

Anais

III CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM

Editores

Adilson Luis Bamberg

Carlos Augusto Posser Silveira

Éder de Souza Martins

Magda Bergmann

Rosane Martinazzo

Suzi Huff Theodoro



CARACTERIZAÇÃO DE FLOGOPITITOS E OUTRAS ROCHAS ENCAIXANTES DAS MINERALIZAÇÕES DE ESMERALDA DE CAMPO FORMOSO E PINDOBAÇU (BA) COMO FONTES DE POTÁSSIO E MULTINUTRIENTES PARA REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS

Magda Bergmann¹; Alessandra Blaskowski¹; Carlos Augusto Posser Silveira²; Maria Abadia Camargo¹; Margarete Wagner Simas¹; Oliveira Cavalcante¹

¹Serviço Geológico do Brasil-CPRM - alessandra.blaskowski@cprm.gov.br, magda.bergmann@cprm.gov.br, abadia.camargo@cprm.gov.br, margarete.simas@cprm.gov.br, oliveira.cavalcante@cprm.gov.br; ²Embrapa Clima Temperado - augusto.posser@embrapa.br

Sumário: O projeto da Agrominerais da Região de Irecê-Jaguarari-BA (CPRM-Serviço Geológico do Brasil) indicou os flogopititos encaixantes das gemas das lavras de esmeralda de Campo Formoso e Pindobaçu (BA), como fontes de K e multinutrientes para remineralização de solos, destinados à área do assentamento Baixio de Irecê da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF). Litotipos variados de nove dentre as maiores pilhas de descartes foram caracterizados por litoquímica, petrografia e DRX semi-quantitativo, quanto ao conteúdo e alocação de nutrientes e Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT). Nas pilhas estimou-se quantidades relativas de rochas e as possibilidades de misturas para composição de agrominerais. Foi ressaltada a importância da faiscagem como forma de obtenção de agromineral potássico a partir dos flogopititos. Por fatores ligados à estrutura cristalina, a flogopita é um mineral capaz de disponibilizar o íon potássio no solo. Os flogopititos estudados, enquanto rochas constituídas por até 98% de flogopita (K_2O 9,44 a 10,86 %; MgO 17 a 21,9%), podem ser considerados fontes de multinutrientes, com potencial de disponibilização de K, Mg, Fe e Si, além dos micronutrientes Mn, Mo e V.

Palavras-chave: remineralização de solos, flogopititos, mineração de esmeralda da Bahia.

INTRODUÇÃO

Contexto geológico

A mineração de esmeralda dos municípios de Campo Formoso e Pindobaçu-BA é operada por uma cooperativa garimpeira (Cooperativa Mineral da Bahia-CMB), e emprega o método de lavra subterrânea, onde o acesso aos horizontes mineralizados em gemas é realizado através de *pits* e galerias que atravessam camadas de rochas metamórficas dobradas. A tipologia dos jazimentos é do tipo metassomática, ligada à intrusão do granito Campo Formoso em uma sequência de rochas ultramáficas. Embora as esmeraldas ocorram encaixadas quase exclusivamente em flogopititos, estruturas dúcteis e rúpteis promovem um padrão de acentuada descontinuidade do nível mineralizado, o que, somado à falta de controle por trabalhos de pesquisa faz com que os trabalhos de escavação se multipliquem buscando segui-lo e acaba por gerar um grande volume de rejeitos.

MATERIAL E MÉTODOS

A sequência de rochas ultramáficas metassomatizadas se constituiu em um dos alvos prioritários do projeto da CPRM (Blaskowski, Bergmann e Cavalcante 2016, no prelo) por atender ao conceito de **Unidade de Interesse Agrogeológico**, notadamente pela presença dos flogopititos, rochas com potencial de disponibilização de K, agregado ao fato da mineração de esmeraldas resultar em extensas pilhas de rejeitos disponíveis para emprego de seus materiais a curto prazo.

Amostras de todos os litotipos constantes nas pilhas foram coletadas e caracterizadas por litoquímica, petrografia e DRX. Também foram coletadas amostras de 60 kg destinadas a testes agronômicos, dos flogopititos separados e do conjunto das rochas, reproduzindo a proporção relativa entre elas.

