



Lítio em Minas Gerais: mineralogia, depósitos e estágios de geração de espodumênio na Província Pegmatítica Oriental Brasileira

LITHIUM IN MINAS GERAIS: MINERALOGY, DEPOSITS, AND SPODUMENE GENERATION STAGES IN THE EASTERN BRAZILIAN PEGMATITE PROVINCE

MARIO LUIZ DE SÁ CARNEIRO CHAVES¹, CORALIE HEINIS DIAS²

1 - PESQUISADOR, FACULDADE DE GEOLOGIA, UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, RIO DE JANEIRO, RJ, BRASIL.

2 - PROFESSORA ASSOCIADA, DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS, CIÊNCIAS HUMANAS E LINGUAGENS, UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS, JOÃO MONLEVADE, MG, BRASIL.

E-MAIL: SACARNEIRO.70@GMAIL.COM, CORALIE.DIAS@UEMG.BR.

Abstract: In recent years, an important lithium rush is occurring given the growing consumption of compact batteries. This metal is extracted from granitic pegmatites and brines, but the latter are in rapid exhaustion, drawing attention to pegmatite deposits. In Brazil, lithium richest deposits are associated with pegmatites from the Eastern Brazilian Pegmatite Province, more specifically in the Araçuaí Pegmatite District, where the main lithium mineral is spodumene. This mineral shows many varieties which are related to five different crystallization stages related to the pegmatite evolution. Stage I is primary and forms at higher temperatures (700-350°C), representing the main lithium ore in pegmatites. Further stages are secondary, growing between 350-50°C, and although not representing in most cases interest for lithium extraction, they are economically important for production of gem material and/or minerals for collectors.

Resumo: Nos últimos anos, observa-se uma verdadeira corrida mundial para a obtenção de lítio (Li), tendo em vista o consumo crescente de baterias compactas em diversos setores da indústria. Esse metal é extraído de pegmatitos graníticos e de salmouras, mas com o rápido esgotamento desses últimos depósitos as atenções têm se voltado para os pegmatitos. No país, os mais ricos depósitos de Li se associam a pegmatitos da Província Pegmatítica Oriental Brasileira, mais especificamente ao Distrito Pegmatítico de Araçuaí, onde seu principal mineral é o espodumênio, caracterizado por apresentar diversas variedades. Tal mineral é associado a cinco estágios de cristalização na evolução pegmatítica. O Estágio I, primário, se forma em temperaturas mais altas (700-350°C), e constitui o principal para fins industriais. Os outros estágios, secundários, se desenvolvem entre 350-50°C; mesmo que na maior parte não possuam maior interesse para a obtenção do Li, são economicamente importantes por produzirem material para fins gemológicos e/ou peças para colecionadores.

Citation/Citação: Chaves, M. L. S. C., & Dias, C. H. (2022). Lítio em Minas Gerais: mineralogia, depósitos e estágios de geração de espodumênio na Província Pegmatítica Oriental Brasileira. *Terraê Didática*, 18(Publ. Contínua), 1-10, e022040. doi: 10.20396/td.v18i00.8671078.

Keywords: Pegmatites, Crystallization, Mineral Exploration, Exploitation.

Palavras-chave: Pegmatitos, Cristalização, Exploração Mineral, Exploração.

Manuscript/Manuscrito:

Received/Recebido: 01/10/2022

Revised/Corrigido: 30/11/2022

Accepted/Aceito: 16/12/2022



Introdução

Existem diversos minerais que possuem lítio em sua composição química. Entre os mais importantes em termos econômicos estão espodumênio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), ambligonita/montebrazita ($\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{F},\text{OH})$), petalita ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$) e lepidolita ($\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$). No Brasil, eles ocorrem exclusivamente em pegmatitos graníticos diferenciados e têm sido explorados para aplicações industriais, embora o único que atualmente apresenta uma rota economicamente viável para extração do lítio seja o espodumênio.

O lítio é o mais leve dos metais, apresentando abundância na crosta terrestre com média de 20 ppm e em granitos média de 22 ppm (Klein & Dutrow, 2012). É o único elemento químico que

teve um brasileiro envolvido em sua descoberta: José Bonifácio de Andrada e Silva [1763-1838]. Nascido em Santos (SP) e conhecido como o “Patriarca da Independência”, foi mineralogista, estadista e poeta, atuando ainda como ministro de Dom Pedro I e depois tutor de Dom Pedro II até este atingir a maioridade.

José Bonifácio realizou estudos sobre variados assuntos científicos, um deles publicado na revista *Allgemeines Journal der Chemie*, de Leipzig (Alemanha). O artigo, oriundo de trabalhos de campo na Escandinávia, descrevia a química e mineralogia de doze minerais, sendo quatro deles inéditos. Entre os novos minerais havia dois, espodumênio e petalita, que começaram a ser pesquisados em diversos países, resultando na descoberta de um novo

elemento químico, batizado pelo químico inglês Sir Humphry Davy (1778-1829) como “lithium”, do grego pedra, enfatizando sua origem mineral (Marques & Lombardi, 2009).

A Província Pegmatítica Oriental do Brasil (Paiva, 1946, Pedrosa-Soares et al., 2011), que engloba diversos distritos pegmatíticos na região nordeste de Minas Gerais, destaca-se pela produção de minerais industriais, de minério, gemológicos e de coleção. Na atualidade o espodumênio é o mais importante mineral de minério explorado na província, com sua principal área de produção o Campo do Taquaral, no Distrito Pegmatítico de Araçuaí (Fig. 1). Dias (2015) discutiu a existência de várias feições características para o mineral, em função de seu estágio de mineralização na evolução dos pegmatitos hospedeiros. Muito embora os depósitos mais importantes em termos econômicos associem-se à mineralização considerada primária, outras gerações do mineral descritas pelo autor também se destacam por produzir peças gemológicas e de coleção, com altos valores individuais.

Os objetivos do presente trabalho consistem em descrever aspectos físicos do espodumênio, tais como suas morfologias e cores variadas, e discutí-los em função de diferentes estágios de cristalização no ambiente pegmatítico, bem como revisar os depósitos e principais métodos de beneficiamento. Os estudos abrangem principalmente os distritos pegmatíticos de Araçuaí, São José da Safira e Conselheiro Pena, da citada província pegmatítica.

