

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**INGRID CRISTINA DE FARIA SALES**

**DESAGREGAÇÃO DO POTÁSSIO EM MINÉRIOS PARA USO NA AGRICULTURA**

**FORMIGA – MG**  
**2019**

INGRID CRISTINA DE FARIA SALES

DESAGREGAÇÃO DO POTÁSSIO EM MINÉRIOS PARA USO NA AGRICULTURA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Química do UNIFOR-MG, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.  
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva.

FORMIGA – MG

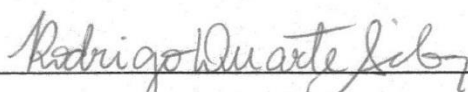
2019

Ingrid Cristina de Faria Sales

DESAGREGAÇÃO DO POTÁSSIO EM MINÉRIOS PARA USO NA AGRICULTURA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Química do UNIFOR-MG, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

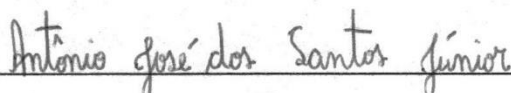
BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva

Orientador



---

Prof. Me. Antônio José dos Santos Júnior

UNIFOR-MG



---

Prof. Neylor Makalister Ribeiro Vieira

UNIFOR-MG

Formiga, 05 de novembro de 2019

## RESUMO

Potássio origina-se do latim *kalium*, representado pelo símbolo K. É o sétimo elemento de maior ocorrência na crosta terrestre, e ocorre somente na forma de compostos, tais como cloretos e sulfatos, presente em rochas, solos, oceanos, lagos e salinas residuais de lagos salgados. Aproximadamente 95% do consumo mundial de potássio é destinado para fertilizantes, sendo 90% na forma de cloreto e 5% na forma de sulfato. Depósitos de minerais potássicos formaram-se por evaporação gradual de águas salinas, onde as camadas de sais alternam-se entre camadas ricas em cloreto de potássio e cloreto de sódio, e camadas de argilas estéreis. As reservas brasileiras de potássio são da ordem de 13 bilhões de toneladas, em termos de  $K_2O$ , das quais 64,9% medidas, 24,6% indicadas e 10,5% inferidas, localizadas na bacia sedimentar de Sergipe/Alagoas e na bacia sedimentar do Amazonas. Os depósitos mais explorados atualmente estão localizados em Sergipe. A principal mina é a do complexo Taquari-Vassouras, no município de Rosário do Catete, Sergipe, operada pela Vale, com reservas medidas de 482,6 milhões de toneladas e teor médio de 9,2% de  $K_2O$  equivalentes. A produção em Taquari-Vassouras é de potássio fertilizante, produzidos os tipos granular e padrão, sendo o minério silvinita lavrado através do método câmaras e pilares retangulares, com beneficiamento através de flotação. Devido a produção interna insuficiente frente a demanda interna, o Brasil situa-se como um grande importador de potássio fertilizante. A quantidade importada em 2010 alcançou 5,2 milhões de toneladas, sendo 52% maior do que o volume de 2009. O Brasil desembolsou US\$ 3,512 bilhões com a importação de cloreto de potássio em 2012, US\$ 3,503 bilhões em 2011 e US\$ 2,234 bilhões em 2010. O preço esperado para a tonelada de potássio em 2020 será o mais baixo dos últimos anos, 161,4 US\$/tonelada, dependendo do aumento da oferta de acordo com projetos futuros. Os termofosfatos potássicos, o verdete, e o fonolito apresentam-se como fontes alternativas ao potássio convencional, buscando reduzir as importações no país.

Palavras-chave: Potássio. Fertilizantes. Fontes alternativas.

## ABSTRACT

Potassium originates from the Latin kalium, represented by the symbol K. It is the seventh most commonly occurring element in the earth's crust and occurs only in the form of compounds such as chlorides and sulfates present in residual rocks, soils, oceans, lakes and salines. of salty lakes. Approximately 95% of world potassium consumption is destined for fertilizers, 90% in chloride form and 5% in sulfate form. Deposits of potassium minerals formed by gradual evaporation of saline waters, where the salt layers alternate between layers rich in potassium chloride and sodium chloride, and sterile clay layers. Brazilian potassium reserves are in the order of 13 billion tons, in terms of K<sub>2</sub>O, of which 64.9% measured, 24.6% indicated and 10.5% inferred, located in the Sergipe / Alagoas sedimentary basin and Amazonian sedimentary. The most explored deposits are currently located in Sergipe. The main mine is the Taquari-Vassouras complex in the municipality of Rosario do Catete, Sergipe, operated by Vale, with measured reserves of 482.6 million tons and an average content of 9.2% of K<sub>2</sub>O equivalents. The production in Taquari-Vassouras is fertilizer potassium, produced granular and standard types, and the silvinitic ore mined through the method chambers and rectangular pillars, with processing through flotation. Due to insufficient domestic production against domestic demand, Brazil is a major importer of fertilizer potassium. The amount imported in 2010 reached 5.2 million tons, 52% more than the volume of 2009. Brazil disbursed US \$ 3.512 billion with imports of potassium chloride in 2012, US \$ 3.503 billion in 2011 and US \$ 2.234 billion in 2010. The expected price for the ton of potassium in 2020 will be the lowest in recent years, 161.4 US \$ / tonne, depending on supply increases according to future projects. Potassium thermophosphates, verdigris, and phonolite are alternative sources to conventional potassium, seeking to reduce imports in the country.

Keywords: Potassium. Fertilizers. Alternative sources.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama geral do processamento do potássio .....	19
Figura 2 - Exemplo de um circuito de flotação.....	24
Figura 3 - Disposição de potássio nos solos .....	26
Figura 4 - Origem das importações brasileiras de potássio .....	30

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Importação de potássio (2004-2010) .....	31
Gráfico 2 - Consumo brasileiro de NKP em 2008 .....	33
Gráfico 3 - Preço do potássio por tonelada no período de 2004 a 2010 .....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Minerais de potássio e seus teores equivalentes em massa (%).....	16
Tabela 2 - Compostos fertilizantes potássicos e seus nutrientes .....	28
Tabela 3 - Granulometria dos adubos potássicos .....	28
Tabela 4 - Produção interna de potássio (1997-2008).....	29
Tabela 5 - Consumo interno de KCl (1997-2008) .....	32
Tabela 6 - Ranking mundial do consumo de fertilizantes .....	32



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
a.C	Antes de Cristo
AM	Amazonas
Ca	Cálcio
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EUA	Estados Unidos da América
Fe	Ferro
FOB	Free on Board - Livre a Bordo
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo
K	Potássio
K <sup>+</sup>	Íon de Potássio
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de Potássio
KCl	Cloreto de Potássio
Km <sup>2</sup>	Quilômetro Quadrado
KNO <sub>3</sub>	Sulfato de Potássio
m	Metro
MIBIC	Metil Isobutil Carbinol
MG	Minas Gerais
MgCl <sub>2</sub>	Cloreto de Magnésio
mm	Milímetro
Mn	Manganês
Na <sup>+</sup>	Íon de Sódio
NaCl	Cloreto de Sódio
NPK	Nitrogênio-Fósforo-Potássio
SE	Sergipe

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo geral .....	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
3	METODOLOGIA .....	13
4	REFERENCIAL TEÓRICO .....	14
4.1	Potássio .....	14
4.2	Mineralogia .....	15
4.3	Geologia.....	16
4.4	Reserva .....	17
4.5	Processamento.....	18
4.5.1	Lavra.....	20
4.5.2	Flotação .....	22
4.5.3	Evaporação solar.....	25
4.6	Aplicações .....	25
4.6.1	Fertilizantes .....	26
4.6.1.1	Agricultura .....	26
4.6.1.2	Especificações .....	28
4.7	Produção.....	29
4.8	Consumo.....	31
4.9	Comércio exterior .....	33
4.9.1	Preço .....	34
4.10	Fontes alternativas.....	36
5	CONCLUSÃO .....	38
	REFERÊNCIAS .....	39

## 1 INTRODUÇÃO

Os solos brasileiros são especialmente férteis, porém, são pobres em nutrientes devido ao grande volume de chuvas, que são as responsáveis por lixiviar principalmente o potássio. Sendo assim, necessita-se de reposição constante dos elementos lixiviados para que ocorra o desenvolvimento de organismos vegetais (WERLE; GARCIA; ROSOLEM, 2008).

O potássio está presente em diversos minerais, mas apenas cloretos e sulfatos são de interesse econômico devido à alta concentração e à fácil solubilização desses compostos. Cloretos como a silvita e a carnalita são largamente processadas como minerais de potássio, além dos sulfatos langbeinita, polihalita e kainita (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

Depósitos de minerais de halita, silvita e carnalita formaram-se por evaporação gradual de águas salinas, com alternância das camadas de sais entre camadas ricas em cloreto de potássio e cloreto de sódio, e camadas de argilas estéreis (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

O processamento dos minerais de potássio subdivide-se em lavra, flotação e evaporação solar, com principal uso na agricultura. Mais de 95% da produção mundial de potássio é usada como fertilizante, sendo cerca de 90% na forma de cloreto de potássio, e os outros 5% na forma de sulfato de potássio (OLIVEIRA, 2012).

O Brasil ocupa o 7º lugar no *ranking* mundial em termos de reservas de potássio, consideradas insignificantes diante do cenário mundial. As reservas de potássio brasileiras são da ordem de 13 bilhões de toneladas, incluindo as reservas de silvita e carnalita, localizadas nos estados do Sergipe e Amazonas (VALENTE, 2013).

A produção de potássio no Brasil está restrita à Usina de Taquari-Vassouras em Sergipe, atualmente a cargo da Companhia Vale do Rio Doce. A produção é de potássio fertilizante, do tipo granular e padrão, e se dá através de lavra subterrânea convencional, sendo o minério silvinita lavrado através do método câmaras e pilares retangulares, com beneficiamento através de flotação (OLIVEIRA; SOUZA, 2001).

