



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar - *Campus* de Pombal - CCTA
Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental - UACTA

Rayanne Maria Galdino Silva

**INFLUÊNCIA DO ENXOFRE ELEMENTAR ADICIONADO EM UM RESÍDUO DA
MINERAÇÃO NA LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES NO SOLO**

Pombal - PB

2018

Rayanne Maria Galdino Silva

**INFLUÊNCIA DO ENXOFRE ELEMENTAR ADICIONADO EM UM RESÍDUO DA
MINERAÇÃO NA LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES NO SOLO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Josinaldo Lopes Araujo Rocha

Área de concentração: Ciência do solo

Pombal - PB

2018

S586i Silva, Rayanne Maria Galdino.
Influência do enxofre elementar adicionado em um resíduo da
mineração na liberação de nutrientes no solo / Rayanne Maria Galdino
Silva. – Pombal, 2018.
38 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de
Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Josinaldo Lopes Araujo Rocha."

1. Fertilização do solo. 2. Exploração mineral. 3. Resíduos de
mineração. 4. Mineração de vermiculita. 5. Intemperismo dos minerais. 6.
Oxidação de enxofre. 7. Sustentabilidade ambiental. I. Rocha, Josinaldo
Lopes Araujo. II. Título.

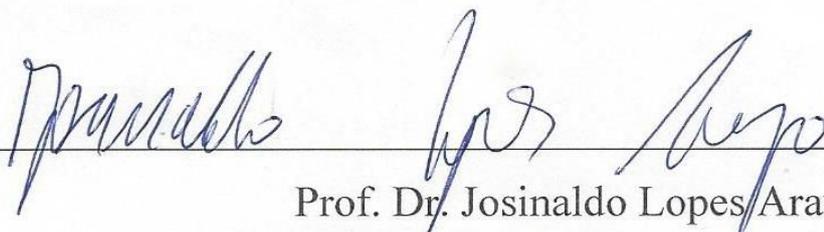
CDU 631.8(043)

RAYANNE MARIA GALDINO SILVA

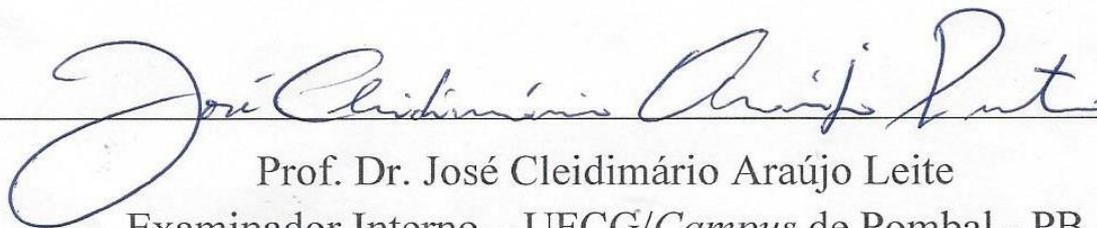
INFLUÊNCIA DO ENXOFRE ELEMENTAR ADICIONADO EM UM RESÍDUO
DA MINERAÇÃO NA LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES NO SOLO

Aprovado em 10/12/2018

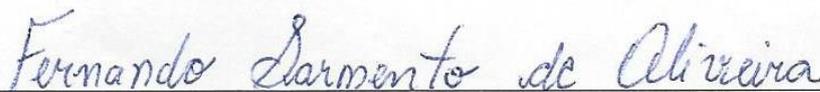
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Josinaldo Lopes Araujo Rocha
Orientador – UFCG/Campus de Pombal – PB



Prof. Dr. José Cleidimário Araújo Leite
Examinador Interno – UFCG/Campus de Pombal - PB



MSc. Fernando Sarmiento de Oliveira
Examinador Externo – Eng. Agrônomo- UFERSA

Pombal – PB

Dezembro 2018

*Para aqueles que me abriram portas,
Que me ajudaram a encontrar o caminho
E que permaneceram ao meu lado...*

*À José Galdino de Lima e,
Maria Luzia da Silva Lima,*

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me ter dado forças e permitir chegar ao fim dessa longa jornada, cuidando de mim e por me capacitar quando eu mesma não acreditava ser capaz.

Ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande, por me tornar um bacharel em minha profissão, abrindo portas para um futuro melhor.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro para conclusão deste trabalho e auxílio para novas pesquisas.

Ao Orientador e Professor Dr. Josinaldo Lopes Araujo Rocha, pela paciência, dedicação e ensinamentos.

Ao professor Renilton Correia da Costa pelas análises de DRX.

Ao Prof. Dr. José Cleidimário Araújo Leite e ao Me. Fernando Sarmiento de Oliveira, por fazerem parte da banca examinadora.

Ao Engenheiro Elidio Nunes, por me incentivar a cursar engenharia e ter me ensinado a persistir e encarar da melhor forma as dificuldades encontradas ao longo da graduação.

À minha companheira de pesquisa, Viviane Borges, por todo apoio e acompanhamento em trabalhos de campo e laboratoriais e, além de tudo, sua amizade durante todos esses anos.

Ao técnico do Laboratório de Solos, Franciezer, pela colaboração à pesquisa.

A todos os professores, funcionários e alunos do CCTA/UFCG. Deixo aqui meu profundo agradecimento.

Agradeço aos meus pais, José Galdino e Maria Luzia, por dedicarem a mim todo amor, carinho, conselhos, tempo, trabalho, paciência e atenção, sou eternamente grata, amo vocês. Primeiros orientadores de nossas vidas, que nos conduzem aos primeiros aprendizados, que hoje se consolidam na pessoa que sou e que pretendo seguir.

Às minhas irmãs, Daniele, Dalcilene e Raquel, pelo amor e singularidade de cada uma que nos completam quando estamos unidas, por todo o carinho e contribuição para realização desse sonho.

À minha amiga Lílian, que dividiu teto comigo durante quase cinco anos de curso, por me aconselhar e me tomar como irmã nos momentos difíceis.

Às minhas outras companheiras de quarto e amigas, Vitória Régia e Kaline, pelo carinho e pela convivência tão harmoniosa, aconchegante e divertida. Vocês fazem sentir-me em família.

Aos meus sobrinhos, Expedito Neto e Talita Santini, por me proporcionarem tantas alegrias.

Às inúmeras pessoas que tive a oportunidade de conhecer e conviver durante esta caminhada e pela amizade que conquistei de muitas delas, por toda diversão, aprendizado e boas energias. Dentre estas, as especiais: Priscilla, Gabriella, Olávio, Airton, Luan, Íthalo, Thomas Mayck, dentre tantas outras, pelo simples fato de acreditarem em mim e fazerem parte da minha história.

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria, e o conhecimento do Santo é entendimento.” (Provérbios 9:10).

SILVA, R. M. G. **Influência do enxofre elementar adicionado em um resíduo da mineração na liberação de nutrientes no solo**. 2018. 38 f. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental - Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar - Universidade Federal de Campina. Pombal - PB, 2018.

RESUMO

No Estado da Paraíba e no Brasil, a exploração do mineral vermiculita tem gerado grande volume de resíduos no entorno das mineradoras, que tem se tornado um passivo ambiental significativo, com potencial poluente ou contaminante. Assim, torna-se urgente uma solução racional que permita o reaproveitamento destes resíduos para diminuir o impacto ambiental desta atividade. Desta forma, neste trabalho, objetivou-se avaliar a influência de proporções de enxofre elementar adicionado a resíduo da exploração de vermiculita sobre a liberação de nutrientes no solo. Para tanto, foi realizado experimento em delineamento inteiramente casualizado em fatorial 5 x 8, sendo cinco proporções de enxofre elementar (0, 50, 100, 150 e 200 g.kg⁻¹) adicionados aos resíduo de vermiculita e oito períodos de incubação (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 e 105 dias de incubação), com quatro repetições, totalizando 160 parcelas experimentais. Durante 105 dias de incubação, a cada 15 dias, foram determinados os teores de K, Na, Ca, Mg, P, SO₄⁻² e os valores de pH. O resíduo de mineração associado ao enxofre elementar, proporcionou aumento significativo nos teores de sulfato, cálcio e de fósforo disponível, redução do pH e dos teores de K. Os teores de Mg não foram influenciados pela adição do “fertilizante”, já em relação aos teores de Na, houve aumento significativo. Pode-se afirmar que a aplicação do resíduo de mineração diretamente ao solo como fonte de potássio, mesmo sob acidez elevada não é recomendada. Da mesma forma, a elevação dos teores de Ca é insignificante em casos de aplicação em solos já ricos neste nutriente como os Vertissolos e Luvissolos.

Palavras-chave: Sustentabilidade ambiental. Vermiculita. Oxidação de enxofre. Fertilizante. Intemperismo dos minerais.

SILVA, R. M. G. **Influência do enxofre elementar adicionado em um resíduo da mineração na liberação de nutrientes no solo**. 2018. 38 f. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental - Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar - Universidade Federal de Campina. Pombal - PB, 2018.