Minerais de lítio na Província Pegmatítica Oriental do Brasil

Vários minerais possuem lítio em sua composição, com características físicas e químicas diversas (Tab. 1). Dentre estes, os mais importantes em termos econômicos são espodumênio, lepidolita, petalita e ambligonita/montebbrasita. No Brasil, eles

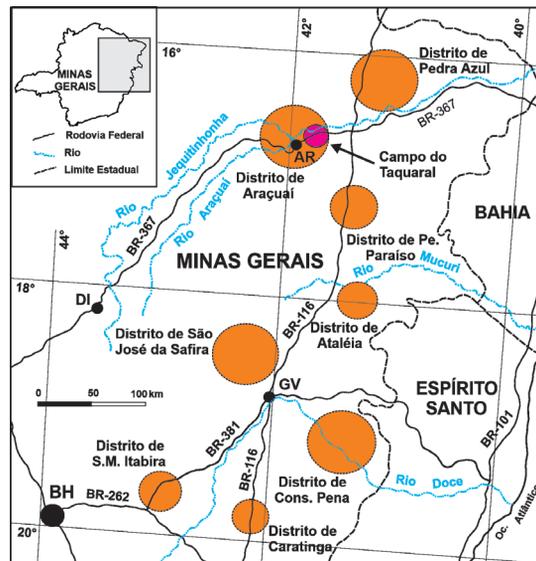


Figura 1. Distritos pegmatíticos da Província Pegmatítica Oriental em Minas Gerais, destacando o Campo do Taquaral, no Distrito de Araçuaí, onde se concentram os principais depósitos litíferos. Cidades: BH – Belo Horizonte, GV – Governador Valadares, DI – Diamantina, AR – Araçuaí

ocorrem exclusivamente em pegmatitos graníticos diferenciados, com destaque para a Província Pegmatítica Oriental, cuja maior extensão e principais distritos localizam-se no estado de Minas Gerais (Fig. 1).

O espodumênio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$; Tab. 1, Fig. 2A) pertence ao grupo dos piroxênios, cristaliza-se no sistema monoclinico e apresenta clivagem perfeita em duas direções paralelas às faces do prisma, quase perpendiculares entre si (Klein & Dutrow, 2012). O mineral é incolor em seu estado puro, apesar de existirem variedades coloridas, gemológicas, das quais as mais conhecidas são kunzita (rósea) e hiddenita (verde-esmeralda), de ocorrência mais limitada. Sua porcentagem típica de Li_2O varia entre 1,5% e 7,0% (Mindat, s.d.). O mineral constitui o principal mineral de minério para a extração de lítio, tendo como mais importantes jazidas no

Tabela 1. Principais minerais contendo lítio em sua estrutura. Fonte: Mindat (s.d.)

Minerais	Fórmula	Densidade	Dureza	%Li ₂ O	
				Teórica	Típica
Ambligonita	$\text{LiAl}(\text{PO}_4)\text{F}$	3,0 - 3,1	5,5 - 6,0	11,9	5,0
Eucryptita	LiAlSiO_4	2,66	6,5	11,9	5,0
Lepidolita	$\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$	2,8 - 2,9	2,5 - 3,5	3,3 - 7,8	3,0 - 4,0
Montebbrasita	$\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH})$	3,0	5,5 - 6,0	7,0	
Petalita	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	2,4	6,5	4,9	3,0 - 4,5
Espodumênio	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	3,1 - 3,2	6,5 - 7,0	8,0	1,5 - 7,0
Zinnwaldita	$\text{KLiFe}^{2+}\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$	2,9 - 3,0	2,5 - 4,0	5,6	2,0 - 5,0
Trifilita	$\text{LiFe}^{2+}\text{PO}_4$	3,4 - 3,6	4,0	9,47	8,91

Brasil a Mina da Cachoeira, explorada pela Companhia Brasileira de Lítio (CBL) em Araçuaí, e os pegmatitos Xuxa e Barreiro (Itinga), que estão em implantação de lavra pela Sigma Lithium Mineração.

A lepidolita ($K(Li,Al_3)(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$; Tab. 1, Fig. 2B) pertence ao grupo das micas, possui clivagem perfeita e hábito foliáceo. Cristaliza-se no sistema monoclinico, apresentando cristais usualmente em placas pequenas ou prismas com contorno hexagonal. Também se apresenta com hábito botrioidal (“lepidolita-de-coco” para os garimpeiros da região). Sua cor característica vai do lilás ao róseo, sendo encontrada em pegmatitos comumente associada com outros minerais de lítio, como turmalina elbaíta rósea ou verde, ambligonita e espodumênio (Klein & Dutrow, 2012).

Para distingui-la da moscovita rósea, é necessário fazer o ensaio da chama: a lepidolita produz uma chama carmesim, devido à presença do lítio. Sua porcentagem típica de Li_2O varia entre 3,0% e 4,0% (Mindat, s.d.). Conforme informações obtidas em Araçuaí, chineses desenvolvem tecnologia para extração do lítio deste mineral, e vêm comprando todo o material obtido nas pilhas de rejeito de lavras antigas, que visavam principalmente minerais gemológicos.

A petalita ($LiAlSi_4O_{10}$; Tab. 1, Fig. 2C) é quebradiça, de clivagem perfeita e brilho vítreo. Pode ser incolor, branca ou cinzenta, transparente ou translúcida (Klein & Dutrow, 2012). Caracteriza-se por seu hábito em placas, distinguindo-se do espodumênio por sua clivagem e sua densidade relativa mais baixa. Sua porcentagem típica de Li_2O varia entre 3,0% e 4,5% (Mindat, s.d.). A petalita também é encontrada em pegmatitos, nos quais está associada a quartzo, feldspatos e outros minerais de lítio. Até a metade do século XX foi considerada um mineral muito raro, mas descobertas no Zimbábue tornaram-na também um mineral de minério importante. A petalita é ainda muito procurada como mineral de coleção, principalmente com fins ao “mercado esotérico” em franca expansão.

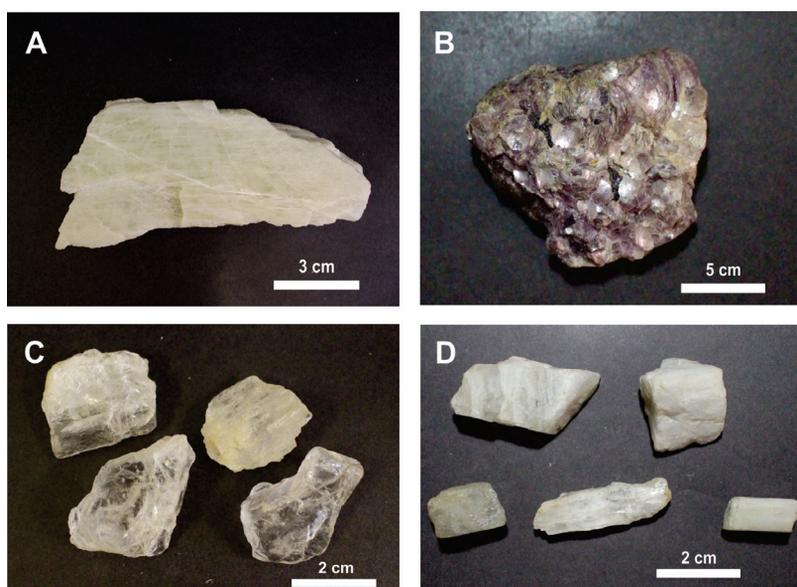


Figura 2. Amostras dos principais minerais de lítio coletadas na Província Pegmatítica Oriental. A) Amostra de espodumênio da Mina da Cachoeira (CBL), Araçuaí-Itinga. B) Amostra de lepidolita botrioidal da Lavra Zé de Linto, Itinga. C) Amostras de petalita da Lavra do Barreiro, Itinga. D) Amostras de ambligonita/montebrasita da Lavra do Urubu, Itinga (Fotos dos Autores); as três últimas lavras pertencem à Sigma Lithium

