fraturas, também de maneira disseminada próxima a núcleos de quartzo nos pegmatitos e em rochas metabásica.

Ensaio de DRX confirmaram a presença dos minerais identificados pela análise macroscópica e petrográfica, relativos à presença de minerais comuns nos pegmatitos, assim como minerais que contêm cobre. Os resultados corroboram com a análise química por FRX, a qual constatou expressiva presença de CuO em uma das amostras de pegmatito, alcançando um teor variando de 0,53 a 24,94%.

As imagens obtidas por MEV-EDS, mostraram a predominância de minerais de origem secundária de cobre, principalmente na forma de cristais anédricos inclusos nos pegmatitos, associados predominantemente com albita, quartzo e biotita, ou ainda preenchendo fraturas ou acompanhando a foliação em xistos pertencentes as rochas encaixantes aos pegmatitos.

Tendo em vista o complexo arcabouço geológico que está inserida a área de estudo situada na PPB, a assimilação de informações obtidas até então, permitiu definir alguns padrões das mineralizações cupríferas, modo de ocorrências e informações de caráter pioneiro sob o ponto de vista microscópico. No entanto, ainda são necessários estudos mais detalhados a fim de se compreender os processos metalogenéticos que contribuíram para concentrar cobre nos principais litotipos da PPB.

## SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudos voltados para identificação da fonte de cobre por meio de estudos isotópicos usando-se amostras que contém ocorrências de cobre primário, como digenita e bornita.
- Elaboração de um modelo genético das mineralizações de cobre associadas aos pegmatitos.
- Catalogar novas ocorrências em outros pegmatitos inseridos na PPB e compará-las com as documentadas até então pela literatura.

## REFERÊNCIAS

- ABCOBRE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO COBRE. (2019). **Cobre e suas propriedades**. Disponível em < <http://abcobre.org.br/cobre-e-suas-propriedades/>> Acesso em 10 de Ago. de 2022.
- ABCOBRE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO COBRE. (2020). **Anuário Brasileiro do Cobre 2020**. São Paulo: ABCOBRE. Disponível em: < <https://abcobre.org.br/o-poder-do-cobre/>> Acesso em 10 Dez. 2021.
- ABCOBRE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO COBRE. (2021). **O poder do Cobre**. São Paulo: ABCOBRE. Disponível em: <<http://abcobre.org.br/anuario-brasileiro-do-cobre/>> Acesso em 20 Dez. 2021.
- ALMEIDA F.F.M., HASUI Y., BRITO NEVES B.B., FUCK, R. (1977). **Províncias estruturais brasileiras**. In: SBG/Núcleo Nordeste. Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande; Atas, 8: 363-391.
- ALMEIDA F.F.M., HASUI Y., BRITO NEVES B.B., FUCK, R.A. (1981). **Brazilian structural provinces: an introduction**. *Earth Science Reviews*, 17: 1-29
- ALMEIDA, S. C., (1941). **Cobre, estanho e tântalo no Planalto de Borborema**. *Mineração & Metalurgia*, v.5, n.30, p.277-281.
- ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. (2023). **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas** / Agência Nacional de Mineração; coordenação técnica de Karina Andrade Medeiros. – Brasília: ANM, 2023. 23 p. Disponível em < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>> Acesso em 18 de mar. 2023.
- ATKINS, P.; JONES, L., (2012). **Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5ª ed. 922p.
- BARTON, M. D. (2014). **Iron oxide (Cu–Au–REE–P–Ag–U–Co) systems**. 2nd edition. *Treatise on Geochemistry* 13 pp. 515–541.
- BATISTA, M. J. A. F. (2003). **Comportamento de elementos químicos no sistema rocha-solo-sedimento-planta na área mineira de Neves Corvo: implicações ambientais**. Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade de Aveiro, Departamento de Geociências. 406p. (Tese de Doutorado).