As análises litoquímicas foram realizadas pelo Laboratório SGS Geosol Laboratórios Ltda e quantificaram elementos e compostos químicos nutrientes pelo método ICP (Plasma Acoplado Indutivamente) para óxidos maiores e ICP-MS (Plasma Acoplado Indutivamente-Espectrometria de Massa) para elementos traços, dentre os quais micronutrientes e elementos potencialmente tóxicos (EPT). O método de abertura das amostras foi eleito de acordo com a precisão e limites de detecção apropriados para determinar EPT como o mercúrio, restrito pela legislação dos remineralizadores de solo a valores muito baixos, de modo que para determiná-lo foi utilizado o método da digestão por Água Régia e leitura por ICP OES (Espectrometria de Emissão Ótica) /ICP MS.

A análise petrográfica modal de lâminas delgadas determinou a assembleia mineralógica e a proporção de cada mineral presente nas rochas, permitindo o reconhecimento dos minerais capazes de disponibilizar nutrientes para o sistema solo-água-plantas. A petrografia também determinou a sanidade ou grau de alteração destes minerais (estabilidade de fases minerais); suas texturas e tamanho de grãos, para determinar os intervalos granulométricos apropriados à cominuição; a geração de minerais secundários, como argilominerais 2:1, e processos como alteração hidrotermal. Para validação da petrografia modal e para reconhecimento de fases como argilominerais todas as amostras foram encaminhadas para análise de DRX semi quantitativo, realizada no Laboratório de Difração e Fluorescência de Raio-X da Universidade Federal do Pará (UFPA).

ARRANJOS PRODUTIVOS E IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO DE ESMERALDA

Nas localidades de Carnaíba de Cima, Carnaíba de Baixo e Pindobaçu, a extração de esmeraldas é operada por mais de 100 frentes de lavra. Estas são com frequência abandonadas em função do controle precário que os mineradores têm sobre a geometria e os condicionantes das jazidas, e acabam sendo reativadas em épocas de picos da atividade minerária. Isto gera rejeitos da ordem de centenas de milhares de metros cúbicos, que são dispostos em encostas a partir da boca dos *pits*, assoreando vales e promovendo extensas pilhas, em parte dentro da zona urbana das pequenas localidades garimpeiras (Fig. 1A). Como a CMB enfrenta a demanda de organizar a disposição de rejeitos como uma das exigências para qualificar a atividade como Associação Produtiva Local (APL Mineração), a oportunidade de aproveitamento de ao menos uma parte dos

materiais descartados pela lavra constitui-se em uma perspectiva promissora e vista com interesse pela cooperativa. Neste sentido, um arranjo de trabalho peculiar nos garimpos coloca em foco a atividade de faiscação, que é desenvolvida por moradoras locais, conhecidas como “quijilas”. Estas selecionam e recolhem os blocos dos flogopititos dentre outras rochas dos rejeitos, para fragmentá-los com pequenos martelos em busca de gemas menores que passam despercebidas na mineração subterrânea. As faiscadoras também recolhem a molibdenita, mineral metálico que ocorre em manchas nos flogopititos. A CMB já se encontra envolvida em ações que visam a melhoria das condições de trabalho das “quijilas”, que exercem a faiscação em meio aos rejeitos, e carecem de proteção do sol e da chuva (Fig. 1B). Com a organização da faiscação, e uma vez que esta atividade manipula exclusivamente os flogopititos, abre-se a perspectiva de destinar os resíduos destas rochas a contêineres, permitindo juntar e armazenar os descartes de flogopititos de várias lavras para posterior moagem e obtenção de agromineral rico em K.