ABSTRACT

In the state of Paraíba and Brazil, the exploration of the vermiculite mineral has a high volume of waste around the mining companies, which have made a great environmental impact with polluting potential or contaminant. Thus, a rational solution that allows the reuse of the waste to reduce the environmental impact of this activity becomes urgent. In this work, the objective of this work was the influence of proportions of elemental stimulus at the end of the vermiculite operation on the release of nutrients in the soil. The experiment was carried out in a completely randomized design in 5 x 8 factorial, with five proportions of elemental sulfur (0, 50, 100, 150 and 200 g.kg⁻¹). , 15, 30, 45, 60, 75, 90 and 105 days of incubation), with four replications, totaling 160 experimental plots. During 105 days of incubation, every 15 days, the contents of K, Na, Ca, Mg, P, SO₄⁻² and the pH values were determined. The mineralization associated with elemental sulfur provided higher sulfate, calcium and phosphorus content, lower pH and K contents. The Mg contents were not influenced by the addition of fertilizer, already in relation to the Na content, there were significant increase. You may be able to use the same analysis formula at the same time as a potassium source, even if its effectiveness is not recommended. Likewise, the framework of application cases in cases of application in soils already rich in this nutrient as the Vertisols and Luvisols.

Keywords: Environmental sustainability. Vermiculite. Oxidation of sulfur. Fertilizer. Weathering of minerals.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	10
2.1 Geral	10
2.1 Específicos	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 Aspectos gerais sobre a atividade de mineração	11
3.2 A vermiculita	13
3.3 Potencial do uso de resíduo de vermiculita na agricultura	14
4 MATERIAL E MÉTODOS	17
4.1 Local de realização do estudo	17
4.2 Caracterização do solo	18
4.3 Caracterização do resíduo de vermiculita	18
4.4 Delineamento experimental	20
4.5 Preparo do fertilizante	20
4.6 Instalação e condução do experimento	22
4.7 Caracterização química do solo no experimento	22
4.8 Análise estatística	22
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6 CONCLUSÕES	33
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

A atividade de mineração tem gerado impactos ambientais negativos em todo o mundo, seja pelo desmatamento para a implantação da lavra ou pelo acúmulo do resíduo gerado em torno das áreas de beneficiamento, uma vez que cerca de 60 a 80% do material extraído constitui resíduos não aproveitados (LEITE et al., 2016). No Bioma Caatinga, este fato é ainda mais agravante quando se considera seu elevado índice de desmatamento e de desertificação.

No Estado da Paraíba, a exploração do mineral vermiculita situa-se principalmente na região do Seridó e do Cariri. Nestas regiões, em torno das mineradoras acumulam-se milhares de toneladas de resíduos de granulometria muito variável, que são depositados na forma de “dunas” causando poluição visual. Estas grandes “pilhas” ficam expostos à ação do vento, que tendem a provocar a sua dispersão e o transporte atmosférico para outras áreas, contaminando o solo e/ou corpos d'água

Na caracterização mineralógica do resíduo de vermiculita identificou-se vermiculita, talco, Mg-hornblenda e hidrobiotita como minerais mais abundantes. Por sua vez, análises químicas realizadas constataram que K, Ca e Mg foram os nutrientes encontrados em maior proporção, cuja variação foi de: 3,5% a 4,6% de K_2O ; 9,4% a 10,0% de CaO e 16,1% a 21,0% de MgO (FRANÇA et al., 2010; SOUSA al., 2011).

O potencial de pó de rochas e minerais silicatados primários como fonte de nutrientes, especialmente de potássio, tem sido alvo de diversas pesquisas (SILVA et al., 2012; FUGIMURA et al., 2013; LI et al., 2015; LEITE et al., 2016; MACHADO et al., 2016). Estes trabalhos atestam que estes materiais apresentam alto potencial como fonte de nutrientes, entretanto, para espécies agrícolas anuais, que apresentam ciclo curto, sua utilização torna-se limitada, podendo não atender às necessidades das culturas.

Assim, apesar de apresentar elevados teores de nutrientes, a liberação de K, Ca e Mg nos resíduos da mineração de vermiculita é um processo muito lento, tendo em vista que depende do intemperismo químico dos minerais presentes (SOUSA et al., 2011; LI et al., 2015). Desta forma, quando estes resíduos são aplicados diretamente no solo como fonte de nutrientes, quase sempre não proporcionam os efeitos desejados (SANTOS et al., 2016).

Para converter minerais primários de baixa solubilidade, como os resíduos de vermiculita, em fontes de nutrientes para as plantas, faz-se necessário a adição de produtos capazes de acelerar o processo de intemperismo químico, por meio da hidrólise desses minerais. Um dos produtos com grande potencial para acelerar este processo é o enxofre elementar, cujo potencial acidificante foi comprovado em vários trabalhos (SOUSA et., 2012; SÁ et al., 2013; STAMFORD et al., 2015; ARAUJO et al., 2015). Além do enxofre elementar, a adição de ureia, como fonte de nitrogênio (N) ao resíduo, potencializa o efeito do enxofre (S), tendo em vista que a nitrificação do N da ureia gera acidez, ao mesmo tempo que o enxofre minimiza a volatilização da ureia, obtendo-se assim um fertilizante que é fonte de N, K, Ca, Mg e S para as plantas.

Apesar de acelerar o processo de intemperização dos minerais presentes no resíduo, a liberação dos nutrientes ocorre com menor velocidade em comparação com os fertilizantes comerciais solúveis, a exemplo dos fertilizantes potássicos e nitrogenados, que devido sua alta solubilidade, geralmente necessitam ser aplicados de forma parcelada para evitar perdas por lixiviação e por volatilização de potássio e nitrogênio, respectivamente, entretanto

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver um fertilizante mineral de liberação lenta contendo macronutrientes utilizando como matéria prima principal, o resíduo da exploração mineral de vermiculita, obtido da Mineradora localizada no município de Santa Luzia (PB).

2.1 Específicos

a) Estudar o efeito do enxofre elementar adicionado ao resíduo mineral sobre a disponibilidade de potássio, cálcio, magnésio e enxofre ao solo, disponíveis às plantas;

b) Avaliar a influência do enxofre elementar adicionado ao resíduo de vermiculita sobre o pH do solo;

c) Avaliar a influência da interação entre períodos de incubação do solo e proporções de enxofre elementar adicionado ao resíduo de mineração sobre os atributos químicos do solo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos gerais sobre a atividade de mineração

O crescimento da indústria mineral tem acontecido em grande escala, tanto na quantidade de matéria-prima extraída, quanto na abertura de novas minas (FERNANDES et al., 2016).

Na América Latina, o setor de mineração tem sido alvo de elevado investimento pelas companhias de mineração internacionais, principalmente as canadenses e as norte-americanas, em consonância, no Brasil, a atividade de mineração tem sido tratada como de interesse público, sendo levado em conta especialmente o poder econômico proporcionado (FERNANDES et al., 2016). Atualmente, no Brasil, esse setor tem se destacado devido à grande ampliação produtiva, estimada em 550% na mineração e lavra garimpeira (IBRAM, 2015), sendo considerado um dos maiores produtores de minérios do mundo (CARVALHO et al., 2016).

Os principais países produtores de vermiculita são África do Sul, Estados Unidos, China, Zimbábue, Austrália e Índia, e o Brasil é detentor de 11% das reservas minerais de vermiculita existentes no mundo, se destacando nesta produção por ocupar a quarta posição mundial, sendo este, um mercado com tendência à atingir países do primeiro mundo (UGARTE et al., 2008; ARAUJO et al., 2014; MAGNO, 2015).

As jazidas de vermiculita no Brasil estão localizadas nos estados da Paraíba, Goiás e Piauí e seu beneficiamento é realizado primeiramente no estado de Goiás, seguido pelo Piauí, Bahia e Paraíba (UGARTE et al., 2008). No sertão da Paraíba, é uma das atividades que se destaca em termos econômicos, no entanto, é responsável pela geração de resíduos que ficam acumulados nos pátios e que causam impactos ambientais negativos (TRAJANO et al., 2010).

Desta forma, a utilização desses resíduos como fonte de nutrientes para as plantas pode se tornar uma alternativa econômica e ambientalmente viável, reduzindo

os custos e promovendo a sustentabilidade do ambiente (FARIAS JÚNIOR et al., 2015).

Quando realizada a céu aberto, a atividade de mineração envolve a remoção do material não aproveitado, que é acumulado frequentemente ao lado ou nas proximidades da mina (PORTELLA, 2015). O resíduo produzido, em grande quantidade, se torna instável e propenso a deslizamentos e, nos períodos de precipitação é carregado para locais de relevo mais baixo e para os cursos de água, o que pode causar assoreamento, bem como inúmeros outros danos relacionados (PORTELLA, 2015).

A intensa atividade de mineração modifica o ambiente, podendo ter âmbito de ocorrência em espaço local, regional e estratégico, produzindo impactos diretos e indiretos de grande magnitude e importância. É a segunda atividade que mais causa impactos ambientais, ficando atrás apenas das atividades agropecuárias, devido não se estenderem geralmente por extensas áreas, e por gerar maiores impactos pontuais. No entanto, os danos resultantes da atividade de mineração, afeta tanto as áreas locais, como a quilômetros de distância, por ter seus efeitos dispersados pela água, Kummer et al. (2011) e pelos ventos.

Alguns dos maiores problemas ambientais enfrentados no Brasil em resposta às atividades de mineração são principalmente os relacionados à poluição das águas, do ar e sonora, geração de resíduos e degradação do subsolo (MARTIN; SANTOS, 2013). A poluição visual proveniente do desarranjo do material consolidado é um dos mais característicos da atividade (SILVA, 2007).

A degradação visual da paisagem é um dos impactos gerados pela mineração e sua reconstituição é muito complexa, o que gera um quadro preocupante (RODRIGUES et al., 2017). Quanto mais elevado for o volume e extensão da área de escavação, conseqüentemente, maior é a deposição de resíduo, que constitui uma intrusão e também um impacto visual da paisagem na área de deposição (VIEIRA et al., 2015).