Atualmente, o Brasil consome cerca de 5 milhões de toneladas de potássio, mas produz apenas 460 mil. Devido a pequena produção interna, completamente insuficiente frente à demanda interna, o país situa-se no contexto mundial como um

grande importador de potássio fertilizante, tendo como principais fornecedores a Rússia e o Canadá. O Brasil é considerado um mercado em crescimento substancial em termos de consumo de potássio fertilizante, mas continuará dependendo da importação para suprir a demanda interna pelo produto (OLIVEIRA; SOUZA, 2001).

Uma das fontes alternativas ao potássio convencional é o verdete, rocha rica em potássio e constituída essencialmente por glauconita, quartzo e caulinita. O fonolito, rocha com predominância de feldspato potássico, feldspato plagioclásios e feldspatóides, também surge como possível fonte alternativa (PIZA; FRANÇA; BERTOLINO, 2009; TEIXEIRA et al., 2012).

Outra fonte alternativa são os termofosfatos potássicos com a produção baseada na fusão de uma mistura de rocha fosfática, rocha potássica e outras rochas de alta disponibilidade no Brasil (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

Nesse contexto, dada a importância do potássio como fertilizante para a agricultura aborda-se a necessidade da utilização de fontes alternativas para a desagregação de potássio convencional, diminuindo a taxa de importações do país.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho foi realizar um estudo bibliográfico sobre os processos de desagregação do potássio em minérios, ou seja, a obtenção de sais de potássio para utilização como fertilizante na agricultura.

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Definir conceitos gerais referentes ao tema;
- Ressaltar a geologia e mineralogia do potássio;
- Apresentar os tipos de processamentos utilizados para a desagregação do potássio;
- Analisar a utilização do potássio e suas aplicações na agricultura;
- Abordar as reservas nacionais de potássio;
- Explanar sobre a produção e o consumo de potássio;
- Discutir sobre fontes alternativas e projeções futuras.

### **3 METODOLOGIA**

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de caráter exploratório, descritivo e qualitativo, com levantamento bibliográfico fundamentado em livros, artigos científicos, revistas científicas, dissertações, teses e monografias, disponibilizadas pelo Google Acadêmico, abordando a desagregação de potássio em minerais para obtenção de sais de potássio utilizados como fertilizantes na agricultura e a importância da utilização de fontes alternativas para produção de insumo alternativo de potássio convencional para que o Brasil diminua sua taxa de importações.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

Este tópico tem como principal objetivo conceituar o que será discutido no decorrer do trabalho.

### 4.1 Potássio

O potássio, representado pelo símbolo K, origina-se do latim *kalium* que é proveniente da expressão árabe *qali* que significa álcali. É o sétimo elemento de maior ocorrência na crosta terrestre, contribuindo com 2,6% do seu total, à frente do magnésio (8°), titânio (9°), hidrogênio (10°), fósforo (11°), entre outros. Devido à sua alta reatividade e afinidade com os demais elementos, ocorre somente na forma de compostos, tais como cloretos e sulfatos, e se encontra presente em rochas, solos, oceanos, lagos e salinas residuais de lagos salgados, embora nestas ocorrências raramente seja observado um teor superior a 10%. Teores mais elevados são observados nos minerais evaporativos e nos silicatos de potássio (OLIVEIRA, 2012).

De acordo com as especificações químicas, o potássio possui número atômico 19, massa atômica 39,098 u, ponto de fusão -103 °C e ponto de ebulição -34 °C (PEIXOTO, 2004).

Não há nenhum substituto natural ou artificial para o potássio. Aproximadamente 95% do consumo mundial de potássio é destinado para fertilizantes. Os 5% restantes incluem as indústrias de detergentes, cerâmicas, produtos químicos e farmacêuticos. Os compostos de potássio mais comuns são aqueles formados por cloretos e sulfatos, embora existam inúmeros outros que se distinguem pelo teor de potássio presente neles. São encontrados compostos com teores acima de 10% e uma maioria com teores entre 2% e 10%. Tais compostos vão sendo modificados e transformados ao longo do tempo geológico em compostos de potássio solúveis em água. Uma vez solubilizados, são transportados pelos rios até o mar e depositados em bacias (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

O potássio na forma de cloreto (KCl) corresponde a cerca de 90% do potássio consumido mundialmente, sendo a forma mais abundante encontrada nas jazidas

minerais de potássio além de apresentar 52,45% de potássio recuperável (OLIVEIRA, 2012).

Desde a Antiguidade, sabe-se da importância do potássio para o metabolismo das plantas, o que o torna um dos elementos chave para a agricultura. Existem referências que comprovam a utilização do potássio como fertilizante desde o século III a.C., fase em que as cinzas de árvores que apresentavam expressiva concentração de potássio eram utilizadas para promover a agricultura (CORDEIRO, 2018).

Consoante Peixoto (2004), o potássio não é um elemento essencial somente para a vida vegetal, mas também para a vida animal. No metabolismo das plantas, o elemento é absorvido através do solo na forma de tartaratos e oxalatos, os quais podem ser convertidos em carbonatos após a queima. Nos animais, inclusive nos seres humanos, os íons de potássio,  $K^+$ , em conjunto com os íons de sódio,  $Na^+$ , agem nas membranas celulares através da transmissão de impulsos eletroquímicos e no balanceamento da alimentação e remoção de subprodutos. Tanto um excesso quanto uma ausência de potássio no organismo pode ser fatal. Entretanto a mera presença de potássio nos solos já garante a necessidade mínima indispensável através da alimentação.

## 4.2 Mineralogia

O potássio está presente em diversos minerais, mas apenas um pequeno número deles, constituído por cloretos e/ou sulfatos, são considerados de interesse econômico devido, principalmente, à concentração de potássio e à sua fácil solubilização. Embora os feldspatos constituam o mais abundante grupo de minerais da crosta terrestre e a maioria deles apresentem teores elevados de potássio, não são considerados minerais de minério pela dificuldade de extração do potássio. De fato, apenas a silvita ( $KCl$ ) e a carnalita ( $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$ ) são largamente processadas como minerais de potássio. Outros, menos explorados, são os sulfatos langbeinita ( $KMg_2(SO_4)_3$ ), polihalita ( $K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ ) e kainita ( $4KCl \cdot 4MgSO_4 \cdot 11H_2O$ ) (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

A silvita é o mineral industrial com a maior percentagem de potássio (52,5%) (BETEJETIN, 1977). Constitui-se ainda minério típico de potássio, uma mistura de



silvita (KCl) e halita (NaCl) que se designa por silvinita (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

A TAB. 1 apresenta os cloretos e sulfatos de potássio mais comuns, com formação, principalmente, em antigos lagos e extensos depósitos de origem marinha.

Tabela 1 - Minerais de potássio e seus teores equivalentes em massa (%)

Minerais	Fórmula	Teores Equivalentes (%)			
		K	KCl	K <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Silvita*	KCl	52,44	100,00	63,17	-
Carnalita*	KCl.MgCl <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	14,07	26,83	16,95	-
Silvinita*	KCl + NaCl	-	-	10-35	-
Kainita**	4KCl.4MgSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	15,71	29,94	19,26	-
Arcanita	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	44,88	-	54,06	100,00
Glaserita	3 K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	35,29	-	42,51	78,63
Langbeinita**	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .2MgSO <sub>4</sub>	18,84	-	22,69	41,99
Leonita	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .2MgSO <sub>4</sub> .4H <sub>2</sub> O	21,33	-	25,69	47,52
Polihalita**	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .MgSO <sub>4</sub> .2CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	12,97	-	15,62	28,90

Fonte: HAGEDORN, 1993.

Legenda: \*Principais minerais de minério; \*\*Minerais de minério secundários.

### 4.3 Geologia

Depósitos de minerais contendo halita (NaCl), silvita (KCl) e carnalita (KMgCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O) formaram-se por evaporação gradual de águas salinas, em bacias fechadas, pouco profundas. As camadas de sal formadas, principalmente no hemisfério norte, durante o período Paleozoico superior, período Permiano, e período Devoniano, foram recobertas, no tempo geológico, por outros depósitos sedimentares (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

As camadas de sais alternam-se entre camadas ricas em cloreto de potássio (KCl) e cloreto de sódio (NaCl), com camadas de argilas estéreis. Isso ocorre porque as águas dos rios transportam, em solução, diversos sais solúveis e, quando deságuam em mares fechados, cuja evaporação seja igual ou superior ao aporte das águas fluviais, a concentração dos sais passa a aumentar progressivamente. Com a elevação do nível dos oceanos, as bacias podem ser invadidas por águas de mar aberto, ricas em NaCl. Porém em períodos de estações chuvosas, podem perder a saturação. Os depósitos de halita também podem ter sido formados quando volumes consideráveis de água marinha foram isolados dos oceanos por formação de barras arenosas com grande concentração de NaCl proveniente do processo de evaporação. As morfologias mais especiais e complexas encontradas, aquelas que

apresentam grande plasticidade do material salino e a propriedade de passar para o estado fluido sob altas pressões, foram formadas por deformações tectônicas ocorridas ao longo do tempo (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

Embora os silicatos ricos em potássio, como o feldspato potássico, a moscovita e a leucita, contenham de 10 a 20% de óxido de potássio ( $K_2O$ ) equivalente e sejam abundantes na crosta, eles não constituem importantes fontes de potássio, pois não são solúveis em água e suas estruturas não são rompidas com facilidade por meios artificiais. O aproveitamento de rochas ígneas como fonte de potássio limita-se a áreas de exploração de outras substâncias, onde o potássio é obtido como subproduto. Os depósitos evaporativos constituem as mais importantes fontes de sais de potássio, pois os sais derivados desses depósitos são muito solúveis em água e podem ser explorados e processados mais facilmente (OLIVEIRA, 2012).

#### 4.4 Reserva

Em termos mundiais, o Canadá com 62,6% e a Rússia com 12,5%, são os dois principais países em reservas de sais potássio. O Brasil ocupa o 7º lugar no *ranking* mundial em termos de reservas de potássio. As reservas brasileiras são praticamente insignificantes diante do cenário mundial, correspondendo a menos de 1% do total (VALENTE, 2013).

