



## Caracterização Gemológica das Turmalinas de Quixeramobim Gemological Characterization of the Tourmalines from Quixeramobim

Isaac Gomes de Oliveira<sup>1</sup>; Laryssa de Sousa Carneiro<sup>2</sup>; Claudia Estefani Rodrigues Saraiva<sup>1</sup>;  
Irani Clezar Mattos<sup>1</sup> & Tereza Falcão de Oliveira Neri<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia,  
Avenida Av. Humberto Monte, s/n, Mister Hull, s/n, CEP 60440-593, Fortaleza, CE, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia e Recursos Naturais,  
Rua Carlos Gomes, 250, CEP 13083-851, Campinas, SP, Brasil.

E-mails: isaacgomes\_1996@hotmail.com; laryssa.s.carneiro@gmail.com;  
claudiaestefani10@hotmail.com; irani.mattos@ufc.br; tereza.neri@ufc.br

Recebido em: 09/08/2019 Aprovado em: 21/11/2019

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2020\\_1\\_207\\_217](http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_207_217)

### Resumo

A caracterização gemológica de minerais permite a avaliação de gemas naturais, sintéticas, orgânicas e artificiais quanto à sua qualidade gemológica, incluindo descrição de características referentes a sua densidade, dureza, cor e composição química. A turmalina é um mineral que pode ser utilizado como gema e ocorre em todas as cores. Jazidas deste grupo mineral são encontradas especialmente em pegmatitos e depósitos aluvionares. Este trabalho trata da caracterização gemológica dos espécimes de turmalina não estudados oriundos do município de Quixeramobim (CE) que possuem potencial para serem utilizados como gemas. As amostras selecionadas para este estudo derivam de pegmatitos do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim, da porção central do estado do Ceará. Para a caracterização das turmalinas foram utilizados refratômetro, balança hidrostática, dicróscópio, espectroscópio, lâmpada ultravioleta (UV) e microscópio gemológico, além de espectroscopia por energia dispersiva (MEV-EDS) para análise da composição química das amostras estudadas. Os exemplares nas cores azul, verde e rosa apresentam características gemológicas similares às de turmalinas de outras regiões do mundo, no entanto, podem mostrar variações no pleocroísmo, densidade e birrefringência, que foram atribuídas a variações na quantidade de FeO na estrutura cristalina de alguns exemplares. Os minerais possuem bom grau de cor e inclusões fluidas perceptíveis. Por meio do uso dos instrumentos gemológicos listados e análises acuradas foi possível realizar uma excelente caracterização e compilação dos dados dos minerais desta região, além de comprovar que os exemplares possuem boas a medianas características para serem utilizados como gemas.

**Palavras-chave:** Propriedades Ópticas; Quixeramobim; Qualidade Gemológica

### Abstract

Gemological characterization of minerals allows the evaluation of natural, synthetic, organic and artificial gems in relation to their gemological quality, including description of characteristics regarding their density, hardness, color and chemical composition. Tourmaline is a mineral that can be used as a gemstone and occurs in all colors. Deposits of this mineral group are found especially in pegmatites and alluvial deposits. This paper aims the gemological characterization of unstudied tourmaline specimens from Quixeramobim (CE) that have the potential to be used as gems. The samples selected for this study are derived from pegmatites from the Solonópole-Quixeramobim Pegmatite District, in the central portion of Ceará. For the characterization of tourmaline, refractometer, hydrostatic balance, dichroscope, spectroscope, ultraviolet lamp (UV) and gemological microscope were used, as well as energy dispersive spectroscopy (MEV-EDS) for analysis of the chemical composition of the studied samples. The specimens in blue, green and pink colors have similar gemological characteristics to tourmaline from other regions in the world; however, they may show variations in pleochroism, density and birefringence, which were attributed to the variation of the amount of FeO in the crystalline structure in some specimens. Minerals have a good degree of color and noticeable fluid inclusions. Through the use of the listed gemological instruments and accurate analysis, it was possible to perform an excellent characterization and compilation of mineral data from this region, besides proving that the specimens have good to medium characteristics to be used as gems.

**Keywords:** Optical properties; Quixeramobim; Gemological Quality

## 1 Introdução

A caracterização gemológica é usada em todo o mundo em nações em que a exploração de gemas foi, ou ainda é, economicamente expressiva. Esta caracterização é usada como forma de avaliação de minerais com qualidade gemológica a serem comercializados. Quando as propriedades ópticas de um mineral variam muito é comum que estes países publiquem e organizem dados gemológicos de acordo com as regiões geográficas de proveniência de cada gema dentro do território nacional. Sem esta caracterização e atualização dos dados, o reconhecimento de gemas seria um processo mais lento e demorado, prejudicando o comércio e as pesquisas em geral.

Desse modo, a caracterização gemologia é de extrema importância, uma vez que características como índice de refração, birrefringência, pleocroísmo, fluorescência e densidade relativa podem variar bastante dentro de um mesmo grupo mineral, dependendo de sua proveniência. Essa variação é muito comum no grupo do rubi, por exemplo, em que o dichroísmo e a fluorescência variam de forte até fraco, estando por vezes ausente. A ocorrência dessas variações em posições geográficas específicas pode ser usada com traçador de proveniência, situação comum para o caso do rubi, que possui peso específico médio que varia entre 3.90 e 4.00 g/cm<sup>3</sup>, enquanto os rubis provenientes do Sri Lanka detêm uma densidade de 3.97 g/cm<sup>3</sup> (Pehrson, 2017).

Portanto, a organização e divulgação de informações e dados gemológicos facilita o trabalho de identificação gemológica feita por profissionais gemólogos e pesquisadores, que constantemente lidam com gemas ou imitações, diminuindo exponencialmente a chance de um erro no reconhecimento do mineral. A caracterização gemológica pode ainda ser utilizada como modo de diferenciação entre gemas e imitações, o termo imitações é usado para designar produtos que imitam as gemas naturais e que são usadas pelo homem no intuito de reproduzir efeito óptico, cor e aparência das gemas naturais (IBGM/DNPM, 2005).

Esta análise se utiliza especialmente de técnicas não-invasivas e não-destrutivas que são capazes de fornecer informações confiáveis, rápidas e bara-

tas quanto à classificação estrutural e mineralógica de pedras preciosas (tipologia, defeitos etc.), bem como a procedência (Gemological Institute of America - GIA, 2019).