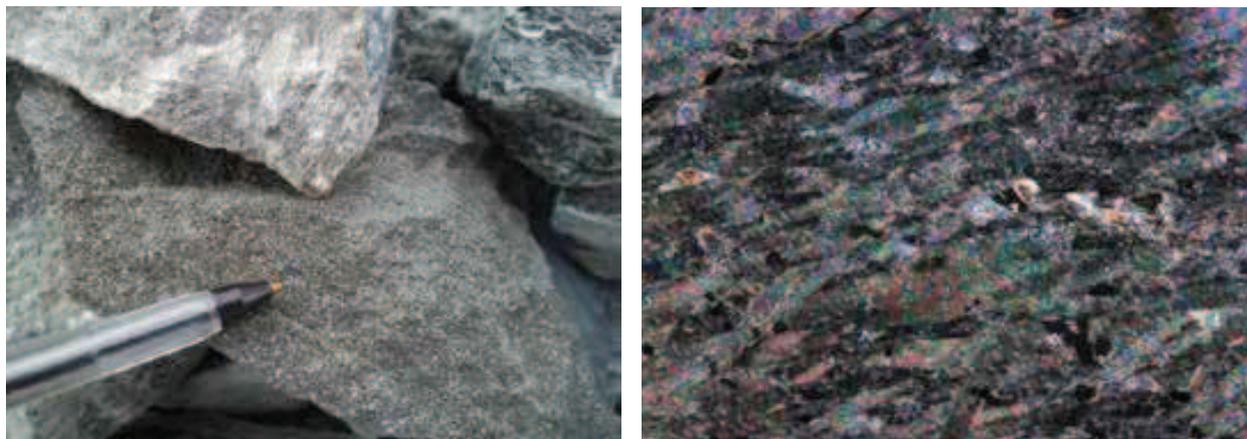
Figura 1 – A: Pilhas de rejeitos na região urbana de Carnaíba de Cima. Visada de SE para NW a partir da Mineração São Francisco. B: Faiscadoras na pilha da mineração Beira Rio, Carnaíba de Cima.



CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E PETROGRÁFICA DAS ROCHAS DAS PILHAS DE DESCARTES

Nas pilhas de rejeitos os blocos de flogopitito (Fig. 2A) perfazem cerca de 15% em volume, em meio a uma variedade de litotipos como flogopita-tremolita xisto, quartzo-turmalina-biotita xisto, clorita-talco-tremolita-actinolita xisto, além de esteatito, metaultrabasi-to/serpentinito, albita pegmatito e quartzito a fuchsitita. A petrografia modal dos flogopititos registra flogopita entre 94% a 98% (Fig. 2B). Este filossilicato pode portar 10% de K_2O e quantidades de MgO superiores a 20% (Deer, Howie e Zussmann 2008). Por fatores ligados à estrutura cristalina, a flogopita é um mineral capaz de disponibilizar o íon potássio no solo com maior facilidade do que minerais como os feldspatos potássicos, tectossilicatos resistentes ao intemperismo. Isto se dá pelo fato de a flogopita comportar como unidade estrutural (camada) duas folhas tetraédricas interpostas por uma folha octaédrica (estrutura 2:1) onde o K ocupa a posição inter-camadas, sustentado por ligações fracas. Durante o avanço do intemperismo os átomos de K tendem a ser liberados, pois são substituídos por cátions hidratados como H^+ , Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} (Van Straaten 2007).

Figura 2 – A: Flogopitito de granulação média-grossa (Mineração Beira Rio), com cor bronze conferida pela mica flogopita. B: Fotomicrografia (LP 2x) de flogopitito, rocha monominerálica com flogopita em agregados lamelares orientados e deformados.



Os flogopititos estudados têm teores de K_2O entre 9,44 e 10,86 % e são considerados ainda fontes de multinutrientes, disponibilizando Mg, Fe e Si, além dos micronutrientes Mn, Mo e V. Todas as amostras pesquisadas atendem ao critério de Soma de Bases da legislação brasileira para remineralizadores de solo (IN MAPA 05 e 06/2016), com $K_2O+MgO+CaO$ entre 27,64 e 31,45% (ver Tabela 1). Exceto por duas amostras que mostraram teores anômalos de Cd as demais rochas analisadas enquadram-se nos limites IN MAPA 05/2016 quanto a EPT.