Em termos de  $K_2O$  as reservas de potássio brasileiras são da ordem de 13 bilhões de toneladas, incluindo as reservas de silvita e carnalita, das quais 64,9% medidas, 24,6% indicadas e 10,5% inferidas. Estas reservas estão localizadas nos estados de Sergipe (bacia sedimentar de Sergipe/Alagoas) e Amazonas (bacia sedimentar do Amazonas) (OLIVEIRA, 2012).

Os depósitos mais explorados atualmente estão localizados em Sergipe (SE) e foram descobertos em 1963 durante trabalhos de prospecções de petróleo na região. A principal mina é a do complexo Taquari-Vassouras, no município de Rosário do Catete, Sergipe, operada pela Vale S.A. Esta mina é de grande porte, com reservas medidas de 482,6 milhões de toneladas e teor médio de 9,2% de  $K_2O$  equivalentes (MONTE et al., 2002).

As reservas de Sergipe totalizaram, em 2008, 489,6 milhões de toneladas de silvinita e 11,5 bilhões de toneladas de carnalita, com teores entre 9,7% e 8,3% de

K<sub>2</sub>O, respectivamente. Esses depósitos encontram-se nas sub-bacias evaporativas de Taquari-Vassouras e Santa Rosa de Lima, municípios de Rosário do Catete, Carmópolis e Santa Rosa de Lima. Desse total apenas 129,6 milhões de toneladas de silvinita foram definidas como passíveis de serem exploradas e 36,51 milhões de toneladas de minério já foram explorados de 1985 a 2008 (OLIVEIRA, 2012).

Similar à descoberta dos depósitos no Sergipe, na Amazônia os depósitos de potássio foram descobertos em 1955 durante pesquisas de petróleo pela Petrobras. As primeiras reservas foram descobertas na região de Nova Olinda, posteriormente trabalhos de sondagem revelaram a ocorrência de outros depósitos na região de Tapajós, de Nhamundá-Trombetas e de Nova Olinda-Maués. As reservas amazônicas somam um total de 1 bilhão de toneladas (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

No início de 2013, a empresa Brazil Potash anunciou a descoberta de jazidas de potássio em Autazes, região metropolitana de Manaus (AM), com reservas estimadas em mais de 500 milhões de toneladas. A expectativa é que dentro de uma década o Brasil possa tornar-se autossustentável na produção de potássio (BORGES, 2013).

#### **4.5 Processamento**

O processamento dos minerais de potássio segue, tradicionalmente, três rotas, sendo elas:

- i. mineração subterrânea seguida de flotação;
- ii. mineração por dissolução seguida da cristalização fracionada dos sais;
- iii. evaporação solar a partir de salmouras, seguido de flotação ou com variantes como separação eletrostática ou cristalização a frio (CORDEIRO, 2018; NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

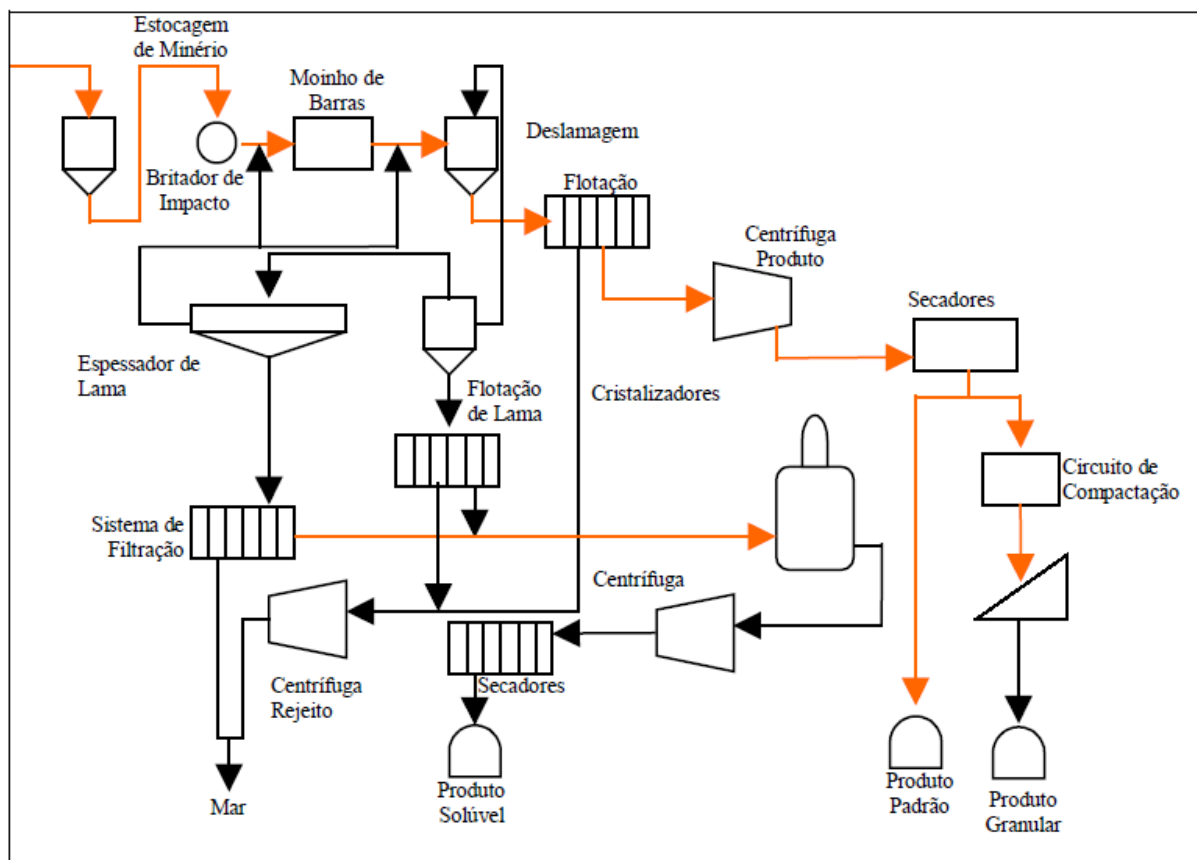
A rota (i) é responsável por 82% da produção mundial de potássio a partir da silvinita, o minério potássico solúvel. As etapas de processamento desta rota consistem em britagem, moagem, deslamagem, separação seletiva dos minerais, secagem do produto final e etapas finais de compactação ou granulação (CORDEIRO, 2018).

A rota (ii) normalmente é empregada quando a extração subterrânea não é economicamente viável, devido à profundidade dos depósitos, sendo assim, a

técnica de injeção de água apresenta-se comparativamente mais econômica. Esta técnica possui algumas vantagens como, por exemplo, a eliminação do custo de perfuração de poços. Além disso, depósitos que originalmente eram explorados por mineração convencional podem passar a utilizar essa técnica no final de suas operações, com o objetivo de um melhor aproveitamento do depósito. Já a rota (iii) apresenta-se como uma alternativa para a produção de sais de potássio (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

A FIG. 1 representa um esquema simplificado do processamento dos minerais de potássio e nele a unidade de flotação separa de forma seletiva o KCl do NaCl no minério silvinítico, para produzir três granulações de produtos distintas. Neste caso, o NaCl constitui o rejeito e, em geral, é descartado no mar.

Figura 1 - Diagrama geral do processamento do potássio



Fonte: NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008.

As tecnologias utilizadas para o processamento do minério silvinítico no Brasil são compatíveis com as praticadas em outros países, tanto nos métodos de lavra como no beneficiamento mineral. O processo inicia-se na unidade britagem do

minério, passando, em sequência, para a unidade de concentração, composta por moinhos de barras, classificação em peneiras, deslamagem, flotação e centrifugação, onde o concentrado de KCl é obtido. Na etapa final é feita a secagem do concentrado em um secador de leito fluidizado e dois produtos são originados, o cloreto de potássio *standard*, com granulometria inferior a 1 mm, representando 15% da produção total e os 85% restantes são enviados para a unidade de compactação, a fim de que seja obtido o cloreto de potássio granular, com granulometria entre 1 mm e 4 mm (CORDEIRO, 2018).

#### 4.5.1 Lavra

Entende-se por lavra, o conjunto de operações coordenadas objetivando o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração de substâncias minerais úteis, até o beneficiamento das mesmas (DNPM, 2019).

Minérios de potássio em leitos sólidos, a aproximadamente 1400 m de profundidades, são extraídos principalmente por métodos convencionais de mineração subterrânea mecanizada. Variações da técnica do tipo câmaras e pilares são comumente usadas. Outras técnicas, em particular a de mineração por dissolução, também podem ser uma opção (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

Em grande parte das minas, o sal de potássio é minerado a partir de depósitos sub-horizontais. Geralmente as câmaras são criadas pela remoção do sal e os pilares permanecem entre elas para sustentação (FERREIRA, 2017).

No Canadá, a extração de minério de potássio realiza-se pelo processo de câmaras e pilares, a uma profundidade de aproximadamente 1000 m. As câmaras têm larguras que podem variar entre 18 e 23 m e comprimentos de mais de 914 m. Os pilares dão suporte para o teto superior da mina. Esse método só permite a extração de 45% do total. No Novo México e nos EUA também produzem minério potássico utilizando o mesmo sistema. O minério é extraído numa série de câmaras com largura média de 10 m, suportadas por pilares que são minerados em uma segunda etapa. Cerca de 72% do minério potássico é extraído durante a primeira etapa. A segunda fase eleva a capacidade da mina para 90% (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

Os depósitos profundos do norte da Alemanha começaram ser lavrados pelo teto das câmaras, processo que foi seguido mais tarde pela mineração do piso (FERREIRA, 2017).

A única mina em operação no Brasil, a mina de Taquari-Vassoras, também é lavrada com a técnica de câmaras e pilares. A existência de lençóis aquíferos traz dificuldades na abertura dos poços da mina, os quais tiveram que ser recobertos por concreto especial e um tipo de resina epóxi para sustentar e impedir o inundamento. A ocorrência de gases explosivos relacionado com a proximidade de áreas petrolíferas aumentou mais a dificuldade da exploração do minério. A recuperação na lavra da mina é de 46% (BALTAR et al., 2001).