A turmalina é um tipo de borossilicato de alumínio contendo quantidades variáveis de magnésio, ferro, cálcio e metais alcalinos, que apresenta composição química e estrutura cristalográfica extremamente complexas (Anderson, 1984). Seu comportamento químico-cristalino e propriedades físicas atraem bastante atenção no campo da ciência e física dos materiais. Este grupo mineral possui uma gama de cores única, o que o torna excelente para uso como material gemológico (Koivula & Fryer, 1985). Como toda turmalina tem dureza entre 7 e 7,5 na escala de Mohs, ela se torna um exemplar muito adequado para produção de joias. Contudo, turmalinas com qualidade gemológica são relativamente raras (Phichaikamjornwut et al., 2019).

Apesar de na antiguidade ter sido reconhecida inicialmente na região mediterrânea, foram os holandeses que a introduziram na Europa ao trazê-la do Ceilão (atual Sri Lanka), em 1703. Jazidas de turmalina são encontradas comumente em pegmatitos e depósitos aluvionares. O país de maior importância no mundo para o fornecimento deste mineral é o Brasil, mais precisamente os estados de Minas Gerais e Paraíba (Schumann, 2006).

As complexas variações composicionais, estruturais e cristalinas deste mineral são responsáveis pela intensa variedade de cores e outras características ópticas da turmalina (Hawthorne e Dirlam, 2011) Anderson (1984) relata que a turmalina apresenta um pleocroísmo notável, que varia de intensidade, no entanto, é constantemente marcada por um pleocroísmo particularmente forte, resultante provavelmente de seu conteúdo em ferro. Anderson (1984) e Deer (2010) explanam ainda que algumas características físicas e ópticas da turmalina, tais como o índice de refração, a birrefringência e a densidade aumentam com o incremento do teor de alguns elementos, tais como Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mn e Ti.

Portanto, a caracterização gemológica se faz extremamente necessária para atualização dos dados ópticos das gemas, também servindo para evitar os casos comuns de fraudes que são recorrentes e as várias tentativas de golpes relacionadas as gemas, sen-

do comuns o superfaturamento de gemas e a atividade comercial que envolva pedras sem nenhum valor econômico. Este trabalho trata da caracterização geológica de cinco cristais de turmalina provenientes do município de Quixeramobim, no estado do Ceará, geologicamente inserido no Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim.

## 2 Localização da Área

A área de Quixeramobim compreende aproximadamente 3275 km<sup>2</sup>, representando 2,44% da área do estado do Ceará. Está inserida na porção do Ceará Central; na mesorregião do Sertão Cearense. Estão situados na região dez distritos: Lacerda, Manituba, Passagem, Uruquê, Panabibu, Belém, Nenelândia, Damião Carneiro, Encantado e São Miguel. Quixeramobim limita-se com os municípios de Madalena (Norte); Quixadá, Banabuiú e Choró (Leste); Senador Pompeu, Sonolópole e Pedra Branca (Sul); Boa Viagem (Oeste) (Figura 1).

## 3 Contexto Geológico Regional

O município de Quixeramobim (Figura 1) está inserido geologicamente no Domínio Ceará Central, na região setentrional da Província Borborema (PB – Figura 2), definida inicialmente por Almeida *et al.*

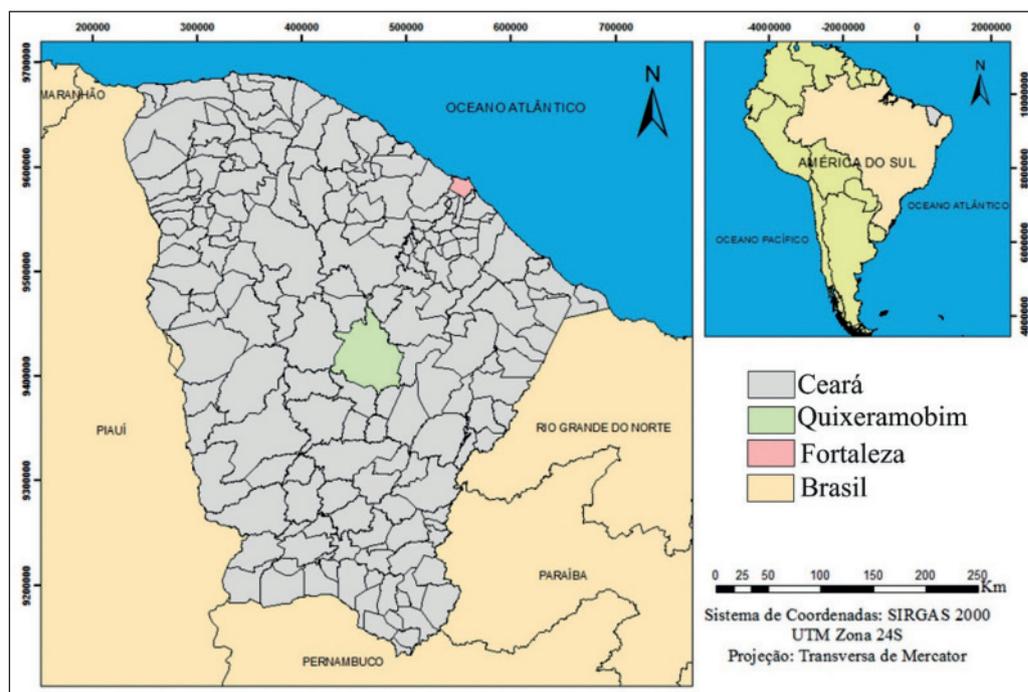
(1981). A PB ocupa a zona central de um cinturão orogênico de idade Pré-Cambriana com evolução variando do Arqueano ao Neoproterozoico que ocupa uma área de cerca de 450.000 km<sup>2</sup> (Almeida *et al.*, 1981).

Autores como Brito Neves & Cordani (1991), Trompette (1994), Jardim de Sá, (1994) e Van Schmus *et al.* (1995), assim como Arthaud (2007), atribuem a origem da PB aos eventos de colisão e amalgamação dos Crátons São Luis-Oeste Africano e São Francisco-Congo, que resultaram dos processos atuantes ao longo da formação da porção oeste do supercontinente Gondwana, durante a orogenia Brasileira/Pan-Africana, no final do Neoproterozóico (600-550 Ma).