A poluição das águas provocada por sedimentos e por metais pesados geralmente carregados pela chuva até os rios, lagos e mares conservam-se por longos períodos de tempo (PORTELLA, 2015). Além de afetar à saúde ecológica e social, a poluição das águas juntamente com o desmatamento, afeta a vida econômica dos grupos sociais que tiram seu sustento da pesca (RODRIGUES et al., 2017).

3.2 A vermiculita

O principal componente dos resíduos da exploração de vermiculita é o mineral vermiculita $[(\text{Mg}, \text{Fe})_3 [(\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10}] [\text{OH}]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$, embora outros minerais silicatados como biotita, talco, hornblenda e muscovita possam estar presentes. A vermiculita é um silicato hidratado de magnésio, alumínio e ferro, cujo nome é proveniente do latim *vermicullus*, nome traduzido como pequeno verme, devido sua expansão sob aquecimento que gera um movimento semelhante ao realizado por vermes (UGARTE et al., 2008).

No solo, especialmente os mais jovens, são encontradas as vermiculitas secundárias, provenientes do processo natural de intemperismo das micas presentes nas rochas. Nas micas, os teores de potássio variam de 3 a 6,5%, e ficam alojados nas extremidades da estrutura laminar da mica que, com o desgaste pelo intemperismo, aumenta-se a sua disponibilidade para participar de processos de troca iônica (FRANÇA et al., 2010).

A vermiculita também pode ter origem dos minerais biotita, diopsídio, hornblenda e serpentina (NASCIMENTO, 2008). Contudo, geralmente é resultado do intemperismo das micas, onde há liberação do potássio (K), constituinte das entrecamadas desse mineral, sendo considerado, no aspecto agrícola como fonte de K, e que pode ser usado como fertilizante (BORTOLUZZI et al., 2005; MELO; ALLEONI, 2009).

O mineral vermiculita é caracterizado por possuir baixa densidade e estrutura variável, constituído de lâminas sobrepostas de tetraedros de silício e octaedros de alumínio (CALDEIRA et al., 2013), na proporção 2:1, respectivamente, configurando assim esse tipo de mineral. Solos com presença de minerais 2:1, por terem elevada expansividade, requerem práticas específicas para uso agrícola e planejamento adequado de obras de engenharia, que devem suportar sua variação de volume (MELO; ALLEONI, 2009).

A vermiculita pode ser do tipo dioctaedral ou trioctaedral. É dita dioctaedral quando ocorre substituição do silício (Si) por alumínio (Al) nos tetraedros, e os sítios octaedrais são ocupados por Al. Já, quando ocorre a substituição de Si por Al nos tetraedros e os sítios octaedrais são ocupados por magnésio (Mg) ou ferro (Fe), a vermiculita é dita trioctaedral (MELLO; ALLEONI, 2009). Este mineral tem grande

influência sobre a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo e apresenta grande facilidade de formar complexos com a matéria orgânica (NASCIMENTO, 2008).

A comercialização da vermiculita geralmente é feita na forma expandida, podendo ter aplicação para construções civis, como isolante acústico e térmico; na indústria química, como acelerador de reações com compostos orgânicos; cerâmica; meio ambiente, na recuperação de ambientes contaminados devido ao vazamento de petróleo; e na agricultura, para melhoria de suas características físicas e nutricionais, como composto de liberação lenta de nutrientes; suporte para inseticidas; microrganismos e micronutrientes (NASCIMENTO, 2008).

A necessidade por fertilizantes é uma questão que tem se mostrado crescente à medida que há aumento na produção agrícola. Tais insumos podem ser de origem orgânica ou mineral, desde que contenham nutrientes suficientes ao desenvolvimento das espécies (SILVA, 2017). Entretanto, o uso de fertilizantes minerais solúveis, de forma indiscriminada pode causar impactos ambientais negativos sobre os diversos componentes do ambiente. Desta forma, a utilização de resíduos de mineração com potencial agrícola, com manejo adequado, pode contribuir na mitigação destes impactos.

3.3 Potencial do uso de resíduo de vermiculita na agricultura

A exploração do potencial de uso agrônômico dos resíduos de mineração de vermiculita foi alvo de diversas pesquisas.

Rodrigues et al. (2014), ao testarem a viabilidade de se utilizar diferentes tipos de substrato no desenvolvimento de mudas de Sabiá (*Mimosa caesalpinifolia Benth*), observaram que os substratos solo mais resíduos de vermiculita e solo mais esterco bovino tiveram resultados satisfatórios, e produziram mudas com qualidade superior, diferentemente do tratamento no qual se aplicou apenas solo mais húmus, em que não se obteve resultados positivos.

Em trabalho realizado por Noberto (2013), foi testado o efeito de substrato à base de rejeito de vermiculita e de fibra coco verde no enraizamento de *Cnidocolus quercifolius Pohl* pela técnica da alporquia. O autor observou que ambos os materiais promoveram maior porcentagem de enraizamento e que os melhores resultados foram obtidos com o uso do rejeito de vermiculita e uma combinação de fibra da casca de coco verde mais pó da casca de coco verde mais rejeito de vermiculita.

Holanda Leite e Bakke (2018) ao testarem o uso dos coprodutos finos e extrafinos da extração da vermiculita misturados a doses fixas de esterco bovino, obtiveram resultados positivos na produção de mudas de faveleira (*Cnidoscolus quercifolius Pohl*), promovendo desenvolvimento semelhante ou superior ao de mudas usando o substrato convencional.

Ao avaliarem o crescimento inicial do maracujazeiro usando tratamentos com resíduos de mineração, dentre eles o de vermiculita, Santos e Gomes (2015), indicaram o uso do rejeito de vermiculita mais composto orgânico para o cultivo de maracujá, considerando que o mesmo promoveu aumento significativo no diâmetro das mudas.

França et al. (2010) avaliaram o potencial de resíduo de vermiculita como fonte de liberação de K para a agricultura, a partir da extração em solução. Os resultados obtidos nesse trabalho evidenciaram que a liberação de K do resíduo foi pequena, em um curto período de avaliação. Contudo, de acordo com os autores, o resíduo de vermiculita pode ser uma ótima alternativa como fertilizante de liberação lenta, e citam a necessidade de estudos com ensaio de longa duração.

Uma das limitações para o uso agrícola dos resíduos de vermiculita é a elevada resistência dos minerais constituintes ao processo de intemperismo e, por conseguinte, de liberação de nutrientes no solo.

A resistência dos minerais ao intemperismo está relacionada principalmente a composição química, estrutura e tamanho (KER et al., 2012). Este fato está evidenciado pela velocidade na qual ocorre este processo, variando de material para material, enquanto que alguns intemperizam mais rapidamente (10^3 anos), outros demoram muito tempo (10^5 a 10^6 anos) (NAHON; BIRKELAND apud KER et al., 2012, p. 190).

A augita (piroxênio) é mais estável que a olivina e menos que a hornblenda que por sua vez é mais estável que a biotita, enquanto o feldspato potássico é mais resistente que plagiocásios cálcio e sódicos e, dentre os silicatos de Al, a muscovita é geralmente a mais resistente (KER et al., 2012). Sendo assim, em ordem do mineral mais resistente para o menos resistente, Goldich apud Ker et al. (2012) estabeleceram a seguinte sequência: quartzo, muscovita, feldspato-K, biotita, hornblenda, augita e olivina. A mica tem baixa resistência ao intemperismo se comparada à vermiculita e à caulinita (DEMATTE; HOLLOWAYCHUCK, 1977).

Silva (2016) testou em vários níveis de complexidade (*in vitro*; em colunas de solo; em vasos com plantas e em campo) a dissolução de um pó de rocha (remineralizador), avaliando suas alterações mineralógicas. Em seus resultados foi possível constatar o aumento nos teores de Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} trocáveis no solo, Na, Fe, e Si, além disso, o autor afirma que em todos os níveis de experimentação, os plagioclásios cálcio-sódicos e clinopiroxênios foram os maiores responsáveis pelo fornecimento de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , Fe e Si.

O pó de rocha foi a fonte mais eficiente para acúmulo de potássio pelas plantas dentre os tratamentos arranjados por Rodrigues (2017), que avaliou em experimento a reatividade e eficiência agrônômica do hidropotássio e pó de rocha sienítica ultrapotássica.

Santos et al. (2015), ao avaliarem os efeitos da adição de doses de pó de rocha no feijão comum, em experimento conduzido na Estação Experimental de Lagoa Seca-PB, verificaram aumento significativo na produtividade da cultura, indicando o pó de rocha para adubação de feijoeiro em sistema de agricultura familiar.

Alovisi et al. (2017), em pesquisa na qual avaliaram a liberação de nutrientes em pó de rocha, os autores aplicaram cinco doses de pó de basalto no solo associadas a três períodos de incubação, e observaram o aumento nos teores de Ca e Mg no tempo de incubação de 90 dias, indicando que o pó de rocha pode ser utilizado como fonte alternativa de fertilizante no solo.

De maneira geral, os solos tropicais, como a maioria dos solos brasileiros, são pobres em nutrientes e para produzirem adequadamente necessitam de fertilização mineral e, ou orgânica (LOPES; GUILHERME, 2007). Contudo, a maior parte dos fertilizantes consumidos no Brasil é importada, deixando o Brasil altamente dependente de países como o Canadá, Rússia, Estados Unidos e China em relação a aquisição destes insumos (IBRAM, 2010).