O processo de mineração por dissolução é normalmente empregado quando a extração subterrânea não é economicamente executável, devido à profundidade dos depósitos. Esta técnica possui algumas vantagens como a eliminação do custo de perfuração de poços. Além disso, depósitos que originalmente eram explorados por mineração convencional podem passar a utilizar essa técnica no final de suas operações, com o objetivo de um melhor aproveitamento (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

Desde 1964, a Kalium Chemicals em Saskatchewan, Canadá, extrai uma salmoura a uma profundidade de 1500 m pelo processo de dissolução obtendo KCl de alta pureza. O processo baseia-se na injeção de água ( $H_2O$ ) ou uma solução diluída de KCl por um sistema de perfuração no interior do leito do depósito. A solução já concentrada em KCl é então bombeada para a superfície e alimenta a etapa de cristalização. O sal de rocha acima do leito de potássio é protegido da dissolução por um colchão de óleo ou ar. A salmoura produzida passa por uma série de evaporadores para a cristalização do NaCl e o KCl é produzido em uma série de refrigeradores a vácuo (BALTAR et al., 2001).

No estado americano de Utah, a mineração convencional foi encerrada por problemas geológicos e técnicos. Passou então a ser executada por dissolução, em 1972. Poços e cavidades subterrâneas foram inundados pela água que deu origem à formação das salmouras. Trazida à superfície, passa por um processo de evaporação solar para produzir uma mistura de cloretos de sódio e de potássio que segue para a planta de flotação, produzindo KCl com 60% de  $K_2O$  (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

#### 4.5.2 Flotação

A flotação é um processo físico de separação de misturas heterogêneas, contrário ao processo de sedimentação, que consiste em adicionar bolhas de ar ao meio para que as partículas em suspensão no líquido aglutinem-se. A espuma formada pode então ser removida, arrastando consigo as partículas de impurezas (DNPM, 2019).

A flotação pode ser utilizada no tratamento de vários tipos de minérios de potássio como: minérios silvíníticos; sais pesados constituídos por kieserita, silvita e halita e, algumas vezes, anidrita; mistura de sais constituídos por uma mistura de silvinita ou sais pesados com carnalita; e polimineriais salinos contendo além de silvita, halita e kieserita, também langbeinita, kainita, polihalita e argilas. No processo de flotação de sais solúveis em água, os transportadores líquidos do processo são soluções saturadas com sais da matéria-prima. Assim, a flotação da silvinita ocorre em uma solução saturada de KCl e NaCl. Para a flotação de sais pesados, a salmoura contém quantidades de sulfato e cloreto de magnésio (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

O processo de flotação consiste nas etapas de adição de reagentes químicos ao minério, responsáveis por modificarem as características hidrofóbicas e hidrofílicas do mesmo; colisão e adesão das partículas flotáveis às bolhas de ar; e separação das partículas flotadas, daquelas não flotadas (HARRIS; JIA, 2000).

A hidrofobicidade é uma propriedade da superfície das partículas, que gera determinado grau de diferenciação entre elas, sendo a propriedade diferenciadora usada pelo processo de flotação. Pode ser uma propriedade natural ou induzida, uma vez que a diferença de propriedades físico-químicas na maioria dos sistemas pode não existir ou ser insuficiente. Portanto, utiliza-se reagentes para o condicionamento da polpa que alimenta a célula de flotação, os quais desempenham diferentes funções que modificam o sistema (SANTANA, 2011).

Os principais grupos de reagentes utilizados na operação de flotação são classificados de acordo com sua função específica. Coletores são substâncias que se depositam de forma seletiva na superfície mineral, recobrando-a sob a forma de um filme, deste modo, a partícula mineral passa a apresentar não mais sua superfície própria, mas sim uma outra, revestida pelo coletor hidrofóbico. Depressores deprimem a ação do coletor sobre as partículas indesejáveis, através

da modificação seletiva da superfície de determinados minerais, impedindo sua coleta. Espumantes favorecem a formação de uma espuma estável, de tal forma que as partículas flotadas possam ser removidas da superfície, como também a formação de bolhas com tamanho adequado. Modificadores ou reguladores adequam a ação efetiva do coletor e aumentam sua seletividade (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2010).

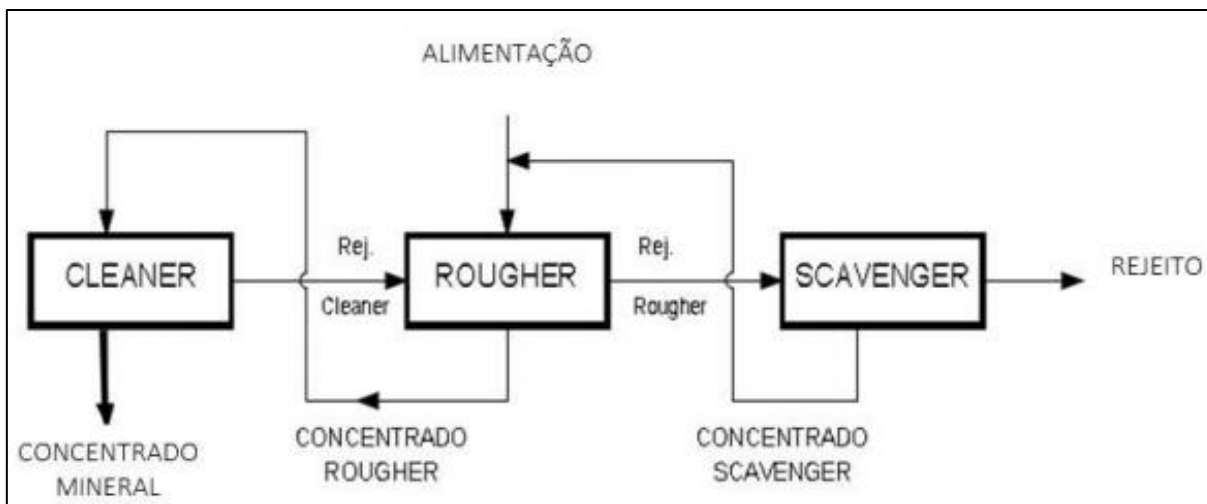
Os coletores revestem as superfícies a serem flotadas. Na flotação da silvita, por exemplo, são utilizadas aminas primárias alifáticas de cadeias não-ramificadas na forma de seus cloridratos ou acetatos. Os espumantes contribuem para a dispersão das aminas de cadeia longa, a estabilização e a distribuição homogênea das micelas, sendo utilizados álcoois alifáticos de cadeias longas, alcóois terpenos, éteres alquilpoliglicol e metil-isobutil carbinol. Em alguns sistemas de flotação, compostos polares, como óleos vegetais e minerais, são usados como coletores para conferir maior hidrofobicidade à silvita, apresentando eficácia para a recuperação das partículas mais grossas. Já os depressores são utilizados para minimizar o arraste do material argiloso até a zona de espuma. Concentrações de argilas em torno de 1,5 e 2% podem ser controladas por depressores, como a goma guar, amido, carboximetilcelulose e poliacrilamida (MAEDA, 2014; NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008; SANTANA, 2011;).

Como o processo de flotação é dependente do grau de hidrofobicidade da superfície das partículas, o coletor torna-se essencial para a flotação, uma vez que é o responsável por tornar a superfície de um mineral hidrofóbica e, assim, promover a adesão seletiva da partícula na bolha (CHAVES; LEAL FILHO, 2004).

Em geral, uma única etapa de flotação não é suficiente para se obter um grau de pureza elevado, sendo comum a opção por circuitos de flotação (FIG. 2) (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2010).



Figura 2 - Exemplo de um circuito de flotação



Fonte: Adaptado de CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2010.

Uma primeira flotação (*rougher*) é realizada com a alimentação da polpa, onde se obtém um concentrado (*concentrado rougher*) e um rejeito (*rejeito rougher*). O concentrado obtido da primeira flotação é enviado para uma segunda câmara de flotação denominada *cleaner*, onde são obtidos o concentrado mineral e um rejeito *cleaner*, ambos com elevado teor de minerais. Por esta razão, o rejeito *cleaner* é enviado novamente para a câmara *rougher*. Por outro lado, o rejeito *rougher* é enviado para uma terceira câmara de flotação, onde são obtidas duas correntes: uma de rejeito final muito pobre, e um concentrado que reúne todos os minerais úteis que estavam no rejeito *rougher*, entretanto o teor de minerais nesta corrente é insuficiente para ser considerado como produto final da flotação. Sendo assim, a corrente de concentrado é reciclada e introduzida junto com a alimentação do processo (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2010).

No Brasil, o processo de flotação de KCl realizado na usina de Taquari-Vassouras/SE, inicia-se com a preparação da polpa, constituída por 31% de minério e 69% de salmoura. O circuito de flotação compreende os estágios: *rougher* e *scavenger*, *cleaner* e *re-cleaner*. O condicionamento da polpa de alimentação é feito em uma caixa receptora, em que se adicionam os seguintes reagentes de flotação: amina primária de sebo hidrogenada, neutralizada com ácido acético, como coletor; metil isobutil carbinol (MIBC) como espumante; e amido de milho como depressor. O concentrado final contém entre 48% e 50% de sólidos, com teor de KCl entre 93% e 96% (LEAL FILHO; MASINI; MOURA, 2006).

