

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**PEDRO HENRIQUE LIMA BORBOREMA**

**PEGMATITOS LITINÍFEROS DE ARAÇUAI E ITINGA(MG):  
IMPORTÂNCIA GEOLÓGICA E ECONÔMICA.**

**Caçapava do Sul**

**2023**

**PEDRO HENRIQUE LIMA BORBOREMA**

**PEGMATITOS LITINÍFEROS DE ARAÇUAÍ-ITINGA(MG):  
IMPORTÂNCIA GEOLÓGICA E ECONÔMICA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Delia Del Pilar Montecinos de Almeida

**Caçapava do Sul**

**2023**

PEDRO HENRIQUE LIMA BORBOREMA

**PEGMATITOS LITINÍFEROS DE ARAÇUAÍ E ITINGA (MG): IMPORTÂNCIA GEOLÓGICA E ECONÔMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 26 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Delia Del Pilar Montecinos de Almeida

Orientadora

Universidade Federal do Pampa

---

Prof. Msc. Luiz Delfino Albarnaz

Universidade Federal do Pampa

---

Prof. Dr. Igor Magalhães Clemente

Universidade Federal do Pampa



Assinado eletronicamente por **IGOR MAGALHAES CLEMENTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/01/2023, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIZ DELFINO TEIXEIRA ALBARNAZ, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/01/2023, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DELIA DEL PILAR MONTECINOS DE ALMEIDA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/02/2023, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1039015** e o código CRC **1E176B9D**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em especial a minha família por todo incentivo ao estudo, apoio e amor que tem por mim, sem isso nada seria possível. A todos os amigos que enriqueceram com culturas diferentes, carinho, música e muita geologia. Aos amigos que tive o prazer conviver durante a estadia em Caçapava do Sul. A minha namorada que sempre me apoio e incentivou. Ao meu cachorro José por está ao meu lado nessa jornada.

Aos meus professores que ensinam a geologia com empolgação, amor e empenho que me fez despertar este mesmo amor por esta ciência. As instituições públicas de ensino, que apesar de todas as dificuldades enfrentadas, especialmente durante 2018-2022, sempre estiveram resistentes a tentativa de enfraquecimento da ciência brasileira. Agradeço, sobretudo, a Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul onde tive uma evolução como estudante de geologia e, principalmente, como pessoa. Agradeço ao presidente Luís Inácio Lula da Silva que democratizou o acesso a ensino superior público de qualidade, proporcionando a criação da UNIPAMPA.

Tenho a agradeço imensamente a minha querida professora e orientadora Pilar, que me auxiliou na conclusão deste trabalho. Aos professores que fizeram parte da banca do TCC, pelo tempo e contribuições feitas.

Tudo isso contribuiu, profundamente, para que eu pudesse chegar até onde cheguei e me tornar a pessoa que sou hoje.

## RESUMO

Desde o início do século XXI tem aumentado significativamente o uso do minério de lítio na indústria mundial, sendo liderado no uso de baterias em eletroportáteis e veículos elétricos. A intensa procura por esse minério acarretou a identificação de novas fontes de extração do lítio. No Brasil, as principais reservas estão em complexos pegmatitos localizados no Médio Jequitinhonha, no nordeste de Minas Gerais, onde tem a principal empresa de exploração litinífera, a CBL (Companhia Brasileira de Lítio) e a SigmaLithium, empresa canadense. Esta pesquisa está dirigida ao estudo na região que abrange os municípios de Araçuaí (MG) e Itinga (MG), a área toda está inserida no Orógeno Araçuaí, zona de importância histórica de mineração do Brasil. A concentração de lítio do nesses pegmatitos tem fonte granítica do tipo S, derivado pela anatexia de rochas metassedimentares. Na área do estudo estes pegmatitos foram classificados como pegmatitos L-C-T. Os objetivos desta pesquisa são compilar e discutir o conhecimento dos pegmatitos litiníferos desta região e a importância econômica do lítio no cenário mundial. Para que os objetivos sejam cumpridos, foi realizada uma pesquisa na busca de trabalhos anteriores com relação aos pegmatitos da região (características petrográficas, gênese, conteúdo de Li, etc), obter e comparar dados do aumento e variabilidade do minério no Brasil e países produtores. E discutir sobre como é explorado. Esta pesquisa contribui para a entender a evolução da importância do conhecimento dos pegmatitos, bem como a relevância econômica do minério de lítio na economia.

**Palavras-Chaves:** lítio, pegmatitos, pesquisa bibliográfica, exploração.

## **ABSTRACT**

Since the beginning of the 21st century there has been a significant increase in the use of lithium ore in industry worldwide, led by the use of batteries in portable electronic devices and electric vehicles. The intense demand for this ore has led to the identification of new sources of lithium extraction. In Brazil, the main reserves are in pegmatite complexes located in Médio Jequitinhonha, in northeastern Minas Gerais, where the main lithium mining company, CBL (Companhia Brasileira de Lítio) and SigmaLithium, a canadian company. This research is directed to the study in the region that covers the municipalities of Araçuaí (MG) and Itinga (MG), the whole area is inserted in the Araçuaí Orogen, area of historical mining importance in Brazil. The lithium concentration in these pegmatites has a granitic S-type source, derived by anatexis from metasedimentary rocks. In the study area these pegmatites have been classified as L-C-T pegmatites. The objectives of this research are to compile and discuss the knowledge of the lithiferous pegmatites of this region and the economic importance of lithium on the world stage. In order to fulfill the objectives, a research was conducted in search of previous works regarding the pegmatites in the region (petrographic characteristics, genesis, Li content, etc.), to obtain and compare data on the increase and variability of the ore in Brazil and producing countries. And discuss how it is exploited. This research contributes to understanding the evolution of the importance of pegmatite knowledge, as well as the economic relevance of lithium ore in the economy.

**Keywords:** lithium, pegmatites, bibliographic research, exploitation.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. ....  | 15 |
| Figura 2 – Mapa Geológico do Orógeno Araçuaí. ....  | 17 |
| Figura 3 - Mapa Geológico Local.....  | 20 |
| Figura 4 – Representação de pegmatitos zonados com estruturas assimétricas.<br>.....                  | 24 |
| Figura 5 – Modelo esquemático com o zoneamento dos pegmatitos LCT. ....                               | 26 |
| Figura 6 – Diagrama de fase experimental dos aluminossilicatos de lítio.....                          | 32 |
| Figura 7 – Localização mundial dos corpos pegmatíticos LCT.....                                       | 33 |
| Figura 8 – Fluxograma descrevendo o processo de aquisição do $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ . . | 37 |
| Figura 9 – Fluxograma detalhando o processo ácido de obtenção do Li.....                              | 38 |
| Figura 10: Fluxograma da extração de Li pelo processo LieNa®. ....                                    | 39 |
| Figura 11 – Fluxograma do processo de beneficiamento do SiLeach®.....                                 | 40 |
| Figura 12 – Fluxograma simplificado do processo Nemaska.....  | 41 |
| Figura 13 – Processo L-Max® para extração do lítio.....   | 42 |
| Figura 14 – Fluxograma do processo elaborado pela Outotec. ....                                       | 43 |
| Figura 15 - Produção mundial de lítio de 2010 a 2021 .....  | 45 |
| Figura 16 - Consumo global de lítio de 2008 a 2016. ....  | 46 |
| Figura 17 - Reservas mundiais de 2010 a 2021 de minério de lítio. ....                                | 47 |
| Figura 18 - Demanda da utilização de lítio de 2015 para 2025.....                                     | 48 |
| Figura 19 – Distribuição do uso do LCE no mercado mundial.....  | 49 |
| Figura 20 - Histórico do preço do Li entre 2002 e 2018.....   | 49 |
| Figura 21 - Variação do preço do hidróxido de lítio. ....   | 50 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Subdivisões da classificação de Černý & Ercit (2005) segundo a geologia, paragênese mineral e geoquímica dos pegmatóides graníticos.....                  | 27 |
| Tabela 2- Classificação da mineralogia acessória dos pegmatitos em grupos. Em evidência o Grupo a qual os pegmatitos do estudo possuem correlação mineralógica. .... | 28 |
| Tabela 3- Classificação dos tipos de granito de fusão residual de magma, segundo o Grupo de minerais acessórios presentes na rocha. ....                             | 29 |
| Tabela 4- Classificação de pegmatitos produtos de anatexia direta e mineralogia acessória. ....  | 30 |
| Tabela 5 - Minerais de lítio em pegmatitos e suas fórmulas químicas.....   | 31 |
| Tabela 6- Categorização dos pegmatitos litiníferos de Araçuaí e Itinga, conforme a classificação de Wise <i>et al.</i> (2022).....                                   | 36 |
| Tabela 7 – Recursos, reservas e produção de lítio (t), e=estimado.....   | 44 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSF – Cráton São Francisco

CPI – Campo Pegmatítico de Itinga

FRM – Fusão residual de magma granítico

Ga – Bilhões de anos

LCE – Carbonato de lítio equivalente

LCT – Lítio, Césio e Tântalo

Li – Lítio

Ma - Milhões de anos

NYF – Nióbio, Ítrio e Fluor

OA – Orógeno Araçuaí

OCO – Orógeno Congo Ocidental

PPOB – Província Pegmatítica Oriental do Brasil

PAD – Produto de anatexia direta

VE – Veículos Elétricos

## SUMÁRIO

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                     | <b>12</b> |
| <b>2</b>     | <b>OBJETIVOS</b> .....                                      | <b>13</b> |
| <b>2.1</b>   | <b>Objetivo Geral</b> .....                                 | <b>13</b> |
| <b>2.2</b>   | <b>Objetivos Específico</b> .....                           | <b>13</b> |
| <b>3</b>     | <b>JUSTIFICATIVA</b> .....                                  | <b>14</b> |
| <b>4</b>     | <b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....                                 | <b>15</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>Geologia Regional</b> .....                              | <b>16</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>Geologia Local</b> .....                                 | <b>18</b> |
| <b>5</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                          | <b>21</b> |
| <b>5.1</b>   | <b>Teoria dos Métodos e Técnicas</b> .....                  | <b>21</b> |
| <b>5.2</b>   | <b>Trabalhos Anteriores Aplicados</b> .....                 | <b>21</b> |
| <b>5.2.1</b> | <b>Pegmatitos</b> .....                                     | <b>21</b> |
| <b>5.2.2</b> | <b>Pegmatitos Litíferos</b> .....                           | <b>30</b> |
| <b>5.2.3</b> | <b>Tecnologias de Extração de Lítio de Pegmatitos</b> ..... | <b>36</b> |
| <b>5.2.4</b> | <b>Cenário Econômico do Lítio</b> .....                     | <b>44</b> |
| <b>6</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                            | <b>51</b> |
| <b>7</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                        | <b>52</b> |
| <b>8</b>     | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....                           | <b>54</b> |
| <b>9</b>     | <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                    | <b>55</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A região nordeste de Minas Gerais está ganhando reconhecimento no setor mineral brasileiro devido as reservas de lítio da Província Pegmatítica Oriental, com destaque para o Campo Pegmatítico de Itinga (CPI), constituído de pegmatitos de lítio, céσιο e tântalo (LCT) com importantes jazidas desse minério. O CPI pertence ao Orógeno Araçuaí (OA), localizado a leste do Cráton São Francisco. A maioria dos pegmatitos contendo lítio são nitidamente zonados tanto em sua granulometria quanto em sua mineralogia, e os minerais de lítio se concentram geralmente em zonas interiores ou núcleos de granulometrias extremamente grossas. Entretanto, pegmatitos contendo espodumênio ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ) também são bastante comuns.

A área estudada encontra-se na região do Vale do Jequitinhonha, onde existem 2 companhias que exploram o bem mineral, a CBL tem o seu início de produção em 1991 na cidade de Araçuaí-MG, já a SigmaLithium é uma canadense localizada em uma área entre os municípios de Itinga e Araçuaí em 2018, existindo com relação a está última uma expectativa de ser a maior mineradora de Li do Brasil.

Os pegmatitos contribuem com 26 % dos recursos globais conhecidos de lítio, a maior parte vinda do espodumênio (PISTILLI, 2013). Uma característica que se destaca entre os espodumênios é a sua ampla diversidade de aspectos os quais podem ter origem física e/ou química distintas. A maioria dos pegmatitos contendo lítio são nitidamente zonados tanto em sua granulometria quanto em sua mineralogia, e os minerais de lítio se concentram geralmente em zonas interiores ou núcleos de granulometrias extremamente grossas (ČERNÝ, 1982).

O primeiro mineral de lítio a ser descrito foi o espodumênio dos pegmatitos de Utö, na Suécia, pelo mineralogista brasileiro José Bonifácio de Andrada e Silva (d'Andrada, 1800; in Mauthner, 2011).

Este trabalho foca na compilação de dados sobre os pegmatitos, mais precisamente do CPI, área que tem ganhado destaque devido a suas grandes reservas. Explorando novas tecnologias de beneficiamento do minério litinífero, além de mostrar o cenário atual econômico deste bem mineral.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O trabalho em questão tem como objetivo geral:

- Compilar o desenvolvimento do conhecimento dos pegmatitos litiníferos da região do Vale do Jequitinhonha;
- Discutir o estado de avanço do conhecimento com relação aos pegmatitos litiníferos;
- Expor a importância econômica do Lítio no contexto global, analisando a partir de suas reservas, consumo e produção mundial.

### **2.2 Objetivos Específico**

Os objetivos específicos são:

- Indicar as principais aplicações do Li na indústria mundial;
- Apresentar a quantificação das reservas mundiais com base em dados atuais;
- Analisar a variação de preço nas últimas décadas;
- Demonstrar o comportamento do consumo do minério nas últimas décadas;
- Expor as tecnologias de extração de lítio vigentes e os métodos emergentes.
- Explanar sobre a importância do minério de lítio para a desenvolvimento socioeconômico da região do Vale do Jequitinhonha;
- Conciliar informações sobre o processo diagenético dos depósitos de lítio.

### **3 JUSTIFICATIVA**

Com a crescente aplicação de minério de lítio na indústria mundial, principalmente nas baterias de íon-lítio, que em 2019 foram responsáveis por 65% do consumo global de compostos químicos de lítio (VALE, 2021), foi estimulada a necessidade da pesquisa voltada para as reservas e consumo deste minério.

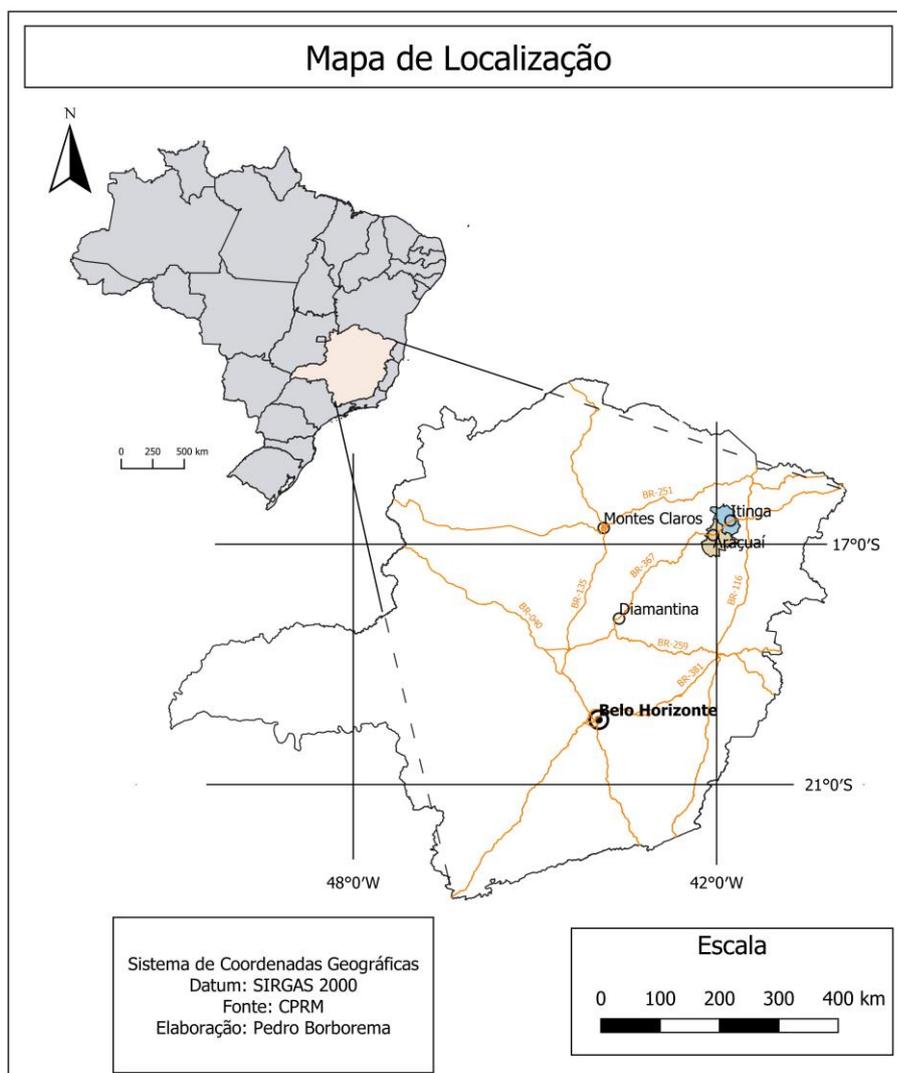
Considerando, por exemplo, que as baterias têm aplicação em produção de veículos de transportes elétrico (carros, caminhões, motocicletas, aviões, barcos, entre outros). Além disso, podem ser utilizadas em bens de consumo tecnológicos portáteis (Celulares, laptops, tablets). Assim, fica em evidência que se tem ampliado a busca por novas reservas litíferas para suportar a demanda global desse minério.

Dentro do contexto geológico, o estudo permite analisar o desenvolvimento do conhecimento dos pegmatitos, tanto em suas classificações como também nos estudos específicos dos corpos pegmatíticos do Campo Pegmatítico de Itinga, segundo trabalhos de autores focados nessa área específica.

#### 4 ÁREA DE ESTUDO

A região que contempla a área de estudo está localizada no Médio Jequitinhonha, situada entre os municípios de Araçuaí e Itinga no estado de Minas Gerais no Sudeste do Brasil (Figura 1). O acesso da área de estudo partindo da capital do estado, Belo Horizonte, se inicia pela BR-040 por 110 km até a interseção na BR-135 em direção a cidade de Curvelo durante 53 km, onde se entra na BR-259 por 98 km chegando na interseção com a BR-367, segue-se na mesma rodovia durante 332 km até o destino final, cidade de Araçuaí. Para seguir para a cidade de Itinga, continua na BR-367 por 46 km.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autor.