Além disso, geralmente os fertilizantes minerais comerciais, altamente solúveis em água, apresentam baixa eficiência devido aos processos de fixação no caso do fósforo, lixiviação de potássio e principalmente volatilização de N, no caso dos fertilizantes nitrogenados, cujas perdas podem ser superiores a 50% (DOMINGHETTI et al., 2016), causando prejuízos econômicos e ambientais. Sendo assim, a elevada solubilidade dos sais aplicados na agricultura tem dois lados: fácil assimilação pelas plantas, mas elevadas perdas por lixiviação (FRANÇA, 2010).

Atualmente, o enxofre elementar (S^0) tem sido constituinte de diversos fertilizantes nitrogenados de liberação controlada (STAMFORD et al., 2015; DOMINGHETTI et al., 2016). Ao ser adicionado ao solo, juntamente com o fertilizante, o enxofre elementar sofre oxidação biológica por bactérias *Acidithiobacillus thiooxidans*, gerando ácido sulfúrico (STAMFORD et al., 2015). Contudo, a adição do S^0 em resíduos de mineração visando acelerar as taxas de liberação de nutrientes e, assim, produzir fertilizantes de liberação controlada, tem sido pouco explorada pelas pesquisas.

Durante a oxidação do S^0 , o sulfato gerado nesta oxidação pode ser absorvido pelas plantas, e os íons H^+ resultantes da reação, em contato com minerais primários, aceleram seu processo de intemperismo químico através da hidrólise, podendo liberar Ca, Mg e K presentes em minerais como aqueles do grupo das micas, como a biotita, vermiculita e muscovita (SÁ et al., 2015).

A acidez gerada pela oxidação do enxofre elementar também contribui para diminuir as perdas de N por volatilização da ureia na forma de amônia (DOMINGHETTI et al., 2016). Por outro lado, o amônio oriundo da ureia, ao ser convertido a nitrato pelo processo de nitrificação, gera acidez no solo, a qual irá contribuir com o intemperismo de minerais primários como já mencionado.

Em trabalhos realizados por Sousa et al. (2012), Sá et al. (2013), Araújo et al. (2015), os autores verificaram que a adição de enxofre elementar ao solo salino-sódico reduziu drasticamente o pH do solo e elevou os teores de Ca, Mg e K no solo. Os autores atribuíram este efeito à aceleração do intemperismo de minerais primários do solo, como as micas e os feldspatos. Nestes trabalhos, ficou evidente que a oxidação do enxofre elementar ocorreu de forma natural, sem a necessidade da inoculação do enxofre elementar com bactérias do gênero *Acidithiobacillus*, e que as elevadas temperaturas, normalmente observadas em clima semiárido, pode ter favorecido este processo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local de realização do estudo

O estudo foi realizado em casa de vegetação, pertencente ao Centro de Ciência e Tecnologia Agroalimentar (CCTA) da Universidade Federal de Campina Grande

(UFCG), no município de Pombal-PB a 06° 46' 13" S e 37° 48' 06" W, com altitude 184m e temperatura média de 27° C.

4.2 Caracterização do solo

. O solo para a realização do estudo foi coletado na camada de 0-20 cm em área de Luvisolo Crômico, localizada no município de São Domingos-PB. Após secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2,0 mm, as amostras de solo foram encaminhadas ao Laboratório de Solos e Nutrição Mineral de Plantas do CCTA/UFCG para sua caracterização química e física, conforme procedimentos descritos em Embrapa (2011).

Foi determinado o pH em CaCl_2 a $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, os teores de Ca^{+2} , Mg^{+2} , H + Al, Na^+ , K^+ trocáveis, P disponível e matéria orgânica. A caracterização física constou da determinação dos teores de areia, silte e argila, densidade do solo (densidade global), densidade de partículas (Tabela 1).

Tabela 1 - Atributos físico-químicos do solo utilizado no experimento.

pH	M.O	P	K^+	Na^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$	CTC
CaCl_2	g/kg	mg/kg	----- $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ -----					
5,0	8,16	5,4	0,22	0,23	5,4	3,3	1,48	10,63
Areia	Silte	Argila	Densidade de partículas		Densidade do solo			
----- g.kg^{-1} -----			----- g cm^{-3} -----					
636,8	97,2	266,0	2,67		1,40			

Fonte: Dados da pesquisa.

Onde:

pH = Potencial hidrogeniônico

M.O = Matéria orgânica

P = Fósforo

K^+ = Potássio

Na^+ = Sódio

Ca^{+2} = Cálcio

Mg^{+2} = Magnésio

$\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$ = Hidrogênio + alumínio

CTC = Capacidade de troca de cátions

4.3 Caracterização do resíduo de vermiculita

O resíduo de vermiculita foi obtido em uma área de descarte próxima a mineradora União Brasileira de Mineração (UBM), localizada no município de Santa

Luzia-PB (Figura 1). Após passar em peneira de 2,0 mm, o resíduo foi analisado quimicamente (Tabela 2) de acordo com os procedimentos descritos em Embrapa (2013) para análise de solo. A caracterização mineralógica do resíduo foi efetuada por difração de raios-X (DRX), a partir de uma amostra moída com granulometria de 200 mesh (74 μm). Os difratogramas (Figura 2) gerados foram interpretados com o auxílio do *Software* CRYOSYSTEMS (1999) e da literatura (RESENDE et al., 2005).

Figura 1 - Resíduo de vermiculita disposto sobre o solo próximo à mineradora UBM em Santa Luzia-PB.



Fonte: Fotografia da autora.

Tabela 2 - Atributos químicos do resíduo de vermiculita utilizado no experimento.

K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ + Al ³⁺	MO
-----cmol _c .dm ⁻³ -----					g.kg ⁻¹
0,35	1,54	7,48	30,32	0,0	0,29

Fonte: Dados da pesquisa.

Onde:

M.O = Matéria orgânica

K⁺ = Potássio

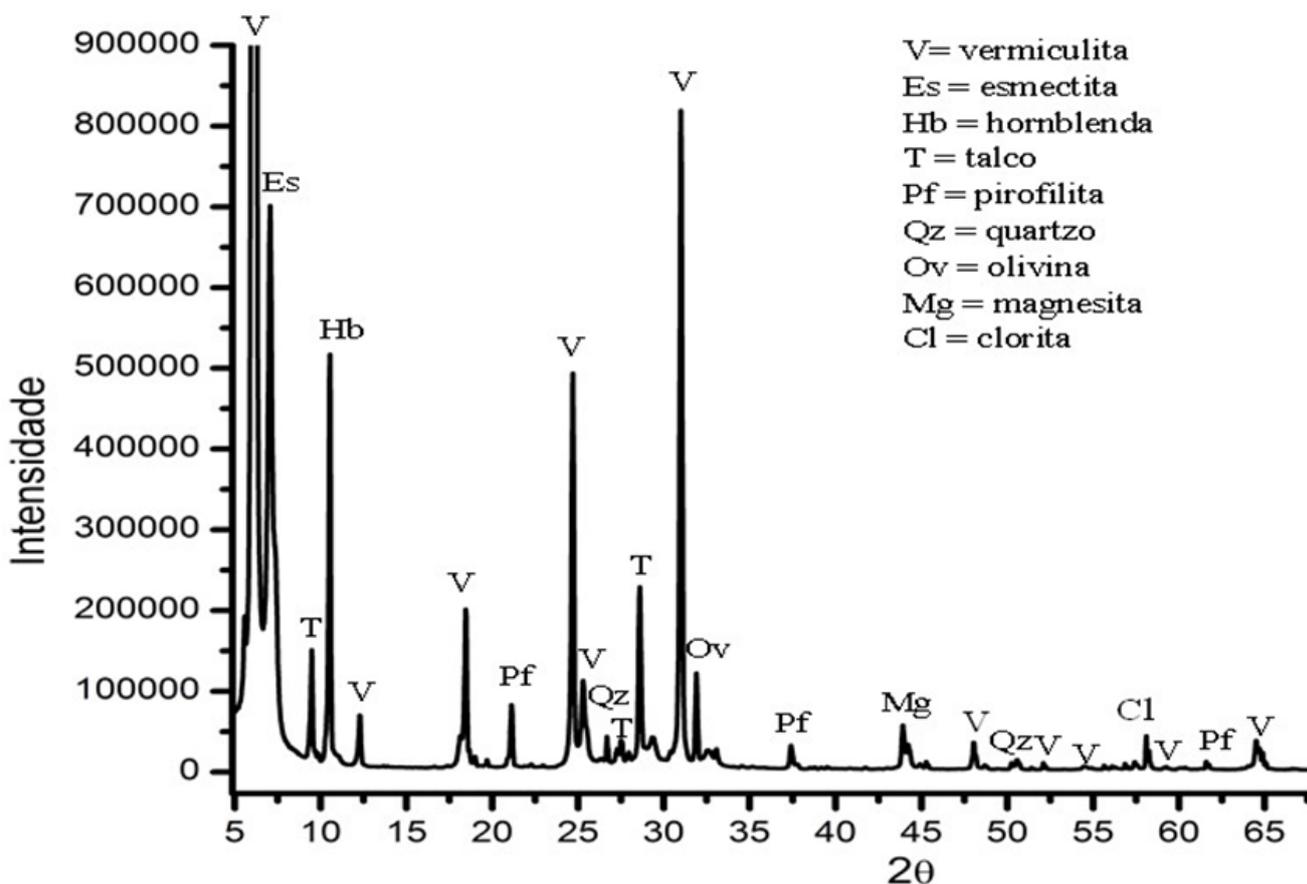
Na⁺ = Sódio

Ca²⁺ = Cálcio

Mg²⁺ = Magnésio

H⁺ + Al³⁺ = Hidrogênio + alumínio

Figura 2 - Difratoograma de raios-X (DRX) do resíduo de vermiculita.