- BERGER, B. R., AYUSO, R. A., WYNN, J. C., SEAL, R. R., (2008). **Preliminary Modelo f Porphyry Copper Deposits**. U. S. Geological Survey, Reston, VA. Disponível em <[https://pubs.usgs.gov/of/2008/1321/pdf/OF081321\\_508.pdf](https://pubs.usgs.gov/of/2008/1321/pdf/OF081321_508.pdf)> Acesso em 20 de out. de 2022.
- BEURLIN, H., DA SILVA, M.R.R., THOMAS, R., SOARES, D.R., OLIVIER, P. (2008). **Nb-Ta-(Ti-Sn) oxide mineral chemistry as tracer of rare-element granitic pegmatite fractionation in the Borborema Province, Northeastern Brazil**. *Mineralium Deposita*, v.43, p.207-228.
- BEURLIN, H., THOMAS, R., DA SILVA, M.R.R., MÜLLER, A., RHEDE, D., SOARES, D.R. (2014). **Perspectives for Li- and Ta-mineralization in the Borborema Pegmatite Province, NE-Brazil: a review**. *Journal of South American Earth Sciences*, v.56, p.110-127.
- BEURLIN, H.; BARRETO, S.; MARTIN, R.; MELGAREJO, J.; SILVA, M. R. R.; SOUZA NETO, J. A. (2009). **The Borborema pegmatite province, NE-Brazil revisited**. *Estudos Geológicos, Recife*, v. 2, n. 19, p. 62-66.
- BEURLIN, H.; SILVA, M. R. R. & SOARES, D. R. (2002). **Ametista da província pegmatítica da Borborema: gênese e confirmação da procedência através do estudo de inclusões fluidas**. *Revista de Geologia*, v. 15, p.77-86.
- BIONDI, J. C. (2003). **Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos. 528 p.
- BRADLEY, D. C. *et al.* (2017). **D. Lithium**. In: SCHULZ, K. J. (ed.). *Critical Mineral Resources of the United States: Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. Virginia: USGS, p. 1-21.
- BRITO NEVES, B. B., SANTOS, E. J., VAN SCHMUS, W. R. (2000). **Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil**. In: U. Cordani, E. Milani, A. Thomaz Filho., D.A. Campos (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Special publication, 31st Internat. Geol. Congr. Rio de Janeiro, Brazil, pp 151–182.
- BRITO, R. S. C.; SILVA, M. G.; KUYUMJIAN, R. M. (Eds). (2010). **Modelo de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo**. Brasília: CPRM. 213 p., il. (Série Metalogenia). Programa Geologia do Brasil. Disponível em <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16979>> Acesso em 20 Dez. 2021.
- CAVALCANTI NETO, M. T. O. (2008). **A Faixa Cuprífera do Rio Grande do Norte e Paraíba e as relações de contato entre as formações Equador e Seridó**. *Holos*, Ano 24, Vol. 3. Disponível em <<https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/210>> Acesso em 20 Nov. 2021.
- ČERNÝ, P. (1991). **Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies?**. *Precambrian Research*, 51: p. 429-468.
- CHAVES, O. P., (1947). **Cobre em Pedra Branca – Picuí-Paraíba**. DNPM/DGM. (Boletim 81), Rio de Janeiro, 51p.
- COCKER, M. (1998). **Distribution of selected elements in stream sediments, stream hydrogeochemistry, and geology of the Flint River Basin, Georgia**. The Georgia Environmental Protection Division, Bulletin 129.
- CONEGO JUNIOR, D. (2019). **Interpretação geofísica do batólito de Catolé do Rocha PB-RN, Brasil**. Universidade Federal do Pernambuco – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. (Dissertação de Mestrado), 96p.
- CORREIA, M. G.; LEITE, E. P. & SOUZA FILHO, C. R. (2010). **Comparação de métodos de estimativa de profundidades de fontes magnéticas utilizando dados aeromagnéticos da província mineral de Carajás, Pará**. *Revista Brasileira de Geofísica* Vol. 28(3) p. 411-426.

- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (2007). **Jardim do Seridó- SB.24-Z-B-V, escala 1:100.000: nota explicativa**. Francisco Hilário Rego Bezerra, Ricardo Farias do Amaral, Francisco Oliveira da Silva, Maria Osvalneide Lucena Sousa, Vanildo Pereira da Fonseca, Marcela Marques Vieira.- Rio Grande do Norte/Paraíba: UFRN /CPRM.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (2008). **Geologia e Recursos Minerais da Folha Sousa SB.24-X-A. Estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará**. Recife: 312 p.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (2010). **Projeto Aerogeofísico Paraíba-Rio Grande do Norte**. Disponível em < <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/10832>> Acesso em 05 Jun de 2022.
- DAMASCENO, C. G. (2017). **Geologia, mineração e meio ambiente**. Cruz das Almas, BA: UFRB. 64p. Disponível em < [https://www2.ufrb.edu.br/ead/images/imagensACESSE/Geologia\\_Minera%C3%A7%C3%A3o\\_e\\_Meio\\_Ambiente.pdf](https://www2.ufrb.edu.br/ead/images/imagensACESSE/Geologia_Minera%C3%A7%C3%A3o_e_Meio_Ambiente.pdf)> Acesso em 30 de out. de 2022.
- DANTAS, J. R. A., mouraCAULA, J. A. L. (1982). **Estratigrafia e geotectônica**. In: SERM/CDRM. Mapa geológico do estado da Paraíba; texto explicativo. João Pessoa, SERM/CDRM. 134 p.
- DANTAS, L. F. (2020). **Potencial Econômico dos Pegmatitos tipo LCT localizados a sudeste de Parelhas/RN**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Departamento de Geologia. (Trabalho Final de Curso). 111p.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. (2007). **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS.
- DICKSON B.L., SCOTT K.M. (1997). **Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors**. *AGSO J. Australia Geology & Geophysics*. 17(2):187-200.
- DOBRIN, M.B. e SAVIT, C. H. (1988). **Introduction to Geophysical Prospecting**. McGraw-Hill Book Co., New York, 867 p.
- DOWNING, B.W., (2009). **Acid rock generation/drainage in mineral deposits throughout time (Kemess case study)**. Disponível em < <http://technology.infomine.com/enviromine/ard/Case%20Studies/kemess.html>> Acesso em 18 de set. de 2022.
- FERNANDES, G. P. (2012). **Mineralizações de Cobre da Mina de Miguel Vacas: Caracterização Petrográfica e Geoquímica**. 345 f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.
- FERREIRA, F. J. F., WEIHERMANN, J. D., BARÃO, L. M., FEDALTO, G., CASTRO, L. G., STEVANATO, R. (2016). **Gamaespectrometria Aérea e sua aplicação na Cartografia Geológica**. In: Nadalin R. J. (eds.) Tópicos Especiais em Cartografia Geológica. 2ª edição, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 303-335p.
- FREITAS, J. M. S. (2014). **Fluídos hidrotermais em pegmatitos graníticos**. Dissertação de mestrado em Geologia pelo departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP). Portugal, 96 p.
- GARCIA, P. M. P. (2013). **Metalogênese dos Depósitos Cupríferos de Caracíba, Surubim, Vermelhos e Sussuarana, Vale do Curaça, Bahia, Brasil**. Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, Área de Petrologia, Metalogênese e Exploração Mineral. 226p. (Dissertação de Mestrado).
- GOYZUETA, C. J. S. (2013). **O pórfiro de Cu Cuajone, Peru: geoquímica, petrologia e evolução da alteração hidrotermal e sua relação com a fase fluída**. Tese de Doutorado em Mineralogia e Petrologia – Universidade de São Paulo. 283p.