## 4.1 Geologia Regional

A área de estudo está inserida, geologicamente, na Província Pegmatítica Oriental do Brasil (PPOB) abrangida no contexto geotectônico, totalmente pelo Orógeno Araçuaí (AO), este contempla, aproximadamente, 90% da PPOB. A área do OA compreende uma zona que se prossegue entre os paralelos 15° e 21° e é composta por rochas graníticas e rochas de alto grau metamórfico (ALMEIDA, 1977). A bacia que foi sua antecessora seria do tipo inland sea-basin, ou seja, um golfo relativamente oceanizado e possuindo aulacógenos (PEDROSA-SOARES *ET AL.*; 1998, 2001, 2008, ALKMIM *ET AL.* 2006), que desaguaria no extinto, Oceano Adamastor (CORDANI *et al.*, 2003). É definido como um orógeno confinado, tendo a evolução tectônica catalisada por colisões à distância e análoga a um fechamento de um quebra-nozes (ALKMIM *et al.*, 2003, 2006, 2007).

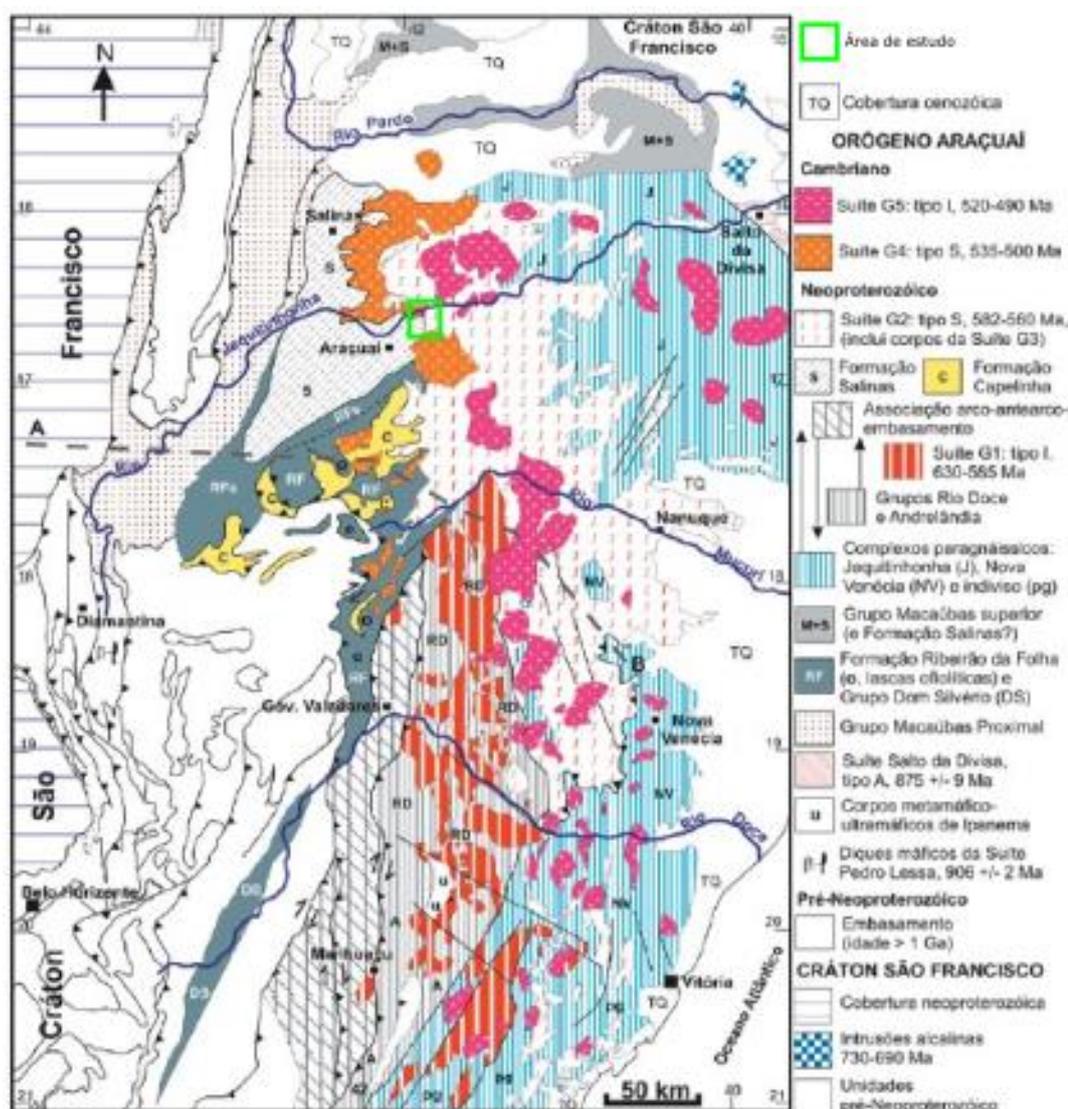
O embasamento do OA, como observado ao longo da porção ocidental deste orógeno, consiste essencialmente do complexo gnáissico de composição tonalito-trochjemitó-granodiorito (TTG) pertencentes ao Arqueano, remanescentes de *greenstone belts*, de sequências supracrustais paleoproterozóicas e associação de suítes graníticas. Estas unidades foram afetadas, inicialmente, pela Orogenia Transamazônica e posteriormente retrabalhadas durante a Orogenia do Brasileiro (FIGUEIREDO & TEIXEIRA, 1996; ALKMIM & MARSHAK, 1998; NOCE *ET AL.*, 1998, 2000). Os gnaiesses que bordeiam a região oriental do Orógeno Araçuaí indicam uma idade U-Pb em zircão de cerca de 2,15 Ga (DELHAL & DEMAIFFE, 1985). Na extensão da parte africana do orógeno, o complexo gnáissico de Eburneana com idade 2.2-2.0 Ga, ocorrem paralelamente à supracosta do Orógeno Congo Ocidental (OCO) (DJALMA *et al.*, 1992; TROMPETTE, 1994). Acredita-se que o embasamento do Orógeno Congo Ocidental esteve uma vez conectado ao Cráton São Francisco. (PEDROSA-SOARES *et al.*, 1999).

O início da separação do OA e OCO, se dá com um evento de extensão, registrado por intrusão de enxames de diques máficos e granitos anorogênicos na região paleocontinental do São Francisco-Congo, que ocorreu a partir do fim do Mesoproterozóico até ao início do Neoproterozóico (D'AGRELLA-FILHO *et al.*, 1990; DJAMA *et al.*, 1992; VICAT & POUCKET, 1995). Um rift continental então abriu, possivelmente, em resposta à ascensão de uma enorme pluma astenosférica

(CORREA-GOMES & OLIVEIRA, 1997; MARTINS-NETO, 1998b). O magmatismo máfico relacionado com este episódio de rift teve atividade até  $906 \pm 2$  Ma (MACHADO *et al.*, 1989).

As rochas graníticas mais antigas dentro da Faixa Araçuaí foram datadas em ca. 625 Ma, restringindo ao início do evento orogênico. O estágio de colisão tardia durou até cerca de 570 Ma. O magmatismo pós-colisional e a estágio de cráton foram alcançados a cerca de 500 Ma (PEDROSA-SOARES, 1999).

Figura 2 – Mapa Geológico do Orógeno Araçuaí.



Fonte: Modificado de Pedrosa-Soares (2007)

Durante o estágio de rifteamento continental há variados ambientes de sedimentação desde rochas de menor granulometria, como pelitos, avançando para maiores granulometrias como arenitos e esporádicos conglomerados sedimentares fluviais e marinhos (MARTINS, 2006). A fase de deposição glacial situa-se no Grupo Macaúbas que é formado por diamictitos maciços com intercalações de pelitos e arenitos disseminados nestes diamictitos. Babinski *et al.*(2007), aplicando o método de datação U-Pb, obteve uma idade de formação  $933\pm 9$  Ma, definindo que essas rochas foram formadas no Neoproterozóico Inferior. No período pré-colisional originou-se o arco magmático, correspondente a Suíte G1 (Figura 2) constituída, majoritariamente, por granodioritos e tonalitos que apresentam fácies e autólitos de composição diorítica e máfica, há, também, a presença de xenólitos sedimentares. São corpos de stocks e batólitos de foliação milonítica regional, com idades entre 630 e 585 Ma. A fase sin-colisional, gerada entre 582 e 560 Ma, é representada na Suíte G2 e G3 (Figura 2), onde ocorreu ampla granitogênese do tipo S e estes granitóides sofreram metamorfismo regional e deformação (SILVA *et al.*, 2005). Estas feições geradas na fase sin-colisional possuem associação com empurrões e dobramentos que tem sentido a leste contra o Cráton do Congo e a oeste no Cráton São Francisco (PEDROSA-SOARES *et al.* 2001, 2008, ALKMIM *et al.* 2006, 2007, VIEIRA 2007).

Na fase pós-colisional ocorrem os principais processos deformacionais (MARSHAK *et al.*, 2006; ALKMIM *et al.*, 2007), concomitantemente a queda gravitacional proveniente do plutonismo gerado no OA. (PEDROSA-SOARES & WIEDEMANN-LEONARDOS, 2000; PEDROSA-SOARES *et al.*, 2001; CAMPOS *et al.*, 2004). As suítes G4 e G5 são formadas neste estágio, elas são constituídas por plútons que são discordantes em relação a foliação regional. Muitas dessas intrusões possuem foliação concordante com a foliação regional nos contornos dos contatos (PEDROSA-SOARES *et al.*, 2001). A suíte G4, onde se encontram os pegmatitos litiníferos tema desse estudo, apresentam idades entre 535-500 Ma.

## **4.2 Geologia Local**

No âmbito da geologia local (Figura 3), tem-se 3 grupos dominantes de rochas, sendo da mais jovem a mais antiga: 1) a Suíte G4, G3 e G2; 2) Formação Salinas; 3) Formação Macaúbas. Dentro dessas formações geológicas, as rochas graníticas da Suíte G4 são as responsáveis por conter os minerais de Li (Figura 2), as quais

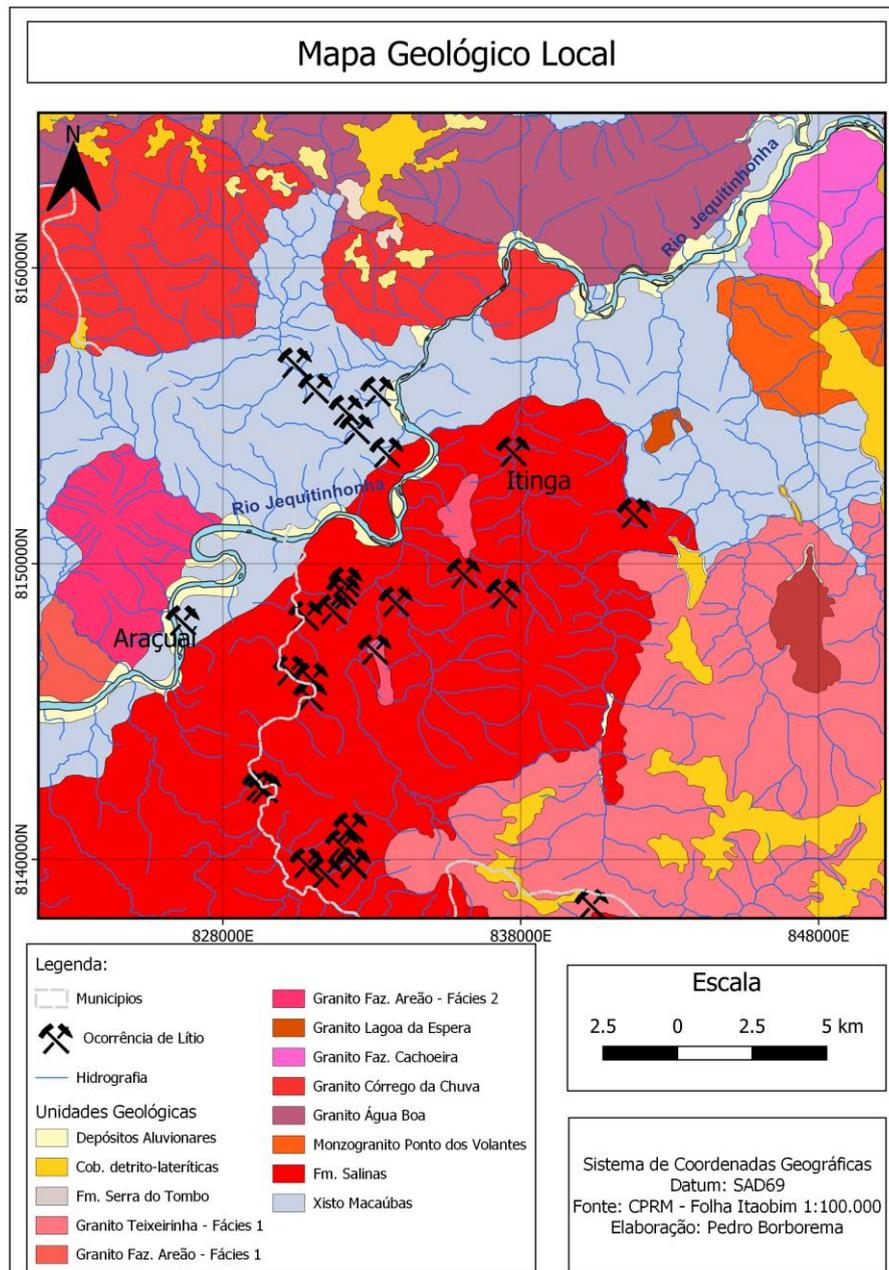
segundo Pedrosa-Soares *et al.* (2007), são rochas do tipo S, compostas majoritariamente por duas micas, onde é observado cúpulas de pegmatóides de granito ou raízes de biotita granito, com presença de intrusões hospedadas de rochas das formações Ribeirão da Folha e Salinas, que estão no entorno da suíte G4. A granitogênese G4 possui uma idade variando de 535-500 Ma (SILVA *et al.*, 2005). A suíte G4 possui níveis de contemporaneidade com a G3 podendo ser correspondentes alóctones, além de ter sido cristalizada em porções superiores da crosta, tendo em consideração os corpos autóctones da suíte G3. Sendo assim, evidencia-se que o magma oriundo da G4 era hidratado, devido a presença de duas micas (PEDROSA-SOARES *et al.*, 1987) em comparação a suíte G3, o leucogranito granada-cordierita, sem a presença de micas primárias (CASTAÑEDA *et al.*, 2006; PEDROSA-SOARES *et al.*, 2006). Destaca-se a semelhança composicional dos granitóides G4 com os pegmatitos litiníferos que são característicos de profundidades inferiores a 12 km (CORREIA-NEVES *et al.*, 1986).

Com uma idade média, dos 3 grupos citadas acima, a Formação Salinas (Figura 3) que é a rocha encaixante da Suíte G4, G3 e G2, que é constituída por conglomerados, pelitos e arenitos grauvaquianos, tem claros indícios de uma bacia que adquiriu sedimentos oriundo do arco magmático do OA (LIMA *et al.*, 2002). A presença de metamorfismo muito fraco nesta formação, foi descrita como sinorogênica, do tipo *flysch* (SANTOS *et al.*, 2007). De acordo Pedroso-Soares *et al.* (2008), a Formação Salinas é datada com idade de  $588 \pm 24$  Ma, os conglomerados possuem seixos de rochas vulcânicas, com idade de cristalização semelhante ao da Suíte G1.

As unidades glaciais estão concentradas no Grupo Macaúbas que na fase de rifteamento teve duas etapas de deposições (MARTINS-NETO & HERCOS, 2002). A primeira, membro inferior, é a Formação Chapada Acauã que é composta por uma sucessão periódica de intercalações de diamictitos, pelitos e turbiditos arenosos, que, no topo, contêm ao menos uma lente espessa de calcário dolomítico (MOURÃO & PEDROSA-SOARES 1992, PEDROSA-SOARES *et al.* 1992, GROSSI-SAD *et al.* 1997, NOCE *et al.* 1997, PEDROSA-SOARES & GROSSI-SAD 1997, MARTINS 2006). No membro superior se tem a Formação Serra do Catuni, constituída por diamictitos maciços intercalados por pelitos e arenitos dispersos, isso sugere que

houve sedimentação glácio-terrestre a glácio-marinha. A datação U-Pb apresenta idade de  $933 \pm 9$  Ma (BABINSKI *et al.* 2007).

Figura 3 - Mapa Geológico Local.



Fonte: Autor

## **5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este item do trabalho detalha qual foi o tipo de revisão aplicada para a produção do estudo.

### **5.1 Teoria dos Métodos e Técnicas**

Neste estudo foi realizada uma revisão sistemática, que é o método recomendado a ser utilizado no desenvolvimento de um artigo científico em que tem como objetivo a compilação de conceitos e linhas de pensamento. A revisão sistemática é um método descritivo que tem como base a análise aprofundada de literatura posterior do tema, com uma clara definição de estratégia de busca e assim como a adotada para a admissão ou não de um estudo.

### **5.2 Trabalhos Anteriores Aplicados**

#### **5.2.1 Pegmatitos**

A classificação para pegmatitos criada por Landes (1933) foi a primeira a ser amplamente utilizada nos Estados Unidos. Neste esquema, era feita a distinção entre pegmatitos simples, tomados como ígneos devido à sua similaridade com rochas plutônicas comuns, e pegmatitos complexos, contendo uma abundância significativa de minerais raros, atribuídos à substituição hidrotermal do pegmatito pré-existente (LONDON, 2008). Devido ao fato de pegmatitos serem definidos mais pela sua textura do que pela composição, London (2008) considera o termo “simples,” mal-empregado neste contexto, e sugere o uso do termo “comum” para pegmatitos de composição semelhante à de outras rochas graníticas.

Segundo Jahns (1955), são “rochas holocristalinas que apresentam, pelo menos em parte, uma granulação muito grosseira, tendo como maiores constituintes minerais aqueles encontrados tipicamente em rochas ígneas, mas com a características de apresentarem extremas variações texturais, especialmente no que se refere ao tamanho dos grãos”. Posteriormente London (2008) conceitua como pegmatito uma rocha substancialmente ígnea, de composição normalmente granítica, discernida de outras rochas ígneas através do seu tamanho de grão exageradamente

grosso, porém oscilante, ou pelo excesso de cristais com hábito gráfico, este no qual é exclusivo aos pegmatitos, e hábito esquelético.

Em uma abordagem mais recente (LONDON, 2021) conclui que o "The Study of Pegmatites" (JAHNS, 1955) serviu para estabelecer a autoridade do autor sobre o assunto, através da qual as suas próprias opiniões ganharam peso. Jahns utilizou este artigo para introduzir a sua convicção de que a "ebulição ressurgente de repouso-líquido" é responsável por muitas das características problemáticas dos pegmatitos. Neste manuscrito, Jahns refutou em grande parte as suas conclusões de apenas alguns anos antes, incluindo Cameron et al. (1949) e Jahns (1953a,b), que os pegmatitos podem ser explicadas por cristalização fracionada de um líquido silicato num sistema essencialmente fechado, e no qual a substituição metasomática e a cristalização hidrotermal desempenham apenas papéis menores. Ele o fez principalmente em referência às suas próprias observações como supostamente expostas em artigos que nunca foram publicados. Não existe neste manuscrito uma explicação de como este processo funciona, começando com um líquido granítico hidratado, e terminando com pegmatitos zonados com núcleos de quartzo. É evidente que Jahns (1955) procurou basear o estudo dos pegmatitos de uma grande parte intuitiva, em observações *in loco* a um ambiente laboratorial para confirmação. Ele usou dois métodos, 1) fluido análise de inclusão e 2) petrologia experimental. Achou os dois métodos não confiáveis. Em 1955, Jahns se juntou a O. Frank Tuttle e C. Wayne Burnham na Universidade Estatal da Pensilvânia (WRIGHT, 1985), liderando o caminho no estudo experimental de sistemas de granito.