A ambligonita ($LiAl(PO_4)F$; Tab. 1, Fig. 2D) é um mineral comumente maciço de cristais raros quase equidimensionais, em geral mal formados quando grandes, cristalizando-se no sistema triclinico e apresentando clivagem perfeita. Os fragmentos da clivagem podem ser confundidos com o feldspato, mas são fundíveis com muito maior facilidade e produzem chama vermelha. Sua porcentagem típica de Li_2O é de 5,0% (Mindat, s.d.). É um mineral relativamente raro, encontrado em pegmatitos graníticos com espodumênio, turmalinas, lepidolita e apatita. Seu nome provém de duas palavras gregas, significando “obtusos” e “ângulo”, em alusão ao ângulo entre seus planos de clivagem (Klein & Dutrow, 2012). Diversos autores, no entanto, afirmam que a maior parte do material comercializado como “ambligonita” na província se trata na realidade de montebrasita (e.g. Chaves et al., 2005, Dias et al., 2011, Scholz et al., 2012).

Recentemente, três novos minerais raros de lítio, todos secundários, foram descritos pela primeira vez no Brasil, nos distritos de Araçuaí e Conselheiro Pena. São eles, a litotantita [$Li(Na,Nb)_3O_8$] (Menezes Filho et al., 2012), a litiofilita [$LiMn^{2+}PO_4$] (Scholz et al., 2012) e o litiofosfato [Li_3PO_4] (Menezes Filho et al., 2016). Tais descobertas ressaltam o ainda importante campo de pesquisas a ser desenvolvido visando os minerais de lítio.

Depósitos em Minas Gerais

No Brasil, minerais de lítio ocorrem principalmente em Minas Gerais, associados a pegmatitos graníticos na “Província Pegmatítica Oriental do Brasil (Fig. 3 – 1, 2 e 3), além do Distrito de São João del Rei (Fig. 3 – 4), que ocorre isolado no sul do Estado. Mais de 90% desta província mineral está localizada na parte nordeste do estado de Minas Gerais, especificamente na unidade geotectônica conhecida como Orógeno Araçuai (Pedrosa-Soares et al., 2011). De acordo com tais autores, rochas graníticas com idades variando do final do Neoproterozoico até o Cambro-Ordoviciano, incluindo pegmatitos associados, cobrem em torno de 1/3 desta região. Os depósitos de minerais de lítio mais importantes nessa província associam-se ao Distrito de Araçuai.

Entre os projetos que levantaram as ocorrências de tais minerais na Província Pegmatítica Oriental, destacam-se os seguintes: (1) “Recursos Minerais do Estado de Minas Gerais”, realizado pela extinta companhia estatal mineira Metais de Minas Gerais S/A – Metamig (Alecrim, 1982); (2) o “Projeto Leste”, executado pela então Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (Netto et al., 1998), além do projeto (3) “Avaliação do Potencial do Lítio no Brasil: Área do Médio Rio Jequitinhonha, Nordeste de Minas Gerais”, também conduzido pela CPRM-SGB (Paes et al., 2016). O projeto (1) foi recentemente atualizado e reeditado em

meio digital, onde cada bem mineral específico compõe um capítulo independente (Chaves et al., 2018).

Os registros de reservas de lítio em Minas Gerais ocorrem principalmente na região limítrofe Araçuai-Itinga (vale do Ribeirão Piauí), no Campo do Taquaral (Fig. 4), onde a Companhia Brasileira de Lítio (CBL) explora espodumênio na Mina da Cachoeira desde 1991 e a Sigma Lithium Mineração possui projeto para os pegmatitos Xuxa e Barreiro, em fase

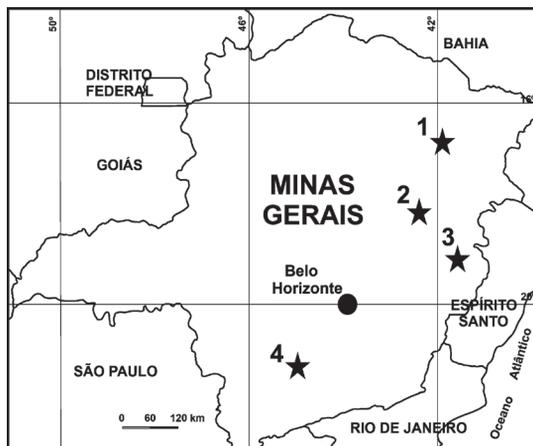


Figura 3. Mapa de Minas Gerais com os distritos pegmatíticos e a distribuição das áreas conhecidas com jazidas ou ocorrências de minerais de lítio no Estado, apresentando os distritos de (1) Araçuai, (2) São José da Safira, (3) Conselheiro Pena, (4) São João del Rei. Estrelas com números 1, 2 e 3 encontram-se na área abrangida pela Província Pegmatítica Oriental

final de implantação, além de outros. Essa empresa adquiriu as áreas minerárias antes pertencentes à Arqueana Minérios e Metais, de Araçuai. Nesta área ocorrem 100% das reservas oficiais de lítio do Brasil, sendo espodumênio e petalita os minerais de minério mais visados atualmente.

Os pegmatitos que compõem os distritos de Araçuai, São José da Safira e Conselheiro Pena são do tipo “LCT” (lítio-césio-tântalo), conforme a classificação de Cerný & Ercit (2005) e Cerný et

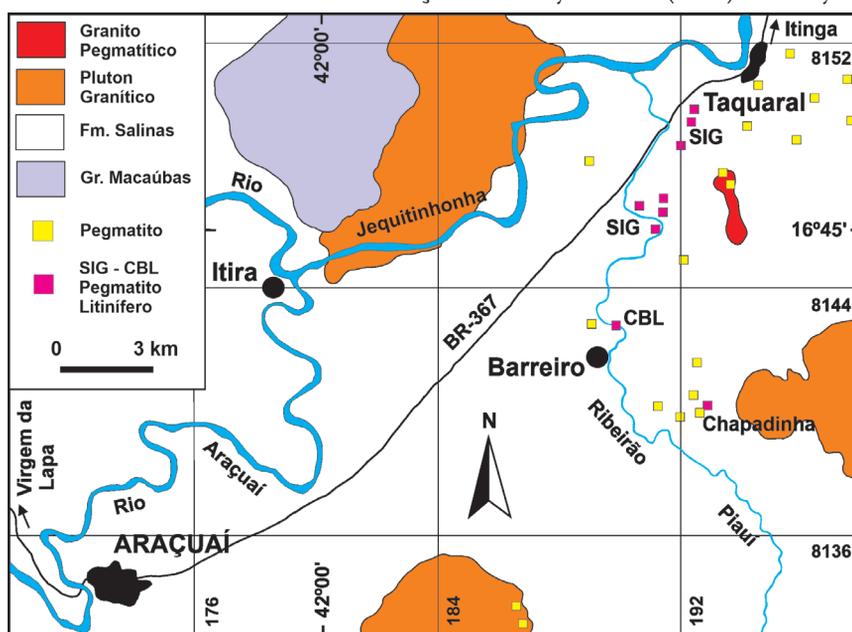


Figura 4. Mapa geológico do Campo Pegmatítico do Taquaral, no Distrito de Araçuai, onde se concentram as principais reservas de lítio no país (Geologia conforme Pedrosa-Soares, 1996 – Folha Araçuai, e Paes et al., 2008 – Folha Itaobim)