Fonte: Dados da pesquisa.

4.4 Delineamento experimental

Para a determinação da proporção ideal do S^o a ser adicionado ao resíduo de vermiculita, foi realizado um experimento em delineamento inteiramente casualizado, em esquema de fatorial 5 x 8, sendo cinco proporções de enxofre elementar (0, 50, 100, 150 e 200 g.kg⁻¹ do resíduo) adicionados ao resíduo de vermiculita e oito períodos de incubação (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 e 105 dias), com quatro repetições, totalizando 160 parcelas experimentais. Cada parcela foi constituída por um vaso com 1,0 dm³ de solo. As doses de S^o aplicadas foram de 0, 216, 432, 648 e 864 mg de S^o.dm⁻³ de solo.

4.5 Preparo do fertilizante

O resíduo de vermiculita foi passado em peneira de 0,2 mm e enriquecido com enxofre elementar (S^o) na forma de reagente em pó, nas doses calculadas de acordo

com os tratamentos. Em seguida, foi aplicada ao produto obtido, ureia comercial contendo 45% de N, na dose de 5g de N/100g de resíduo (Figura 3) e homogeneizado (Figura 4). A dose do "fertilizante" aplicada no solo foi de 4,33 g/dm³ ou 8,66 t/ha na camada de 0 a 20 cm. Esta dose correspondeu a dose teórica de 300 kg de K₂O/ha, considerando um teor total de 3,46% de K₂O (SOUSA et al., 2011).

Figura 3 - Proporções de enxofre elementar dos tratamentos.



Fonte: Fotografia da autora.

Figura 4 - Etapa da homogeneização do fertilizante.



Fonte: Fotografia da autora

4.6 Instalação e condução do experimento

Após seu preparo, o “fertilizante” foi misturado a 1,0 dm³ de solo contido nos vasos plásticos, durante todo o período experimental, o solo foi mantido com 60% da capacidade de campo. O controle da umidade foi realizado diariamente mediante pesagem por amostragem (Figura 5).

Figura 5 - Experimento montado em casa de vegetação do CCTA/UFCG.



Fonte: Fotografia da autora.

4.7 Caracterização química do solo no experimento

Durante 105 dias, em intervalos de 15 dias, o solo contido nos vasos dos respectivos tratamentos foi homogeneizado, seco ao ar, destorroado, peneirado em peneira de malha de 2,0 mm e, posteriormente, analisado quanto ao pH e os teores de K, Ca, Mg, Na, P e SO₄²⁻, de acordo com as metodologias descritas em Embrapa (2011).

4.8 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste de F e de regressão, ambas ao nível de 5% de significância, utilizando-se o *software* SISVAR (FERREIRA, 2011). Os coeficientes das funções foram testadas pelo teste t de Student. Para as variáveis cujos fatores em estudo apresentaram interação

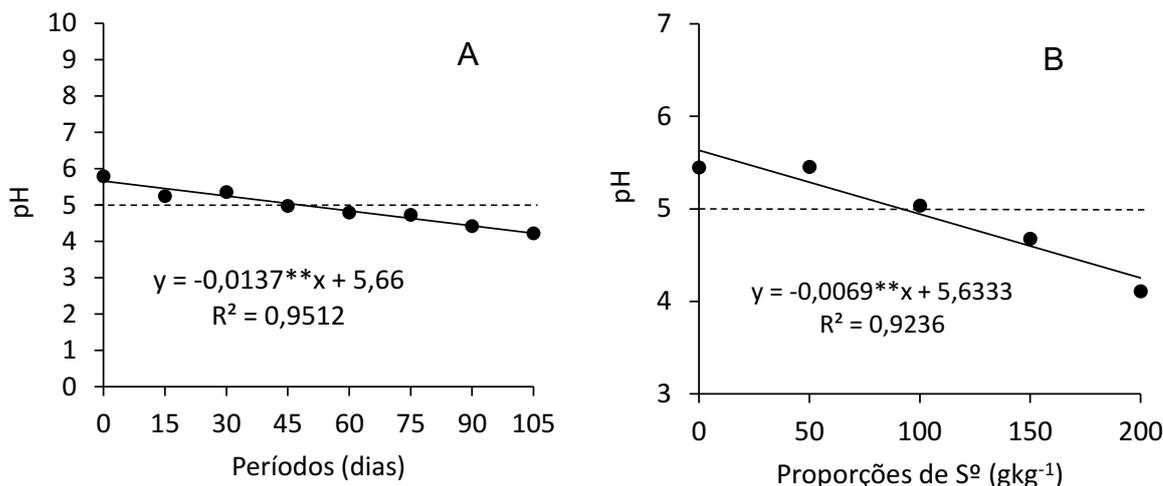
significativa, foram ajustadas superfícies de resposta plana ou paraboloide, enquanto para as variáveis que foram influenciadas apenas pelos fatores de forma isolada, foram ajustadas curvas de regressão linear ou quadrática utilizando-se o *software* SigmaPlot 2011.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de pH do solo foram influenciados pelos fatores em estudo apenas de forma isolada (Figuras 6A e 6B). Houve decréscimo do pH ao longo dos períodos de avaliação, e de forma mais acentuada em função das proporções de enxofre elementar (S°).

O decréscimo do pH do solo devido à oxidação do S° é fundamental para acelerar o processo de liberação de nutrientes do resíduo de mineração em estudo. Contudo, vale ressaltar que, em valores de pH muito ácido (menor que 5,0) a maioria das espécies vegetais apresentam dificuldade no seu crescimento e desenvolvimento. Desta forma, a adição de proporções muito elevadas de S° no resíduo de mineração pode trazer complicações ao solo em relação à disponibilidade de nutrientes e, principalmente, ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas.

Figura 6 – Valores de pH do solo em função dos períodos de incubação e das proporções de enxofre elementar aplicado ao resíduo de vermiculita.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Legenda:

Ns = Não significativo

* = Significância ao nível de 5%

** = significância ao nível de 1%

R² = Coeficiente de determinação.

As linhas pontilhadas, paralelas ao eixo "X" representam os valores iniciais do solo.

Houve interação significativa entre os fatores períodos de avaliação e proporções de enxofre elementar (S⁰) para os teores de sulfato, cálcio e sódio (Figuras 7, 8 e 11).

Os teores de sulfato ajustaram-se ao modelo de superfície de resposta plana (Figura 7), ou seja, houve aumento linear significativo de sulfato com os períodos de avaliação e especialmente com as proporções de S⁰ adicionados ao solo.

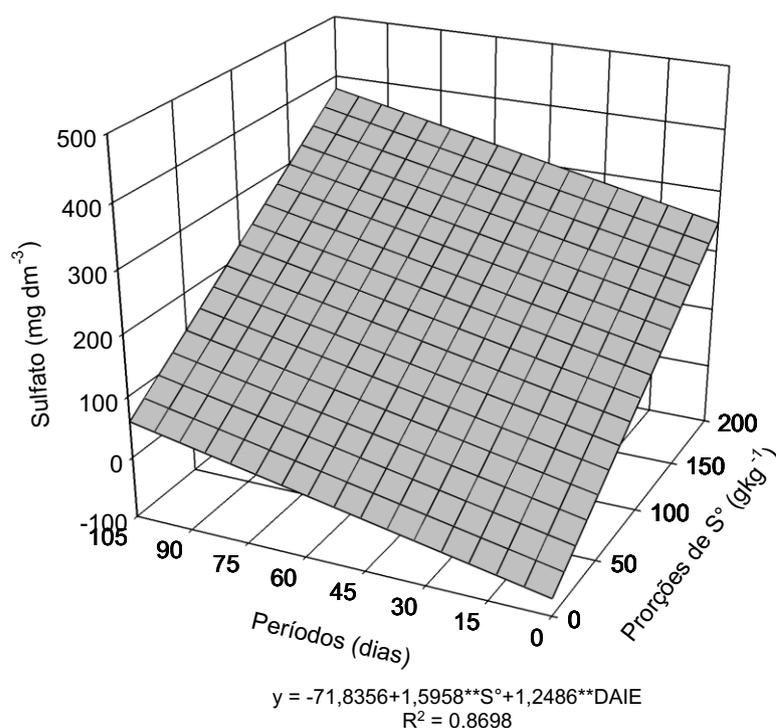
O aumento nos níveis de sulfato do solo em função dos períodos de incubação e das proporções de S⁰ (Figura 7), explicam a diminuição do pH do solo, o qual ocorreu devido a oxidação do S⁰. Ao ser adicionado ao solo, juntamente com o fertilizante, o enxofre elementar sofre oxidação biológica por bactérias *Acidithiobacillus thiooxidans*, gerando ácido sulfúrico (STAMFORD et al., 2015), fato também observado por Sá et al. (2013), Araújo et al. (2015) e Araújo et al. (2017).