Os corpos pegmatíticos possuem aspectos de predominância mundial sendo corpos de proporções métricas e com suas estruturas internas bastante complexas, formando segregação em grandes volumes de rochas graníticas. São observados corpos pegmatíticos que ocorrem como lentes, soleiras e diques nas encaixantes, que podem ser de rochas graníticas e/ou metamórficas. (LONDON, 2008; LONDON & KONTAK, 2012). Estas segregações são frequentemente apresentadas como massas, claramente, delimitadas no interior de suas encaixantes ígneas de mesma composição geral. As modificações de, por exemplo, soleiras para lentes é uma resposta da alternância da competência da rocha hospedeira, em razão da variação composicional, variando de ígneas a gnáissicas ou, mesmo, xistosas (LONDON, 2008).

Ainda que não haja nenhum modelo globalmente adotado da gênese dos pegmatitos que esclareça todas as variadas feições dessas rochas, a gênese oriunda de fusões residuais provenientes da cristalização dos plútons graníticos é a mais aceita por pesquisadores do mundo. Nas fusões residuais é onde se acumulam os elementos incompatíveis, voláteis e raros. Estes elementos diminuem a temperatura de cristalização dos minerais associados, reduzindo as taxas de nucleação, viscosidade e polimerização da fusão. Em contrapartida é elevada a taxa de solubilidade e difusão, características determinantes para o desenvolvimento da textura pegmatítica e grandes cristais (SIMMONS & WEBBER, 2008).

O enriquecimento do fluido em elementos incompatíveis, substâncias voláteis e metais raros (Be, Nb, Ta, Li, Rb, Ce e Ga) reflete na mineralogia única dos pegmatitos, como a presença de gemas, minerais raros e minerais industriais, o que possibilita a exploração econômica desta rocha. Levando em consideração a frequência de descobertas no campo, a grande maioria dos pegmatitos possui composição granítica, embora pegmatitos também sejam originados de rochas ultramáficas, máficas, sieníticas e carbonatíticas, refletindo sua composição (LONDON, 2008). Todos estes últimos, no entanto, não geram jazidas economicamente exploráveis.

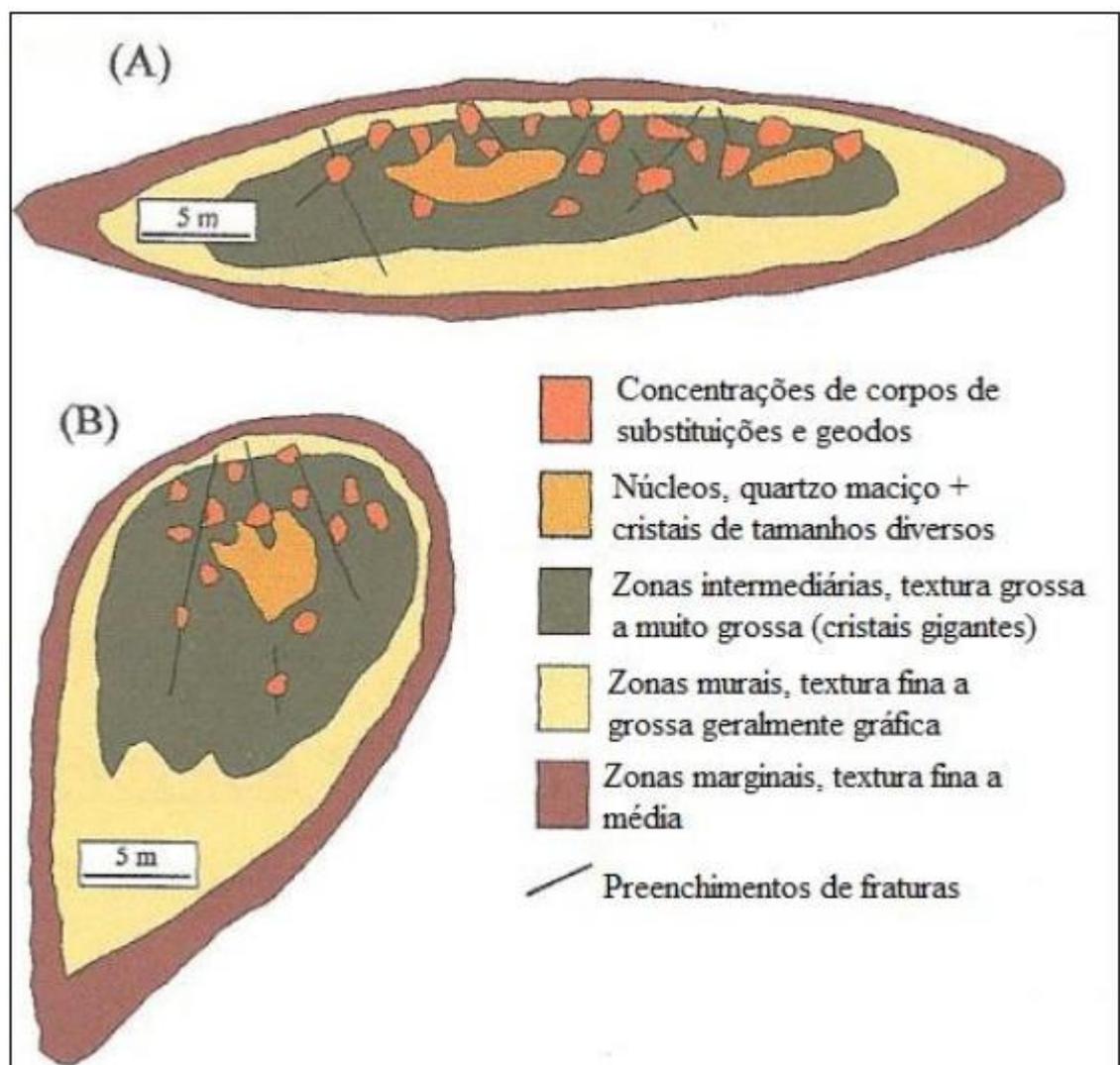
Houve várias tentativas de classificação de pegmatitos graníticos ao longo do século passado, tendo apresentado taxas de êxito e aplicabilidade variáveis. A estrutura interna, as relações paragenéticas, a composição química global, os aspectos petrogenéticos, a natureza do ambiente de crescimento e as características geoquímicas foram todos utilizados como parâmetros de classificação. Todavia, tais esquemas foram limitados pelo nível de compreensão destes parâmetros em sua aplicação, e pela negligência das diferenças do meio geológico (ČERNÝ & ERCIT, 2005).

Os pegmatitos podem ser classificados em zonados e não zonado de acordo a mineralogia presente. Os não zonados, homogêneos, possuem composição essencial de minerais de quartzo, feldspatos potássicos e mica, preferencialmente, muscovita, estão dispersos regularmente do corpo, com cristais que possuem dimensão de centímetros até decimétricos. Também apresentam minerais acessórios como turmalina, granada, berilo, topázio e apatita. Corpos de pegmatitos homogêneos

tendem a formatos dômicos e tabulares, com contato abrupto nas rochas encaixantes (VIDAL & NETO, 2005).

Enquanto isso os pegmatitos heterogêneos, bem como definidos de zonados, são classificados em 4 zonas diferentes entre si (Figura 4), que se distinguem pela paragénese mineral e/ou da granulometria dos cristais por de acordo a zona em que se encontra, incluindo também os corpos de substituição (JAHNS, 1955; IN VIDAL & NETO, 2005).

Figura 4 – Representação de pegmatitos zonados com estruturas assimétricas.

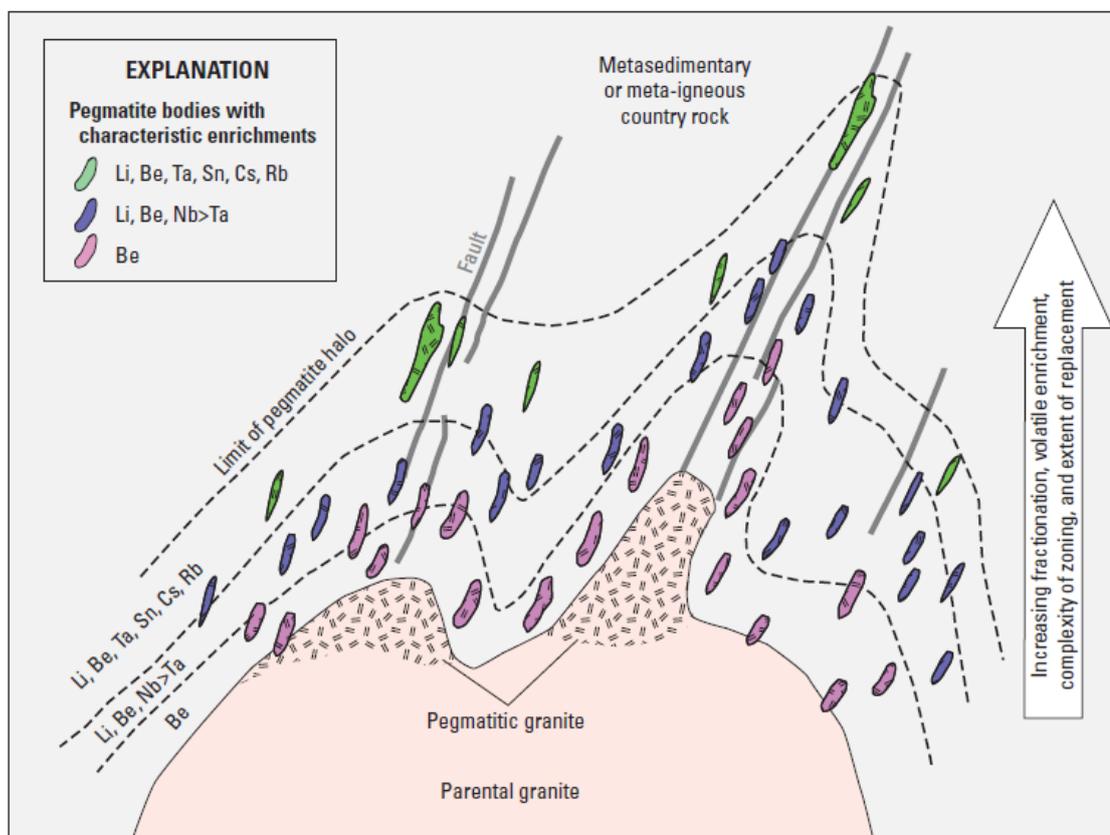


Fonte: Retirado de Dias (2015).

- 1) **Zona 1, marginal ou de borda:** Zona de mudança com a rocha encaixante, parte mais externa. Tem como minerais essenciais o quartzo, k-feldspato e muscovita, pode conter granada e cassiterita
- 2) **Zona 2, mural ou de parede:** Área com composição, estrutura e granulação semelhante a um pegmatito não zonado. Abrange a maior porção do corpo com uma transição gradual para a Zona Intermediária.
- 3) **Zona 3 ou intermediária:** Aqui é onde se encontram minerais de importância econômica como espodumênio, ambligonita, columbita-tantalita, berilo, entre outros. Destaca-se os cristais gigantes dos feldspatos.
- 4) **Zona 4 ou axial:** Composta por um núcleo quartzoso maciço, apresentando cores distintas, apresenta formas que variam de formas irregulares, regulares ou disseminados em grandes porções, arranjados assimétricos ou simétricos comparados às outras zonas. Os minerais acessórios situam-se, majoritariamente, na junção com a Zona 3.
- 5) **Corpos de substituição:** Denominados também com pockets, são geradas por substituição de pegmatitos antecedentes, tendo ou não um controle estrutural claro (CORREIA NEVES, 1981)

Em 1991, Černý propôs uma designação dos pegmatitos em 2 classes de “famílias” pretogenética: pegmatitos LCT e pegmatitos NYF. Essas abreviações referem-se aos elementos químicos de maior concentração. Os granitos “tipo-S” são da família LCT, significando que apresentam um enriquecimento maior em lítio, célio e tântalo, oriundos da fusão de rochas metassedimentares com alto volume de muscovita (LONDON, 1995; IN LONDON, 2008). As zonas enriquecidas nos pegmatitos LCT tem um padrão conforme a distância que está da área fonte (Figura 5). Os granitóides “tipo-A” pertencentes à família NYF que são enriquecidos em nióbio, ítrio e flúor, possuem uma composição mais ácida que o LCT, são oriundos de granitos interiores, anidros e de origem anorogênica (LONDON, 2008).

Figura 5 – Modelo esquemático com o zoneamento dos pegmatitos LCT.



Fonte: Retirado de Bradley *et al.* (2017).

ČERNÝ & ERCIT (2005) classificam os pegmatitos graníticos em 5 classes distintas (Tabela 1), levando em consideração as suas condições de pressão e, em menor grau, a temperatura que definam as rochas hospedeiras. As condições de pressão e temperatura utilizadas para avaliar o ambiente durante a intrusão dos pegmatitos deve ser máxima, já que é típica de metamorfismo das rochas encaixantes, que geralmente é anterior as intrusões de fusões geradoras dos pegmatitos. Algumas classes são subdivididas, de acordo, as suas diferenças geoquímicas. Posteriormente, eles os subdividem com base nos tipos e subtipos dos pegmatóides, considerando a sua paragênese mineral, condição de cristalização e assinatura geoquímica

Tabela 1 – Subdivisões da classificação de Černý & Ercit (2005) segundo a geologia, paragénese mineral e geoquímica dos pegmatóides graníticos.

| Class                  | Subclass | Type   | Subtype   | Family |
|------------------------|----------|--|---|--------|
| Abyssal                | HREE     |  |   | NYF    |
|                        | LREE     |  |   |        |
|                        | U        |  |   | NYF    |
|                        | BBe      |  |   | LCT    |
| Muscovite              |          |  |   |        |
| Muscovite-rare element | REE      |  |   | NYF    |
|                        | Li       |  |   | LCT    |
| Rare element           | REE      | allanite-monazite<br>euxenite<br>gadolinite        |   | NYF    |
|                        | Li       | beryl  | beryl-columbite<br>beryl-columbite-phosphate                  | LCT    |
|                        |          | complex  | spodumene<br>petalite<br>lepidolite<br>elbaite<br>amblygonite |        |
|                        |          | albite-spodumene<br>albite                         |   |        |
| Miarolitic             | REE      | topaz-beryl<br>gadolinite-fergusonite              | NYF   |        |
|                        | Li       | beryl-topaz<br>spodumene<br>petalite<br>lepidolite | LCT   |        |

Fonte: Retirado de Černý e Ercit (2005).

A classificação proposta por Wise *et al.* (2022) é fortemente baseada na assembleia mineral do corpo pegmatítico individualmente. Segundo os autores, a mineralogia acessória e as assinaturas químicas parecem servir como os melhores critérios para o agrupamento dos tipos de pegmatitos, desde que uma gama suficientemente ampla de minerais e suas assinaturas químicas sejam consideradas. A fundamentação da classificação proposta pelos autores é que a assembleia de minerais acessórios existentes que, em alguns casos, podem ser geneticamente ligadas a tipos específicos de rochas associadas, que apresentam coletivamente a diversidade dos mais conhecidos tipos de pegmatitos graníticos. Uma classificação confiável requer uma base de dados extensa e sólida do conhecimento atual das ocorrências de pegmatitos e as suas mineralogias em todo o mundo. A base para a mineralogia genética, componente do esquema de classificação proposto foi

desenvolvido a partir de uma exaustiva pesquisa de dados de literatura e exames de campo pelos autores.

Neste esquema de classificação proposto (Tabela 2), os pegmatitos estão divididos em três grupos principais (Grupos 1, 2, e 3), com base na sua associação dos minerais acessórios de formação de rochas e de elementos raros.

Tabela 2- Classificação da mineralogia acessória dos pegmatitos em grupos. Em evidência o Grupo a qual os pegmatitos do estudo possuem correlação mineralógica.

| Group 1                                     | Group 2  | Group 3                                   |
|---|--|---|
| Beryl ± columbite ± triphylite ± graffonite | Magnetite ± epidote ± titanite                 | Andalusite ± sillimanite ± corundum       |
| Beryl + amblygonite + columbite             | Uraninite ± magnetite                          | Kyanite ± rutile                          |
| Amblygonite + spodumene                     | Fayalite ± magnetite                           | Cordierite ± beryl                        |
| Spodumene ± petalite                        | Arfvedsonite-riebeckite ± fayalite             | Sapphirine + sillimanite                  |
| Spodumene ± elbaite                         | Arfvedsonite-riebeckite ± aegirine ± fluorite  | Chrysoberyl ± beryl ± schorl              |
| Spodumene + lepidolite + elbaite            | Allanite ± gadolinite                          | Dumortierite ± grandidierite ± borasilite |
| Spodumene + albite                          | Allanite ± monazite ± euxenite                 | Dumortierite ± schorl                     |
| Lepidolite + elbaite                        | Allanite ± beryl ± columbite                   |   |
| Elbaite ± danburite ± hambergite ± zeolites | Gadolinite ± euxenite ± fergusonite            |   |
|   | Beryl ± topaz ± fluorite                       |   |
|   | Beryl ± phenakite                              |   |
|   | Microcline (var. amazonite) ± fluorite         |   |
|   | Microcline (var. amazonite) ± topaz ± fluorite |   |

Fonte: Modificado de Wise *et al.* (2022).

Após a identificação do Grupo de minerais acessórios que os constituem, tendo subdividido em função da sua petrogênese pegmatítica. A maioria dos geólogos aceitam o conceito de que muitos pegmatitos têm a sua origem em derivados magmáticos tardios da cristalização de granito e que o pegmatito de fusão residual (FRM) é posteriormente modificado por cristalização fracionada, assimilação de rochas encaixantes, e outros processos de fases tardias (por exemplo, alteração de subsólidos, albitização) e recristalização que, combinadas, levam a uma vasta gama de tipos de pegmatitos e assembleias mineralais. Černý & Meintzer (1988) e Černý (1991b) consideram os férteis granitos tipo-S e tipo-A como as fontes primárias corpos pegmatíticos de alta concentração de ETR. A relação entre granito e pegmatito é indicada por uma continuidade química e física entre os corpos pegmatíticos e o granito parental. Nesta classificação (Tabela 3), notamos que os granitos com afinidade química do tipo S tendem a gerar pegmatitos do Grupo 1 enriquecidas em Be, Nb, Ta, P, Li e Cs. Granitos com química do tipo-A, por comparação, produzem pegmatitos do Grupo 2 que são largamente enriquecidos em ETR e flúor. No tipo-I os

granitos podem gerar pegmatitos do Grupo 1 ou do Grupo 2. Pegmatitos oriundo de granitos peraluminos de tipo-S receberam a maior parte da atenção científicas, em grande parte devido à sua importância econômica e diversidade mineralógica.