Tabela 1 – Teores de macronutrientes de flogopititos e outras rochas presentes em nove pilhas de descartes da mineração de esmeralda da Bahia. SB-Soma de Bases.

| Procedência | Classificação dos tipos de rochas identificadas em cada procedência | CaO | K ₂ O | MgO | SB |
|-------------------------------------|---|-------|------------------|-------|-------|
| | | % | | | |
| Garimpo Socotó-Cesta do Povo | 1 Flogopita-tremolita xisto | 5,21 | 5,13 | 21,28 | 31,62 |
| | 2 Flogopitito | 0,14 | 9,59 | 21,57 | 31,30 |
| Garimpo Carnalba - Marota | 1 Flogopitito | 0,07 | 9,46 | 21,92 | 31,45 |
| Carnalba de Cima - Mina Deus é Amor | 1 Metaultrabásito/flogopita-talco-tremolita xisto | 2,49 | 7,26 | 24,35 | 34,10 |
| Garimpo Socotó-Mamona | 1 Tremolita-actinolita xisto (metaultrabásica) | 7,09 | 3,36 | 21,48 | 31,93 |
| | 2 Flogopitito-hidrotermalito | 0,26 | 9,68 | 19,78 | 29,72 |
| | 3 Tremolita-flogopita-talco xisto/esteatito | 1,53 | 3,85 | 24,6 | 29,98 |
| Garimpo Carnalba-Cabra Velha | 1 Flogopitito | 0,18 | 9,44 | 18,02 | 27,64 |
| | 2 Clorita-talco-flogopita xisto | 0,06 | 3,60 | 21,96 | 25,62 |
| Garimpo Carnalba - Serra Pelada | 1 Flogopitito | <0,01 | 9,18 | 17,11 | 26,29 |
| Garimpo Carnalba - Beira Rio | 1 Flogopitito | 0,12 | 9,11 | 21,12 | 30,35 |
| Garimpo Carnalba-Noel | 1 Flogopitito | 0,07 | 10,06 | 19,72 | 29,85 |
| | 2 Flogopita-tremolita xisto | 6,47 | 3,56 | 20,15 | 30,18 |
| | 3 Flogopitito | 0,06 | 10,86 | 19,42 | 30,34 |
| | 4 Flogopitito | 0,25 | 9,97 | 18,94 | 29,16 |
| Garimpo Carnalba de Baixo - Bráulia | 1 Flogopitito | 0,69 | 9,74 | 18,62 | 29,05 |

Não obstante, nas amostras de flogopititos os teores de Ni ultrapassam 500 ppm e em alguns casos, como nos garimpos da Marota, Beira Rio e Bráulia, atingem 800 ppm. O Ni é um elemento considerado fitotóxico em teores desta ordem, e como se trata de rochas praticamente monominerálicas tudo leva a supor que ele esteja contido na própria estrutura da flogopita. Brindley & Brown (1980) referem a sintetização de micas com estruturas análogas à da flogopita com cátions como Co, Ni, Cu, Fe^{+2} substituindo o Mg na posição octaédrica. Este

fato poderia justificar a presença dos teores relativamente altos de Ni em alguns dos flogopititos analisados, e ressalta a relativa propensão à liberação do Ni pela sua posição em sítio octaédrico na estrutura da flogopita. Também os teores elevados de Cr (1600-3200 ppm), de resto comuns em rochas de afiliação ultramáfica, introduzem cuidados adicionais quanto ao emprego destas rochas na remineralização de solos.

Segundo Garnier et al. (2006) reações de oxirredução com óxidos de Mn, ou com o ânion PO_4^{-3} em solos podem promover a passagem do Cr ao estado oxidado Cr^{6+} , forma de cromo solúvel altamente tóxica. Especificamente em relação a esses dois elementos, visando garantir a segurança ambiental e dos alimentos, há a necessidade de realização de testes de incubação com diferentes tipos de solos bem como ensaios agronômicos com diferentes espécies de plantas.

CONCLUSÕES

No Brasil, diversos trabalhos recentes tratam da dinâmica da liberação de K nos flogopititos da Bahia com uso de extratores como ácido nítrico, ácido oxálico e ácido cítrico, e solução extratora Melich-1 (Silva et al., 2010a, Silva et al. 2010b; Ribeiro et al., 2010; França et al., 2013), sem, no entanto, apresentarem resultados animadores. Nestes trabalhos verifica-se que os teores de K_2O , CaO e MgO não são condizentes com a química dos flogopititos em questão, o que levanta dúvidas quanto às rochas testadas, e leva a supor que os testes tenham incluído alguma proporção de outros litotipos presentes nas pilhas de rejeitos.