O aumento dos teores de sulfato no solo em função das proporções de S⁰ ao longo do tempo de incubação, indica que não houve restrição ao processo de oxidação de S⁰ no solo estudado. Neste sentido, considerando a dose máxima de S⁰, 864 mg de S⁰.dm⁻³ de solo, nas proporções de 200 g.kg⁻¹ de resíduo, e que o solo apresenta

baixíssimos teores de matéria orgânica, estima-se que no período do estudo, cerca de 46% do S° foi oxidado.

Destaca-se que a vantagem da adição de S° ao resíduo de mineração para produzir acidez, e assim, acelerar a hidrólise dos minerais presentes na sua composição, é que o S° na forma de sulfato gerado é absorvido pelas plantas, o que se torna fundamental especialmente em solos pobres em matéria orgânica.

Figura 7 – Concentrações de sulfato no solo em função das proporções de enxofre elementar adicionado a resíduo de vermiculita e do tempo de incubação.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Legenda:

Ns = Não significativo

* = Significância ao nível de 5%

** = significância ao nível de 1%

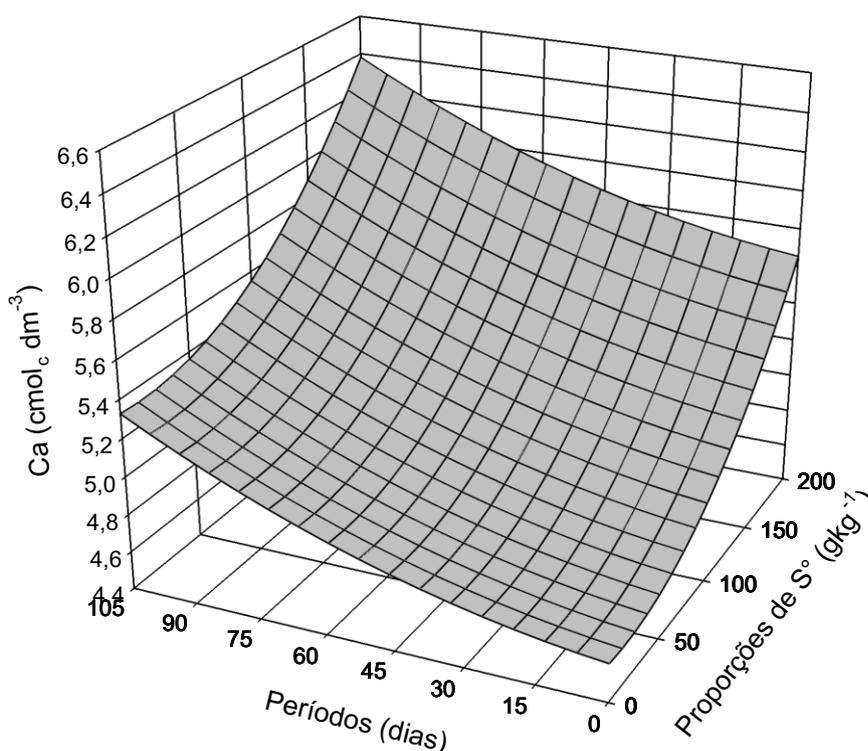
R² = Coeficiente de determinação.

Os teores de Ca (Figura 8) ajustaram-se ao modelo de superfície parabolóide, elevando-se de forma significativa em função do aumento tempo de incubação e das proporções de S°. Este fato poderia ser explicado pela acidez gerada pela oxidação do enxofre elementar, que aceleraria o processo de intemperismo químico dos minerais adicionados ao solo na forma do resíduo de mineração de vermiculita e, ou

de outros minerais de fácil intemperização oriundos no próprio solo (ARAÚJO et al., 2015).

Em comparação com os teores iniciais no solo (Tabela 1), houve um aumento de 18,5% nos teores trocáveis de Ca na maior proporção de S°. Em trabalho realizado por Araújo et al. (2017), em que foram testadas doses de S° sobre crescimento inicial de crabeira e os atributos químicos do solo, os autores observaram que a adição de S° também elevou os teores de Ca no solo.

Figura 8 - Concentrações de cálcio no solo em função das proporções de enxofre elementar adicionado a residuo de vermiculita e do tempo de incubação.



$$y = 4,6003 - 0,0008 * S^{\circ} + 0,0022 * DAIE + 0,000035 * S^{\circ 2} + 0,00004457 ** DAIE^2$$

$$R^2 = 0,6380$$

Fonte: Resultados da pesquisa.

Legenda:

Ns = Não significativo

* = Significância ao nível de 5%

** = significância ao nível de 1%

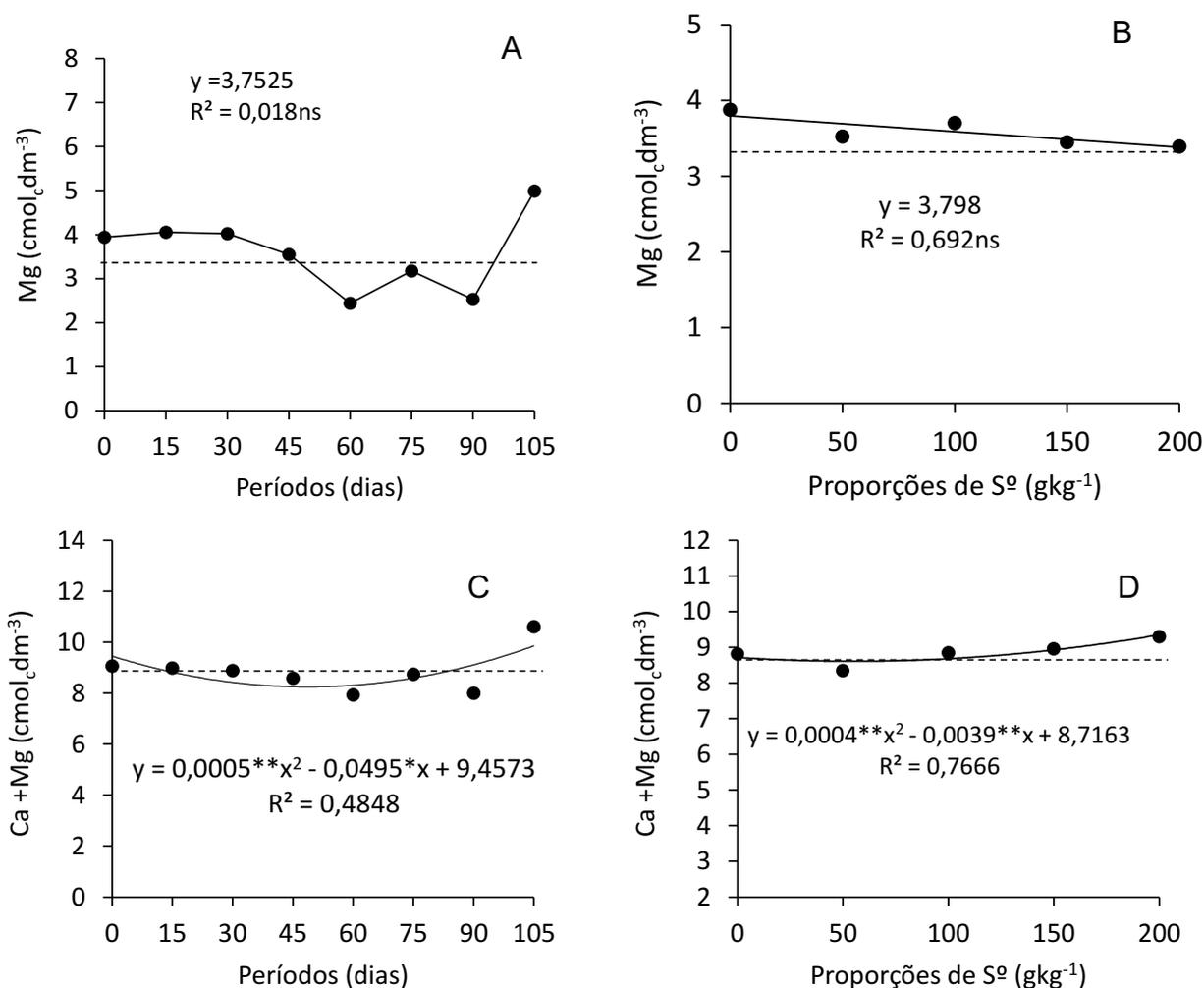
R² = Coeficiente de determinação.

Para os teores de magnésio, não houve influência significativa do período de avaliação (Figura 9A) nem das proporções de S° (Figura 9B). Já para a variável

Ca+Mg, houve ajuste quadrático, tanto em função dos períodos de avaliação (Figura 9C), quanto para as proporções de S° (Figura 9D). Tal fato é justificado pelos efeitos dos períodos e das proporções de S° sobre os teores de Ca. Estes resultados indicam que, embora o resíduo de vermiculita aplicado ao solo, tenha em sua composição minerais contendo Mg (Tabela 2), a adição de enxofre elementar nas proporções utilizadas na presente pesquisa, não foram suficientes para acelerar o processo de liberação deste elemento no solo.

Em comparação com os teores iniciais (Tabela 1), houve um aumento médio de 13,6% nos teores trocáveis de Mg, fato provavelmente associado aos elevados teores trocáveis desse elemento no resíduo (Tabela 2).

Figura 9 – Concentrações de Mg (A e B) e de Ca+Mg (C e D) no solo em função dos períodos de incubação e das proporções de enxofre elemental aplicado ao resíduo de vermiculita.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Legenda:

Ns = Não significativo

* = Significância ao nível de 5%

** = significância ao nível de 1%

R² = Coeficiente de determinação.