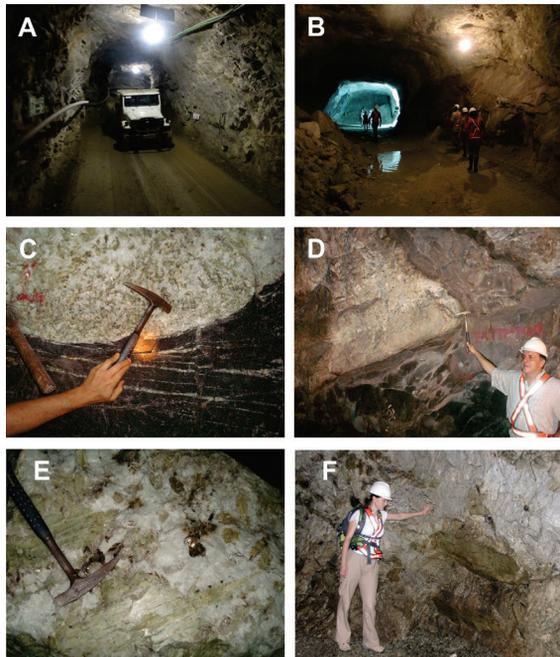


Figura 5. A-B Atividades de mineração subterrânea na Mina da Cachoeira (CBL). C-D Contatos bruscos concordantes com os micaxistos hospedeiros. E-F Cristais de espodumênio comuns na mina (5-15 cm), além de “gigantes” (> 1 m; Fotos dos Autores)

al. (2012). Constituem, em geral, corpos moderada a intensamente afastados da fonte granítica, o que se relaciona ao alto grau de diferenciação de tais depósitos. Mineração subterrânea ocorre na Mina da Cachoeira (Fig. 5A-B), focada em corpos concordantes ou discordantes (Fig. 5C-D), em contatos bruscos com os biotita xistos hospedeiros (Formação Salinas). Os cristais de espodumênio, em sua maioria, possuem entre 5-15 cm (Fig. 5E), podendo, porém, ocorrer cristais “gigantes”, de porte métrico (Fig. 5F).

O grupo de pegmatitos minerados pela CBL tinha, segundo estudo realizado no final da década de 1990, reservas medidas de espodumênio da ordem de 127.874 m³ ou 409.197 t, segundo Afgouni & Marques (1997). Tais autores salientaram que as atividades desenvolvidas no local integram um dos poucos exemplos mundiais de mineração subterrânea altamente organizada desenvolvida em pegmatitos. Existe previsão de lavra do depósito para pelo menos mais 20 anos (M. Takaoka, diretor da CBL, inf. verbal 2018).

Ao contrário da maioria dos pegmatitos conhecidos no Distrito de Araçuaí, que apresentam zonamento mineralógico interno, os corpos da Mina da Cachoeira são homogêneos. Cinco corpos mais potentes estão sendo minerados (Fig. 6A). A mine-

ralogia principal dos pegmatitos da mina é constituída por albita e feldspato potássico (40-45%), quartzo (25%), espodumênio (20%) e moscovita (<10%), todos esses de origem primária. Apesar da persistência das características mineralógicas, foi observada uma variação na granulação do espodumênio em diversos corpos em função da profundidade ou do mergulho, aponta Romeiro (1998).

Segundo o último autor, a concentração de espodumênio com granulação mais grossa ocorre devido ao acúmulo de fluidos aquosos no topo do corpo, ou em porções onde o pegmatito apresenta mergulho mais baixo. A retenção de fluidos aquosos ascendentes, fenômeno que foi denominado de “piscinamento” de fluido, é responsável pela diminuição da viscosidade e, conseqüentemente, diminuição da densidade da nucleação na fusão silicatada, o que resulta no aumento da granulação dos minerais que é observada na rocha (Fig. 6B).

Os pegmatitos contendo minerais de lítio nas outras duas regiões de Minas Gerais abrangidas pela Província Pegmatítica Oriental (Fig. 3) podem ser considerados pouco expressivos em termos econômicos, embora pesquisas adicionais sejam

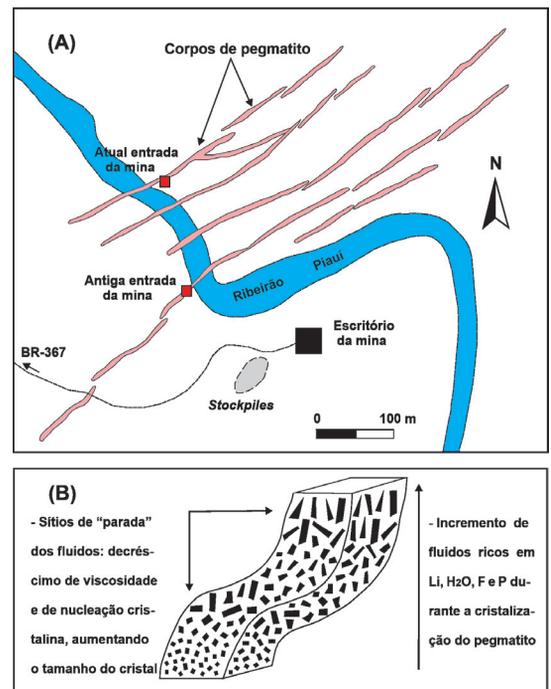


Figura 6. A) Mapa esquemático mostrando o alinhamento dos cinco principais corpos de pegmatito da Mina da Cachoeira (Araçuaí-Itinga; conforme Romeiro, 1998). B) Esquema mostrando a tendência de crescimento dos cristais de espodumênio para o topo do corpo e o fenômeno de “piscinamento” de fluido aquoso na porção de mergulho mais baixo (desenho fora de escala; conforme Romeiro, 1998)