Tabela 3- Classificação dos tipos de granito de fusão residual de magma, segundo o Grupo de minerais acessórios presentes na rocha.

|                                      | Group 1 (S-type granite affiliation) |                  | Group 2 (A-type granite affiliation) |                       | Groups 1 & 2 (I-type granite affiliation) |                   |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|-----------------------|---|-------------------|
| <b>Rock-forming</b>                  | Biotite                              | Fe, Mg           | Biotite                              | Fe, Mg, Na            | Biotite                                   | Fe, Mg            |
|                                      | Almandine                            |                  | Fayalite                             |                       | Almandine                                 |                   |
|                                      | Muscovite                            | Al               | Arfvedsonite/Riebeckite              |                       | Muscovite                                 | Al                |
|                                      |                                      |                  | Magnetite                            |                       |   |                   |
|                                      |                                      |                  | Spessartine                          | Mn                    |   |                   |
|                                      |                                      |                  | Muscovite                            | Al                    |   |                   |
| <b>Rare-element</b>                  | Schorl                               | Fe, B            | Allanite                             | REE, Y, Be, Nb, Ta, P | Schorl                                    | B                 |
|                                      | Beryl                                | Be               | Gadolinite                           |                       | Beryl                                     | Be                |
|                                      | Columbite-group                      | Nb, Ta, Sn       | Fergusonite                          |                       | Columbite-group                           | Nb, Ta            |
|                                      | Tapiolite-(Fe)                       |                  | Samarskite                           |                       | Allanite                                  | REE, Y, Nb, Ta, P |
|                                      | Wodginite                            |                  | Euxenite                             |                       | Monazite/Xenotime                         |                   |
|                                      | Cassiterite                          |                  | Columbite-group                      |                       | Topaz                                     | F                 |
|                                      |                                      |                  | Monazite                             |                       | Fluorite                                  |                   |
|                                      | Graftonite group                     | P, Li, F         | Xenotime                             |                       | Elbaite                                   | Li, B, Ca         |
|                                      | Triphylite-lithiophilite             |                  |                                      |                       | Liddicoatite                              |                   |
|                                      | Amblygonite-montebrasite             |                  | Beryl                                | Be                    | Lepidolite                                |                   |
|                                      |                                      |                  | Phenakite                            |                       | Danburite                                 |                   |
|                                      | Elbaite                              | Li, B            |                                      |                       |   |                   |
|                                      | Lepidolite                           |                  | Zinnwaldite                          | Li, Fe                |   |                   |
|                                      | Spodumene                            |                  | Topaz                                | F                     | Hambergite                                | Be, B             |
|                                      | Petalite                             |                  | Fluorite                             |                       | Epidote                                   | Ca                |
|                                      |                                      |                  | Cryolite                             |                       | Stilbite/Laumontite                       |                   |
| Pollucite                            | Cs                                   |                  |                                      |                       |   |                   |
| <b>Additional accessory minerals</b> |                                      |                  |                                      |                       |   |                   |
| Apatite                              |                                      | Aegirine         | <i>Hyalite opal</i>                  | <i>Amazonite</i>      | Petalite                                  |                   |
| <i>Cleavelandite</i>                 |                                      | <i>Amazonite</i> | Molybdenite                          | <i>Amethyst</i>       | Pollucite                                 |                   |
| Zircon                               |                                      | <i>Amethyst</i>  | Schorl                               | Anatase               | Pyrochlore-group                          |                   |
|                                      |                                      | Ilmenite         | Triplite                             | Apatite               | Rhodizite                                 |                   |
|                                      |                                      | Helvine group    | Zircon                               | Axinite               | Stibiotantalite                           |                   |
|                                      |                                      |                  |                                      | <i>Cleavelandite</i>  | Titanite                                  |                   |
|                                      |                                      |                  |                                      | Ilmenite              | Zinnwaldite                               |                   |
|                                      |                                      |                  |                                      | <i>Kunzite</i>        | Zircon                                    |                   |

Fonte: Retirado de Wise *et al.* (2022).

Nos pegmatitos considerados como produtos de fusão anatética de fontes relacionadas com o manto e supracrustais. As litologias são vastas e englobam pegmatitos tipos dos Grupos 1, 2, e 3. Estes pegmatitos ocorrem como "pods", lentes, e diques posicionados em terrenos metamórficos de alto grau e não partilham qualquer ligação às intrusões de granito especialmente associadas que podem ser inequivocamente considerado população de pegmatito parental. A composição mineral acessória dos corpos pegmatíticos PAD varia muito (Tabela 4) e alternam entre intervalos de pegmatitos estéreis desprovidas de qualquer mineralização de elementos terras-raras a corpos evoluídos quimicamente que hospedam quantidades consideráveis de terras-raras.

Tabela 4-Classificação de pegmatitos produtos de anatexia direta e mineralogia acessória.

|                                      | Group 1                  |           | Group 2           |            | Group 3      |    |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------|-------------------|------------|--------------|----|
| Rock-forming                         | Biotite                  | Fe (± Mg) | Biotite           | Fe (± Mg)  | Cordierite   | Mg |
|                                      | Almandine                |           | Magnetite         |            | Kyanite      | Al |
|                                      | Muscovite                | Al        | Hornblende        |            | Andalusite   |    |
|                                      |                          |           | Almandine         |            | Sillimanite  |    |
|                                      |                          |           | Muscovite         | Al         | Muscovite    |    |
| Rare-element                         | Schorl                   | B         | Uraninite         | U          | Schorl       | B  |
|                                      | Beryl                    | Be        | Allanite          | REE, Nb, P | Dumortierite |    |
|                                      | Amblygonite-montebrazite | P         | Monazite/Xenotime |            | Grandierite  |    |
|                                      | Lepidolite               | Li, B, F) | Titanite          | Ti         | Borasilite   |    |
|                                      | Spodumene                |           | Beryl             | Be         | Chrysoberyl  | Be |
|                                      | Elbaite                  |           | Columbite-group   | Nb, Ta     |              |    |
|                                      | Pollucite                | Cs        |                   |            |              |    |
|                                      |                          |           |                   |            |              |    |
| <b>Additional accessory minerals</b> |                          |           |                   |            |              |    |
| Apatite                              | Petalite                 | Amazonite | Molybdenite       | Almandine  | Monazite     |    |
| Cleavelandite                        | Zircon                   | Epidote   | Schorl            | Beryl      | Rutile       |    |
| Columbite-group                      |                          | Fluorite  | Topaz             | Corundum   | Sapphirine   |    |
| Cassiterite                          |                          | Hematite  | Zircon            | Gahnite    | Surinamite   |    |
| Graftonite group                     |                          | Ilmenite  |                   | Ilmenite   | Xenotime     |    |
| Triphylite-lithiophilite             |                          |           |                   |            | Zircon       |    |

Fonte: Retirado de Wise *et al.* (2022).

### 5.2.2 Pegmatitos Litiníferos

Pegmatitos graníticos ricos em lítio constituem usualmente uma pequena proporção (em geral 1-2 %) de todos os pegmatitos expostos em um determinado distrito; a maioria dos distritos pegmatíticos contém, no entanto, no mínimo alguns pegmatitos ricos em lítio. Tais pegmatitos são os mais afastados de sua fonte termal ou magmática entre todos os pegmatitos gerados a partir dela, e usualmente intrudem terrenos metamórficos que registraram elevados gradientes termais (ČERNÝ, 1982).

Os pegmatitos com lítio, predominantemente, são zonados conforme a sua mineralogia e granulometria, e os minerais de lítio encontram-se, geralmente, nos núcleos de granulometria muito grossa e zonas interiores. Pegmatitos homogêneos de composição de espodumênio são muito comuns (ČERNÝ, 1982). Os dois principais minerais litiníferos de pegmatitos graníticos de estágio primário são o espodumênio ( $\alpha$ -LiAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) e petalita (LiAlSi<sub>4</sub>O<sub>10</sub>), ocorrem no Brasil, Estados Unidos e depósitos da África (LONDON, 2008). Porém, frequentemente, esses minerais não ocorrem juntos, pois o espodumênio é mais denso, desponta em zonas de maiores P e T. Já a petalita se cristaliza em sistemas de alta temperatura e baixa pressão.

Os pegmatitos litiníferos possuem minerais de Li específicos. A seguir, uma tabela com esses minerais e suas fórmulas químicas (Tabela 5).

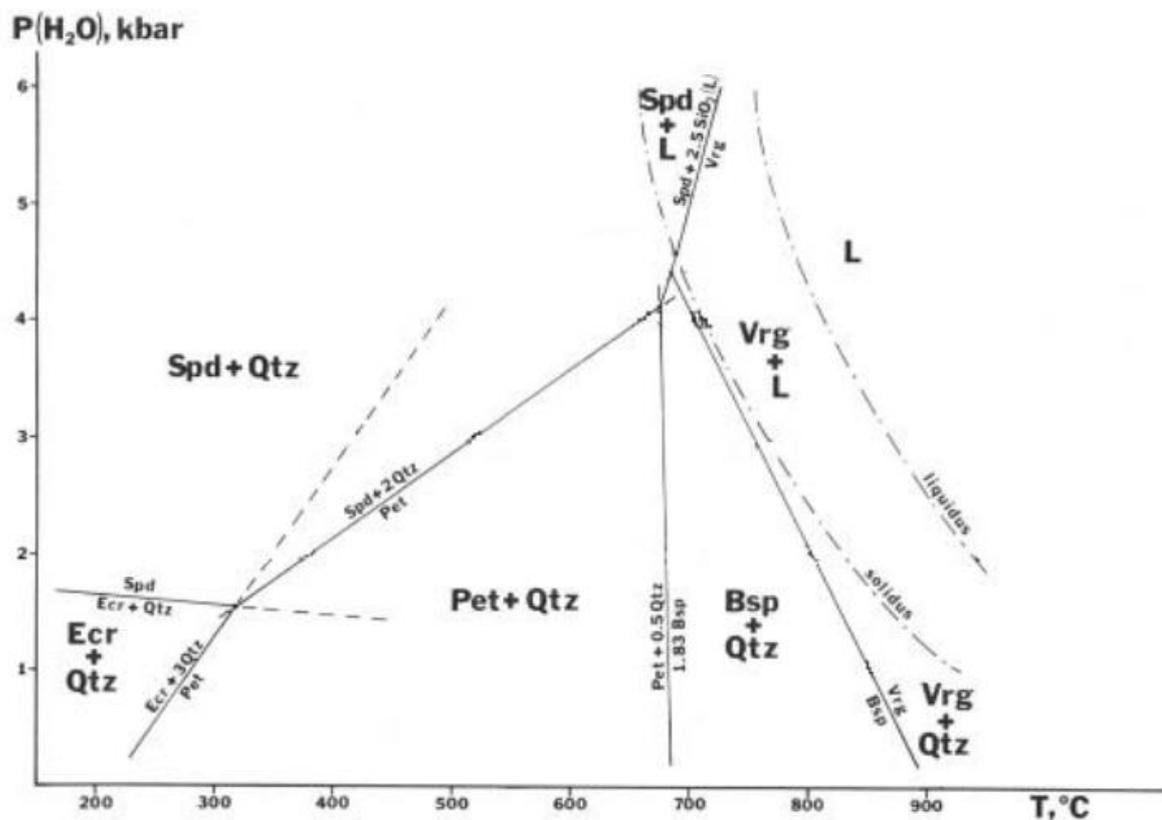
Tabela 5 - Minerais de lítio em pegmatitos e suas fórmulas químicas.

| <b>Mineral</b> | <b>Fórmula Química</b>   |
|----------------|--|
| Ambligonita    | LiAl(PO <sub>4</sub> )(F,OH)   |
| Eucryptita     | LiAlSiO <sub>4</sub>   |
| Espodumênio    | LiAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>   |
| Lepidolita     | K(Li,Al) <sub>3</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (F,OH) <sub>2</sub> |
| Montebrasita   | LiAl(PO <sub>4</sub> )(OH,F)   |
| Petalita       | LiAlSi <sub>4</sub> O <sub>10</sub>  |
| Trifilita      | Li(Fe,Mn)PO <sub>4</sub>   |
| Virgilita      | LiXAlXSi <sub>3</sub> -XO <sub>6</sub>   |

No diagrama a seguir (Figura 6), está apresentada as relações entres os aluminossilicatos de lítio associado à sílica (SiO<sub>2</sub>), indicando que quando for estável a saturação de sílica, as correlações da imutabilidade entre petalita, espodumênio e eucrypta serão razão da T e P (London, 2008). London & Burt (1982<sup>a</sup>,b) estabeleceu as relações da estabilidade do quartzo e dos alumunissilicatos litiníferos, de acordo o sistema de LiAlO<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, após isso foram definidas experimentalmente por London (1984). O espodumênio e/ou petalita reagem alterando para virgilita ou β-espodumênio (teórico) que delimitam a formação desses minerais nos pegmatitos a qualquer pressão com uma temperatura inferior a 700° C (LONDON, 2008).

O Campo Pegmatítico de Itinga possui nítida afinidade com os pegmatitos LCT (Lítio-Césio-Tântalo) como foi demonstrado por Pedrosa-Soares et al. (2011a) que identifica o alto teor de Li. Ele também pontua que o corpo é composto por 2 tipos distintos de grupos de pegmatitos. O primeiro grupo é constituído por um enxame de corpos não zonados, homogêneo, enriquecidos em espodumênio, tendo ainda a petalita e turmalina. A formação do segundo grupo é descrita como pegmatitos zonados com mineralização de espodumênio, petalita, lepidolita, ambligonita-montebrasita, elbaíta, polucita, cassiterita, tantalita, albita e cleavelandita. Para além dos minérios de lítio - petalita, lepidolita e espodumênio, os pegmatitos LCT podem conter o mineral de césio, polucita; o mineral de tântalo, columbita-tantalita; o mineral de berílio, berilo; e o minério de estanho presente na cassiterita.

Figura 6 – Diagrama de fase experimental dos aluminossilicatos de lítio.



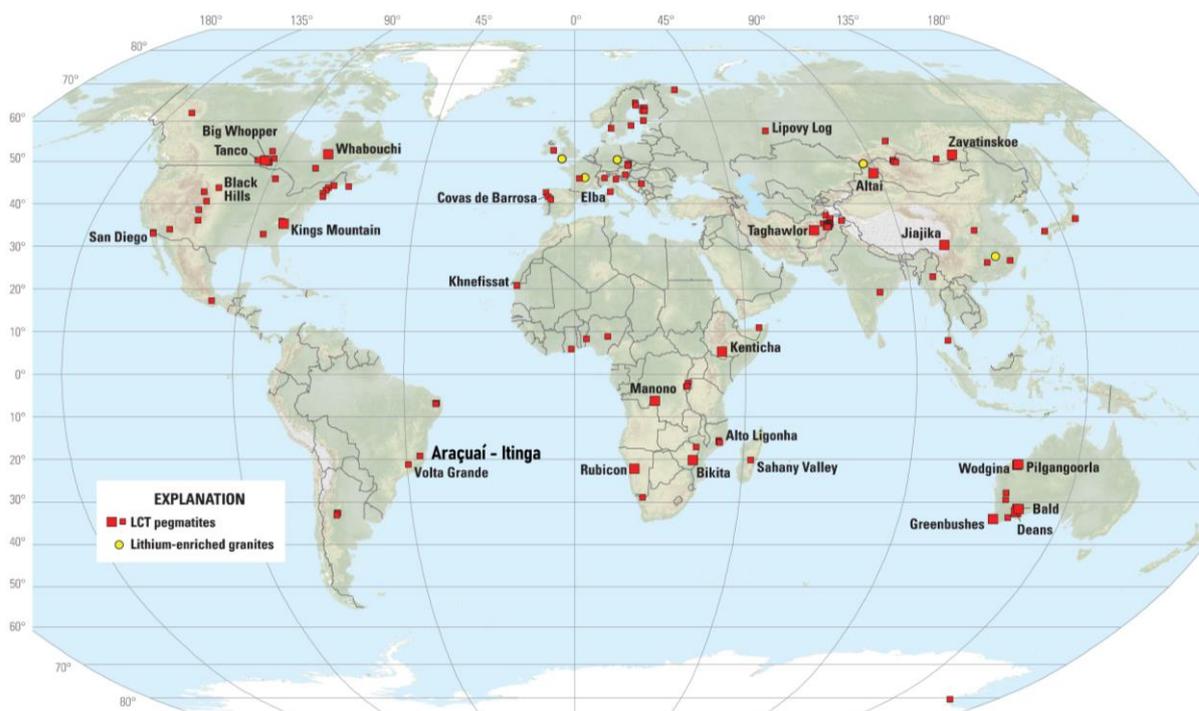
Fonte: Retirado de Dias (2015).

Os pegmatitos LCT também podem produzir pedras preciosas de alto valor espécimes de minerais raros. As pedras preciosas incluem o berilo nas variedades água-marinha, esmeralda e heliodora. A variedade da turmalina de lítio elbaíta ("turmalina de melancia") e as variedades do espodumênio hiddenita (cor verde), kunzita (Cor roxa-azulada) e trifano (amarelo). Nos pegmatitos LCT também são extraídos para feldspatos, muscovita e quartzo ultrapuro. A diversidade de espécies minerais nos mais complexos pegmatitos do LCT é impressionante, no depósito Tanco em Manitoba, Canadá, por exemplo, foram identificados 105 minerais (LONDON, 2008). Os pegmatitos LCT são famosos entre geólogos e colecionadores de minerais pelos seus enormes cristais. O maior cristal de espodumênio encontrado tem 14 metros de comprimento, em Dakota do Sul-EUA, o maior cristal de berilo, 18 m e o maior cristal de k-feldspato, 49 m foi achado em Rickwood, no Alabama em 1981.

Estes achados são mais notáveis porque se acredita que os pegmatitos têm cristalizado numa questão de dias a anos (LONDON, 2008).

Os pegmatitos LCT podem ser datados utilizando a geocronologia isotópica. A idade é uma função da relação das abundâncias de um isótopo radioativo e o seu produto em decomposição. Nos pegmatitos, os minerais columbita-tantalita, monazita e zircão são datados explorando a decadência do urânio-238 para o chumbo-206. Em seis continentes já foram datados os pegmatitos (BRADLEY & MCCAULEY, 2013). A mais antiga, que se encontra em Austrália, formada a cerca de 2,829 Ma e os mais novos, na Itália, por volta dos 7 Ma (MCCAULEY & BRADLEY, 2014). A distribuição etária global, com alguns picos separadas por longos intervalos de poucos ou nenhum pegmatito. A idade atinge o pico de 2.638, 1,809, 962, 485, 309, 274, e 97 Ma correspondem a épocas em que os continentes da Terra estavam a ser reunidos em supercontinentes (BRADLEY, 2011). Os principais produtores de lítio de pegmatitos são Austrália, Brasil, China, Portugal e Zimbabué. O mundo tem centenas de depósitos conhecidos (Figura 7) e alguns destes, por exemplo, no Quebec, Canadá contêm grandes reservas de lítio que não tenham sido extraídos (BRADLEY *et al.*, 2017).

Figura 7 – Localização mundial dos corpos pegmatíticos LCT.



Fonte: Modificado de Bradley *et al.* (2017).