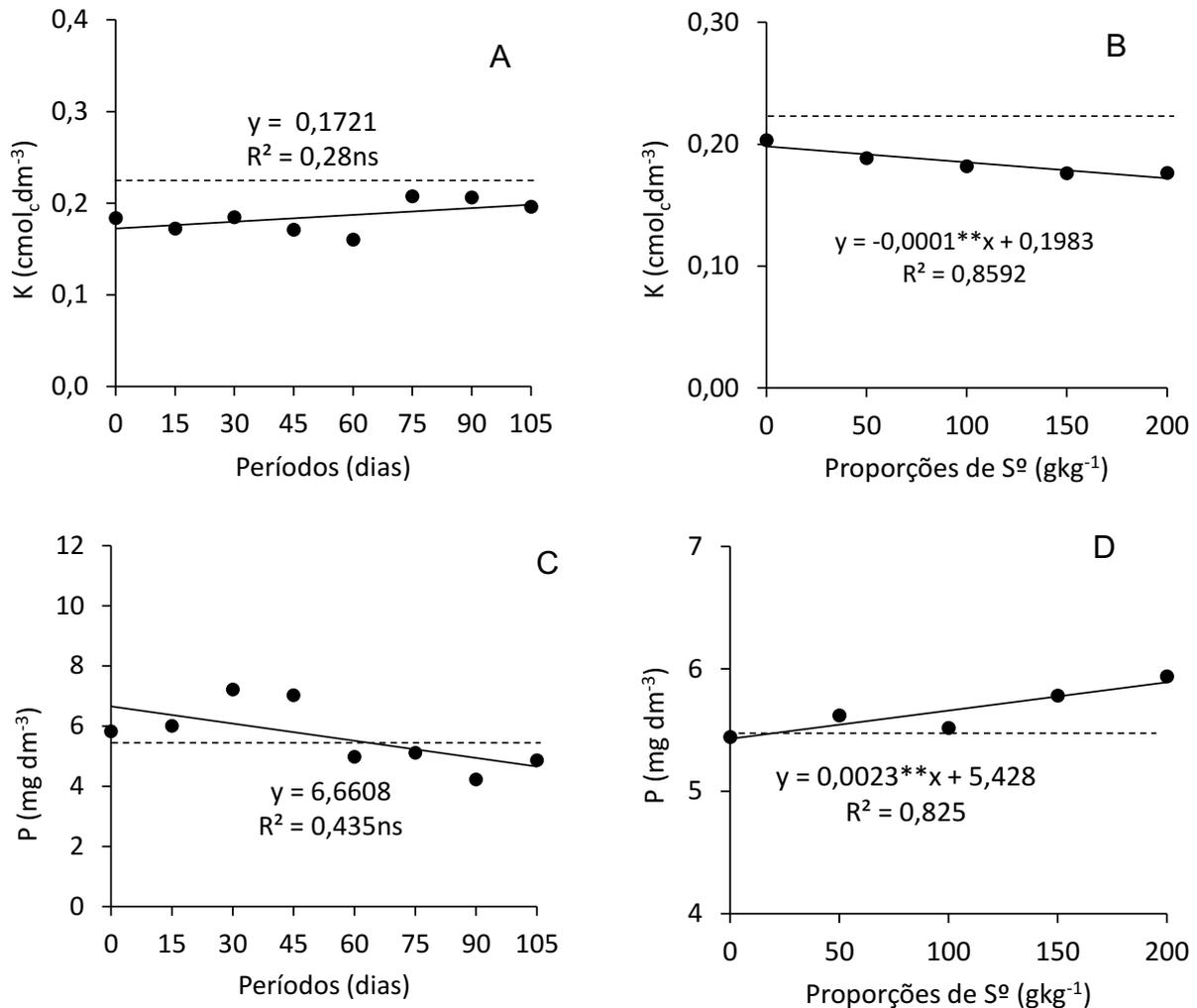
As linhas pontilhadas, paralelas ao eixo "X" representam os valores iniciais do solo.

Os teores de K trocável não se alteraram significativamente em função dos períodos de avaliação (Figura 10A). Contudo, ao contrário do que se esperava, houve um leve decréscimo em função do aumento das proporções de S^o (Figura 10B). Este fato pode ter ocorrido pelo aumento dos teores trocáveis de Ca no solo, o qual tem preferência em relação ao K no processo de adsorção na CTC do solo (McBRIDE, 1994), tendo em vista que se trata de um cátion bivalente em comparação com o K,

que é monovalente. Outra explicação plausível para este decréscimo, seria possíveis modificações estruturais da vermiculita em função da acidez gerada pelas proporções de S^o, favorecendo, em última estância, a fixação de K nestes minerais (FRANÇA et al., 2010).

De acordo com estes resultados, infere-se que a redução do pH do solo para valores em torno de 3,5 a 4,0 não é suficiente para aumentar a liberação de K contido nos minerais presentes no resíduo de mineração estudado. Além do mais, o íon K presente nas micas, mineral do mesmo grupo da vermiculita, tem elevada energia de ligação, o que torna o K pouco susceptível a trocas (FRANÇA et al., 2010), e, portanto, de liberação muito lenta, mesmo sob acidez elevada.

Figura 10 – Concentrações de K (A e B) e de P (C e D) no solo em função dos períodos de incubação e das proporções de enxofre elemental aplicado ao resíduo de vermiculita.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Legenda:

Ns = Não significativo

* = Significância ao nível de 5%

** = significância ao nível de 1%

R² = Coeficiente de determinação.

As linhas pontilhadas, paralelas ao eixo "X" representam os valores iniciais do solo.

Os teores de fósforo não sofreram alteração significativa em função dos períodos de avaliação (Figura 10C), entretanto, se elevaram de forma linear em função do aumento das proporções de S^o (Figura 10D). Considerando os baixos teores de P normalmente presentes no resíduo de vermiculita (SOUZA et al., 2011), este fato ocorreu, provavelmente devido ao aumento dos teores de sulfato no solo, visto que este ânion compete pelos mesmos sítios de fixação de P no solo,

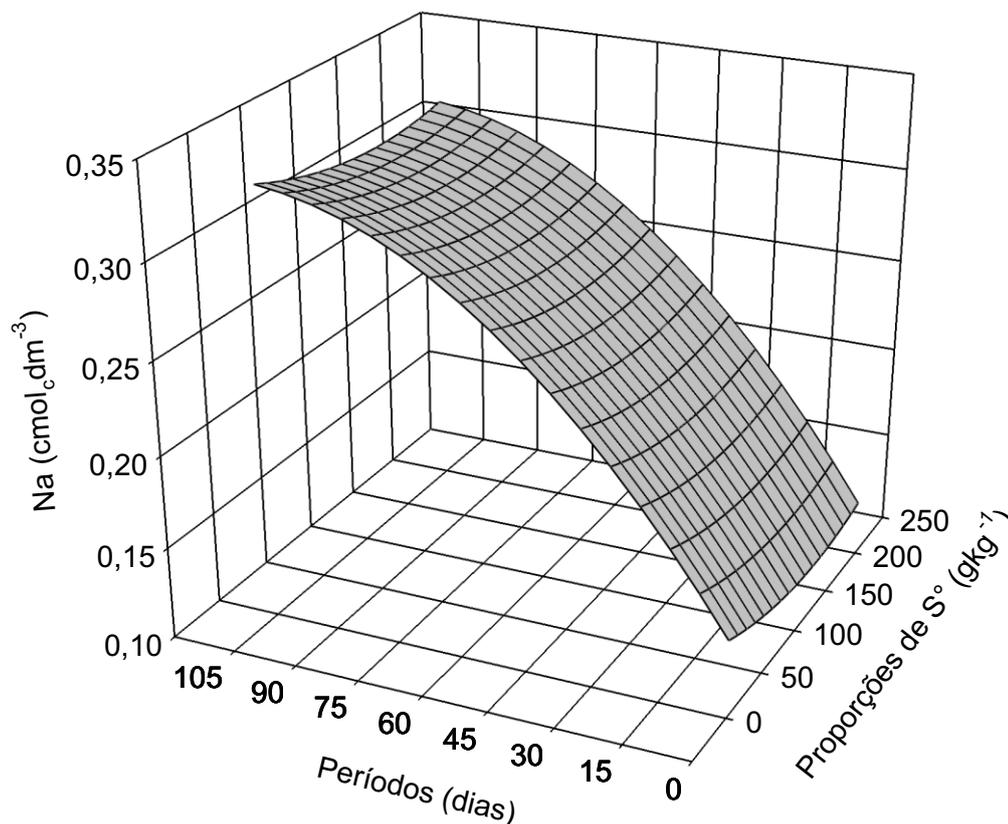
aumentando assim a disponibilidade de P (FRANDOLOSO et al., 2010). Adicionalmente, é possível que a acidificação do solo pelo enxofre elementar tenha aumentado a solubilidade de fosfatos fixados como fosfatos de cálcio no solo (HASHEMIMAJD et al., 2012).

Em relação ao P, ressalta-se que, embora tenha havido efeito significativo para as proporções de S^o, o aumento observado é muito pequeno em relação às necessidades das plantas e provavelmente não produziria qualquer efeito prático sobre a nutrição fosfatada das plantas.