O Domínio Ceará Central (DCC) corresponde a um bloco crustal localizado no norte da PB que é limitado a noroeste pelo Lineamento Transbrasileiro e a oeste pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu (Arthaud, 2007).

Os cristais de turmalina analisados neste trabalho são oriundos de corpos pegmatíticos pertencentes ao DCC, que, de modo geral, estão relacionados a gnaisses, migmatitos e intrusões graníticas; os referidos minerais estão contextualizados no Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim.

Figura 1 Área de Pesquisa, situada na porção central do Ceará, no município de Quixeramobim.



### 3.1 Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim

O Brasil é um dos maiores produtores de gemas de cor, destacando-se na produção de esmeralda, água-marinha, turmalina, ametista, citrino, topázio e ágata, dentre outros (Svisero & Franco, 1991). As gemas brasileiras são muito apreciadas no mercado internacional por sua qualidade, variedade e dimensões. Dentre os diversos distritos gemológicos do país, a Província Borborema (PB) se destaca no cenário nacional quanto às ocorrências de mineralizações na qualidade de gemas. Dentre as várias ocorrências na PB, o estado do Ceará é marcado por hospedar grande parte das reservas do nordeste do país, apresentando minerais gema relacionados em sua maioria a distritos pegmatíticos pertencentes à Subprovíncia Pegmatítica do Ceará (SPPC; Souza, 1985; Marques Júnior, 1992; Vidal & Nogueira Neto, 2005)

Além de minerais gema, representados por diversas ocorrências de quartzo, feldspato, turmalina (vermelha, preta, verde e azul), fluorita, água-marinha, dentre outros, Vidal & Nogueira Neto (2005) relatam que a SPPC é caracterizada por uma grande variedade de minerais industriais.

Souza (1985) divide a SPPC em seis distritos pegmatíticos e ressalta a relevância do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim (DPQ) e do Distrito Cristais-Russas (DCR). O DPQ está situado no centro-oeste do Ceará, que apresenta a maior concentração de pegmatitos com potencial econômico da SPPC, abrangendo os municípios de Solonópole, Quixadá, Milhã e Banabuiú (Souza, 1985; Marques Júnior, 1992; Vidal & Nogueira Neto, 2005). As amostras de turmalina estudadas neste trabalho provêm do DPQ, mais especificamente no distrito Morro dos Tonhos, em Quixeramobim, englobado pelo Campo Pegmatítico Berilândia-Carnaubinha que se insere geologicamente no Domínio Ceará Central (DCC; Figura 2).

O DPQ abrange uma área de 2.375 km<sup>2</sup> e é conhecido desde o início do século XX, a exploração econômica desse distrito ganhou diversas ênfases com diferentes finalidades de extração ao longo dos anos (Vidal & Nogueira Neto, 2005; Santos *et al.*, 2014).

Os pegmatitos do DPQ são de natureza granítica e estão orientados preferencialmente nas direções NE e E-W, apresentando formas preferencialmente tabulares e dimensões variáveis, ocorrendo de dezenas a centenas de metros, com mergulhos verticais a subverticais, sendo discordantes em relação às suas encaixantes (biotita-gnaisses e muscovita-xistos; Vidal & Nogueira Neto, 2005; Cardoso *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2014; Moreira & Da Silva, 2017). Quanto à estruturação interna, esses pegmatitos podem ser classificados como heterogêneos simples (pegmatitos zonados sem corpos de substituição), heterogêneos complexos (pegmatitos zonados com corpos de substituição) e homogêneos (sem estrutura interna zonada), sendo que as mineralizações econômicas são encontradas geralmente nos pegmatitos heterogêneos (Marques Júnior, 1992; Almeida & Ulbrich, 2001).

Mineralogicamente, esses pegmatitos são compostos essencialmente por quartzo, feldspato, muscovita, contendo quantidades menores de minerais de interesse econômico, mostrando mineralizações em lítio, nióbio e tântalo. São marcados ainda por uma assembleia de minerais acessórios representados por turmalina colorida, amblygonita, lepidolita, berilo, espodumênio, cassiterita e columbita-tantalita (Marques Júnior, 1992; Almeida & Ulbrich, 2001; Vidal & Nogueira Neto, 2005; Moreira & Da Silva, 2017). Os pegmatitos do DPQ são do tipo LCT, como definido por Cerny (1991), apresentando mineralizações de Li, Ta, Nb, assim como feldspato, quartzo e turmalina.

Para Souza (1985) o DPQ pode ser individualizado em cinco campos pegmatíticos de acordo com a concentração da mineralogia acessória, na ocasião, o autor constatou um zoneamento de sul (Solonópole) para norte (Quixeramobim): (i) O primeiro destes campos, de sul para norte, corresponde ao campo de Nova Floresta-Feiticeiro, situado no município de Jaguaribe, que é constituído por pegmatitos mineralizados em cassiterita e tantalita/columbita; (ii) O segundo campo, a NE de Solonópole contém pegmatitos lítio-berilo-tantalíferos e lítio-berilo-estanníferos, com ocorrência de veios pegmatíticos com fluorita; (iii) O campo a W e NW de Solonópole é o maior detentor de pegmatitos lítio-berilo-tantalíferos