- GROVES, D., BIERLEIN, F., MEINERT, L., HITZMAN, M. (2010). **Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from Other Epigenetic Iron Oxide Deposits**. *Economic Geology*, v. 105, pp. 641-654.
- HAYES, T.S., COX, D.P., PIATAK, N.M., and SEAL, R.R., II, (2015). **Sediment-hosted stratabound copper deposit model: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-M**, 147 p. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070M>> Acesso em 17 de out. de 2022.
- HITZMAN, M.W., ORESKES, N., EINAUDI, M.T. (1992). **Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposit**. *Precambrian Research*. 58, 241-287.
- HITZMAN, M.W., SELLEY, D. and BULL, S., (2010). **Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history**. *Economic Geology*, 105(3), pp.627-639.
- INFORMAQ – Jornal. (2023). **A importância de minerais estratégicos para a indústria e as potencialidades do cobre são expostas na ABIMAQ**. Jornal digital INFORMAQ. Disponível em <<https://informaq.abimaq.org.br/a-importancia-de-minerais-estrategicos-para-a-industria-e-as-potencialidades-do-cobre-sao-expostas-na-abimaq/>> Acesso em 10 de jun. 2023.
- JARDIM DE SÁ, E. F. (1994). **A Faixa Seridó (Província Borborema, ne do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-africana**. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, tese de Doutorado, 804 p.
- JARDIM DE SÁ, E. F., SALIM, J. (1980). **Reavaliação dos conceitos estratigráficos na região do Seridó (RN-PB)**. *Mineração e Metalurgia*, 80, 16-28.
- JOHN, D. A., AYUSO, R. A., BARTON, M. D., BLAKELY, R. J., BODNAR, R. J., DILLES, J. H., GRAY, F., GRAYBEAL, F. T., MARS, J. C., MCPHEE, D. K., SEAL, R. R., TAYLOR, R. D., VIKRE, P. G., (2010). **Porphyry copper deposit model, chapter of mineral deposit models for resource assessment**. 2010-5070-B, U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 186p.
- JOHNSTON Jr., W. D. (1945). **Beryl-tantalite pegmatites of Northeastern Brazil**. *Geological Society of América Bulletin*, v.56, 1015-1070 p.
- JOHNSTON JR., W. D. (1945a). **Os pegmatitos berilo-tantalíferos da Paraíba e Rio Grande do Norte, no Nordeste do Brasil**. DNPM/DFPM (Boletim 72). Rio de Janeiro, 85 p.
- JOHNSTON JR., W. D. (1945b). **Beryl-tantalite pegmatites of northeastern Brazil**. *The Geological Society of America – Bulletin*, 56; p. 1015-1070.
- JONES, S. M. (2020). **Alteration and fluid flow associated with semente-hosted stratiform Copper mineralisation in the 1.1 Ga midcontinent rift system, USA**. University of St Andrews. 201p.
- KOLB, J. & STENSGAARD, B. M., (2009). **IOCG – Iron Oxide Copper-Gold mineralising systems in Greenland**. *Revista Geology and Ore – Exploration and Mining in Greenland*. 13 Ed. 12p.
- KUNZ, K. F. (2019). **Mapeamento Geológico de uma área situada em regiões dos municípios de Jardim de Piranhas e Timbaúba dos Batistas – RN**. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. (Trabalho Final de Curso).
- LAZNICKA, P. (2006). **Giant Metallic Deposits: Future Sources of Industrial Metals**. 1 ed. Berlim: Springer. 732 p.
- LAZNICKA, P. (2010). **Giant Metallic Deposits: Future Sources of Industrial Metals**. 2 ed. Berlim: Springer. 961 p.