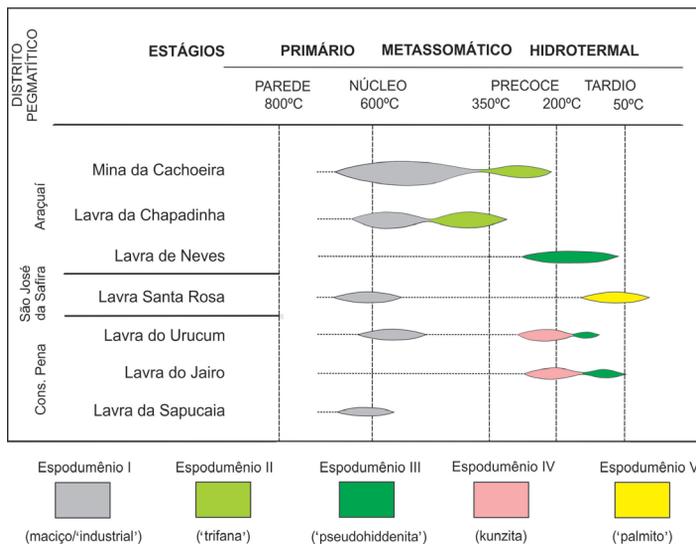


Figura 7. Representação esquemática dos estágios de cristalização do espodumênio em pegmatitos da Província Pegmatítica Oriental (extraído de Dias, 2015)

ainda necessárias. Dentre os depósitos mais ricos em espodumênio, destacam-se os pegmatitos Urucum (Galiléia), Cigana (Conselheiro Pena) e Jairo Linguíça (Resplendor).

Em Minas Gerais o lítio também é explotado no Distrito Pegmatítico de São João del Rei, envolvendo uma área isolada com cerca de 1.400 km² na porção centro-sul do estado (Fig. 3). Tais pegmatitos são desde longa data minerados para cassiterita e nióbio-tantalatos. No entanto, pesquisa na base de dados de recursos minerais do SGB-CPRM (CPRM, s.d.) levou à identificação de quatro locais de lavra de espodumênio nos municípios de Nazareno e São Tiago. No principal depósito, o Minas-Brasil em São Tiago, o espodumênio constitui entre 10-15% do volume mineral presente (Paes et al., 2016). Quéméneur et al. (2003) o consideraram como a maior reserva do mineral no país à época, embora não fosse lavrado devido ao tamanho muito irregular dos cristais, o que demandaria a implantação de uma unidade de flotação especial. Entretanto, a produção de concentrado de espodumênio a partir de rejeitos das rotas de processamento de Nb e Ta teve início em 2018.

Na outra província pegmatítica de expressão do país, a “Província Pegmatítica da Borborema”, que envolve os estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e Ceará, algumas ocorrências de minerais de lítio são verificadas, cujos potenciais econômicos foram discutidos em Beurlen et al. (2014).

Estágios de mineralização do espodumênio

Em sua dissertação de mestrado, Dias (2015) identificou e distinguiu cinco tipos diferentes de espodumênio em depósitos pegmatíticos do nordeste de Minas Gerais, propondo os estágios de mineralização primário, metassomático e hidrotermal (Fig. 7), com temperaturas decrescentes desde cerca de 700°C até 50°C. Tal proposta evolutiva tomou como base o modelo concebido por Moore (1973) para a cristalização dos pegmatitos graníticos, conforme a diminuição da temperatura. As amostras estudadas foram obtidas em três distritos pegmatíticos da Província Pegmatítica Oriental: Araçuaí, São José da Safira e Conselheiro

Pena (Fig. 1).

A distinção entre os tipos de espodumênio I a V se deu principalmente com base em aspectos físicos e morfológicos observados em campo. Conforme o esquema exposto em Dias (2015), a linha tracejada em 800°C na Figura 7 corresponde ao início da cristalização dos pegmatitos, com a formação de espodumênio primário iniciando por volta de 700-650°C (London & Burt, 1982). O estágio metassomático ocorre entre 600-350°C, e o estágio hidrotermal entre 350°C até menos que 50°C. Para os últimos autores, em 200°C indica-se a temperatura aproximada na qual as moléculas de água são estáveis como unidades ligadas aos cátions de metais de transição.

O espodumênio I (“industrial”) é maciço, de coloração cinza a cinza levemente esverdeada, translúcido a preferencialmente opaco, sendo relacionado à cristalização do núcleo do pegmatito em temperaturas a partir de 700°C (Dias, 2015). O espodumênio II, por vezes comercializado erroneamente como “hiddenita”, possui coloração verde clara, verde amarelada e amarela, apresentando-se translúcido a transparente, e representa um estágio hidrotermal precoce, em temperaturas por volta dos 350-200°C. Tal variedade foi designada informalmente como “trifana”, que alguns autores atribuem para a variedade amarela ou verde amarelada do espodumênio (Branco, 1992).

O espodumênio III é transparente, verde claro a intenso, sendo designado informalmente como “pseudohiddenita”, por não possuir o elemen-

to cromo (conforme análise de Dias, 2015), que caracteriza a hiddenita verdadeira (Webster, 1975, Mauthner, 2011). O espodumênio IV é representado pela variedade gemológica rosa conhecida como kunzita. O último estágio de cristalização reconhecido foi o espodumênio V, que possui cor branca e hábito fibroso, sendo por isso designado de “palmito” pelos mineradores (Dias, 2015). Segundo Rossovskiy (1981), a maior parte da cristalização de espodumênio secundário ocorre entre 280-120°C.

No Campo do Taquaral, foram identificados os tipos de espodumênio I, II e III. O primeiro estágio de cristalização do espodumênio foi observado em todos os distritos pegmatíticos estudados, com maior abundância na Mina da Cachoeira (Araçuaí/Itinga) e provavelmente também ocorre nos pegmatitos da Sigma Mineração (não estudados), onde representa o mineral de minério explotado ou a ser explotado. No primeiro local, foram reconhecidos nitidamente dois tipos de espodumênio, o I e o II.

A lavra da Chapadinha (Itinga) situa-se no mesmo campo pegmatítico da Mina da Cachoeira, apresentando menor quantidade de espodumênio do tipo I (Dias, 2015). Segundo Sá (1977) e Cassedanne (1991), este depósito foi minerado rudimentarmente entre as décadas de 1970 a 1990, e após esgotamento aparente da parte mais possante têm sido garimpados apenas pequenos corpos de substituição ricos em petalita e/ou espodumênio do tipo II, muito semelhante ao encontrado na Mina da Cachoeira (Dias, 2015). A menor abundância de espodumênio no local deve-se provavelmente à presença massiva de petalita, que constitui o aluminossilicato de lítio mais estável em temperaturas mais elevadas (Sá, 1977).