Mesmo os maiores pegmatitos de LCT são muito menores do que os típicos corpos graníticos, que normalmente têm áreas de superior a 10 km<sup>2</sup>. Os pegmatitos de Greenbushes na Austrália Ocidental, que é grande para um pegmatito LCT tem 3 km de comprimento e algumas centenas de metros de largura (PARTINGTON *et al.*, 1995). Em uma escala regional, os pegmatitos LCT tendem a ocorrer em distritos ao lado de granitos férteis, com a maior concentração de lítio e outros elementos incompatíveis nos pegmatitos mais distais. Os pegmatitos individuais assumem várias formas, que vão desde diques e sills tabulares para corpos irregulares.

Betioli *et al.* (2016) analisou e classificou 8 tipologias diferentes de pegmatitos de acordo a sua textura, minerais associados, estruturas e particularidades dos minerais litiníferos, com base em 45 pontos de campos obtidos em minas de lítio, ocorrências, depósitos e garimpos, restritos ao Distrito Pegmatítico de Araçuaí. Pedrosa-Soares *et al.* (2011a) define estes pegmatitos correspondentes a corpos residuais originários da suíte G4 e do tipo-S. A seguir são descritas as tipologias definidas:

- 1) Pegmatitos com espodumênio disseminado, homogêneos:** Encontrados entre Araçuaí e Itinga, a feição predominante é a constância das características minerais e das texturas com a contínua dispersão do espodumênio. Foi definida por Sá (1977).
- 2) Pegmatitos com espodumênio disseminado e com zoneamento mineralógico nas bordas:** Estabelecida por Betiollo *et al.* (2016). A mineralogia é similar a tipologia 1, mas se distingue por exibir um zoneamento mineralógico persistente e evidente nas bordas da intrusão pegmatítica que tem um volume intermediário de albita.
- 3) Pegmatitos com espodumênio disseminado, homogêneos ou zonados e com alta proporção de albita:** A mineralogia desta tipologia se difere das duas já apresentadas devido ao alto teor de albita comparado com a proporção relativa e total de k-feldspato (BETIOLLO *et al.*, 2016).
- 4) Pegmatitos com petalita na zona intermediária:** Tem como feição primordial o zoneamento interno diferente aos outros corpos pegmatíticos, tendo a petalita concentrada nas suas partes centrais. Tipologia estipulada por Sá (1977).

- 5) **Pegmatitos com petalita na zona intermediária e com alta proporção de albita:** Indica uma fragmentação da tipologia anterior, tendo como mineral litífero principal a petalita, porém há uma concentração maior de albita com relação a 4. Tipologia definida por Bettiolo *et al.* (2016).
- 6) **Pegmatitos com petalita e espodumênio na zona intermediária:** Estabelecida por Sá (1977), se assemelha a tipologia 4, entretanto distingue-se por apresentar o espodumênio sempre correlacionado à zona da petalita.
- 7) **Pegmatitos com lepidolita e ambligonita, zonados:** É a zona onde estão os corpos mais desenvolvidos, com relação ao processo pegmatítico, se tem um alto grau de albitização iniciada no núcleo e pode atingir os contatos da rocha. Apresenta grande variedade na associação mineralógica com concentração de lepidolita e ambligonita, há também gemas de berilos e turmalinas de diferentes tonalidades (SÁ, 1977).
- 8) **Pegmatitos com espodumênio no núcleo de quartzo e no seu entorno, zonados:** Estabelecida na região de Coronel Murta por Pedrosa-Soares *et al.* (1990). São definidos por apresentar recorrentes e abundantes corpos de substituição, alta concentração de elbaíta, espodumênio na zona intermediária e no núcleo. A zona intermediária e corpos de substituição contêm, também, lepidolita e ambligonita. Os corpos de substituição podem acumular gemas de espodumênio, na variedade kunzita (tonalidade roxeada).

Conforme as descrições realizadas em trabalhos anteriores, com base na assembleia da mineralogia acessória, os pegmatitos de Araçuaí-Itinga se adequam melhor na classificação proposta por Wise *et al.* (2022) no Grupo 1 com origem petrogenética de fusão residual de magmas de granitos do tipo-S (

Tabela 6).

Tabela 6- Categorização dos pegmatitos litiníferos de Araçuaí e Itinga, conforme a classificação de Wise *et al.* (2022).

|                     | Group 1 (S-type granite affiliation) | Group 2 (A-type granite affiliation) | Groups 1 & 2 (I-type granite affiliation) |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| <b>Rock-forming</b> | Biotite Fe, Mg                       | Biotite Fe, Mg, Na                   | Biotite Fe, Mg                            |
|                     | Almandine                            | Fayalite                             | Almandine                                 |
|                     | Muscovite Al                         | Arfvedsonite/Riebeckite              | Muscovite Al                              |
|                     |                                      | Magnetite                            |   |
|                     | Spessartine Mn                       |                                      |   |
|                     | Muscovite Al                         |                                      |   |
| <b>Rare-element</b> | Schorl Fe, B                         | Allanite REE, Y, Be, Nb, Ta, P       | Schorl B                                  |
|                     | Beryl Be                             | Gadolinite                           | Beryl Be                                  |
|                     | Columbite-group Nb, Ta, Sn           | Fergusonite                          | Columbite-group Nb, Ta                    |
|                     | Tapiolite-(Fe)                       | Samarskite                           | Allanite REE, Y, Nb, Ta, P                |
|                     | Wodginite                            | Euxenite                             | Monazite/Xenotime F                       |
|                     | Cassiterite                          | Columbite-group                      | Topaz                                     |
|                     | Graftonite group P, Li, F            | Monazite                             | Fluorite                                  |
|                     | Triphylite-lithiophilite             | Xenotime                             | Elbaite Li, B, Ca                         |
|                     | Amblygonite-montebrazite             | Beryl Be                             | Liddicoatite                              |
|                     | Elbaite Li, B                        | Phenakite                            | Lepidolite                                |
|                     | Lepidolite                           |                                      | Danburite                                 |
|                     | Spodumene                            | Zinnwaldite Li, Fe                   |   |
|                     | Petalite                             | Topaz F                              | Hambergite Be, B                          |
|                     |                                      | Fluorite                             | Epidote Ca                                |
|                     | Pollucite Cs                         | Cryolite                             | Stilbite/Laumontite                       |
|                     | <b>Additional accessory minerals</b> |                                      |   |
| Apatite             | Aegirine                             | Hyalite opal                         | Amazonite                                 |
| Cleavelandite       | Amazonite                            | Molybdenite                          | Amethyst                                  |
| Zircon              | Amethyst                             | Schorl                               | Anatase                                   |
|                     | Ilmenite                             | Triplite                             | Apatite                                   |
|                     | Helvine group                        | Zircon                               | Axinite                                   |
|                     |                                      |                                      | Cleavelandite                             |
|                     |                                      |                                      | Ilmenite                                  |
|                     |                                      |                                      | Kunzite                                   |
|                     |                                      |                                      | Petalite                                  |
|                     |                                      |                                      | Pollucite                                 |
|                     |                                      |                                      | Pyrochlore-group                          |
|                     |                                      |                                      | Rhodizite                                 |
|                     |                                      |                                      | Stibiotantalite                           |
|                     |                                      |                                      | Titanite                                  |
|                     |                                      |                                      | Zinnwaldite                               |
|                     |                                      |                                      | Zircon                                    |

Fonte: Modificado de Wise *et al.* (2022).

## 5.2.3 Tecnologias de Extração de Lítio de Pegmatitos

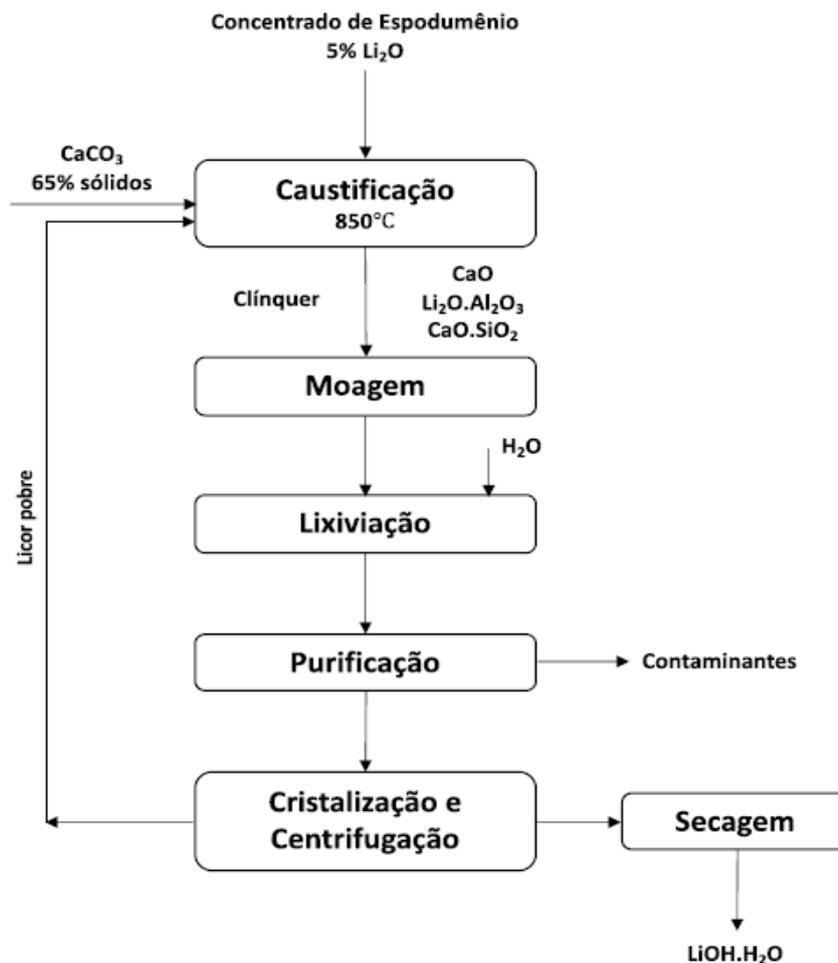
### 5.2.3.1 Tecnologias Estáveis

Neste subitem é apresentado as duas tecnologias já consolidadas de obtenção do concentrado de lítio a partir do, também, concentrado do minério de espodumênio. No Brasil os processos empregados de extração litiníferas são:

#### 5.2.3.1.1 Processo Alcalino

Desenvolvido na década de 1930 pela Foote Mineral Co, este processo utilizado do concentrado de espodumênio (Figura 8), com o auxílio do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) para obter o hidróxido de lítio (LiOH.H<sub>2</sub>O). Esta técnica é utilizada no Brasil pela CBL – Companhia Brasileira de Lítio. O fluxograma a seguir descreve o processo.

Figura 8 – Fluxograma descrevendo o processo de aquisição do LiOH.H<sub>2</sub>O.

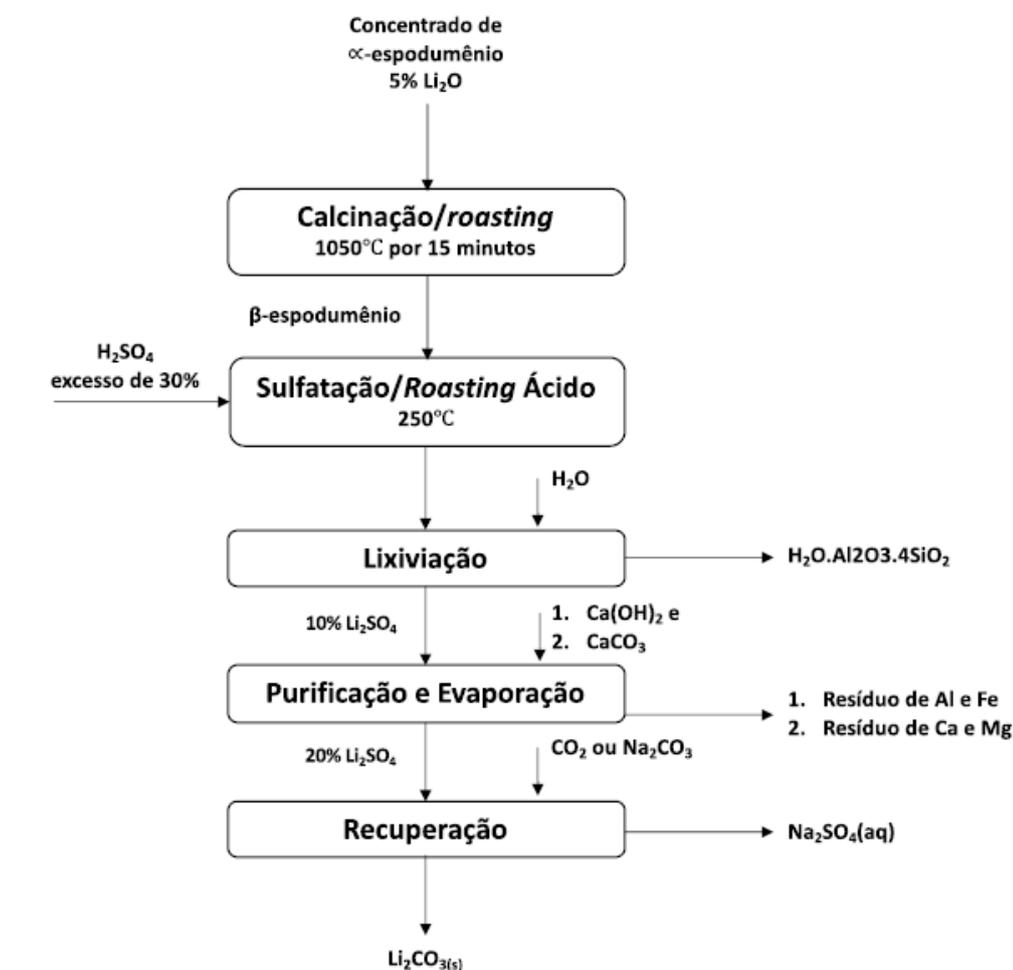


Fonte: Retirado de Brunhara e Braga (2021).

### 5.2.3.1.2 Processo Ácido

No processo ácido o resultado do concentrado de espodumênio é o carbonato de lítio (Li<sup>2</sup>CO<sub>3</sub>). Esta técnica (Figura 9) foi elaborada nos anos 40 pela LITHCOA, sendo muito utilizada, também, na CBL e na Sigma Lithium, que empregam esse método nas suas plantas. Essa metodologia pode, também, resultar na obtenção de hidróxido de lítio, com o Li<sup>2</sup>CO<sub>3</sub> ainda úmido, que é tido como um produto intermediário do processo, acrescenta o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>)<sup>2</sup> que reage com o Li<sup>2</sup>CO<sub>3</sub> (BRUNHARA & BRAGA,2021).

Figura 9 – Fluxograma detalhando o processo ácido de obtenção do Li.



Fonte: Retirado de Brunhara e Braga (2021).

### 5.2.3.2 Tecnologias em Ascensão

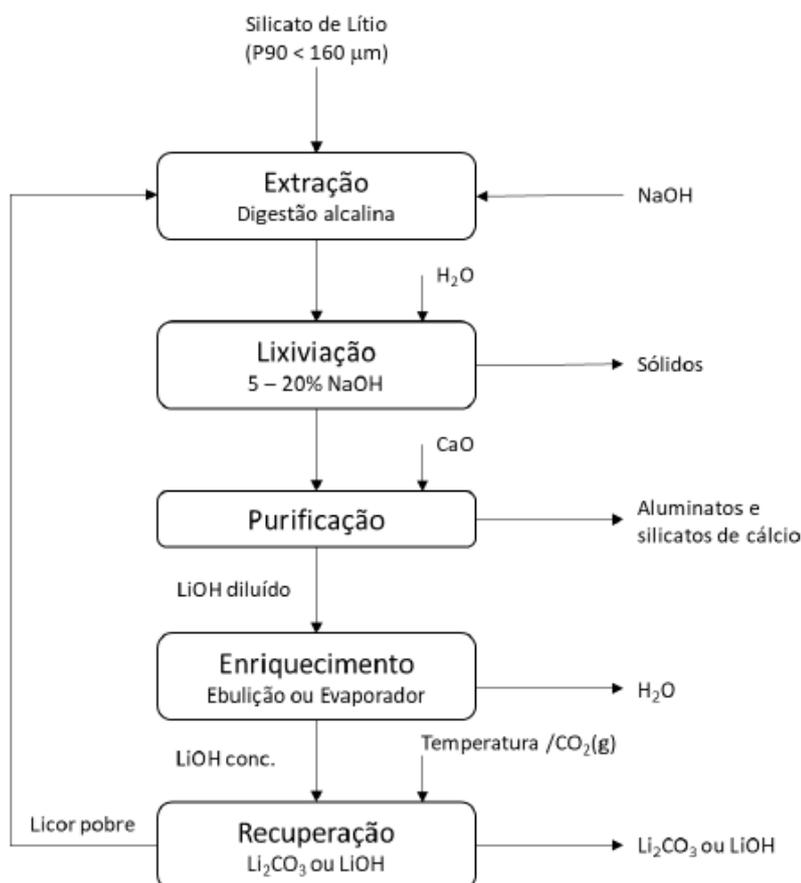
Em contrapartida aos dois processos tradicionais de extração, vem sendo desenvolvido técnicas inovadoras que aprimorarão a forma e qualidade de obtenção do concentrado do minério. Os processos tradicionais possuem como mineral base de aquisição o espodumênio enquanto as novas técnicas poderão usar outros minerais, como a lepidolita, petalita, ambligonita e zinnwaldita.

Atualmente existem cinco métodos conquistando maior relevância no tema. Estes processos já estão em avançado teste, alguns possuem comprovação em escala de bancada e outros em escala piloto (BRUNHARA & BRAGA, 2021). Será apresentado a seguir os cinco métodos inovadores.

### 5.2.3.2.1 Processo LieNa®

Este processo é fundamentado na digestão alcalina de minerais de silicatos de lítio como o espodumênio e a lepidolita em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), que ao fim do beneficiamento gera o  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  e LiOH. Foi desenvolvido pela empresa australiana Lithium Australia NL e patenteado com o nome de *Caustic Digestion Process* (Patente n° AU2017306576). O principal objetivo dessa tecnologia ( Figura 10) é o processamento do espodumênio de fina granulometria resultante do beneficiamento das técnicas em atual uso, que demandam do uso do minério em maior granulometria (BRUNHARA & BRAGA, 2021).

Figura 10: Fluxograma da extração de Li pelo processo LieNa®.