### 4.5.3 Evaporação solar

A evaporação solar de salmouras apresenta-se como uma alternativa para a produção de sais de potássio. Quantidades expressivas são obtidas a partir das salmouras do Grande Lago Salgado em Utah, Lago Searles, na Califórnia, e o Mar Morto, localizado entre Israel e Jordânia. O processo baseia-se em concentrar a salmoura em tanques de evaporação com uma área total de 90 km<sup>2</sup> para recuperar os sais cristalizados e, em sequência, passar para o tanque de produção para cristalizar cloreto de sódio e carnalita. Essa mistura é removida como uma suspensão por um sistema de dragagem, bombeada e filtrada para então passar para o processo de decomposição da carnalita, realizado a 25°C. No processo de decomposição, o minério carnalítico é misturado e agitado com água ou com uma solução de baixa concentração de cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>) até que a mistura chegue a um ponto específico. Isso causa a cristalização de uma quantidade de cloreto de potássio com a formação de uma solução concentrada. O cloreto de potássio produzido ainda contém finas partículas de cloreto de sódio, halita não-dissolvida e, em algumas vezes, kieserita e argilas, dependendo da composição da carnalita utilizada (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

## 4.6 Aplicações

O principal uso dos sais de potássio é na agricultura, onde fornecem um dos três elementos nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. Mais de 95% da produção mundial de potássio é usada como fertilizante. Várias aplicações industriais, incluindo a manufatura de vidros especiais, sabões e detergentes absorvem o restante da produção. Os sais de potássio mais importantes em uso corrente são o cloreto de potássio, contendo de 60 a 62% de K<sub>2</sub>O, e o sulfato de potássio, contendo de 50 a 52% de K<sub>2</sub>O. Cerca de 90% da produção mundial de potássio é na forma de cloreto de potássio, enquanto o sulfato de potássio representa menos que 5% do total. O potássio é considerado um macronutriente essencial, pois interage em quase todos os processos do metabolismo vegetal (OLIVEIRA, 2012).

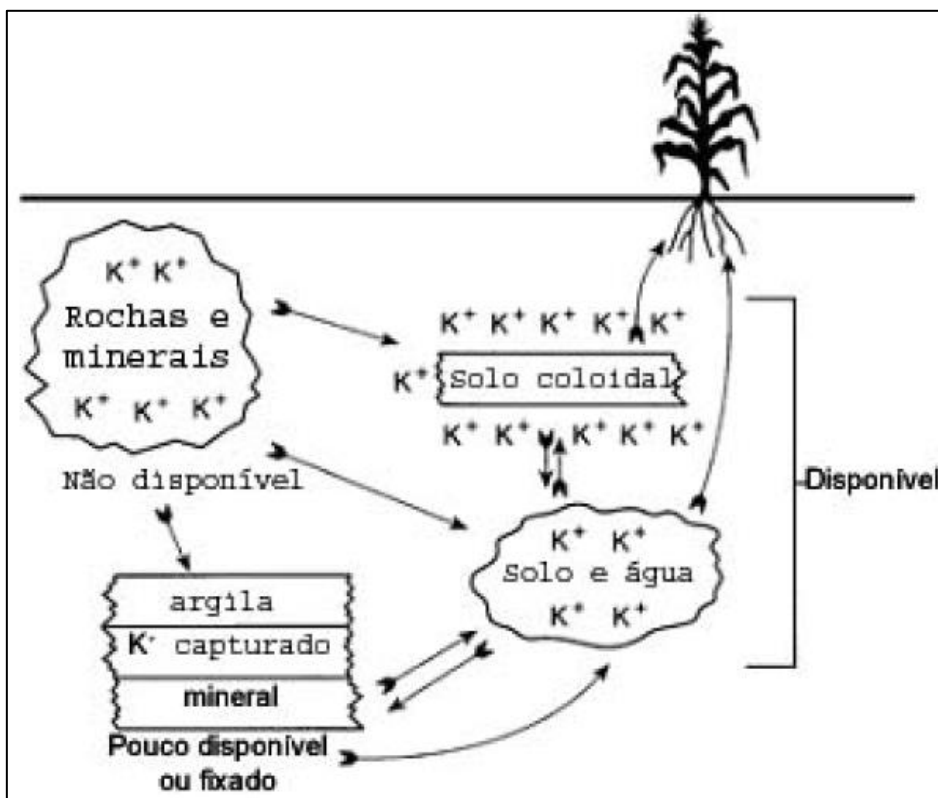
#### **4.6.1 Fertilizantes**

Os fertilizantes estão definidos na legislação brasileira como substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes às plantas. São utilizados na agricultura e pecuária para melhorar a produtividade do solo, contribuindo na reposição das substâncias retiradas da terra com os cultivos. A indústria de fertilizantes produz e comercializa complementos aos nutrientes minerais existentes no solo que, juntamente com a água, gás carbônico e luz, são essenciais para as plantas. Fazem parte deles os macronutrientes primários: nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) (DIAS; FERNANDES, 2006).

##### **4.6.1.1 Agricultura**

A grande maioria dos solos de plantio contém concentrações significativas do íon metálico  $K^+$  (FIG. 3). São centenas de quilos de potássio por hectare, mas menos de 2% está disponível para as plantas durante todo período de seu desenvolvimento, devido às suas diferentes formas de ocorrências no solo (REHM; SCHMITT, 2002).

Figura 3 - Disposição de potássio nos solos



Fonte: REHM; SCHMITT, 2002.

A correta aplicação de compostos de potássio depende do clima, do tipo de cultura e de solo, e do método de manejo. Cada tipo de fertilizante potássico apresenta suas vantagens. O cloreto de potássio, por exemplo, é o mais utilizado para a maioria das culturas. Lavouras especiais podem requerer um outro tipo de fertilizante potássico como o sulfato de potássio ( $K_2SO_4$ ) ou nitrato de potássio ( $KNO_3$ ) (POTAFOS, 1996).

O sulfato de potássio contém cerca de 50% de  $K_2O$  e 18% de enxofre. Como a concentração de cloretos nesse tipo de material é geralmente menor que 2,5%, ele é utilizado em cultivos que apresentam certa sensibilidade a altas concentrações de íons cloretos, como tabaco, frutas e alguns vegetais, fornecendo também o enxofre como nutriente. O sulfato duplo de potássio e magnésio é um fertilizante normalmente processado a partir da langbeinita, e contém aproximadamente 22% de  $K_2O$ , 11% de magnésio e 22% de enxofre. A concentração de cloretos nesse material é inferior a 2,5% (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2008).

O nitrato de potássio é o composto recomendado para cultivos que necessitem de baixos teores de enxofre e cloreto. Tem a vantagem de fornecer ao mesmo tempo, potássio e nitrogênio como nutrientes. Contém aproximadamente 44% de  $K_2O$  e 13% de nitrogênio (THOMPSON, 2002).

#### 4.6.1.2 Especificações

A forma de aplicação de fertilizantes potássicos deve ser baseada nas necessidades do solo e da cultura, nos métodos de aplicação, no preço e na disponibilidade. No Brasil, existe a exigência de comercialização do cloreto de potássio com um teor mínimo de 58% de  $K_2O$ , o que equivale a 91,81% de KCl. A TAB. 2 traz as composições dos variados sais de potássio (POTAFOS, 1996; THOMPSON, 2002).

Tabela 2 - Compostos fertilizantes potássicos e seus nutrientes

Composto	Fórmula	%N	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%K <sub>2</sub> O	%S	%Mg
Cloreto de potássio	KCl			60-62		
Sulfato de potássio	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			50-52	18	
Sulfato de potássio e magnésio	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .2MgSO <sub>4</sub>			22	22	11
Nitrato de potássio	KNO <sub>3</sub>	13		44		
Nitrato de potássio e sódio	KNa(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15		14		
Hidróxido de potássio	KOH			83		
Carbonato de potássio	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> KHCO <sub>3</sub>			<68		
Ortofosfatos de potássio	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>		30-60	30-50		
Polifosfatos de potássio	K <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>		40-60	22-48		
Metaforfatos de potássio	KPO <sub>3</sub>		55-57	38		

Fonte: Adaptada de THOMPSON, 2002.

A granulometria dos sais de potássio pode variar em função das diversas aplicações. Segundo Korndörfer (2003), o KCl é vendido em quatro tipos distintos de granulometrias: granular, grosseiro, padrão e solúvel (TAB. 3). O Brasil produz os tipos granular e padrão.

Tabela 3 - Granulometria dos adubos potássicos

Tipo	%K <sub>2</sub> O	Malha/Mesh	mm	Produto
Granular	61	6-20	3,4-0,8	Cloreto
		6-35	3,4-0,5	Sulfato
Grosseiro	61	8-28	2,4-0,6	Cloreto
Padrão	61,5	10-65	1,7-0,2	Sulfato e Cloreto
Suspensão	61,5	10-200	1,7-0,075	Sulfato e Cloreto
Solúvel	62	35-100	0,4-0,15	Cloreto
Comum especial	61	35-200	0,4-0,075	Cloreto
Puro	63	fina	-	Cloreto

Fonte: KORNDÖRFER, 2003.

#### 4.7 Produção

A produção de potássio no Brasil, iniciada em 1985, está restrita ao complexo Mina/Usina de Taquari-Vassouras em Sergipe, a cargo da Companhia Vale do Rio Doce. O complexo está produzindo a plena carga, observando-se que a produção esteve acima da capacidade nominal prevista no projeto base, que era de 300 mil t/ano de  $K_2O$ . A produção em Taquari-Vassouras é de potássio fertilizante, sendo produzidos os tipos granular e padrão. A produção se dá através de lavra subterrânea convencional, sendo o minério silvinita lavrado através do método câmaras e pilares retangulares, com beneficiamento através de flotação. A Unidade de Taquari-Vassouras representa a única fonte de oferta interna de potássio fertilizante e, mesmo produzindo praticamente 20% acima da capacidade nominal, prevista no projeto base, de 500 mil t/ano de KCl, está distante de suprir a demanda do País (OLIVEIRA; SOUZA, 2001).

Em 2008, a produção atingiu 606,71 mil toneladas de KCl, correspondendo a 383,26 mil toneladas de  $K_2O$  equivalente, tendo sido, essa produção, inferior à observada no ano anterior, quando foram produzidas 670,97 mil toneladas de KCl, correspondendo a 423,85 mil toneladas de  $K_2O$  equivalente (TAB. 4) (DNPM, 2009).