- LEAL E SÁ, R. F. (2021). **Petrografia e balanço de massa aplicados ao estudo da gênese dos skarns mineralizados em Cu da Faixa Timbaúba-Malhada Limpa, Leste da Faixa Seridó, NE do Brasil**. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. (Dissertação de Mestrado). Disponível em <<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/45915/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Rafael%20Ferraz%20Leal%20e%20S%C3%A1.pdf>> Acesso em 27 de jul. de 2022.
- LIMA, S. C. (2006). **Estudo da técnica de difração de raios X**. Trabalho Final de Curso – Universidade Estadual de Feira de Santana (Departamento de Física). 69p.
- LONDON, D., (2008). **Pegmatites. The Canadian Mineralogist**, Special Publication 10. R. F. Martin (Ed.), Mineral. Assoc. Can. Québec, Canadá.
- LUETZELBURG, P. VON. (1923). **Estudo Botânico do Nordeste**. Rio de Janeiro: IFOCS Publicações, Ministério da Viação e Obras Públicas, v.3, 384p. Disponível em <[https://books.google.com.br/books/about/Estudo\\_bot%C3%A2nico\\_do\\_Nordeste.html?id=1MvtQwAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.br/books/about/Estudo_bot%C3%A2nico_do_Nordeste.html?id=1MvtQwAACAAJ&redir_esc=y)> Acesso em 02 de Jan. 2022.
- LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. C. (1995). **Geofísica de prospecção**. Belém: Universidade Federal do Pará.
- PORPHÍRIO, NEY H., BARBOSA, M. I. M., BERTOLINO, L. C. (2010). **Caracterização Mineralógica de Minérios – Parte I**. In. LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. (Eds.), Tratamento de Minérios. (57-84p). 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. Disponível em <<https://livroaberto.ibict.br/handle/1/949>> Acesso em 21 mar. 2023.
- LUZ, A. B., FRANÇA, S. C. A., BRAGA, P. F. A. (2018). **Tratamento de Minérios**. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 959p.
- MAGHFOURI, S., RASTAD, E. BORG, G., HOSSEINZADEH, M. R., MOVAHEDNIA, M., MAHDAVI, A., MOUSIVAND, F. (2020). **Metallogeny and temporal-spatial distribution of sediment-hosted stratabound copper (SSC-type) deposits in Iran; implications for future exploration**. Ore Geol. Rev., 127. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169136820310192#preview-section-cited-by>> Acesso em 30 de set. de 2022.
- MAKSAEV, V., 2004. **Porfíros Cupríferos**. Universidad de Chile, Departamento de Geologia. Disponível em: [https://www.ocmal.org/wp-content/uploads/2017/03/porfidos\\_cupriferos.pdf](https://www.ocmal.org/wp-content/uploads/2017/03/porfidos_cupriferos.pdf). Acesso em 16 de out. de 2022.
- MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de caracterização microestrutural e análise de imagens. Apostila. Disponível em <[http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV\\_Apostila.pdf](http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf)> Acesso em 10 ago. 2023.
- MEDEIROS V. C., CAVALCANTE R., CUNHA A. L. C., DANTAS A. R., COSTA A. P., BRITO A. A., ROBRIGUES J. B., SILVA M. A. (2017). **O furo estratigráfico de Riacho Fechado (Currais Novos/RN), Domínio Rio Piranhas-Seridó (Província Borborema, NE Brasil): Procedimentos e Resultados**. Estudos Geológicos (UFPE), 27(3): 3-44.
- MEDEIROS, J. V. F., PAULA, R. N. (2019). **Mapeamento geológico da Bacia Catolé-São Julião e suas ocorrências de cobre, Piauí-Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharel em Geologia pelo departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza. 132p.
- MEDEIROS, V. C., CAVALCANTE, R., SANTOS, F. G., RODRIGUES, J. B., SANTANA, J. S., COSTA, A. P., NETO, I. C. (2021). **The Rio Piranhas-Seridó Domain, Borborema Province, Northeastern Brazil: Review of Geological-Geochronological Data and Implications for Stratigraphy and Crustal Evolution**. Journal of the Geological Survey of Brazil, 4(3), 179-207.