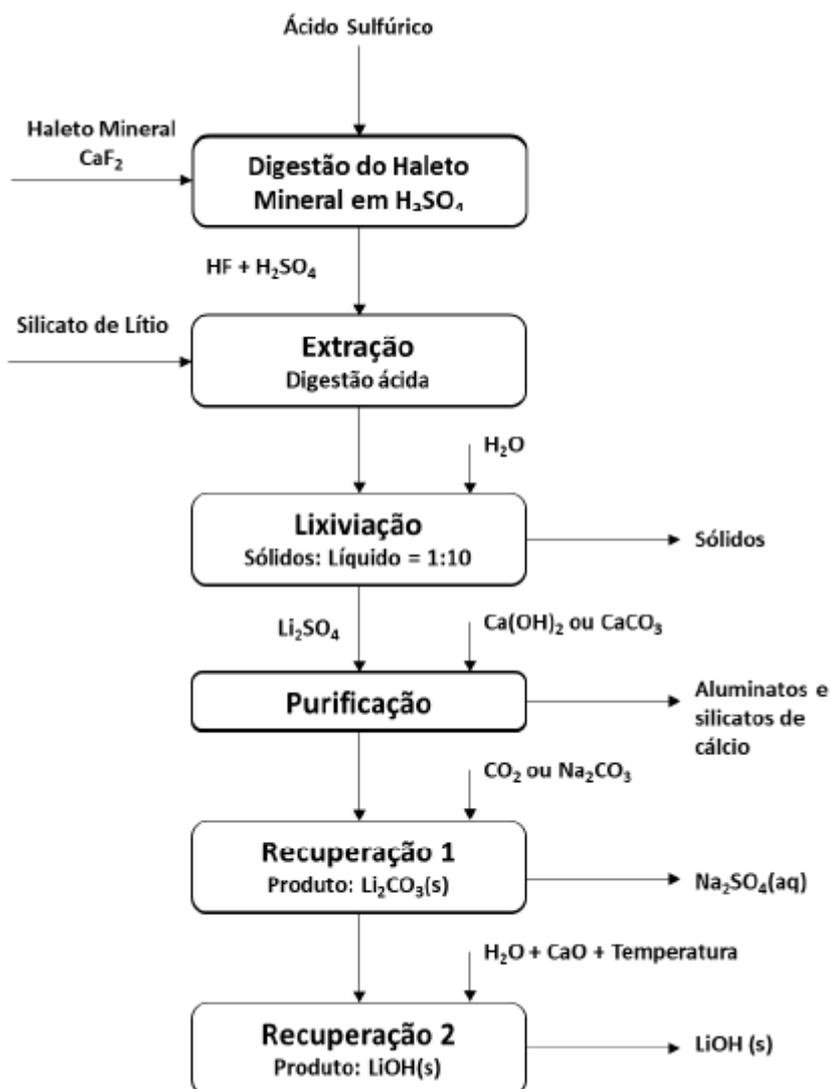
Fonte: Retirado de Brunhara e Braga (2021).

### 5.2.3.2.2 Processo SiLeach®

Este método também foi elaborado e patenteado pela australiana Lithium Australia NL, sob a patente nº AU2016900428, que se explora e recupera o Li a partir de minerais como espodumênio, lepidolita, petalita e zinnwaldita.

Neste processo é usado uma digestão ácida para obter o minério beneficiado, o fluxograma a seguir mostra as etapas do beneficiamento (Figura 11).

Figura 11 – Fluxograma do processo de beneficiamento do SiLeach®.



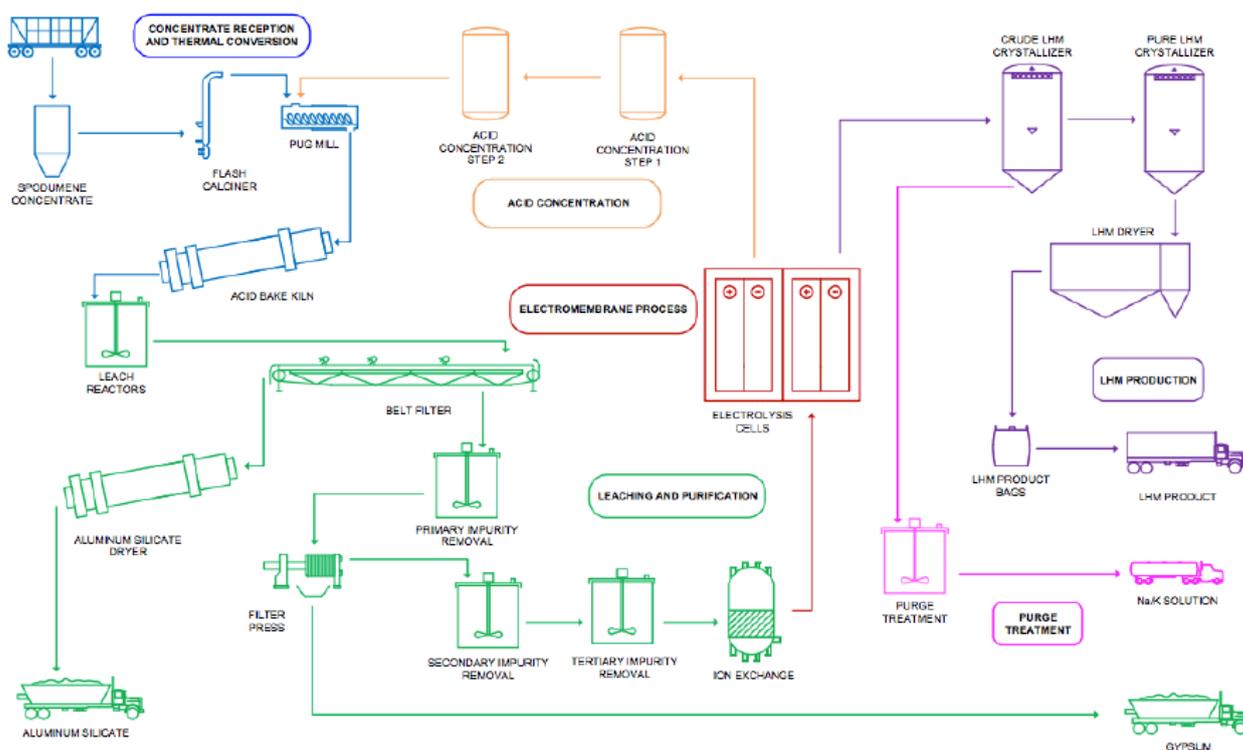
Fonte: Retirado de Brunhara e Braga (2021).

### 5.2.3.2.3 Processo Nemaska *Lithium*

Técnica (Figura 12) concebida pela empresa canadense Nemaska Lithium Inc., onde é produzido o LiOH com alta pureza sem a exigência do produto intermediário, o  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , tendo como vantagem eliminar a necessidade do reagente de carbonato de sódio, conhecido como barrilha, além de excluir o subproduto  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , que não tem valor comercial.

Para a produção direta do hidróxido de lítio grau bateria, o processo conta com tecnologias avançadas de coluna de troca iônica para purificação de sulfato de lítio, o qual é transformado em hidróxido de lítio por processo eletrolítico em eletromembranas (BRUNHARA & BRAGA, 2021).

Figura 12 – Fluxograma simplificado do processo Nemaska.



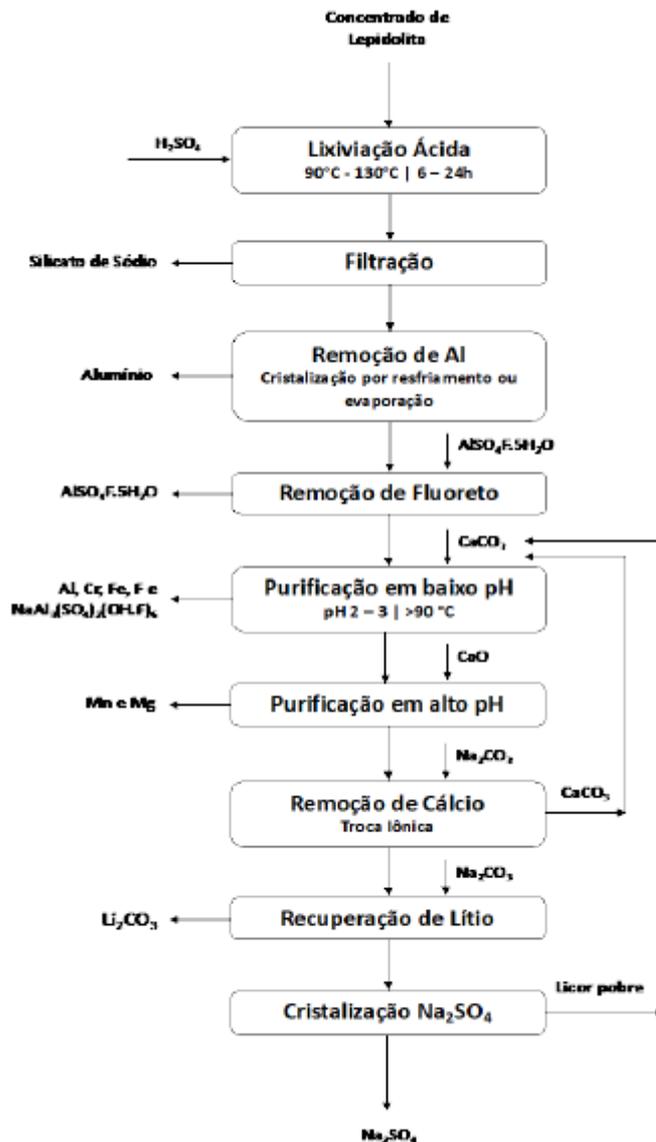
Fonte: Retirado de Brunhara e Braga (2021).

### 5.2.3.2.4 Processo L-Max®

Técnica de beneficiamento elaborada e patenteada pela Li Technology Pty Ltd, empresa subsidiária da australiana Lepidico Ltd. O processo L-Max® (

Figura 13) baseia-se nos minerais lepidolita e amblygonita para produzir o carbonato de lítio, com um diferencial de durante o processo o baixo consumo de energia e uso de reagentes tradicionais, como por exemplo:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . uma empresa subsidiária da Lepidico Ltd.

Figura 13 – Processo L-Max® para extração do lítio.



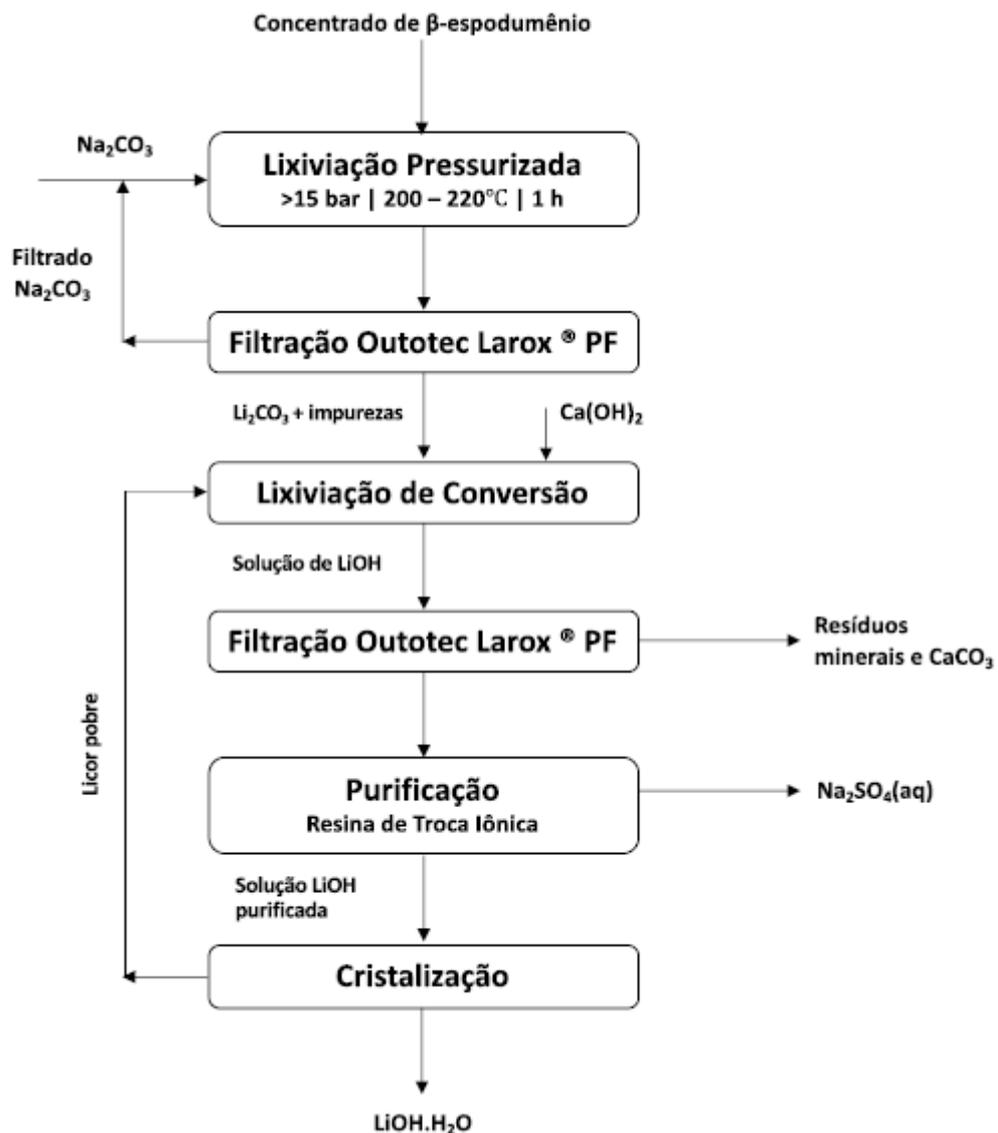
Fonte: Retirado de Brunhara e Braga (2021).

### 5.2.3.2.5 Processo Outotec de Hidróxido de Lítio

Processo elaborado pela empresa finlandesa Outotec, é fundamentado em duas etapas de lixiviação alcalina: o primeiro em autoclave e o segundo à pressão

atmosférica (TIIHONEN, et al., 2019) que o resultado é a geração de hidróxido de lítio. De acordo a própria desenvolvedora, a técnica possui benefícios em relação as demais, pois não emprega o uso de ácidos para aquisição do LiOH com grau de bateria. O beneficiamento (Figura 14) tem a substituição dos métodos tradicionais, por um em que é utilizado resina de troca iônica, evitando a inserção de compostos contaminantes, além proporcionar resíduos inertes e de fácil neutralização.

Figura 14 – Fluxograma do processo elaborado pela Outotec.



Fonte: Retirado de Brunhara e Braga (2021).

#### 5.2.4 Cenário Econômico do Lítio

Os principais produtores de lítio em pegmatitos são Austrália, Brasil, China, Portugal e Zimbábue. O mundo tem centenas de depósitos conhecidos e alguns destes, por exemplo no Quebec em Canadá, contêm grandes reservas de lítio que não tenham sido extraídos. Os pegmatitos LCT são encontradas nos terrenos meta-ígneos e metassedimentares de cinturões orogênicos e são uma consequência da placa convergente. A maioria dos pegmatitos LCT formaram-se durante a colisão entre continentes ou microcontinentes e estão associados a granitos ricos em alumínio que tiveram a sua origem na fusão de rochas sedimentares metamorfoseadas.

Em 2020, foi estimada uma produção superior a 436 mil toneladas de LCE, um aumento de 3 vezes comparado a 2010, que teve uma produção de 150 mil toneladas de LCE (BRUNHARA & BRAGA 2021).

Na (Tabela 7) são demonstrados os países que possuem expressivas reservas e recursos de lítio, medido em 2020. Também é apresentada a produção mineral nos anos de 2010, 2019 e 2020. Porém, o maior depósito deste minério encontra-se na Bolívia, que detém, aproximadamente, 21 milhões de toneladas de minério litinífero nas suas salmouras. Equivalente a 25% dos recursos mundiais, mas não explora seus recursos.

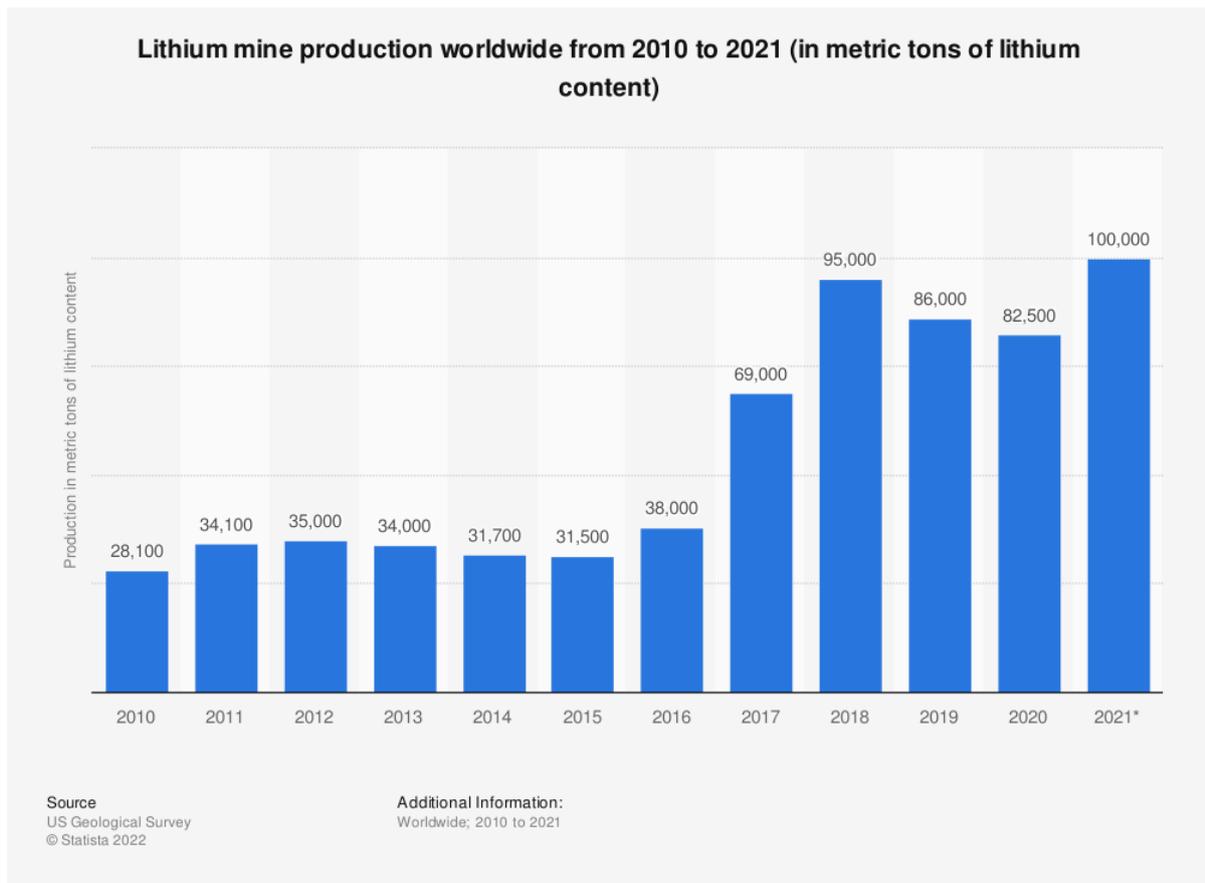
Tabela 7 – Recursos, reservas e produção de lítio (t), e=estimado.

| Países               | Recursos<br>2020  | Reservas<br>2020  | Produção      |               |               |
|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
|                      |                   |                   | 2010          | 2019          | 2020e         |
| Estados Unidos       | 7.900.000         | 750.000           | -             | -             | -             |
| Argentina            | 19.300.000        | 1.900.000         | 2.950         | 6.300         | 6.200         |
| Austrália            | 6.400.000         | 4.700.000         | 9.260         | 45.000        | 40.000        |
| Brasil               | 470.000           | 95.000            | 160           | 2.400         | 1.900         |
| Canadá               | 2.900.000         | 530.000           | -             | 200           | -             |
| Chile                | 9.600.000         | 9.200.000         | 10.510        | 19.300        | 18.000        |
| China                | 5.100.000         | 1.500.000         | 3.950         | 10.800        | 14.000        |
| Portugal             | 270.000           | 60.000            | 800           | 900           | 900           |
| Zimbábue             | 500.000           | 220.000           | 470           | 1.200         | 1.200         |
| Outros países        | 33.070.000        | 2.100.000         | -             | -             | -             |
| <b>Total Mundial</b> | <b>85.510.000</b> | <b>21.055.000</b> | <b>28.100</b> | <b>86.100</b> | <b>82.200</b> |

Fonte: Retirado de Brunhara e Braga (2021).