Tabela 4 - Produção interna de potássio (1997-2008)

Anos	Bruta* (ROM)**	Concentrado (KCl)	Contido ( $K_2O$ )
1997	1.673.856	468.976	281.381
1998	2.035.701	544.148	326.486
1999	1.931.526	580.380	348.231
2000	2.290.408	588.611	353.618
2001	2.295.946	594.935	318.585
2002	2.448.423	627.310	337.266
2003	2.357.527	657.750	415.549
2004	2.286.810	638.020	403.080
2005	2.311.685	640.851	404.871

Tabela 4 - Produção interna de potássio (1997-2008)

(continua)			
Anos	Bruta* (ROM)**	Concentrado (KCl)	Contido ( $K_2O$ )
2006	2.843.741	777.442	491.165
2007	2.852.197	670.968	423.850
2008	2.562.000	606.707	383.257

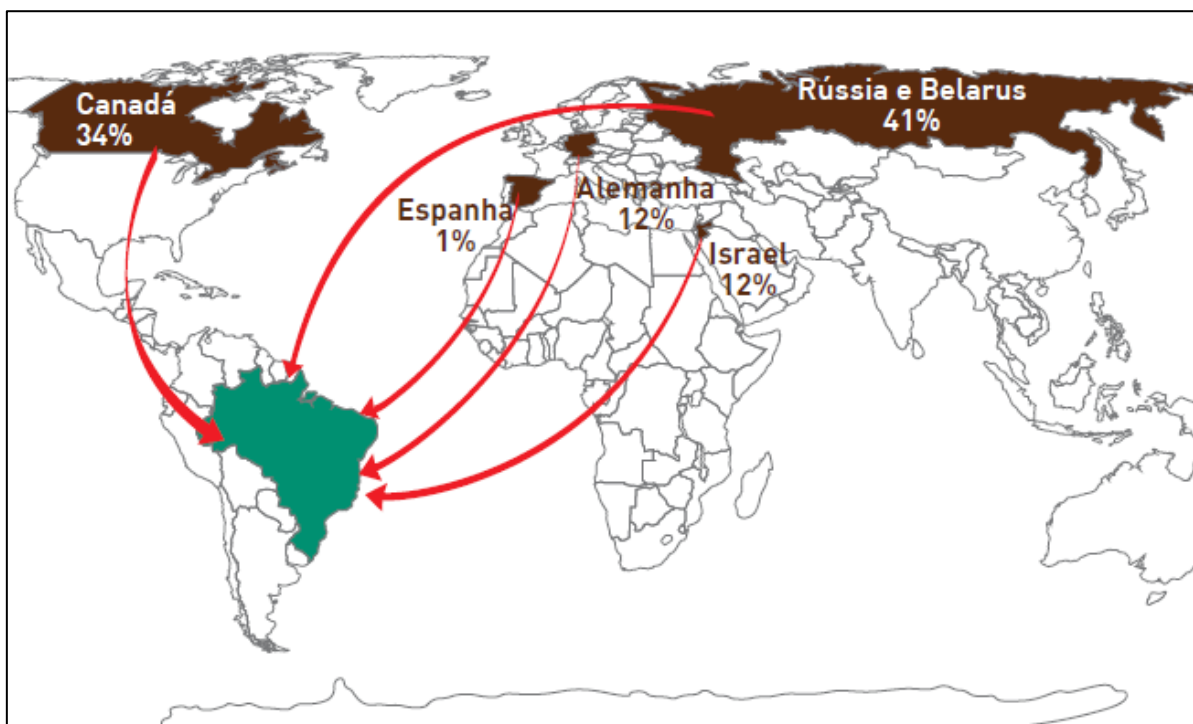
Fonte: DNPM, 2009.

Legenda: \*Silvinita.

\*\*Run-Of-Mine.

Devido a essa pequena produção interna, completamente insuficiente frente a demanda interna do país, o Brasil situa-se no contexto mundial como um grande importador de potássio fertilizante, tendo como principais fornecedores a Rússia e Belarus (41%), o Canadá (34%), a Alemanha (12%), Israel (12%) e Espanha (1%) (FIG. 4) (IBRAM, 2010; OLIVEIRA, 2012).

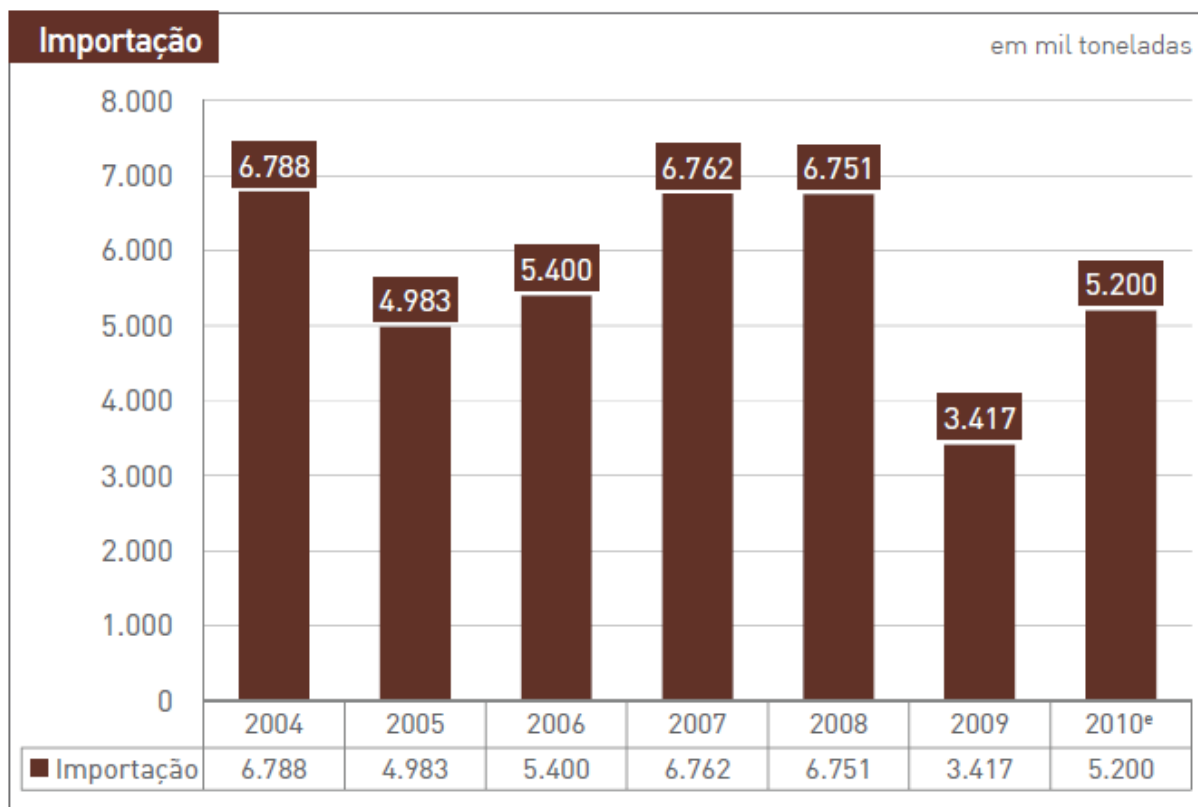
Figura 4 - Origem das importações brasileiras de potássio



Fonte: IBRAM, 2010.

A crise mundial de 2009 aliviou a importação brasileira de cloreto de potássio, que em 2008 bateu o recorde com importações, uma vez que o país não produz quanto necessita. A quantidade importada em 2010 alcançou 5,2 milhões de toneladas, sendo 52% maior do que o volume de 2009, que foi de 3,4 milhões de toneladas (GRAF. 1).

Gráfico 1 - Importação de potássio (2004-2010)



Fonte: IBRAM, 2010.

#### 4.8 Consumo

A agricultura brasileira é praticada em solos que se encontram em estado degradado e em estágio avançado de alteração intempérica, com predominância de óxidos de ferro e alumínio. A maioria desses solos é ácida, pobres em nutrientes minerais e de permeabilidade elevada. Para alcançar patamares de produção e produtividade, milhares de toneladas de fertilizantes industriais de alta solubilidade são aplicados anualmente aos solos brasileiros, originando uma demanda por fósforo e potássio principalmente. O Brasil, atualmente, consome cerca de 5 milhões de toneladas de potássio, mas produz apenas 460 mil, sendo necessária a importação da quantidade restante (OLIVEIRA; SOUZA, 2001).

Mais de 95% da produção mundial de potássio são usados como fertilizante, sendo os outros 5% consumidos pela indústria química. Dessa produção, 90% são na forma de cloreto de potássio e cerca de 5% na forma de sulfato de potássio. Nos EUA, cerca de 95% do consumo de potássio na agricultura são sob a forma de cloreto de potássio (OLIVEIRA, 2012).



No que tange ao consumo interno de potássio, apesar das oscilações verificadas, houve crescimento do consumo de potássio fertilizante, e em 2008 o consumo foi 197,33% maior do que o observado no ano de 1997 (TAB. 5) (DNPM, 2009).

Tabela 5 - Consumo interno de KCl (1997-2008)

Anos	Produção Interna	Importação	Exportação	Consumo Aparente**
1997	281.381	1.960.896	473	2.241.804
1998	326.486	1.962.585	551	2.288.520
1999	348.231	1.914.568	451	2.262.348
2000	353.618	2.605.607	563	2.958.662
2001	318.585	2.434.198	798	2.751.985
2002	337.266	2.923.243	1.131	3.259.378
2003	415.549	3.136.721	2.115	3.550.155
2004	403.080	4.090.027	2.695	4.490.412
2005	404.871	3.007.810	1.940	3.410.741
2006	491.165	3.242.082	3.538	3.729.709
2007	423.897	4.057.387	8.384	4.472.900
2008	383.257	4.050.742	10.316	4.423.683

Fonte: DNPM, 2009.

Legenda: \*\*Consumo Aparente: Produção + Importação - Exportação.

O Brasil se encontra entre os principais países importadores de potássio, com destaque para o cloreto de potássio. Até 1986, o país não dispunha de uma fonte interna do produto, sendo toda demanda suprida através de importação. Atualmente, a produção interna corresponde a pouco mais de 13% da necessidade nacional para atender à indústria de fertilizantes, principalmente no preparo de NPK, através de mistura mecânica, onde a relação percentual de nitrogênio, fósforo e potássio varia de acordo com as necessidades dos solos e das culturas (TAB. 6) (IBRAM, 2010).