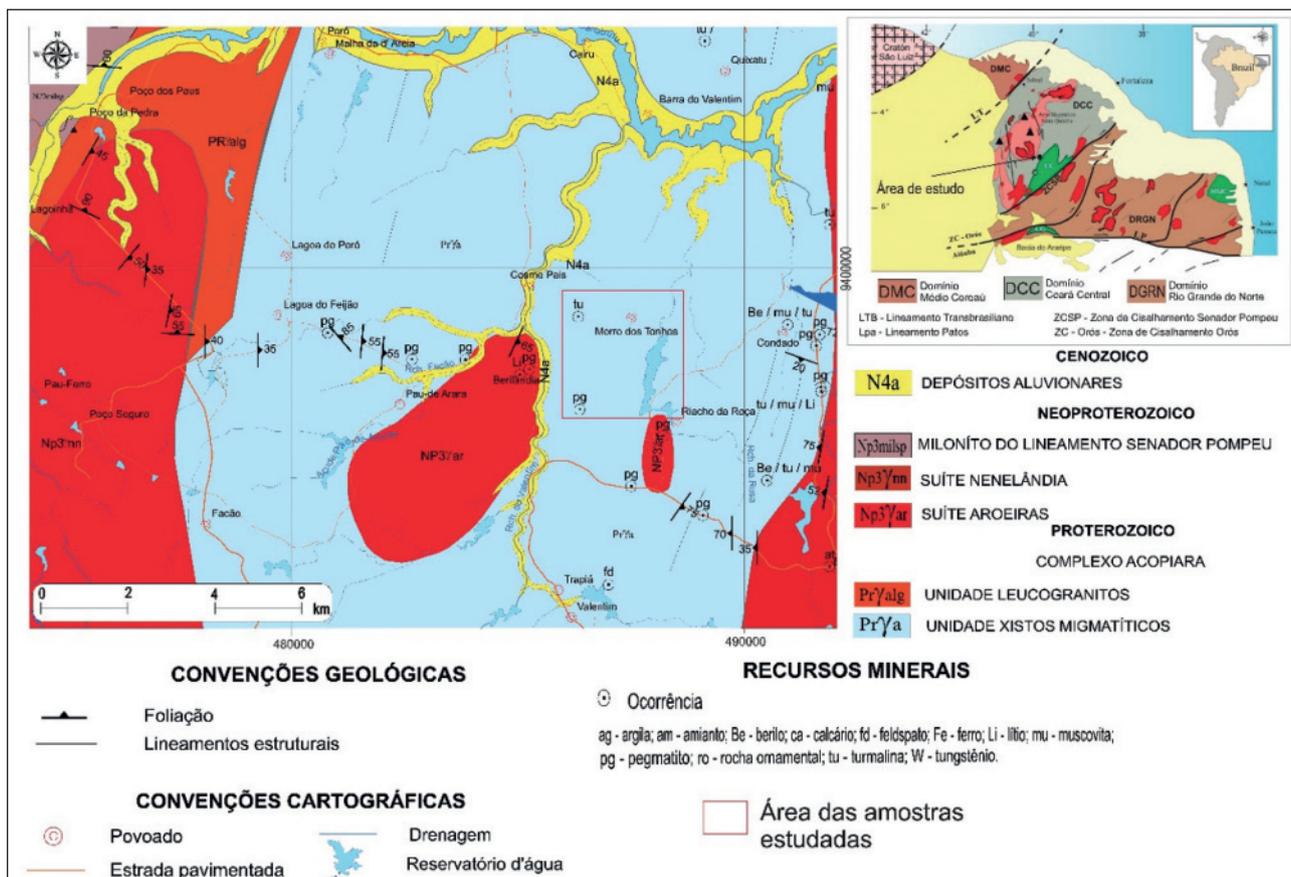


Figura 2 Mapa geológico simplificado de região do DPQ de onde derivam as amostras estudadas e contexto geotectônico em que se insere na porção Setentrional da Província Borborema. Região de proveniência das turmalinas (Morro dos Tonhos) em vermelho. Modificado de Parente *et al.* (2008).

do Distrito Solonópole-Quixeramobim; (iv) O campo de Berilândia-Carnaubinha, local de proveniência dos cristais de turmalina estudados, detém pegmatitos portadores de berilo industrial, em sua maioria, além de água-marinha e turmalina gemológica; (v) O campo de Rinaré-Banabuiú apresenta pegmatitos ricos em turmalina e berilo, situado ao norte da cidade de Banabuiú.

#### 4 Materiais e Métodos

Foram selecionadas cinco amostras de turmalina sendo uma azul claro (Figura 3A), uma azul escuro (Figura 3B), duas verdes (Figuras 3C e 3D) e uma rosa (Figura 3E); a seleção foi feita de modo que as amostras selecionadas representassem simplificada e conjuntamente o conjunto de turmalinas mais comuns em Quixeramobim (região do Morro dos Tonhos –

Figura 2). Todos os exemplares escolhidos foram previamente separados e lapidados, pois foram anteriormente destinados ao comércio e têm proveniência dos pegmatitos heterogêneos do DPQ.

O método de trabalho proposto para a caracterização gemológica das cinco amostras de turmalina incluiu a utilização de diversos instrumentos gemológicos, sendo aplicado o uso de refratômetro, balança hidrostática, dicrossópio, espectrossópio, lâmpada fluorescente e microscópio gemológico; também foi utilizada espectroscopia por energia dispersiva acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV-EDS) para análise da composição química das amostras estudadas.

Para constatação da qualidade gemológica das amostras foi utilizado o “Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor” (DNPM/

IBGM, 2009), adicionalmente, foi usada uma tabela empregada pelo comércio que possui 384 cores e códigos hexadecimais (Código de cor: Infográfico dos códigos das cores em HTML, 2013) para avaliação da cor dos minerais. Os resultados obtidos com cada um dos equipamentos somados aos dados aferidos em pesquisas bibliográficas permitiram a confecção de uma tabela com as propriedades ópticas das gemas e sua qualidade gemológica (Tabela 1).

#### 4.1 Refratômetro

Este instrumento é um dos mais úteis em gemologia para identificação das gemas, com ele é possível medir o índice de refração do mineral, desde que este índice esteja entre 1.40 e 1.81 e que o cristal seja transparente ou translúcido. É possível ainda determinar a birrefringência, caráter e sinal óptico das gemas analisadas, estas últimas são obtidas por meio de cálculos matemáticos.

O princípio de funcionamento do refratômetro gemológico é baseado na reflexão interna total da luz, portanto, o que se mede na prática é o ângulo crítico a partir do qual ocorre a reflexão interna total da luz, que pode ser aferida através do equipamento como um valor numérico.

Gemas podem ser classificadas como anisotrópicas ou isotrópicas, neste último caso, a substância pertence ao sistema cristalino cúbico, em que apenas um índice de refração ( $n$ ) pode ser identificado no mineral, ou é um material amorfo, neste, torna-se impossível a leitura de um índice de refração, sendo atestada a falta de birrefringência, caráter e sinal óptico. Caso seja anisotrópico de caráter uniaxial, independentemente do sinal óptico, pertencerá a um desses sistemas cristalinos: Trigonal, Tetragonal e Hexagonal com dois índices de refração, se o mineral for de caráter biaxial, pertencerá aos sistemas cristalinos Ortorrômico, Monoclínico ou Triclínico, em que cada mineral possui três índices de refração principais com diferentes direções e valores (Anderson, 1984).