Usando como base de informação o site *statistas.com*, vários gráficos indicam o movimento do lítio no mercado, a (Figura 15) demonstra a crescente produção do desse bem mineral de 2010 até o valor estimado que foi produzido em 2021, reforçando a ideia que o uso e exploração tendo a aumentar no futuro.

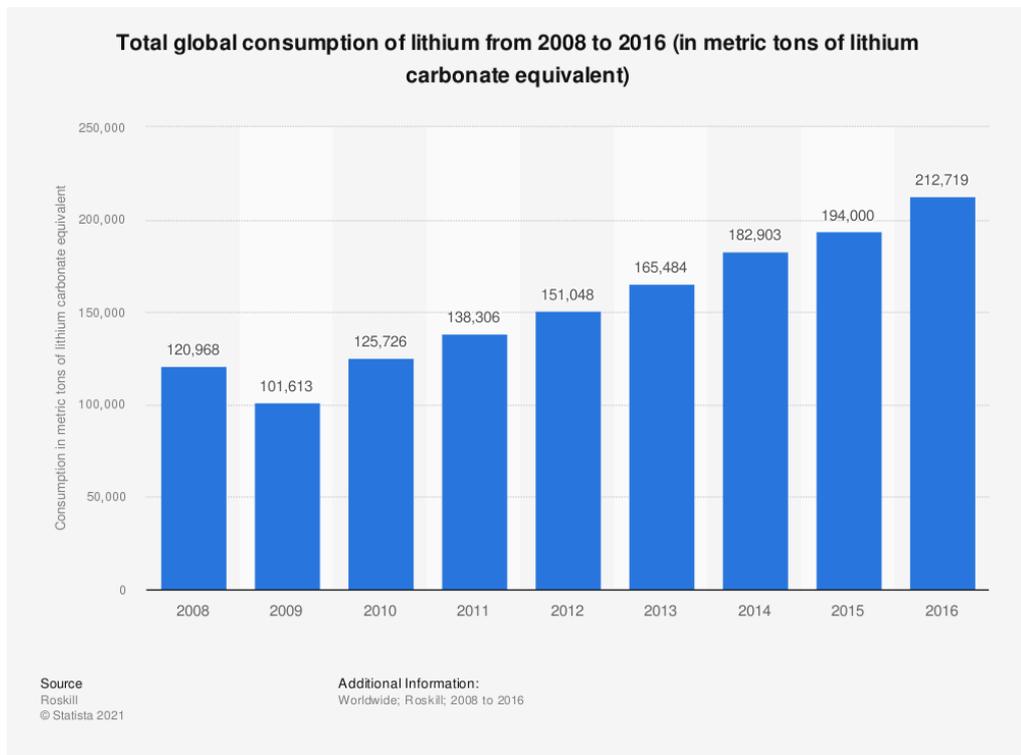
Figura 15 - Produção mundial de lítio de 2010 a 2021



Fonte: Retirado de *statistas.com* (2021).

Na (Figura 16) é observado o avanço do consumo global do Li por um período de 12 anos, entre os anos de 2008 e 2016. Com a grande aplicação do lítio para confecção de baterias, o mercado necessita de novas reservas para atender a progressiva demanda do mesmo.

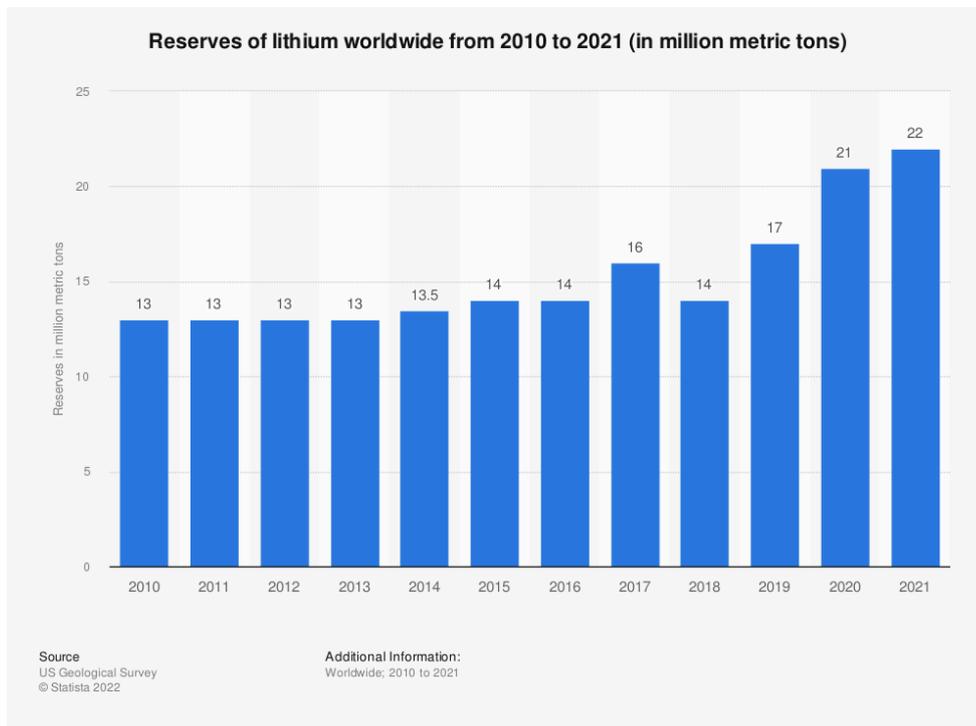
Figura 16 - Consumo global de lítio de 2008 a 2016.



Fonte: Retirado de *statista.com* (2021).

O total de novas reservas tem ampliado com o passar dos anos, conforme está exibido no gráfico da (Figura 17), devido a maior procura para produção de armazenadores de energia, que aumentou expressivamente na década de 2010.

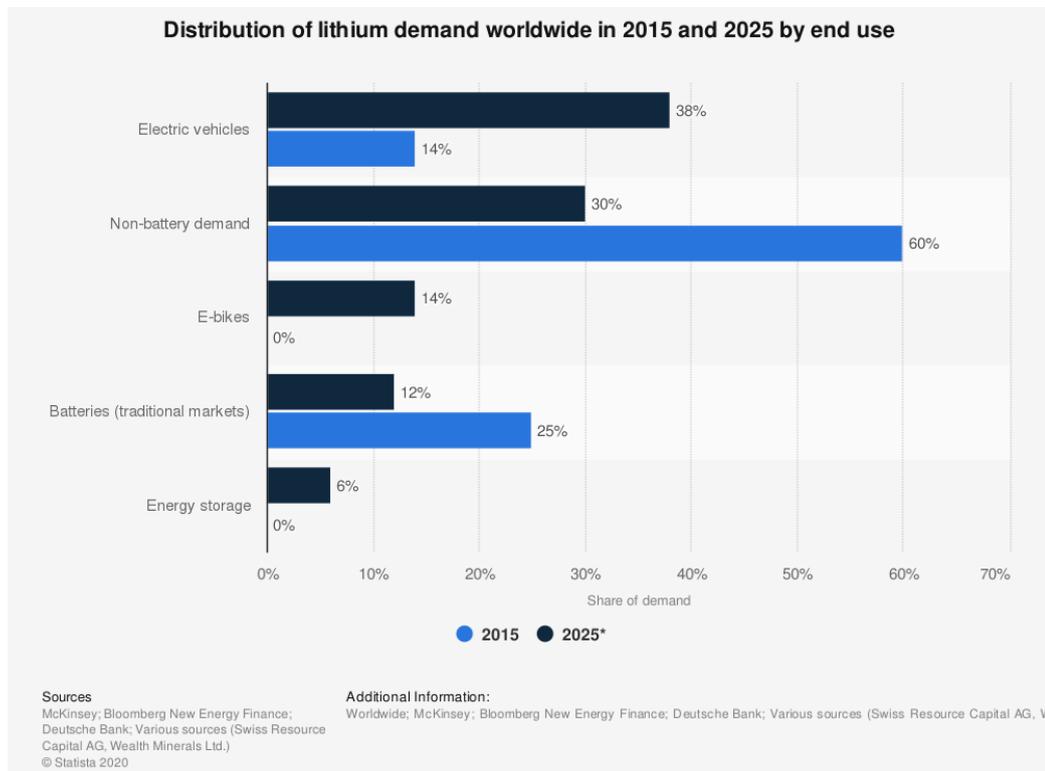
Figura 17 - Reservas mundiais de 2010 a 2021 de minério de lítio.



Fonte: Retirado de *statista.com*.

A popularização de VE influenciou na forma como a indústria tem aplicado o Li nos seus produtos, de acordo um estudo em 2015 o principal manufaturado do lítio era para a demanda de “não bateria” (Figura 18), enquanto a previsão é de 2025 o foco será para a fabricar baterias para os VE.

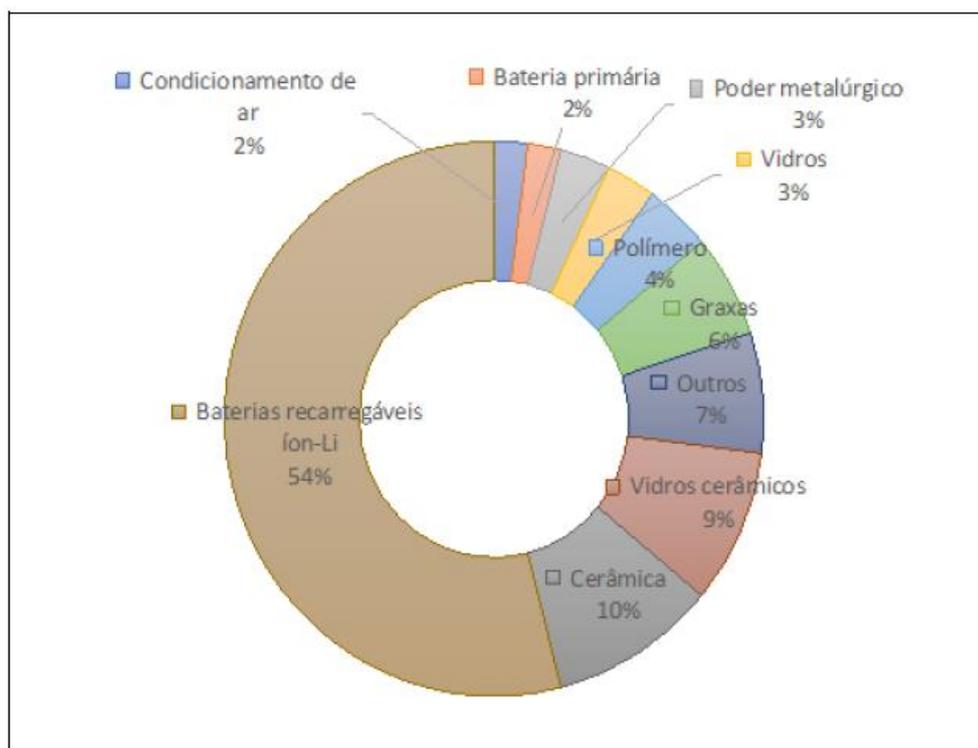
Figura 18 - Demanda da utilização de lítio de 2015 para 2025.



Fonte: Retirado de *statistas.com*

O gráfico a seguir mostra o consumo setorial do LCE mundial no ano de 2020, destacando a relevância do setor de baterias recarregáveis na cadeia de produção do lítio, sendo que mais da metade, mais exatamente, 54% da demanda foi para a produção de baterias de Li. Seguido pela confecção de cerâmicas e vidro cerâmicos (Figura 19).

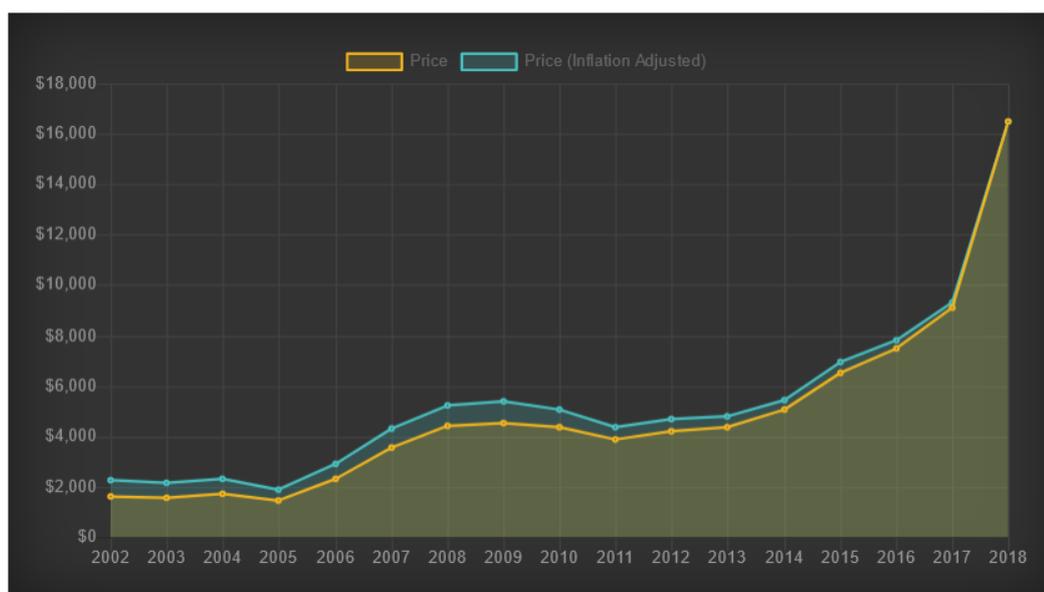
Figura 19 – Distribuição do uso do LCE no mercado mundial.



Fonte: Retirado de Brunhara e Braga (2021).

Conforme os dados obtidos no site *metalary.com*, é possível indicar os valores médios do preço do beneficiado litinífero (Figura 20), entre de 2002 e 2018.

Figura 20 - Histórico do preço do Li entre 2002 e 2018.



Fonte: Retirado de *metalary.com* (2021).

A variação do preço médio, em dólar, da tonelada do hidróxido de lítio durante os últimos 13 meses teve uma amplitude grande, de acordo os dados da revista *Engineering Mining Journal* (Figura 21), das edições de novembro de 2021 a dezembro de 2022. No início da medição, em 5 de novembro, o preço médio era de 26.500 \$/t, existindo uma crescente que atinge o valor de 42.000 dólares por tonelada em 3 meses depois e, novamente, após três meses, no final de abril, chegou a custar 81.000 \$ por tonelada. Após essa alta, o valor médio do minério teve uma leve queda para 75.000 \$/t. Porém, seguindo a tendência anterior, o preço seguiu em alta, tendo atingido o pico em dezembro de 2022, com preço médio de 85.000 \$/t.

Figura 21 - Variação do preço do hidróxido de lítio.



Fonte: Autor, com base nos valores disponíveis na *Engineering Mining Journal*.

## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa teve o auxílio dos seguintes métodos na sua elaboração:

- Coletânea de trabalhos, artigos e teses anteriores que discorrem sobre a mesma área de estudo tendo como propósito a evolução da sapiência dos pegmatitos litiníferos do Orógeno Araçuaí, especificamente aqueles encontrados na região entre Araçuaí e Itinga;
- Flutuação do preço do minério de lítio extraídos do *metalary.com*, site esse reconhecido internacionalmente por seu trabalho com acionista e ações da mineração, da revista de mineração *Engineering Mining Journal*, sites de estáticas globais sobre o mercado de ações como o *statitas.com* entre outros;
- Sintetização do histórico de consumo, produção e reservas do bem mineral em estudo através de bibliografias e sites, sendo a primeira para as informações mais antigas e o segundo para os dados mais recentes;

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a classificação dos pegmatitos do campo de Itinga com base na evolução do conhecimento adquirido, as técnicas de extração do minério de lítio, comumente utilizadas e novos processos, assim como abordar o mercado mundial, no que diz a respeito da variação do preço, produção anual, reservas, consumo de lítio, aplicações principais e suas projeções futuras. Este item terá o foco em discutir os tópicos anteriormente citados.

Com relação aos pegmatitos e considerando o capítulo 5.2.1 e capítulo 5.2.2 podemos mencionar a importância de Sá (1977), conforme o conceito definido por Jahns (1955), que classificou estas em 4 tipologias distintas. Em 2016 Betioli *et al.*, designou mais 4 tipologias para o Campo Pegmatítico de Itinga, as quais, junto com as 4 tipologias de Sá (1977) que determinaram 8 tipologias distintas neste campo que definiram o CPI como pertencente à família LCT, de acordo o conceito estabelecido por Černý & Ercit (2005). No ano de 2022, Wise *et al.* propôs um novo esquema de classificação de pegmatitos levando em consideração a assembleia dos minerais acessórios e a origem petrogenética, como discutido no subitem Pegmatitos Litíferos.

Isto indica que a evolução do pensamento em relação aos pegmatitos mostra o avanço da geociência, auxiliando cada vez mais os pesquisadores a um melhor entendimento e facilidade na procura de corpos pegmatíticos.

Os processos de metalurgia e beneficiamento de lítio evoluiu bastante, desde as primeiras tecnologias que foram desenvolvidas no século XX, que são as mais utilizadas hoje em dia até desenvolvimento de novas tecnologias para aprimorar a capacidade de concentração de lítio, como por exemplo: LieNa®, Nemaska Lithium, SiLeach®, L-Max®, Outotec. Muitos desses métodos incluem baixo consumo de energia (considerando o consumo dos métodos anteriores) o que é muito importante, já que o gasto financeiro em energia é muito alto.

A indústria mineira de lítio teve um grande avanço, tanto em relação a novas descobertas de jazidas quanto na aplicação principal deste minério. Assim, a produção de lítio em 8 anos dobrou (2013-2019), cabe ressaltar que o setor responsável pelas baterias de íon-lítio e em 6 anos duplicou o consumo relativo de Li. Com o aumento da produção e o aumento do consumo os preços tiveram uma

variabilidade importante, como exemplo: uma tonelada de concentrado lítio em 2002 custava U\$ 1.500 e em 2018 chegou a custar U\$ 16.500 sendo que em dezembro de 2022 o preço médio da tonelada foi de U\$ 85.000. A análise da flutuação do preço da *commodity*, no final de novembro de 2021 a dezembro de 2022, indica um *boom* no preço da tonelada entre fevereiro e março de U\$ 20.000 influenciado diretamente pelo início da invasão russa a Ucrânia. Isto significa que a procura por novos depósitos lítio será ser cada vez maior, já que o preço também tende a continuar subindo. Projeções futuras indicam que empresas que desejam explorar este bem mineral terão lucros satisfatórios.