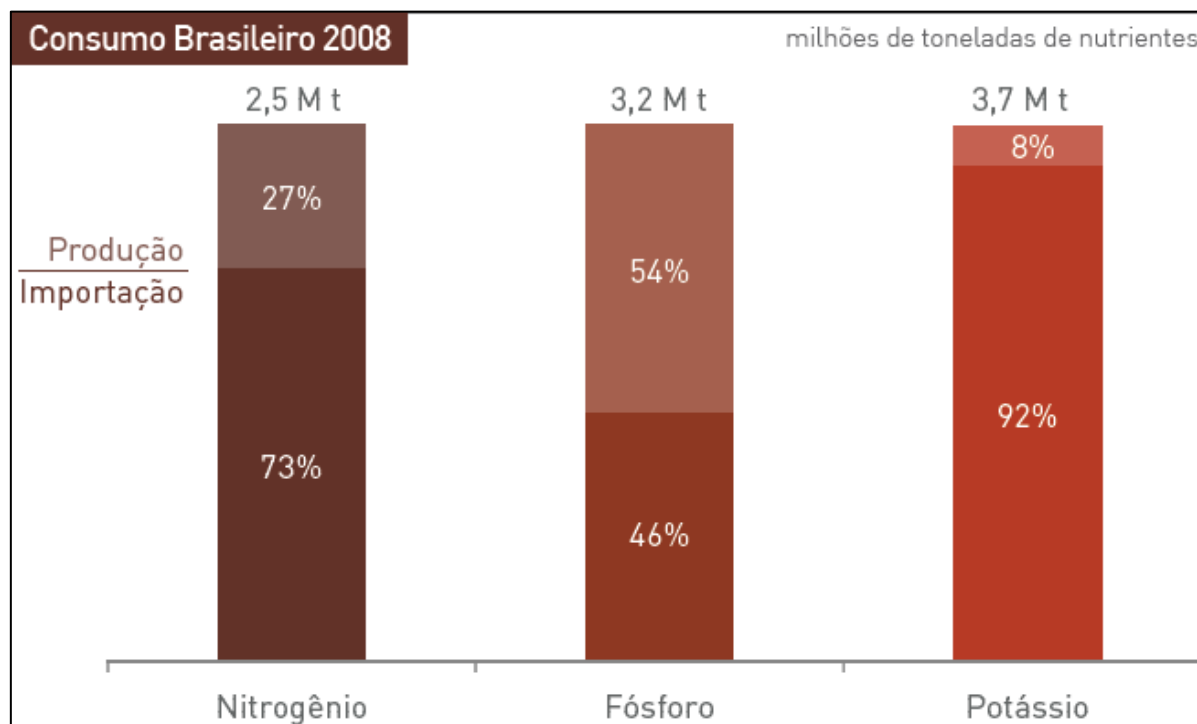
Tabela 6 - Ranking mundial do consumo de fertilizantes

Posição	NPK	Part.	Nitrogênio	Part.	Fósforo	Part.	Potássio	Part.
1°	China	30%	China	30%	China	37%	China	23%
2°	Índia	13%	Índia	14%	Índia	14%	Índia	17%
3°	EUA	12%	EUA	12%	EUA	11%	EUA	13%
4°	Brasil	6%	Brasil	3%	Brasil	8%	Brasil	9%
5°	Paquistão	2%	Paquistão	2%	Paquistão	3%	Paquistão	3%
Milhões ton. de nutrientes	157.3		92.4		37.6		27.2	
<b>Participação do Brasil</b>								
Consumo	6%		2%		8%		13%	
Produção	2%		1%		4%		1%	

Fonte: IBRAM, 2010.

O GRAF. 2 traz o consumo brasileiro de nitrogênio-potássio-fósforo no ano de 2008, em relação a produção e importação.

Gráfico 2 - Consumo brasileiro de NKP em 2008



Fonte: IBRAM, 2010.

O Brasil é considerado pelos grandes produtores mundiais de potássio como um mercado em crescimento substancial em termos de consumo de potássio fertilizante. O país continuará dependendo da importação para suprir a demanda interna pelo produto, não sendo factível, em curto prazo, um aumento significativo da produção interna (DNPM, 2009).

#### 4.9 Comércio exterior

Dos fertilizantes potássicos, destaca-se o cloreto de potássio, considerando os volumes produzidos e consumidos. O sulfato de potássio e o sulfato duplo de potássio e magnésio ficam em segundo plano devido ao pequeno percentual de utilização. Esses sais são produtos do beneficiamento de minérios evaporativos específicos, já anteriormente mencionados. O cloreto de potássio empregado como fertilizante é comercializado com: 60-62% de  $K_2O$  (produto com mais de 95% de KCl), 48-52% de  $K_2O$  e 22% de  $K_2O$ . O de maior utilização, principalmente quando

há necessidade de transporte a longas distâncias, é o de maior grau de pureza, devido ao seu emprego representar menor custo de transporte por tonelada efetiva de fertilizante. No Brasil, exige-se como garantia mínima para a comercialização de cloreto de potássio um teor de 58% de  $K_2O$ , correspondendo a 91,81% de KCl. Além do requisito de pureza, há especificações quanto ao tamanho das partículas. Assim, tem-se para o produto quatro tipos distintos, em função da granulometria, sendo os mais comercializados no Brasil os tipos granular e padrão (OLIVEIRA, 2012).

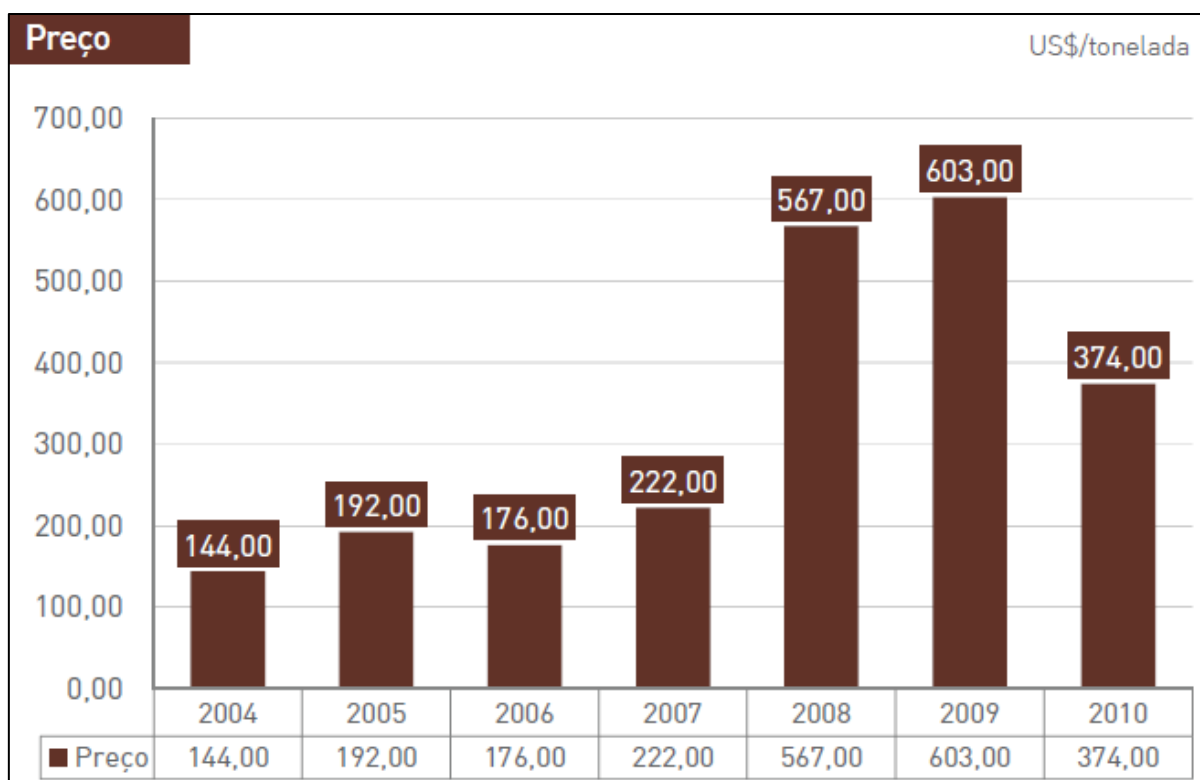
#### 4.9.1 Preço

Em termos mundiais, são poucos os produtores de cloreto de potássio. A oferta é restrita e inelástica, e os produtores não conseguem aumentar a produção em curto prazo (OLIVEIRA, 2012).

O Brasil desembolsou US\$ 3,512 bilhões com a importação de cloreto de potássio em 2012, US\$ 3,503 bilhões em 2011 e US\$ 2,234 bilhões em 2010. As compras vieram principalmente de Bielarus, Rússia, Canadá, Alemanha e Israel. O Brasil está adquirindo cloreto de potássio por US\$ 480 FOB (*free on board*) a tonelada, enquanto os gigantes asiáticos fecharam compras por US\$ 400 a US\$ 420 FOB nos três primeiros meses de 2013 (VALENTE, 2013).

O GRAF.3 traz o preço da tonelada de potássio no período de 2004 a 2006. Em 2009 os preços estiveram em alta, algo em torno de 603 US\$/tonelada, mas houve queda no mercado em 2010.

Gráfico 3 - Preço do potássio por tonelada no período de 2004 a 2010



Fonte: IBRAM, 2010.

Segundo Kulaif (2009), o preço FOB esperado para a tonelada de potássio no ano de 2020 será o mais baixo dos últimos anos, 161,4 US\$/tonelada, dependendo do aumento da oferta de acordo com projetos futuros.

Entre os fatores atuais que influenciam o preço do potássio, destaca-se o cenário positivo da agricultura para a demanda do mineral, como as plantações de milho nos EUA, soja no Brasil, e a palmeira de óleo na África. Porém essa demanda ainda pode variar, principalmente pela questão dos subsídios e capacidade de variação de demanda da Índia (HARRISON, 2013).