A recomendação do presente trabalho é que sejam realizados experimentos agronômicos cotejando o desempenho dos flogopititos isoladamente e em misturas com participação de flogopita-tremolita-xistos e rochas ultramáficas, em busca da formulação de um agromineral multinutrientes (K, Ca, Mg) que possa aproveitar uma variedade maior das rochas presentes nas pilhas. Litotipos como flogopita-tremolita xisto, quartzo-turmalina-biotita xisto, clorita-talco-tremolita-actinolita xisto podem ser também tomados isoladamente como fontes multinutrientes, por contarem com teores de MgO superiores a 20%, e K_2O entre 3,6 e 7,6 % e CaO até 5%. Esteatitos e serpentinitos têm potencial para corretivos de acidez em solos. Afora fornecedoras de nutrientes essenciais, as rochas dos garimpos de esmeralda podem ser consideradas fontes de micronutrientes como Ni, Zn, Mn, Mo, Co e V.

Recomenda-se que ensaios agronômicos verifiquem a disponibilização do Ni a partir dos flogopititos, e também o benefício adicional no incremento da CTC dos solos pela transformação da flogopita em vermiculita durante o processo de abertura do mineral flogopita. Considera-se que os experimentos devam ser ampliados para testar um número maior de espécies de plantas e também o emprego conjunto de matéria orgânica, não constatado nos ensaios de trabalhos anteriores.

Embora a viabilidade de uso das reservas de flogopititos já depositados nas pilhas seja problemática, várias das frentes de lavra do garimpo de Carnaíba de Cima, no município de Pindobaçu se prestam ao fornecimento do material mais rico em potássio, que pode ser concentrado a partir da atividade das faiscadoras. No entanto, ainda é necessário um significativo trabalho de organização no ambiente dos garimpos para que se possa obter quantidades relevantes de flogopitito, sendo necessário considerar a disposição dos flogopititos em pilhas distintas.

Como ressalvas, os teores de Cd, embora restritos a duas amostras, devem merecer atenção especial nos flogopititos, até que se determine a proveniência deste metal potencialmente tóxico enquanto primária, ou devida à contaminação pelo processo extrativo praticado em parte dos garimpos, que, neste caso, deve ser adequado. Além disto, os já citados teores de Ni e de Cr também introduzem ressalvas quanto à utilização agronômica dos flogopititos, e recomendam ensaios agronômicos como incubação em solos e especiação do Cr.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Cooperativa Mineral da Bahia pelo apoio na logística das visitas às lavras e pelas informações compartilhadas.

REFERÊNCIAS

- BLASKOWSKI, Alessandra E.; BERGMANN, Magda; CAVALCANTE, Oliveira A. **Agrominerais da região Irecê-Jaguarari**. Salvador-BA: CPRM, 2016. CD-ROM, no prelo.
- BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. London: Mineralogical Society, 1980. 495p.
- DEER, William A.; HOWIE, Robert A.; ZUSSMANN, Jack. **Minerais constituintes das rochas: uma introdução**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 2008. 727 p.
- FRANÇA, Silvia; RONCONI, Celia. M. M.; SILVA, Adriana A. S. Estudo da cinética de liberação de potássio contido no flogopitito da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2, 2013, Poços de Caldas. **Anais...** p 200-211. Poços de Caldas: Petrobras: Embrapa, 2013.
- GARNIER, J. et al. Solid speciation and availability of chromium in ultramafic soils from Niquelândia, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v.88, p.206-209, 2006.
- SILVA, Davi José da et al. Avaliação do potencial de um resíduo de mineração na liberação de potássio e outros nutrientes em dois solos do submédio São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1, 2010a, Brasília. **Anais...** Brasília: Embrapa Cerrados, 2010.
- SILVA, A. A. S. et al. Flogopitito da Bahia como fonte de potássio para a agricultura brasileira. In: SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE, 2. 2010. Campina Grande, PB. **Anais do...** Campina Grande: CETEM/UFPE, 2010b. p. 115-123.
- RIBEIRO, L. S. et al. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34, p.891-897, 2010.
- VAN STRAATEN, P. **Agrogeology: the use of rocks for crops**. Cambridge, Ontário: Environquest, 2007. 440p.