A turmalina é um mineral cristalizado no sistema trigonal e de caráter óptico uniaxial.

#### 4.2 Dicroscópio

Com este instrumento é possível visualizar o pleocroísmo das gemas. O pleocroísmo é causado pela absorção distinta da luz nos cristais birrefringentes, este é classificado de três formas; se a mudança de tonalidade no mineral for muito visível o pleocroísmo é classificado como forte, quando a



Figura 3 Turmalina do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas. A) Turmalina azul claro (Dark Turquoise); B) Turmalina azul escuro (London Blue Topaz); C) Turmalina verde claro (Chartreuse 4); D) Turmalina verde escuro (Olive Drab); E) Turmalina rosa (Hot Pink 2).

variação não é tão visível este é tido como médio e quando a mudança é pouco perceptível é classificada como fraco. Este fenômeno não ocorre em gemas isotrópicas, amorfas e opacas, tampouco na maioria das translúcidas (Schumann, 2006). Esta mudança nas cores da gema analisada, quando se rotaciona o microscópio rente a um mineral, é decorrente da falta de compensação dos índices de refração de gemas anisotrópicas. É considerada uma consequência de minerais com os índices de refração muito diferentes; quando ocorre uma compensação de  $n_o > n_e$  ou  $n_e > n_o$  para os minerais uniaxiais e  $n_z > n_x$  ou  $n_x > n_z$  para os minerais biaxiais. A vantagem no uso deste instrumento para o trabalho desenvolvido está no fato da turmalina apresentarem majoritariamente pleocroísmo intenso.

#### 4.3 Espectroscópio

Permite observar as bandas de absorção que se formam no espectro luminoso de uma maneira própria a cada pedra examinada; ao colocar a amostra rente a ocular de observação do aparelho, são observadas variadas mudanças em bandas de cores do aparelho (espectros de absorção), enquanto que em alguns minerais essas bandas ficam mais espessas ou finas, já em outros minerais algumas partes do espectro de absorção ficam escuras. Determinados comprimentos de onda (bandas de cor) são absorvidos ao atravessar uma gema; a cor da gema resulta da mistura das partes restantes da luz que originalmente era branca. Muitas gemas têm um espectro de absorção muito característico, único, que se manifesta por linhas ou bandas largas, negras e perpendiculares. Os melhores resultados são obtidos em pedras coloridas, transparentes e de tons intensos. Nas gemas opacas só é possível a observação dos espectros de absorção quando um pedaço fino da pedra é preparado, por meio de um corte utilizando uma serra, de forma a poder transmitir a luz (Schumann, 2006).

#### 4.4 Lâmpada de Luz Ultravioleta

A fluorescência é uma propriedade que resguarda grande importância para a identificação de gemas, ela é causada pela presença de elementos químicos ativadores que ocorrem na estrutura cristalina

do mineral (Schumann, 2006). No entanto, a identificação de fluorescência em turmalina é um método pouco eficaz para a turmalina, pois este mineral dificilmente possui fluorescência, especialmente quando essas gemas são muito enriquecidas em ferro. A fluorescência pode ser aferida em laboratório através do uso de lâmpadas de luz ultravioleta em ambiente escuro ou com pouca iluminação.

#### 4.5 Balança Hidrostática

O método de se obter a densidade relativa com uma balança hidrostática baseia-se no princípio de Arquimedes. Determina-se o volume da gema a ser estudada e a densidade relativa é então calculada. O objeto a ser determinado é pesado primeiramente no ar (no prato da balança sob a plataforma) e depois na água (na cestinha dentro do copo com água). O peso específico não é, na realidade, um atributo constante; depende da magnitude da gravidade no local onde ele é medido. A densidade relativa é uma propriedade independente do local e tamanho da amostra. Ela é definida como peso por volume, representado em  $g/cm^3$  e/ou  $kg/m^3$  (Schumann, 2006).

#### 4.6 Microscópio Gemológico

O Microscópio Gemológico permite a leitura imediata dos diversos tipos de inclusões (sólidas, líquidas, gasosas), fraturas na estrutura do cristal (*healed fractures*), manchas, zoneamento de cores e alterações cristalinas (*fingerprints*) e inclusões aciculares (*silk inclusions*) (Hughes, 2017), ou seja, possibilita visualizar o interior das gemas. Através dos diferentes tipos de inclusões, linhas de crescimento e bolhas de ar, torna-se possível discernir substâncias de origem natural ou sintética. As amostras foram analisadas utilizando um fundo claro, conforme a necessidade perante as tonalidades escuras das gemas selecionadas. O uso deste equipamento é de suma importância na identificação de estruturas internas dos materiais e essencial na caracterização de eventuais especificações em gemas.

#### 4.7 Espectroscopia por Energia Dispersiva (MEV-EDS)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um instrumento utilizado rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos e suas

composições químicas. Seu funcionamento é similar ao de um microscópio óptico tradicional, no entanto, neste caso, a luz e as lentes de vidro são substituídas por um feixe de elétrons e lentes eletromagnéticas, respectivamente (Nagatani, 1987). O equipamento disponível no DEGEO/UFC (HITACHI TM-3000) é acoplado um espectrômetro de energia dispersiva (EDS, SWIFT ED-3000 – Oxford Instruments), que foi utilizado para análise das cinco amostras de turmalina em estudo.

O EDS (Energy Dispersive System) é um espectrômetro de raio-X que pode ser utilizado em microanálises qualitativas ou semiquantitativas de elementos químicos presentes em qualquer amostra contendo elementos da Tabela Periódica entre o Boro (B) e o Urânio (U). O limite de detecção do método do método varia com as especificações utilizadas durante a análise e oscila entre 0.5 e 1%.

## 5 Resultados e Discussões

Por meio da caracterização gemológica, análise química e consultas bibliográficas diversas, foi possível constatar que as gemas analisadas possuem as propriedades ópticas dentro dos limites do grupo da turmalina. No entanto, algumas peculiaridades foram observadas e fogem do padrão esperado para este grupo. Estas variações foram observadas nas amostras de turmalina azul escuro (London Blue Topaz) e azul claro (Dark Turquoise), caracterizadas por birrefringência extremamente elevada e pleocroísmo fraco, respectivamente. Além disso, as duas amostras de turmalina azul apresentam densidade relativa mais alta que o esperado para este grupo mineral. Para a caracterização primária destes minerais, o refratômetro teve um papel fundamental, provando que os minerais são uniaxiais negativos; com *no* e *ne* apresentando valores dentro da normalidade de cada cor, com os maiores valores para os exemplares azuis e os menores para o exemplar rosa.