Outras fontes de potássio com uso específico para agricultura são o sulfato de potássio e sulfato duplo de potássio e magnésio, com cerca de 32,54 mil toneladas importadas pelo Brasil em 2011, correspondendo a US\$-FOB 8.638 mil. As exportações brasileiras de potássio fertilizante são destinadas aos países da América do Sul e atingiram em 2011 aproximadamente 9.553 toneladas de  $K_2O$  equivalente, referente ao cloreto de potássio (OLIVEIRA, 2012).

#### 4.10 Fontes alternativas

Na década de 80, o Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo (IPT) realizou experimentos de ataque da rocha potássica de Poços de Caldas/MG, por hidróxido de potássio sob pressão. Os resultados indicaram a obtenção de um produto totalmente solúvel em ácido cítrico (DNPM, 2009).

O IPT também realizou estudos para obtenção de termofosfatos potássicos para fertilizantes utilizando os estéreis da mina de urânio Osamo Utsumi situada no planalto de Poços de Caldas (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

O processo de produção do termofosfato potássico baseia-se na fusão, de uma mistura de rocha fosfática, rocha potássica e outras rochas de alta disponibilidade no Brasil. A mistura é fundida a altas temperaturas e, em seguida, o produto é resfriado rapidamente, tornando-se granulado, com características vítreas. Finalmente é seco, moído e ensacado (DNPM, 2009).

Os termofosfatos possuem como vantagens a insolubilidade dos nutrientes em água, resultando em menores perdas por lixiviação e fixação; a solubilidade dos nutrientes em solução de ácidos fracos, resultando em liberação lenta e eficiente desses nutrientes para os vegetais; o comportamento alcalino, resultando em efeito simultâneo de fertilização e correção de acidez de solos ácidos; a presença de outros nutrientes além do fósforo e do potássio, como cálcio, magnésio e micronutrientes (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

A extração de potássio a partir da rocha potássica de Poços de Caldas baseia-se na lixiviação alcalina, sob pressão, da rocha finamente dividida. Os resultados mostram uma extração de praticamente 100% do potássio contido na rocha e a formação de um mineral zeolítico como resíduo de lixiviação, com utilidade industrial (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

A rochagem consiste na utilização de pós de rocha como fertilizante natural para a agricultura, disponibilizando de forma direta os nutrientes presentes nos minerais para as plantas. Rochagem de materiais que contenham minerais ricos em potássio é um caminho a ser pesquisado em vários países, inclusive no Brasil. Carbonatitos micáceos (flogopita, vermiculita, biotita) são rochas de maior interesse por conterem macro e micronutrientes, além do potássio (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

Outra alternativa ao potássio convencional é o verdete, uma rocha metassedimentar rica em potássio e que ocorre em uma extensa área no estado de Minas Gerais. A rocha é de granulometria fina, coloração esverdeada, bandada e constituída essencialmente por glauconita, quartzo e caulinita. A coloração verde é dada pela presença de ferro. A porcentagem de  $K_2O$  pode variar entre 7 e até 14% (PIZA; FRANÇA; BERTOLINO, 2009).

Um município brasileiro com possível uso do verdete é o de Cedro de Abaeté, MG, e através de análises como difração e fluorescência de raios X os resultados indicaram que o teor de  $K_2O$  no verdete é em torno de 7% em massa, proveniente da glauconita. Verificou-se ser possível extrair aproximadamente 11% do  $K_2O$  total contido na rocha, através de solubilização, concluindo-se que o verdete de Cedro do Abaeté in natura possui um potencial promissor de aplicação como fertilizante alternativo de liberação lenta, em culturas que demandam potássio em longo prazo, como em culturas perenes (SILVA et al., 2012).

O fonolito do planalto de Poços de Caldas, também surge como possível fonte alternativa de potássio, com 9% de  $K_2O$ , além de outros nutrientes, como manganês (Mn), cálcio (Ca) e ferro (Fe). O fonolito é uma rocha de origem vulcânica que possui predominância de minerais como feldspato potássico, feldspato plagioclásios e feldspatóides. Análises de infravermelho, difração de raios X e fluorescência de raios X indicam que a rocha apresenta potencial para aplicação na agricultura como insumo alternativo de potássio (TEIXEIRA et al., 2012).

## 5 CONCLUSÃO

O principal uso do potássio é como fertilizante na agricultura, fornecendo um dos três elementos nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas, considerado um macronutriente essencial.

A produção de potássio no Brasil, está concentrada no Sergipe, especificamente na Usina de Taquari-Vassouras, com produção inferior à demanda do país, sendo necessário a importação de potássio fertilizante. Atualmente, o verdete de Cedro de Abaeté, o fonolito e o termofosfato potássico de Poços de Caldas, surgem como fontes promissoras para suprir a demanda de potássio convencional no país e reduzir as importações.

O teor de  $K_2O$  no verdete varia entre 7 e 14%, enquanto o teor de  $K_2O$  no fonolito é algo em torno de 9%. O termofosfato possui como vantagem principal a insolubilidade dos nutrientes em água, resultando em menores perdas por lixiviação e fixação. Ambos apresentam potencial para aplicação na agricultura como insumo alternativo de potássio.

## REFERÊNCIAS

- BALTAR, C. A. M. et. al. Cloreto de Potássio-CVRD/Mina de Taquari. In: SAMPAIO, J. A., LUZ, A. B., LINS, F. F. (eds). **Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil**. 1. ed., Rio de Janeiro: CETEM. 2001.
- BETEJTIN, A. **Curso de Mineralogia**. 3. ed., Moscou: Editorial Mir, 1977.
- BORGES, A. Potássio do Brasil confirma projeto na Amazônia. **Valor Econômico**, Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/empresas/3074446/potassiodo-brasil-confirma-projeto-na-amazonia#ixzz2ROQ2DIs9>>. Acesso em: 10 out. 2019.
- CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p. 465-513.
- CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S. Flotação. In: LUZ A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p. 411-458.
- CORDEIRO, L. C. B. **Análise da viabilidade de recuperar potássio de silitos verdes por flotação em célula**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2018.
- DIAS, V. P.; FERNANDES, E. 2006. Fertilizantes: uma visão global sintética. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 24, p. 97-138, 2006.
- DNPM. **Código de mineração**. 2019. Disponível em: <[https://www.dnmp-pe.gov.br/Legisla/cm\\_03.htm](https://www.dnmp-pe.gov.br/Legisla/cm_03.htm)>. Acesso em: 08 nov. 2019.
- DNPM. **Economia mineral do Brasil**. 2009. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnmp/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/0-sumario-apresentacao-e-introducao>>. Acesso em: 10 out. 2019.
- FERREIRA, P. F. **Panorama da produção de potássio e o potencial brasileiro: a exploração dos depósitos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Geologia) - Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2017.
- LEAL FILHO, L. S.; MASINI, E.; MOURA, R. **Teoria e prática do tratamento de minérios: flotação de cloreto de potássio (silvita)**, São Paulo: Signus, ed. 1, v. 4, 2006.
- HAGEDORN, F. **Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry**. Alemanha: Weinheim VCH, 1993.
- HARRIS, G. H.; JIA, R. An improved class of flotation frothers. **International Journal of Mineral Processing**, v. 58, p. 35-43, 2000.



HARRISON, P. **Global fertilizer market outlook**: scotiabank commodities outlook conference. Toronto, Canadá. 2013.

IBRAM. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. 5. ed. 2010. Disponível em: <[www.ibram.org.br](http://www.ibram.org.br)>. Acesso em: 10 out. 2019.

KORDNÖFER, G. H. **Apostila potássio**. Instituto de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

KULAIF, Y. M. M. E. **Relatório técnico 52**: perfil do potássio. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento. Produto 29, Agrominerais. J Mendo Consultoria. 2009.

MAEDA, J. M. M. **Estudo de caracterização mineral e de reagentes na flotação de minério de ferro**. Universidade de São Paulo, PQI, São Paulo, 2014.

MONTE, M. B. M. et al. 2002. **Cloreto de potássio**: Mina de Taquari Vassouras-CVRD. Rio de Janeiro: CETEM/CTEC, 2002.

NASCIMENTO, M.; LOUREIRO, F. E. L. **Fertilizantes e sustentabilidade**: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. p. 61-66. 2004.

NASCIMENTO, M.; MONTE, M. B. M.; LOUREIRO, F. E. L. Agrominerais: potássio. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e minerais industriais**: usos e especificações. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. Capítulo 8.

OLIVEIRA, L. A. M. Potássio. **Sumário mineral 2012**: Departamento Nacional de Produção Mineral. Brasília: DNPM. 2012.

OLIVEIRA, L. A. M.; SOUZA, M. E. Potássio. **Balanço Mineral Brasileiro**. 2001, p. 1-17.

PEIXOTO, E. M. A. Elemento químico potássio. **Química Nova na Escola**, nº 19, 2004.

PIZA, P. A. T.; FRANÇA, S. C. A.; BERTOLINO, S. C. Verdete do Cedro de Abaeté como fonte alternativa para potássio. In: **XVII Jornada de Iniciação Científica-CETEM**. 2009.

POTAFOS. Nutrifatos: informação agrônômica sobre nutrientes para as culturas. **Arquivo do agrônomo**, nº 10, 1996.

REHM, G.; SCHMITT, M. **Potassium for crop production**. University of Minnesota. 2002. Disponível em: <<https://extension.umn.edu/phosphorus-and-potassium/potassium-crop-production>>. Acesso em: 10 out. 2019.

SANTANA, R. C. **Efeito da altura da coluna na flotação de minério fosfático em diferentes granulometrias**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2011.

SILVA, A. A. S. et al. Caracterização do verdete de Cedro do Abaeté para o desenvolvimento de um material com liberação controlada de potássio. **Revista HOLOS**, ano 28, v. 5, p. 42-51. 2012.

TEIXEIRA, A.M.S. et al. 2012. Avaliação da rocha fonolito como fertilizante alternativo de potássio. **Revista HOLOS**, ano 28, v. 5, p. 21-33. 2012.

THOMPSON, B. Efficient fertilizer use-potassium. **International Potash Institute**, 2002.

VALENTE, G. F. **Cenário brasileiro dos minerais para fertilizantes: potássio, fosfato e enxofre; presente e futuro**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2297-2305, 2008.