Com relação aos problemas ambientais produzidos pela extração do minério, podemos mencionar que existe a preocupação das empresas em construir barragem de rejeito seco, para evitar que haja desastres como os de Mariana e Brumadinho, que contaminaram bacias hidrográficas que abastecem uma grande população ao longo desses rios. Próximo a área de beneficiamento da SigmaLithium que possui barragem de rejeito seco, encontra-se o rio Jequitinhonha, rio este importante na região mais árida do nordeste de Minas Gerais.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração deste estudo teve como intuito fazer uma revisão de informações acerca dos pegmatitos encontrados entre os municípios de Araçuaí e Itinga, no Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais, região conhecida por seu histórico de gemas e, posterior mineração de lítio no Brasil. Demonstrar o avanço no conhecimento e classificações dos corpos pegmatíticos, as tecnologias de extração do minério de lítio aplicada vêm para contribuir na otimização da exploração litinífera, melhor aproveitando o minério, com menor impacto no ambiente e diminuição de custos.

A constatada evolução do mercado de minério de lítio durante os anos, causada principalmente pela ascensão de veículos elétricos, aparelhos tecnológicos (celulares, *tablets*, VANT's, *notebook's*, entre outros) que dependem diretamente das baterias de íon-Li que, as quais tiveram uma grande influência no preço do lítio e incentivou estudos na área dos pegmatitos no Brasil e a nível mundial.

## 9 REFERÊNCIAS

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S., 1998. **Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero.** *Prec. Res.* 90, 29–58.

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S., PEDROSA-SOARES, A.C., CRUZ, S.C.P.; PERES, G.G. & WHITTINGTON, A.G. 2003. Tectônica Quebra-Nozes e a Gênese do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. *In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 9, Búzios. SBG-RJ, Boletim de Resumos, p. 40-43.

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S., PEDROSA-SOARES, A.C., PERES, G.G., CRUZ, S.C.P. & WHITTINGTON, A. 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí–West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, 149: 43-63.

ALKMIM, F.F., PEDROSA-SOARES, A.C., NOCE, C.M. & CRUZ, S.C.P. 2007. Sobre a Evolução Tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. *Geonomos*, 15.

ALMEIDA, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349-364.

ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y., RODRIGUES, E.P. & YAMAMOTO, J. 1978. A Faixa de Dobramentos Araçuaí na região do Rio Pardo. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Recife. SBG, Anais, v.1, p. 270-283.

BABINSKI, M., PEDROSA-SOARES, A.C., MARTINS, M., LIU, D., NOCE, C.M. & KARFUNKEL, J. 2007. U-Pb SHRIMP dating of detrital zircons from the Macaúbas Group, southeast Brazil: implications on the depositional age and provenance of pre-glacial and glaciogenic sediments. *In: Symposium on Neoproterozoic-Early Palaeozoic Events in SW Gondwana*, 3, IGCP-478, Stellenbosch, South Africa.

BETIOLLO, L.M. *et al.*, 2016. Tipologia dos pegmatitos litiníferos da região do médio Jequitinhonha – MG, província pegmatítica oriental do Brasil. *Congresso Brasileiro de Geologia*, 48, Porto Alegre. SBG, Poster.

BRADLEY, D.C., 2011, Secular trends in the geologic record and the supercontinent cycle: *Earth-Science Reviews*, v.108, nos. 1–2, p. 16–33.

BRADLEY, D.C., MCCAULEY, A. 2013. A preliminary deposit model for lithium-cesium-tantalum (LCT) pegmatites: *U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1008*, 7 p.

BRADLEY, D.C. *et al.*, 2017. **Lithium – Chapter K. Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply.** Geological Survey.

BRUNHARA, G.F.; BRAGA, P.F.A. Tecnologias de extração de lítio de pegmatitos. **CETEM** 2021.

CAMERON, E.N., JAHNS, R.H., MCNAIR, A.H., AND PAGE, L.R. (1949) Internal structure of granitic pegmatites. **Economic Geology Monograph** 2, 115 p.

CAMPOS, C.M., MENDES, J.C., LUDKA, I.P., MEDEIROS, S.R., MOURA, J.C. & WALLFASS, C. 2004. A review of the Brasiliano magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on postcollisional magmatism. **Journal of the Virtual Explorer**, 17: 1-35.

CASTAÑEDA, C., PEDROSA-SOARES, A.C., BELÉM, J., GRADIM, D., DIAS, P.H.A., MEDEIROS, S.R., OLIVEIRA, L. 2006. **Geologia da Folha Ecoporanga 1:100.000**. Rio de Janeiro, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, UFMG-Programa Geologia do Brasil.

ČERNÝ, P. (Editor). Granitic pegmatites in science and industry. Toronto: **Mineralogical Association of Canada**, 555 p. (Short course handbook, v. 8), 1982.

ČERNÝ, P. (1991b) Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: Is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies? **Precambrian Research** 51, 429–468.

ČERNÝ, P. & ERCIT, T.S. The classification of granitic pegmatites revisited. **Canadian Mineralogist**, v. 43, n. 6, p. 2005-2026, 2005.

ČERNÝ, P. & MEINTZER, R.E. (1988) Fertile granites in the Archean and Proterozoic fields of rare-element pegmatites: Crustal environment, geochemistry, and petrogenetic relationships. In Recent Advances in the Geology of Granite Related Mineral Deposits (R.P. Taylor & D.F. Strong, eds.). **Institut Canadien des Mines et de la Métallurgie**. 170–207.

CORREIA NEVES, J.M. **Pegmatitos Graníticos: morfologia, mineralogia, geoquímica, gênese e metalogênese**. Belo Horizonte, 1981. 500 p. Tese de concurso para professor titular, Universidade Federal de Minas Gerais.

CORREIA-NEVES, J.M., PEDROSA-SOARES, A.C. & MARCIANO, V.R. 1986. A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. **Revista Brasileira de Geociências**, 16 (1): 106-118.

**ENGINEERING MINING JOURNAL**. Jacksonville, FL: Ed. Nov. 2021, pg 66. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/november-2021/>. Acessado em 22 de julho de 2022.

**ENGINEERING MINING JOURNAL**. Jacksonville, FL: Ed. Dec. 2021, pg 66. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/december-2021/>. Acessado em 22 de julho de 2022.

**ENGINEERING MINING JOURNAL**. Jacksonville, FL: Ed. Jan. 2022, pg 90. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/january-2022/>. Acessado em 22 de julho de 2022.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Fev. 2022, pg 58. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/february-2022/>. Acessado em 22 de julho de 2022.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Mar. 2022, pg 90. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/march-2022/>. Acessado em 22 de julho de 2022.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Abr. 2022, pg 66. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/april-2022/>. Acessado em 22 de julho de 2022.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Maio. 2022, pg 58. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/may-2022/>. Acessado em 22 de julho de 2022.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Jun. 2022, pg 82. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/june-2022/>. Acessado em 22 de julho de 2022.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Jul. 2022, pg 48. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/july-2022/>. Acessado em 22 de julho de 2022.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Aug. 2022, pg 58. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/august-2022/>. Acessado em 05 de janeiro de 2023.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Set. 2022, pg 66. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/september-2022/>. Acessado em 05 de janeiro de 2023.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Out. 2022, pg 66. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/october-2022/>. Acessado em 05 de janeiro de 2023.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Nov. 2022, pg 50. Disponível em: <https://www.e-mj.com/flipbooks/november-2022/>. Acessado em 05 de janeiro de 2023.

**ENGINEERING MINING JOURNAL.** Jacksonville, FL: Ed. Dez. 2022, pg 82. Disponível em <https://www.e-mj.com/flipbooks/december-2022/>. Acessado em 05 de janeiro de 2023.

FIGUEIREDO, M.C.H., TEIXEIRA, W., 1996. The Mantiqueira Metamorphic Complex, eastern Minas Gerais State: preliminar geochronological and geochemical results. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** 68, 223–246.

GRAHAM, J. D., RUPP, J. A., & BRUNGARD, E. (2021). **Lithium in the Green Energy Transition: The Quest for Both Sustainability and Security**. *Sustainability*, 13(20), 11274.

GROSSI-SAD, J.H., LOBATO, L.M., PEDROSA-SOARES, A.C. & SOARES-FILHO, B.S. 1997 (eds). **Projeto Espinhaço em CD-ROM**. CODEMIG, Belo Horizonte, 2693 p. e 23 mapas.

JAHNS, R.H. (1953a) The genesis of pegmatites. I. Occurrence and origin of giant crystals. **American Mineralogist**, 38, 563-598.

JAHNS, R.H. (1953b) The genesis of pegmatites. II. Quantitative analysis of lithium bearing pegmatite, Mora County, New Mexico. **American Mineralogist**, 38, 1078-1112.

JAHNS, R.H. The study of pegmatites. **Economic Geology**, Connecticut, [S.N.T.], p. 1025-1130, 1955.

LANDES, K.K. Origin and classification of pegmatites (concluded): classification of pegmatites. **American Mineralogist**, v. 18, n. 3, p. 95-103, 1933.

LONDON, D. **Pegmatites**. [Québec]: Mineralogical Association of Canada, 347 p. (The Canadian Mineralogist, Special Publication 10), 2008.

LONDON, D. (2021). **Jahns (1955): The Study of Pegmatites, with References to Bowen (1928, 1933)**. LONDON, D.; BURT, D.M. Lithium aluminosilicate occurrences in pegmatites and the lithium aluminosilicate phase diagram. **American Mineralogist**, v. 67, n. 5, p. 483-493, 1982(a).

LONDON, D. & BURT, D.M. Chemical models for lithium aluminosilicate stabilities in pegmatites and granites. **American Mineralogist**, v. 67, n. 5, p. 494-509, 1982(b).

LONDON, D. & KONTAK, D.J. Granitic pegmatites: scientific wonders and economic bonanzas. **Elements**, v. 8, n. 4, p. 257-261, 2012.

MCCAULEY, ANDREW, AND BRADLEY, D.C., 2014, The global age distribution of granitic pegmatites: **The Canadian Mineralogist**, v. 52, no. 2, p. 183 –190.

MARSHAK, S., ALKMIM, F.F., WHITTINGTON, A. & PEDROSA-SOARES, A.C. 2006. Extensional collapse in the Neoproterozoic Araçuaí orogen, eastern Brazil: A setting for reactivation of asymmetric crenulation cleavage. **Journal Structural Geology**, 28: 129-147.

MARTINS, M.S. 2006. **Geologia dos diamantes e carbonados aluvionares da bacia do Rio Macaúbas, MG**. Belo Horizonte, IGC-UFMG, Tese de Doutorado.

MARTINS-NETO, M.A. & HERCOS, C.M. 2002. Sedimentation and tectonic setting of Early Neoproterozoic glacial deposits in southeastern Brazil. **International Association of Sedimentologists**, Special Publication, 33: 383-403

MAUTHNER, M. The history of kunzite and the California connection. **Rocks & minerals**, v. 86, n. 2, p. 112-131, 2011

MOURÃO, M.A.A. & PEDROSA-SOARES, A. C. 1992. Evidências de sedimentação turbidítica no Grupo Macaúbas, Faixa Araçuaí. **Revista Escola de Minas de Ouro Preto**, 45: 94-96.

NALINI, H.A., BILAL, E., PAQUETTE, J.L., PIN, C. & MACHADO, R. 2000. Geochronologie U-Pb et géochimie isotopique Sr-Nd des granitoides neoproterozoïques des suites Galileia et Urucum, vallée du Rio Doce, Sud-Est du Brésil. **Compte Rendu Academie Science Paris**, 331: 459-466

NOCE, C.M., PEDROSA-SOARES, A.C., GROSSI-SAD, J.H., BAARS, F.J., GUIMARÃES, M.V., MOURÃO, M.A.A., OLIVEIRA, M.J.R. & ROQUE, N.C. 1997. Nova Subdivisão Estratigráfica Regional do Grupo Macaúbas na Faixa Araçuaí: O Registro de uma Bacia Neoproterozóica. **Boletim do Núcleo Minas Gerais-Sociedade Brasileira de Geologia**, 14: 29-31.

NOCE, C.M., MACHADO, N., TEIXEIRA, W., 1998. U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (southern São Francisco Craton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. **Revista Brasileira de Geociências** 28, 95–102.

NOCE, C.M., MACAMBIRA, M.B., PEDROSA-SOARES, A.C., 2000. Chronology of Late Proterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí belt, Eastern Brazil, based on single zircon evaporation dating. **Revista Brasileira de Geociências** 30, 25–29.

PAES, V.J.C., *et al.* Avaliação do Potencial do Lítio no Brasil: área do Médio Rio Jequitinhonha, Nordeste de Minas Gerais. CPRM, 2016, Belo Horizonte.

PISTILLI, M. **Lithium deposit types: brine, pegmatite and sedimentary**. Disponível em: <http://lithiuminvestingnews.com/6529/lithium-deposits-brine-pegmatite-sedimentary/>. Acessado em: março de 2022.

PEDROSA-SOARES, A.C., LEONARDOS, O. H. & CORREIA-NEVES, J.M. 1984. Aspectos metamórficos de sequências supracrustais da Faixa Araçuaí em Minas Gerais. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 33, Rio de Janeiro. SBG, *Anais*, v. 7, p. 3056-3068.

PEDROSA-SOARES, A. C., CORREIA-NEVES, J. M., & LEONARDOS, O. H. (1990). Tipologia dos pegmatitos de Coronel Murta-Virgem da Lapa, Médio Jequitinhonha, Minas Gerais. **Revista Escola de Minas**, 43(4), 44-54.

PEDROSA-SOARES, A.C. & GROSSI-SAD, J.H. 1997. Geologia da Folha Minas Novas. In: J.H. Grossi-Sad, L.M. Lobato, A.C. Pedrosa-Soares & B.S. Soares-Filho (eds), **Projeto Espinhaço em CDROM**. Belo Horizonte, CODEMIG, p. 952-1052.

PEDROSA-SOARES, A.C., MONTEIRO, R., CORREIA-NEVES, J.M., LEONARDOS, O.H. & FUZIKAWA, K. 1987. Metasomatic evolution of granites, northeast Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, 17: 512-518.

PEDROSA-SOARES, A. C., NOCE, C. M., VIDAL, P., MONTEIRO, R. & LEONARDOS, O. H. 1992. Toward a new tectonic model for the Late Proterozoic Araçuaí (SE Brazil) - West Congolian (SW Africa) Belt. **Journal of South American Earth Sciences**, 6: 33-47.

PEDROSA-SOARES, A.C. & WIEDEMANN-LEONARDOS, C.M. 2000. Evolution of the Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil. *In*: U. Cordani, E. Milani, A. Thomaz-Filho & D. A. Campos (eds), **Tectonic Evolution of South America**. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 265-285.

PEDROSA-SOARES, A. C., NOCE, C. M., WIEDEMANN, C. M., & PINTO, C. P. (2001). The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. **Precambrian research**, 110(1-4), 307-323.

PEDROSA-SOARES, A. C., CASTAÑEDA, C., QUEIROGA, G., GRADIM, C., BELÉM, J., RONCATO, J., NOVO, T., DIAS, P., GRADIM, D., MEDEIROS, S., JACOBHSON, T., BABINSKI, M. & VIEIRA, V. 2006. Magmatismo e Tectônica do Orógeno Araçuaí no Extremo Leste de Minas Gerais e Norte do Espírito Santo. **Geonomos**, 14 (2): 97-111.

PEDROSA-SOARES, A. C., NOCE, C. M., DE ALKMIM, F. F., DA SILVA, L. C., BABINSKI, M., CORDANI, U., & CASTAÑEDA, C. (2007). Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. **Geonomos**.

PEDROSA-SOARES, *et al.* Late Neoproterozoic-Cambrian Granitic Magmatism in the Araçuaí Orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and Related Mineral Resources. *In*: SIAL, A.N.; BETTENCOURT, J.S.; DE CAMPOS, C.P.; FERREIRA, V.P. (Eds.), **Granite-Related Ore Deposits**. Geological Society: London, 2011a., p. 25–51.

PEDROSA-SOARES A.C., DE CAMPOS C., NOCE C.M., SILVA L.C., NOVO T., RONCATO J., MEDEIROS S., CASTAÑEDA C., QUEIROGA G., DANTAS E., DUSSIN I., ALKMIM F.F. 2011b. Late Neoproterozoic–Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. **Geological Society, London, Spec. Publ.**, 350: 25-51.

PARTINGTON, G.A., MCNAUGHTON, N.J., AND WILLIAMS, I.S., 1995, A review of the geology, mineralization, and geochronology of the Greenbushes pegmatite, **Western Australia: Economic Geology**, v. 90, p. 616 – 635.

PINTO, C.P., DRUMOND, J.B.V., FÉBOLI, W.L. (coord.) 2001. **Projeto Leste, Etapas 1 e 2**. CPRM-COMIG, Belo Horizonte, CDROM.

SILVA, L.C., MCNAUGHTON, N.J., ARMSTRONG, R., HARTMANN, L. & FLETCHER, I. 2005. The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections. **Precambrian Research**, 136: 203-240.

SIMMONS, W.B. & WEBBER, K.L. Pegmatite genesis: state of the art. **European Journal of Mineralogy**, v. 20, n. 4, p. 421-438, 2008.

TIIHONEN, M., et al., Outotec lithium hydroxide process -a novel direct leach process for the production of battery grade lithium hydroxide monohydrate from calcined spodumene. In 24th Annual Conference Proceedings – ALTA 2019. Disponível em <[TROMPETTE, R. 1994. \*Geology of Western Gondwana \(2000-500 Ma\)\*. \*\*Pan-African-Brasiliano aggregation of South America and Africa\*\*. Rotterdam, A.A. Balkema, 350 p.](https://www.outotec.com/globalassets/newsletters/hydromet/issue-1-2019/alta2019--tiihonenlp059.pdf?_ga=2.179978785.424110111.1613695223-458423639.1607122023&_gl=1*41ky56*_ga*NDU4NDIzNjM5LjE2MDcxMjlwMjM.*_ga_FB3D51VK1B*MTYxMzc0Mzg0OS43LjEuMTYxMzc0NDA4My40Nw.>. Acesso em fev. 2022.</p></div><div data-bbox=)

VALE, E. O Impacto Das Novas Tecnologias Na Demanda Da Lítio. **RADAR** 2021 Abril (p. 17).

VIDAL, F. W. H. & NOGUEIRA NETO, J. A. Minerais de pegmatitos. In: VIDAL, F.W.H.; SALES, F.A.C.B.; ROBERTO, F.A. DA C.; SOUSA, J.F. DE; MATTOS, I.C. (Organizadores), **Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará**. Fortaleza: CETEM, p. 67-81, 2005.

U.S. Geological Survey, **Mineral Commodity Summaries**, janeiro, 2021

WISE, M. A., MÜLLER, A., & SIMMONS, W. B. (2022). A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites. **The Canadian Mineralogist**, 60(2), 229-248.

Wright, L.A. (1985) Memorial to Richard H. Jahns, 1915-1983. **Memorials, Geological Society of America**, 15, 1-10.