- MORA, N. D. (2010). **Algumas técnicas de caracterização de materiais**. In: Apostila de Materiais Elétricos. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Laboratório de Materiais (LAMAT). Disponível em < <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap5.pdf>> Acesso em 13 de mai. 2023.
- OLIVEIRA, A. C. (1981). **Município de Picuí: Esboço Histórico**. Brasília: CNEC.
- OLIVEIRA, J. R., TELES, G., ECHEVERRI-MISAS, C.M., ALMEIDA, H.L., SILVA PINTO, D., LISBOA, V.A., NETO, F.A., (2019). **Caracterização preliminar das ocorrências de cobre em Nova Palmeira-Pb, Província Pegmatítica do Seridó**. 28º Simpósio de Geologia do Nordeste. 261p. Disponível em < [http://sbgeo.org.br/assets/admin/imgCk/files/Anais/Anais\\_28o\\_Simposio\\_de\\_Geologia\\_do\\_Nordeste-ISBN.pdf](http://sbgeo.org.br/assets/admin/imgCk/files/Anais/Anais_28o_Simposio_de_Geologia_do_Nordeste-ISBN.pdf)> Acesso em 21 de Nov. 2021.
- OLIVEIRA, P., COSTA, S. S., JACAÚNA, I. S. (2019). **Avaliação de Dados aeromagnetométricos na porção Oeste de Roraima a partir de técnicas de processamento digital em ambiente SIB**. Sixteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brasil.
- PARK, J. W., CAMPBELL, I. H., CHIARADIA, M., HAO, H., (2021). **Crustal magmatic controls on the formation of porphyry copper deposits**. Nature Reviews Earth & Environment.
- PEREIRA, A. M. (2014). **Prospecção magnetométrica em intrusiva básica com indícios de mineralização aurífera no município de São Sepé – RS**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 70p.
- PIRAJNO, F., (2009). **Hydrothermal Processes and Mineral Systems**. Geological Survey of Western Australia, Perth, Australia. Springer Science+Business Media B.V. 1273p.
- POHL, W. L. (2011). **Economic Geology: Principles and Practice: metals, minerals, coal and hydrocarbons introduction to formation and sustainable exploitation of mineral deposits**. Ed. John Wiley & Sons Ltd. 680 p.
- QUEIROZ, A.; KUROSAWA, R.; BARRETO, R. (2013). **Difração de Raios-X**. Universidade de São Paulo (USP), Laboratório Avançado de Física Computacional. 34p. Disponível em < [https://www3.ifsc.usp.br/~lavfis/images/BDApostilas/ApRaios-X/Manual\\_RX\\_v2.pdf](https://www3.ifsc.usp.br/~lavfis/images/BDApostilas/ApRaios-X/Manual_RX_v2.pdf)> Acesso em 16 de mar. 2023.
- RIBEIRO, J. A. S. (2001). **Cobre: Balanço Mineral 2001**. Departamento Nacional de Pesquisa Mineral – DNPM. Disponível em < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-cobre/view>> Acesso em 13 de set. de 2022.
- RIBEIRO, V. B.; MANTOVANI, M. S. M.; LOURO, V. H. A. (2013). **Aerogamaespectrometria e Suas Aplicações no Mapeamento Geológico**. Terra e Didática, v.10. p. 29-51.
- ROBB, L. J. (2005). **Introduction to Ore-Forming Processes**: Oxford (Blackwell Publishing), 373p. Disponível em <[https://kursatozcan.com/ders\\_notlari/Introduction\\_to\\_Ore\\_Forming\\_Processes.pdf](https://kursatozcan.com/ders_notlari/Introduction_to_Ore_Forming_Processes.pdf)> Acesso em 09 de ago. de 2022.
- ROLFF, P. A. M. A. (1945). **Contribuição ao estudo de cassiterita no Nordeste**. Divisão de Fomento da Produção Mineral, Rio de Janeiro: DNPM.
- ROLFF, P. A. M. A., (1946). **Bismuto, cobre e ouro na Borborema**. DNPM/DFPM (Avulso 75), Rio de Janeiro, 36p.
- SALES, M. C. C. (2020). **Considerações sobre os granitos pegmatitos da Província Pegmatítica do Seridó: Mapeamento Geológico e Geoquímico**. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharel

em Geologia pelo departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Natal, 111p.