Na lavra de Neves (Araçuaí), Dias (2015) verificou apenas a presença do espodumênio III (pseudohiddenita), e ressaltou tal lavra como a principal produtora dessa variedade de espodumênio no país. O espodumênio do tipo V foi observado apenas na lavra Santa Rosa, provavelmente como produto de alteração de algum mineral primário, como o próprio espodumênio I, ou constitui uma pseudomorfose de outro mineral. Esta lavra, situada em Itambacuri, pertence ao Distrito de São José da Safira, sendo mundialmente famosa por suas elbaítas azuis (Cornejo & Bartorelli, 2010).

O espodumênio do tipo IV foi observado apenas no Distrito de Conselheiro Pena, que possui jazidas famosas por terem produzido grandes quantidades de kunzita de qualidade gemológica. A lavra do Urucum, em Galiléia, adquiriu renome

mundial por ter produzido quase três toneladas de espodumênio kunzita, das quais cerca de 500 kg de qualidade excepcional (Cassedanne, 1986, 1991). Neste pegmatito, o espodumênio se formou em dois estágios; o primeiro é representado por cristais alongados de até vários metros de comprimento, fortemente corroídos, de cor branca a creme (espodumênio I), e o estágio seguinte consiste principalmente na formação de kunzita (espodumênio IV).

Na lavra do Jairo Linguíça, em Resplendor, no mesmo distrito pegmatítico, Dias (2015) identificou espodumênios dos tipos III e IV. Ainda no Distrito de Conselheiro Pena, a lavra da Sapucaia também é mundialmente notada pela ocorrência de numerosas espécies minerais fosfáticas secundárias, diversas delas descritas a partir de espécimes provenientes desta localidade. O tipo de espodumênio identificado por Dias (2015) neste pegmatito parece se restringir a uma geração primária (espodumênio I), com amostras brancas ou ligeiramente rosadas encontradas na zona intermediária do corpo.

Produção, beneficiamento e aplicações dos minerais de lítio

O lítio é utilizado em diversas aplicações, tanto na forma de concentrado mineral, obtido principalmente a partir de espodumênio e petalita, quanto sob a forma de compostos químicos como carbonato, hidróxido e seus derivados, sendo que o hidróxido e o carbonato de lítio representam as principais formas de seu uso industrial (Braga & Sampaio, 2008). Segundo estes autores, tais compostos podem ser obtidos um do outro a partir da carbonatação e decarbonatação, respectivamente. Os principais usos do lítio atualmente são as indústrias de vidro e cerâmicas, produção de baterias e acumuladores, produção de graxas especiais, sistemas de ar condicionado, fabricação de alumínio primário e produção de fármacos (Braga & Sampaio, 2008). A crescente demanda de lítio grau

Tabela 2. Maiores produtores mundiais de lítio (em toneladas) (Wikipedia, 2022)

	País	2018	2019	2020	2021
1	Austrália	58.800	42.000	40.000	55.000
2	Chile	17.000	18.000	18.000	26.000
3	China	7.100	7.500	14.000	14.000
4	Argentina	6.400	6.400	6.200	6.200
5	Brasil	300	300	1.900	1.500
6	Zimbabwe	1.600	1.600	1.200	1.200

bateria tem ainda aumentado a procura por novas reservas deste metal, tendo em vista a indústria dos telefones celulares e veículos elétricos.

Em termos mundiais, quatro minas de espodumênio em pegmatitos na Austrália, respondem pela maior produção desse metal (Tab. 2). Em seguida, destacam-se as operações mineiras sobre salmouras no Chile e Argentina, duas em cada país, e duas outras minerações em material similar na China. A Austrália é o maior produtor mundial de lítio desde 2014, a partir do pegmatito super possante da Mina de Greenbushes (responsável por 1/4 da produção mundial), além dos pegmatitos Mt. Cattlin, Wodgina e Mt. Marion (Sweetapple, 2017, Sweetapple et al., 2019). Segundo tais autores, outros três projetos minerários estão em estágio avançado para entrarem em operação nos próximos anos, todos visando o espodumênio.

No Brasil, como na Austrália, a produção de lítio ocorre exclusivamente a partir da lavra do espodumênio. Até os anos de 2018 e 2019, a produção em escala industrial se dava exclusivamente na Mina da Cachoeira (CBL), quando a empresa AMG Mineração começou a produzir concentrado de lítio na mina de Volta Grande, em Nazareno. O designado “Projeto Lítio” teve início em 2014 objetivando recuperar o espodumênio a partir dos rejeitos da produção de óxidos de Nb e Ta na mina citada, incrementando a produção nacional (Tab. 2). Em breve, tal produção deverá ser ainda acrescida com a entrada em produção de lítio da empresa Sigma Lithium.

Na CBL, a lavra subterrânea se dá pelo método de *sublevel stoping*, de onde o minério é transportado até a britagem por pás carregadeiras. Na usina de beneficiamento, a britagem primária se dá em britadores de mandíbulas enquanto a britagem secundária ocorre em britadores cônicos. Segundo Braga & Sampaio (2008), após tal etapa de cominuição, o material com teor de cerca de 1,5% de Li_2O passa por classificação granulométrica sendo a seguir processado em uma unidade de separação por meio denso, de onde é obtido um concentrado de espodumênio com cerca de 5% de Li_2O (Fig. 8A).

O material é transportado para a planta química localizada em Divisa Alegre (MG) onde é calcinado, moído e sulfatado para obtenção do carbonato de lítio, após separação e purificação da solução de sulfato de lítio. Para obtenção do hidróxido de lítio, é adicionado hidróxido de cálcio ao carbonato de lítio. A CBL tem ainda estocado minério fino para uma futura planta de flotação. Os coletores usados

na flotação de espodumênio foram estudados em detalhe no âmbito da tese de doutorado de Viana (2006). Na operação da Sigma, o minério também será beneficiado através de meio denso, porém o processo tem previsão de custo operacional mais baixo, pois as lavras serão a céu aberto. Na planta de