Este grupo mineral possui características ópticas muito variáveis, tais como índice de refração dentro do intervalo 1.603-1.820, com uma birrefringência igualmente variável entre 0.006-0.080 (Tabela 1).

Por se tratar de um grupo mineral de composição química variável e estrutura cristalina complexa, a turmalina pode apresentar um amplo intervalo de densidades, que variam entre 2.90 e 3.40 e têm maio-

res valores em amostras com altos conteúdos em Fe, Mn e Ti (Lazzarelli, 2002). Os valores de densidade medidos para as turmalinas analisadas variaram dentro do intervalo 2.82-3.90 g/cm<sup>3</sup> (Tabela 1) e foram maiores para as amostras cujo teor em FeO é mais elevado (turmalinas azuis, Tabela 1, Tabela 2)

O pleocroísmo das amostras variou de fraco a forte, enquanto a fluorescência esteve quase sempre ausente e foi, poucas vezes, fraca. Os espectros de absorção são comumente 640, 498, 458 e 451 nm, apenas o caráter e sinal óptico são constantes sendo sempre uniaxial negativo. Dados acerca dos grupos da turmalina são tabelados segundo informações da *International Gem Society* (Arem & Clark, 2019) enfatizando que cada grupo ou cor deste mineral possui características pouco variáveis.

As gemas azuis analisadas possuem um índice de refração dentro dos parâmetros 1.641-1.605 (maiores e menores leituras respectivamente), uma birrefringência muito elevada e uma possui um valor de 0.004 acima da média máxima (0.032; Tabela 1; Schumann, 2006). As amostras de cores verde detêm índices muito próximos aos das azuis 1.640-1.638 (valores de *no*) e valores distantes no segundo índice 1.621-1.620 (valores de *ne*), com valores médios de 0.018-0.021 para a birrefringência (Tabela 1). A turmalina rosa possui o índice de refração afastado das demais cores com 1.633-1.610 (valores de *no* e *ne* respectivamente) e com birrefringência de 0.023 (Tabela 1), valor muito semelhante a dupla refração das amostras verdes.

A utilização do microscópio para análise do pleocroísmo foi o terceiro passo; esta característica é presente e classificada como forte em quatro amostras, porém uma amostra azul (claro – Dark Turquoise – Tabela 1) possui pleocroísmo classificado com fraco em detrimento da baixa absorção, sendo essa uma característica incomum em turmalina (Arem & Clark, 2019).

O espectro de absorção captado pelo espectroscópio se aproxima muito da característica padrão da turmalina (Arem & Clark, 2019); o valor obtido comumente é de 498 nm para os exemplares verdes e um azul (claro – Dark Turquoise – Tabela 1). Para a turmalina rosa foi aferido um valor de 420 nm; enquanto a amostra azul escuro (London Blue Topaz – Tabela 1) possui duas faixas no espectroscópio uma de 690 nm e outra de 492 nm.

O uso de uma lâmpada de luz ultravioleta permitiu a observação de uma segunda característica comum para todas as amostras: a fluorescência, que não pôde ser identificada em nenhuma turmalina estudada (Schumann, 2006).

O uso da balança hidrostática apresentou resultados dentro do esperado (Arem & Clark, 2019), exceto nas amostras de turmalina azul, que possuem densidade relativa de  $3.39 \text{ g/cm}^3$  para a gema azul claro (Dark turquoise) e  $3.28 \text{ g/cm}^3$  para a azul escuro (London blue topaz) (Tabela 1). As amostras verdes detêm uma densidade de  $3.24 \text{ g/cm}^3$  para o exemplar verde claro (Chartreuse 4) e  $3.20 \text{ g/cm}^3$  para o verde escuro (Olive drab), já a turmalina rosa possui  $3.06 \text{ g/cm}^3$  de densidade (Tabela 1).

A composição química e os teores de elementos como boro, alumínio, cálcio e sódio das amostras condiz com a normalidade (Tabela 2). Porém os teores de sílica, ferro e manganês são divergentes dos presentes na literatura (Deer, 2010), principalmente os dois últimos. As amostras azuis não possuem CaO e MnO, mas detêm um teor bastante considerável de FeO, ressaltando que o índice de refração, a birrefringência e a densidade aumentam com o incremento do teor em  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , Mn e Ti (Deer, 2010). Os minerais verdes possuem peso específico e dupla refração menor que as amostras azuis, fato que deve ocorrer em reposta ao teor FeO maior nas gemas azuis. A turmalina rosa não possui ferro em sua estrutura, sua birrefringência é maior que a dos

exemplares verdes, mas sua densidade é a menor entre todos os exemplares estudados, além disso, a turmalina rosa detém manganês em sua composição, diferentemente dos outros cristais.

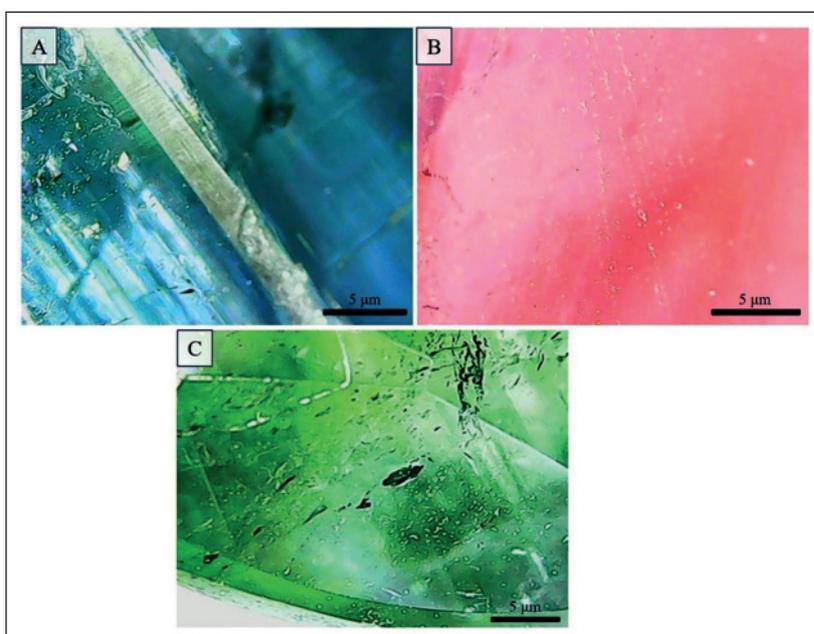
Desse modo, foi possível constatar a existência de uma correlação entre a cor da turmalina, densidades calculadas e composição química das turmalinas. As turmalinas azuis, por exemplo, possuem as densidades mais elevadas (Tabela 1), que por sua vez, podem ser explicadas pelo incremento de metais como  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , Mn e Ti (Tabela 2) nesses espécimes.