- SALES, M. C. C. (2023). **Caracterização petrográfica, composição química mineral e aspectos estruturais do campo pegmatítico Mufumbo-Trigueiro, Nordeste de Parelhas (RN)**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal do Pernambuco (UFPE). Recife, 94p.
- SANTOS, A. L. A. (2018). **Caracterização Mineralógica e tecnológica de minério**. Londrina: editora e distribuidora Educacional S. A. 232p.
- SANTOS, E. J., FERREIRA, C. A., (2002). **Geologia/estratigrafia. In: Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba** (Texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do Estado da Paraíba), Recife.
- SANTOS, E. J., BRITO NEVES, B. B., VAN SCHMUS, W. R., OLIVEIRA, R.G., MEDEIROS, V. C. (2000). **An overall view on the displaced terrane arrangement of the Borborema Province, NE-Brazil**. In: Intern. Geol. Congr., 31, Rio de Janeiro.
- SANTOS, L. L. *et al.* (2020). **Valorização da cadeia produtiva do lítio: alternativas sustentáveis para extração de lítio do espodumênio**. Natal: EDUFRN. Disponível em <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/28955>> Acesso em 30 mai. 2023.
- SCORZA, E. P. (1944). **Província Pegmatítica da Borborema**. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, Boletim 112, 57p.
- SILLITOE, R. H. (2010). **Porphyry Copper Systems**. Society of Economic Geologists Inc. Economic Geology, v. 105, 39p.
- SILVA, A. G. G., (2011). **Cadeia Produtiva do Cobre**. Trabalho Final do Curso (TCC) – Universidade Federal de Minas Gerais. Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais (CEERMIN), 89p. Disponível em <[https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS9C9GJ8/1/monografia\\_benef\\_min\\_cu\\_abel\\_risia\\_ufmg.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS9C9GJ8/1/monografia_benef_min_cu_abel_risia_ufmg.pdf)> Acesso em 20 de abr. de 2022.
- SILVA, A. L. DA. (2013). **Caracterização mineralógica por difração de raios X e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 114p. Disponível em <[https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-97XP2T/1/dissertacao\\_amanda.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-97XP2T/1/dissertacao_amanda.pdf)> Acesso em 01 de abr. 2023.
- SILVA, G. M. (2014). **Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras** / Organizadores Maria da Glória da Silva, Manoel Barretto da Rocha Neto, Hardy Jost [e] Raul Minas Kuyumjian – Belo Horizonte: CPRM, 2014. 589 p.
- SILVA, S. M. P. & CRÓSTA, A. P. (2011). **Mapeamento de pegmatitos da Faixa Seridó (FSe) com base na análise por componentes principais de imagens TM/Landsat-5 e Terra/ASTER e o apoio da espectroscopia de reflectância**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, INPE, p. 3597.
- SOARES, D. R. (2004). **Contribuição à Petrologia de Pegmatitos Mineralizados em Elementos Raros e Elbaítas Gemológicas da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil**. p. 158. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- SUSIN, V. C. F. (2019). **Interpretação de Dados Aerogeofísicos para identificação de Depósitos de Grafita na Região de Macarani, no Estado da Bahia**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências. 92p.

- TEIXEIRA, M. F. L. (2019). **Estudo de caracterização e desenvolvimento tecnológico dos materiais duros cimentados da Mina de Fosfato da Copebrás, GO**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais. 97p.
- ULIANA, D.; KAHN, H.; BRAZ, A. B. (2009). **Caracterização tecnológica dos tipos de minério de fosfato do complexo alcalino de Salitre, MG – área Fosfertil**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 4, p. 511-516.
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. (2021). **Mineral Commodity Summaries – Copper**. Disponível em <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-copper.pdf>> Acesso em 10 Dez. 2021.
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. (2022). **Mineral Commodity Summaries – Copper**. Disponível em <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-copper.pdf>> Acesso em 15 de out. de 2022.
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. (2023). **Mineral Commodity Summaries – Copper**. Disponível em <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-copper.pdf>> Acesso em 10 de fev. de 2023.
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2014). **Avaliação de Cobre Stratabound Hospedado por Sedimentos do Grupo Roan Neoproterozóico, Cinturão de Cobre da África Central, Bacia de Katanga, República Democrática do Congo e Zâmbia**. Disponível em <<https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5090/t/pdf/sir2010-5090T.pdf>> Acesso em 14 de nov. de 2022.
- VAN SCHMUS W.R., BRITO NEVES B.B., HACKSPACHER P.C., BABINSKI M., FETTER A.H., DANTAS E.L. (1997). **Application of U–Pb and Sm– Nd geochronology to understanding the geotectonic history of the Borborema Province, NE Brazil and its implications for the evolution of West Gondwana**. Resumos estendidos, Simpósio da América do Sul em Geologia Isotópica, Campos do Jordão-SP.
- VAN SCHMUS, W. R., BRITO NEVES, B. B., WILLIAMS, I. S., HACKSPACHER, P. C., FETTER, A., DANTAS, E. L., BABINSKI, M. (2003). **The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U-Pb detritial zircon ages and Sm-Nd crustal residence (TDM) ages**. *Precambrian Research*, 127, 284-327.