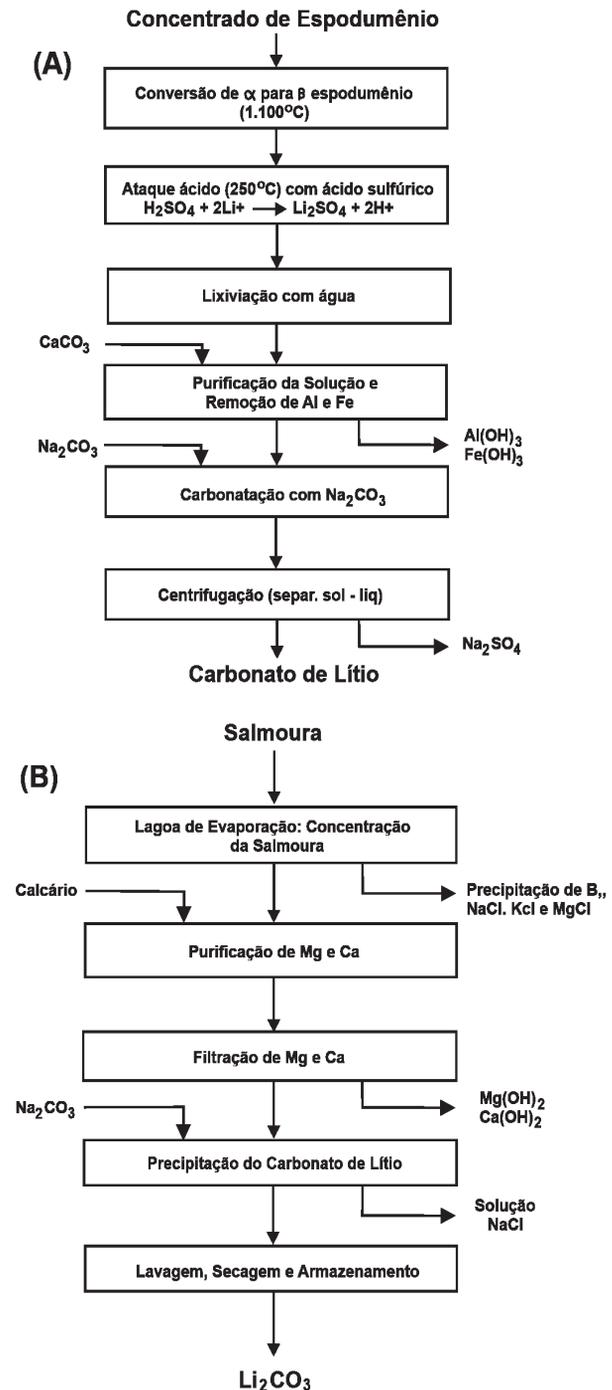


Figura 8. Etapas para obtenção do carbonato de lítio a partir do espodumênio de pegmatitos (A) e de salmouras sedimentares (B) (Braga & Sampaio, 2008)

concentração da AMG Mineração, após britagem, moagem e separação dos minerais de Nb-Ta, o rejeito é flotado para obtenção do concentrado de lítio.

Na extração de lítio a partir de salmouras, as etapas de beneficiamento são mais simples e baratas, pois se aproveitam do processo natural de evaporação das soluções salinas (Fig. 8B). Os sais de lítio ocorrem em rochas evaporíticas, cujos minerais principais são halita e silvita ricas em lítio. No Salar de Atacama, no Chile, bem como depósitos similares da Argentina e Bolívia, as salmouras são bombeadas para a superfície onde passam por múltiplas lagoas de evaporação em que se precipitam e são retirados diversos sais, com início do cloreto de sódio (Braga & Sampaio, 2008).

Considerações Finais

Com a crescente demanda por lítio para aplicações tecnológicas cada vez mais avançadas, e a perspectiva de exaustão das importantes reservas mundiais do metal a partir de suas fontes em salmouras, verifica-se uma procura intensa por minerais de minério hospedados em depósitos pegmatíticos, dentre os quais se destaca o espodumênio. Praticamente todas as áreas detentoras de pegmatitos potencialmente (ou não) importantes na Província Pegmatítica Oriental Brasileira encontram-se com processos de pesquisa minerária ativos junto à Agência Nacional de Mineração (ex Departamento Nacional de Produção Mineral).

No vale do Ribeirão Piauí, que separa os municípios de Araçuaí e Itinga (Campo do Taquaral), se concentram os depósitos mais ricos, que são objeto de exploração e pesquisas complementares nas minas da Cachoeira (CBL), Xuxa e Barreiro (Sigma). Na área, abrangida pelo Distrito Pegmatítico de Araçuaí, verifica-se a quase totalidade das reservas medidas no país, com tendência crescente face ao *boom* de prospecção que se verifica para o espodumênio, bem como para os outros de minerais de minério de lítio pegmatíticos.

Com base no conhecimento das diversas variedades de espodumênio, muito embora somente seu estágio primário de geração seja responsável por depósitos economicamente viáveis em termos industriais, deve-se salientar que as outras variedades também possuem importância econômica como fornecedoras de minerais gemológicos e/ou de coleção. Ainda digna de nota é a compra por chineses em Araçuaí de toneladas de lepidolita,

acreditando-se que estejam tentando viabilizar uma nova rota viável para extração do lítio a partir de outros minerais.

Referências

- Afgouni, K., & Marques, F. F. (1997). Depósito de lítio, berílio e cério de Araçuaí/Itinga, Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C., Queiroz, E. T., & Coelho, C. E. S. (Coords.). 1997. *Principais Depósitos Mineraiis do Brasil*. Brasília: DNPM/CPRM. v. 4B, p. 373-388.
- Alecrim, J. D. (1982). *Recursos Mineraiis do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Metamig. 298p.
- Beurlen, H., Thomas, R., Silva, M. R. R., Müller, A., Rhede, D., & Soares, D. R. (2014). Perspectives for Li- and Ta- mineralization in the Borborema Pegmatite Province, NE-Brazil: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, 56, 110-127. doi: 10.1016/j.jsames.2014.08.007.
- Braga, P. F. A., & Sampaio, J. A. (2008). Lítio. In: Luz, A. B., & Lins, F. A. F. (Eds.). (2008). *Rochas e Mineraiis Industriais: usos e especificações*. 2 ed. Rio de Janeiro: Cetem/MCT. p. 585-603.
- Branco, P. M. (1992). *Glossário Gemológico*. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto Ed. 215p.
- Cassedanne, J. P. (1991). Tipologia das jazidas brasileiras de gemas. In: Schobbenhaus, C., & Coelho, C. S. (Eds.). 1991. *Principais depósitos mineraiis do Brasil*. Brasília: DNPM, v. 4A, p. 17-52.
- Cerný, P., & Ercit, T. S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43(6), 2005–2026. doi: 10.2113/gscanmin.43.6.2005.
- Cerný, P., London, D., & Novác, M. (2012). Granitic pegmatites as reflections of their sources. *Elements*, 8, 289-294.
- Chaves, M. L. S. C., Scholz, R., Atencio, D., & Karfunkel, J. (2005). Assembleias e paragêneses mineraiis singulares nos pegmatitos da região de Galiléia (Minas Gerais). *Geociências*, 24(2), 143-161.
- Chaves, M. L. S. C., Dias, C. H., & Cardoso, D. K. (2018). Lítio. In: Pedrosa-Soares, A. C., Voll, E., & Cunha, E. C. (Orgs.). (2018). *Recursos Mineraiis de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (Codemge). p. 1-21. URL: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/>. Acesso 15.09.2022.
- Cornejo, C., & Bartorelli, A. (2010). *Mineraiis e Pedras Preciosas do Brasil*. São Paulo: Solaris. 701p.
- Dias, C. H. (2015). *Mineralogia, tipologia e causas de cor de espodumênios da Província Pegmatítica Oriental do Brasil e química mineral de Nb-tantalatos da mina da Cachoeira (Minas Gerais)*. Belo Horizonte: Departamento de Geologia, Inst. Geoc., UFMG. (Dissert. Mestrado). URL: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-9ZWPNA>. Acesso 07.09.2022.
- Dias, L. N., Pinheiro, M. V. B., Moreira, R. L., Krambrock, K., Menezes Filho, L. A., Karfunkel, J., Schnellrath, J., & Scholz, R. (2011). Spectroscopic characterization of transition metal impurities in natural montebrasite/amblygonite. *American Mineralogist*, 96(1), 42-52. doi: 10.2138/am.2011.3551.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Mineraiis / Serviço Geológico do Brasil. CPRM/GeoSGB. (s.d.). *Da-*