Ao microscópio gemológico, as amostras foram submetidas a análises em busca de fraturas, inclusões de várias feições e linhas de crescimento. Os cristais de turmalina azul estudados são caracterizados por fraturas, inclusões sólidas e fluidas (Figura 4A – turmalina azul claro). Foram visualizadas inclusões fluidas orientadas quase que paralelamente na gema rosa (Figura 4B), também foram identificadas inclusões bifásicas (sólido + líquido) na amostra verde de menor tamanho e inclusões fluidas orientadas (Figura 4C). Estas inclusões fluidas (desde que não sejam epigenéticas, o que é o caso) são de praxe neste mineral (DNPM/IBGM, 2009; Anderson, 1984).

Logo, estes dados foram compilados em uma tabela com dados gemológicos e ópticos (Tabela 1) e de composição química (Tabela 2), como parte da caracterização gemológica das turmalinas de Quixeramobim, região de Morro dos Tonhos, CE.

Figura 4 Inclusões nas amostras de turmalina estudadas.

A) Inclusões fluidas (transparentes e anastomosadas) e sólidas (pequenas e escuras) na turmalina azul claro (Dark Turquoise); B) Inclusões fluidas (transparentes) orientadas aproximadamente paralelas na turmalina rosa (Hot Pink 2); C) Inclusões fluidas orientadas (transparentes e anastomosadas) e sólidas (escuras) na turmalina verde claro (Chartreuse 4).



**Validação da Imputação Múltipla via Predictive Mean Matching para  
Preenchimento de Falhas nos Dados Pluviométricos da Bacia do Médio São Francisco**  
Laurizio Emanuel Ribeiro Alves & Heliofábio Barros Gomes

	Cor da Amostra				
	Azul claro (Dark Turquoise)	Azul escuro (London Blue Topaz)	Verde claro (Chartreuse 4)	Verde escuro (Olive Drab)	Rosa (Hot Pink 2)
Qualidade Gemológica	Boa	Média	Média	Média	Excelente
Diafaneidade	Semitransparente	Semitranslúcida	Translúcida	Semitransparente	Semitransparente
Índice de refração	1.640 – 1.608	1.641– 1.605	1.638 – 1.620	1.640 – 1.619	1.633 – 1.610
Caráter e sinal óptico	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo
Birrefringência	0.032	0.036	0.018	0.021	0.023
Pleocroísmo	Presente: Fraco	Presente: Forte	Presente: Forte	Presente: Forte	Presente: Forte
Espectro de absorção	498 nm	690 e 498 nm	498 nm	498 nm	420 nm
Fluorescência	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Densidade relativa	3.39g/cm <sup>3</sup>	3.28g/cm <sup>3</sup>	3.24g/cm <sup>3</sup>	3.20g/cm <sup>3</sup>	3.06g/cm <sup>3</sup>
Microscópio gemológico	Fraturas; linhas de crescimento; inclusões sólidas e fluidas	Fraturas; inclusões sólidas e fluidas	Fraturas; inclusões sólidas (às vezes orientadas) e fluidas; muito ocasionalmente bifásicas (sólida + líquida)	Fraturas; inclusões fluidas, por vezes orientadas preenchendo fraturas; inclusões sólidas; minúsculas inclusões gasosas agrupadas	Fraturas; inclusões fluidas, por vezes orientadas; minúsculas e ocasionais inclusões gasosas

Tabela 1 Características gemológicas de cristais de turmalina de Quixeramobim - CE.

Amostras/Teores químicos médios em %	B	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	CaO
Turmalina Azul	10.80	2.76	42.25	41.49	2.70	0	0
Turmalina Verde	10.89	2.15	42.02	42.86	1.50	0	0.57
Turmalina Rosa	10.82	2.20	40.99	44.87	0	0.41	0.71

Tabela 2 Componentes químicos das amostras de turmalina de Quixeramobim - CE.

## 6 Conclusões

O presente trabalho permitiu concluir, por meio da caracterização gemológica, que as turmalinas de Quixeramobim possuem potencial gemológico em razão da cor intensa, boa diafaneidade e teor de inclusões moderado; sendo presentes na região exemplares nas cores rosa, azul e verde. Notadamente parâmetros analíticos para a caracterização gemológica usual forneceram resultados dentro do padrão para este mineral, porém perceptivelmente algumas características peculiares foram constatadas. O caráter uniaxial negativo representa um aspecto distintivo para turmalina, além disso, os índices de refração obtidos encontram-se dentro da

média para este grupo de minerais. Entretanto, a birrefringência de uma amostra azul (escuro – London Blue Topaz) é extremamente elevada para este mineral. Adicionalmente, uma amostra azul (clara – Dark Turquoise) possui uma baixa absorção, o que a caracteriza como um espécime de pleocroísmo fraco, sendo este um atributo incomum para turmalina, que é caracterizada habitualmente por pleocroísmo forte e por uma nítida absorção de  $no > ne$ . O espectro de absorção das amostras e a fluorescência estão dentro do que era cogitado, a ausência de fluorescência das amostras de turmalina analisadas é algo comum. A densidade relativa e a birrefringência elevada dos exemplares azuis são justificadas pelo elevado teor de ferro; quanto maior o teor de ferro, maiores são

Validação da Imputação Múltipla via Predictive Mean Matching para  
Preenchimento de Falhas nos Dados Pluviométricos da Bacia do Médio São Francisco

Laurizio Emanuel Ribeiro Alves & Heliofábio Barros Gomes

os valores nas amostras azuis e verdes; o que não ocorre no exemplar rosa, porém este tem manganês em sua estrutura. O interior dos cristais de turmalina é rico em inclusões fluidas e com fraturas, estas por vezes estão preenchidas por fluidos e muito ocasionalmente foram descritas inclusões bifásicas. Portanto, as amostras gemológicas encontradas em Quixeramobim possuem características gemológicas e ópticas para o padrão da turmalina, entretanto, a composição química do exemplar rosa é intrigante e não se encaixa no padrão encontrado nas outras cores de minerais estudados, merecendo estudos com mais exemplares rosa para que encontrado um padrão.