- dos, informações e produtos do Serviço Geológico do Brasil. Brasília: CPRM/GeoSGB. URL: <https://geosgb.cprm.gov.br/>. Acesso: 10.09.2022.
- Klein, C., & Dutrow, B. (2012). *Manual de ciência dos minerais*. 23 ed. Trad. Rualdo Menegat. Porto Alegre: Bookman. 724p.
- London, D., & Burt, D.M. (1982). Chemical models for lithium aluminosilicate stabilities in pegmatites and granites. *American Mineralogist*, 67(5-6), 494-509. URL: <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/67/5-6/494/41386/Chemical-models-for-lithium-aluminosilicate?redirectedFrom=fulltext>. Acesso 07.09.2022.
- Marques, A. D., & Lombardi, C. A. (2009). Uma família de químicos unindo Brasil e Portugal: Domingos Vandelli, José Bonifácio de Andrada e Silva e Alexandre Vandelli. *Química Nova na Escola*, 31(4), 251-256. URL: http://qnesc.s bq.org.br/online/qnesc31_4/06-HQ-4009.pdf. Acesso 05.09.2022.
- Mauthner, M. (2001). The history of kunzite and the California connection. *Rocks & Minerals*, 86(2), 112-131.
- Menezes Filho, L. A., Yang, H., Downs, R. T., Chaves, M. L. S. C., & Persiano, A. C. (2012). Lithiotantite, ideally LiTa₂O₈. *Acta Crystallographica*, E68, i27-i28.
- Menezes Filho, L. A., Chaves, M. L. S. C., Dias, C. H., & Atencio, D. (2016). Recent mineral discoveries in the Coronel Murta, Taquaral, and Medina pegmatite fields, northeastern Minas Gerais, Brazil. *Revista Escola de Minas*, 69(3), 301-307.
- Mindat. (s.d.). *Mines, Minerals and More*. Mindat. URL: <https://www.mindat.org/>. Acesso 01.09.2022.
- Moore, P. B. (1973). Pegmatite phosphates: descriptive mineralogy and crystal chemistry. *Mineralogical Record*, 4(3), 103-130.
- Paes, V. J. C., Heineck, C. A., & Drumond, J. B. V. (2008). *Folha SE.24-V-A-IV Itaobim*. Belo Horizonte: CPRM, Programa Geologia do Brasil, 1:100,000.
- Paes, V. J. C., Santos, L. D., Tedeschi, M. F., & Betiollo, L.M. (2016). Avaliação do potencial do lítio no Brasil: área do Médio Rio Jequitinhonha, Nordeste de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM. 274p. URL: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17451>. Acesso 05.09.2022.
- Paiva, G. (1946). Províncias Pegmatíticas do Brasil. *Boletim DNPM/DFPM*, 78, 13-21.
- Pedrosa-Soares, A. C. (1996). *Mapa Geológico da Folha Araçuaí, Minas Gerais, Brasil*. Belo Horizonte, Projeto Espinhaço, 1:100.000, Comig-UFMG.
- Pedrosa-Soares, A. C., Campos, C. P., Noce, C. M., Silva, L. C., Novo, T., Roncato, J., & Alkmim, F. F. (2011). 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., Campos, C. P., & Ferreira, V. P. (Eds.). (2011). *Granite-Related Ore Deposits*. London: Geological Society Special Publications. v. 350. p. 25-51. doi: 10.1144/SP350.3.
- Quéméneur, J. J. G., Ribeiro, A., Trouw, R. A. J., Pacillo, F. V., P., & Heilbron, M. (2003). Geologia da Folha Lavras. In: Pedrosa Soares, A. C., Noce, C. M., Trouw, R. A. J., & Heilbron, M. (Orgs.). (2003). *Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro. Projeto Sul de Minas – Etapa I. Relatório Final*. Belo Horizonte: COMIG/UFMG/UFRJ/UERJ. v. 1. p. 259-319.
- Romeiro, J. C. P. (1998). *Controle da mineralização de lítio em pegmatitos da Mina da Cachoeira, Companhia Brasileira de Lítio, Araçuaí, MG*. Belo Horizonte: Inst. Geoc., UFMG. (Dissert. Mestrado).
- Rossovskiy, L. N. (1981). Rare-metal pegmatites with precious stones and conditions of their formation (Hindu Kush). *International Geology Review*, 23(11), 1312-1320.
- Sá, J. H. S. (1977). *Pegmatitos litiníferos da região de Itinga-Araçuaí, Minas Gerais*. São Paulo: Inst. Geoc., USP. (Tese Dout.).
- Scholz, R., Chaves, M. L. S. C., Belotti, F. M., Candido Filho, M., Menezes Filho, L. A., & Silveira, C. (2012). The secondary phosphate minerals from Conselheiro Pena Pegmatite District (Minas Gerais, Brazil): substitutions of triphylite and montebrasite. In: Lopes, F. C., Andrade, A. I., Henriques, M. H., Barata, M. T., & Reis, R. P. dos (Eds.). (2012). *Para conhecer a Terra, memórias e notícias de Geociências do Espaço Lusófono*. Coimbra: Universidade de Coimbra. v. 1, p. 262-269.
- Sweetapple, M. (2017). *A review of the setting and internal characteristics of lithium pegmatite systems of the Archaean North Pilbara and Yilgarn cratons, Western Australia*. In: Conference Granites2017@Benalla. Volume: Bulletin 65. (p.113-117). Benalla, Australia: Australian Institute of Geoscientists.
- Sweetapple, M. T., Grigson, M. W., Tornatora, P., & Urgine, S. (2019). The Archaean Mt. Cattlin spodumene group and 3D geochemical mapping of large “unzoned” pegmatites of economic significance. *Canadian Mineralogist*, 57, 803-805. doi: 10.3749/canmin.AB00026.
- Viana, P. R. M. (2006). *Flotação de espodumênio, microclina, quartzo e muscovita com coletores aniônicos, catiônicos, anfotéricos e mistura de coletores*. (Tese Doutorado). Belo Horizonte: Demin, UFMG. URL: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MAPO-7RL-J2A>. Acesso 07.09.2022.
- Webster, R. (1975). *Gems: their sources, descriptions and identification*. 3 ed. London: Newnes-Butterworths. 931p.
- Wikipedia. (2022). *List of countries by lithium production*. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_lithium_production. Acesso 19.09.2022.