## 7 Referências

- Almeida, A.R. & Ulbrich, H.H.G.J. 2001. O Papel da Mistura de Magmas na Gênese do Magmatismo Granítico Cálcio-Alcalino Quixeramobim-CE. *Revista de Geologia*, 14(1): 49-80.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., & Fuck, R. A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2): 1-29.
- Anderson, B.W. 1984. *Identificação das Gemas*. Rio de Janeiro, Livro Técnico S/A. 460p.
- Arem, J.E. & Clark D. Tourmaline Value, Price, and Jewelry Information. 2019.
- IGS (International Gem Society). Disponível em: <<https://www.gem-society.org/article/tourmaline-jewelry-and-gemstone-information/>>. Acesso em 2 de fevereiro de 2019 e 06 de agosto de 2019.
- Arthaud, M. H. 2007. *Evolução neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira*. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade de Brasília, Tese de doutorado, 117p.
- Brito Neves, B.B., & Cordani, U. G. 1991. Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic. *Precambrian Research*, 53(1-2): 23-40.
- Cardoso, T.; Peixoto, A. M.; Maia, A. O.; Filho, A. F. F.; Santos, T. R. S.; Sousa, J. P.; & Neto, J. A.N. 2014. Novas ocorrências de fosfatos em pegmatitos do Ceará. *Comunicações Geológicas*, 101(Especial I): 761-763.
- Cerny, P. 1991. Fertile Granites of Precambrian Rare-Element Pegmatite Fields: Is Geochemistry Controlled by Tectonic Setting or Source Lithologies?. *Precambrian Research*, 51(1-4): 429-468.
- Código de cor: Infográfico dos códigos das cores em HTML, 2013. Disponível em: <<https://www.devmedia.com.br/codigo-cor-infografico-dos-codigos-das-cores-em-html/37238>>. Acesso em 6 de agosto de 2019.
- Deer, W.A. 2010. *Minerais Constituintes das Rochas uma Introdução*. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian. 727p.
- DNPM/IBGM. 2009. *Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor*. Brasília, Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos/Departamento Nacional de Produção Mineral, 203p.
- Hawthorne, F.C.; Dirlam, D.M. 2011. Tourmaline the indicator mineral: from atomic arrangement to viking navigation. *Elements*, 7(5): 307-312.
- Hughes, R.W. 2017. *Ruby & sapphire: A Gemologist's guide*. Bangkok, RWH Publishing/Lotus Publishing, 816p.
- IBGM/DNPM. 2005. *Manual Técnico de Gemas*. Brasília, Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos/Departamento Nacional de Produção Mineral, 160p.
- Jardim de Sá, E.F. 1994. *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado Geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana*. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade de Brasília, Tese de doutorado, 803p.
- Lazzarelli, H. N. 2002. *Blue Chart-Gem Identification: Natural / Treated / Synthetic / Imitation*.
- Marques Júnior, F. 1992. *Geologia do Campo Pegmatítico de Berilândia, CE*. Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 173p.
- Mazzoleni, P., Barone, G., Raneri, S., Aquilia, E., Bersani, D., & Cirrincione, R. 2016. Application of micro-raman spectroscopy for the identification of unclassified minerals preserved in old museum collections. *Plinius*, 42: 112-124.
- Moreira, M.A.M. & Da Silva, C.A. 2017. Utilização de Análise Multicritério para mapeamento de áreas prioritárias para extração de minerais ricos em lítio nos pegmatitos do município de Solonópole (CE). *Estudos Geológicos*, 27(1): 171-182.
- Nagatani, T. C. 1987. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field-emission source and in-lens system. *Scanning Microscope*, 1: 901-909.
- Pehrson, E. A. K. 2017. *Identification Methods of Sri Lankan Corundum in comparison to Other Common Gemstones*. Department of Earth Sciences, Uppsala University, Disciplinary Domain of Science and Technology, Independent thesis Basic level (degree of Bachelor) Uppsala 42p.
- Santos, E.J.; Neto, A.S.; Silva, M.R.; Beurlen, H.; Cavalcanti, J.A. & Silva, M.G. 2014. Metalogênese das porções norte e central da Província Borborema. In: SILVA, M.G.; NETO, M.B.R. & JOST, H (ed.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM, p. 343-388.
- Schumann, W. 2006. *Gemas do Mundo*. São Paulo, DISAL Editora, 279p.
- Souza, J.V. 1985. *Geologia dos Pegmatitos de Metais Raros da Região W e NW de Solonópole-Ce (Brasil)*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Tese de Professor Titular, 109p.
- SVISERO, D. P.; FRANCO, R. R. 1991. A província gemológica brasileira. In: SCHOBENHAUS, C.; DE QUEIROZ, E. T.; COELHO C. E. S (ed.). *Principais depósitos minerais do Brasil 4 – Gemas e Rochas Ornamentais*. Brasília, DNPM/Companhia Vale do Rio Doce, p. 9-16.
- Trompette, R. 1994. *Geology of western Gondwana Pan-African/Brazilian aggregation of South America and Africa*. Rotterdam, Brookfield: Balkema, 350p.
- Van Schmus, W.R., Brito Neves, B. B., Hackspacher, P., Babinski, M., 1995. U-Pb and Sm-Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(3): 267-288.
- Vidal, F.W.H. & Nogueira Neto, J. A. 2005. Minerais de pegmatitos. In: VIDAL, F.W.H.; SALES, F.A.C.B.; ROBERTO, F.A.C.; SOUSA, J.F. & MATTOS, I.C (ed.). *Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará*. Realce Editora & Indústria Gráfica, p. 67-81.