Os teores de sódio trocável (Figura 11), por sua vez, elevaram-se de forma significativa em função dos períodos de avaliação, entretanto, não foram influenciados pelas proporções de S^o. Este fato provavelmente se deve a alta solubilidade do sódio nos minerais, em comparação com outros cátions como Ca, K e Mg (McBRIDE, 1994). Assim, tanto a acidez gerada pela nitrificação do N-ureia, quanto a acidez gerada no processo de oxidação biológica do S^o, poderia explicar a liberação deste elemento ao longo dos períodos de incubação.

Cabe ressaltar que, apesar da liberação de Na não ter sido demasiadamente elevada, o acúmulo deste elemento no solo é indesejável, tendo em vista que quando a relação deste elemento na CTC do solo é superior a 15%, diversos problemas físicos e químicos no solo podem surgir (SÁ et al., 2013), a exemplo da diminuição da porosidade e do movimento de água e toxicidade às plantas.

Figura 11 - Concentrações de sódio no solo em função das proporções de enxofre elementar adicionado a resíduo de vermiculita e do tempo de incubação.



$$y = 0,1422 - 0,0003 * S^{\circ} + 0,0033 * DAIE + 0,00000097 * S^{\circ 2} + 0,0000148 ** DAIE^2$$

$$R^2 = 0,6550$$

Fonte: Resultados da pesquisa

Legenda:

Ns = Não significativo

* = Significância ao nível de 5%

** = significância ao nível de 1%

R² = Coeficiente de determinação.

De maneira geral, estes resultados indicam que as adições de enxofre elementar no resíduo de mineração nas proporções utilizadas no presente trabalho podem favorecer o aumento dos teores de Ca no solo, mas, provavelmente, não são capazes de acelerar o processo de intemperismo dos minerais presentes no resíduo de vermiculita e elevar os teores de Mg e de K.

Adicionalmente, é válido mencionar que o aumento dos teores de Ca obtidos com as proporções de S^o não tenha sido originado exclusivamente do intemperismo de minerais oriundos do resíduo de mineração, mas também daqueles do próprio solo, e de mais fácil intemperização do que aqueles presentes no resíduo de vermiculita. Contudo, a confirmação desta hipótese só seria possível com a execução de outro experimento com o mesmo número de parcelas, ou seja, avaliação do solo recebendo

apenas as doses de S° correspondentes àquelas aplicadas pelas proporções deste produto no solo. Entretanto, este outro experimento não foi realizado devido às limitações de infraestrutura e financeira da pesquisa.

6 CONCLUSÕES

- O resíduo de mineração associado ao enxofre elementar, proporcionou aumento nos teores de sulfato, cálcio e de fósforo disponível e diminuição do pH;
- Os teores de Mg não foram elevados com a aplicação do resíduo associado ao enxofre elementar;
- O resíduo de mineração diminuiu a disponibilidade de potássio no solo;
- Houve elevação nos teores de Na no solo com a aplicação do “fertilizante”, o que pode implicar no acúmulo desse nutriente no solo, e assim, exigindo cautela no reaproveitamento desse passivo ambiental;
- Pode-se afirmar que a aplicação do resíduo de mineração diretamente ao solo como fonte de potássio, mesmo sob acidez elevada não é recomendada. Da mesma forma, a elevação dos teores de Ca é insignificante em casos de aplicação em solos já ricos neste nutriente como os Vertissolos e Luvisolos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da presente pesquisa devem ser interpretados e utilizados com a devida cautela em função das muitas limitações das condições experimentais nas quais foi realizado.

É recomendável estudos futuros sobre a influência de doses do resíduo de mineração de vermiculita em solos de baixa CTC e/ou com elevado grau de intemperização, associados a técnicas que aumentem as taxas de liberação de K, Ca e Mg no solo.

Finalmente, destaca-se que, devido à presença significativa do mineral vermiculita no resíduo estudado, muito dos efeitos positivos destes materiais, observados nas plantas em outras pesquisas, deve-se, provavelmente, ao aumento da retenção de umidade do solo, tendo em vista a grande capacidade que a

vermiculita tem na adsorção de moléculas de água. Desta forma, estudos sobre a utilização destes resíduos na composição de substratos para produção de mudas ou como parte do substrato para covas no plantio de espécies arbóreas são fundamentais para melhor entendimento e aproveitamento deste grande passivo ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALOVISI, Alessandra Mayumi Tokura et al. Alterações nos atributos químicos do solo com aplicação de pó de basalto. **Acta Iguazu**, v. 6, n. 5, p. 69-79, 2017.

ARAUJO, Eliane Rocha; OLIVIERI, Renata Damico; FERNANDES, Francisco Rego Chaves. **Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente**. 2014.

ARAUJO, J.L.; SEVERO, P.J.S.; LUCENA, F.T.C.; VERIATO, R.G.; PAIVA, K.F. Enxofre elementar ou sulfato de cálcio para remediação de solos salino-sódicos?. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 4, p. 388-396, 2015.

ARAUJO, JOSINALDO LOPES et al. Crescimento inicial de craibeira em solo salinizado corrigido com enxofre elementar. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 647, 2017.

BORTOLUZZI, E. C.; SANTO, D. R. D.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L. C & TESSIER, D. **Alterações na mineralogia de um argissolo do Rio Grande do Sul submetidos à fertilização potássica**. R. Bras. Ci. Solo, 29:327-335, 2005.

CALDEIRA, M. V.; DELARMELINA, W. M.; PERONI, L.; GONÇALVES, E. O & SILVA, A. G. Lodo de esgoto e vermiculita na produção de mudas de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Goiânia, v. 43, n.2, p.155-163, 2013.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; MELO, Luciane Paiva. **Mineração**. 2016.

CRYOSYSTEMS, O. Crystallographica Search-Match. **Journal of Applied Crystallography**, v. 32, n. 2, p. 379-380, 1999.

DE FARIAS JÚNIOR, José Aminthas et al. Clonagem de *Cnidocolus quercifolius* por alporquia, utilizando rejeito de vermiculita e diferentes concentrações de AIA. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 81, p. 35-40, 2015.

DE HOLANDA LEITE, Maria José; BAKKE, Olaf Andreas. USO DE COPRODUTOS DA EXTRAÇÃO DE VERMICULITA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE FAVELEIRA (*Cnidocolus quercifolius* Pohl.). **HOLOS**, v. 3, p. 70-80, 2018.

DEMATTE, J. L. I.; HOLOWAYCHUCK, N. **Características mineralógicas de uma topossequência de solos da região de São Pedro**, Estado de São Paulo. Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, v. 34, p. 15-29, 1977.

NASCIMENTO, M. C. **Argamassa térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita expandida**. 2008.

Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

DOMINGHETTI, A.W.; GUELF, D.R.; GUIMARÃES, R.J.; CAPUTO, A.L.C.; SPEHAR, C.R.; FAQUIN, V. **Nitrogen loss by volatilization of nitrogen fertilizers applied to coffee orchard**. *Ciência e Agrotecnologia*, v.40, n.2, p.173-183, 2016.

DOS SANTOS, Eliane Pereira; FIOREZE, Mariele; BENATTI, Marco Eliandro. DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE RESÍDUO DE EXTRAÇÃO DE PEDRA AMETISTA COMO FERTILIZANTE AGRÍCOLA. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 515-523, 2016.

DOS SANTOS, R. V.; GOMES, A. D. V. **Comportamento inicial do maracujazeiro em solos afetados por sais submetidos a tratamentos alternativos com o uso de coprodutos de mineradoras**. 2015.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). 2011. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro. 225 p.

FERNANDES, Francisco Rego Chaves; ARAUJO, Eliane Rocha. **Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais**. 2016.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FRANÇA, S.C.A.; DA LUZ, A.B.; SANTOS, J.S.; BORGES, R.S. **Estudo da aplicação de resíduos de vermiculita como fertilizante alternativo de potássio**. Anais. 2010. II SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE, Campina Grande, 2010.

FRANDELOSO, J.F.; LANA, M.C.; FONTANIVA, S.; CZYCZA, V. Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n.5, p. 686-694, 2010.

FUGIMURA, S.; Yoshioka, K.; SAITO, T.; SATO, M.; SATO, M.; SAKUMA, YUUKI, MURAMATSU, Y. Effects of applying potassium, zeolite and vermiculite on the radiocesium uptake by rice plants grown in paddy field soils collected from fukushima prefecture. **Plant Production Science**, v. 16, n.2, p. 166-170, 2013.

HASHEMIMAJD, K.; FARANI, T.M. & JAMAATI-E-SOMARINI, S. Effect of elemental sulphur and composto on pH, electrical conductivity and phosphorus availability of one clay soil. **African Journal of Biotechnology**, 11:1425-1432, 2012.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. (2015). **Produção mineral brasileira**. Site. Brasil, mar. 2015.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira (Fosfato/Potássio/Fertilizantes) 5ª Edição**. Potássio. 2010.

KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R & VIDAL-TORRADO, P.,eds. pedologia; **Fundamentos**. Viçosa, MG, SBCS, 2012. 343p.

KUMMER, L.; MELO, F.V.; BARROS, J.Y., AZEVEDO, R.C.J., Extrações sequenciais de chumbo e zinco em solos de área de mineração e metalúrgica de metais pesados, **R. Bras. Ci. Solo**, 35:2005-2018, 2011.

LEITE, M.J.H.; GOMES, A.D.V.; SANTOS, RV.; ARAUJO, J.L. **Crescimento do maracujazeiro amarelo em função de gesso e compostos com resíduos de mineralização aplicados em solo salinizado**. *Nativa*, v.4, n.6, p.353-359, 2016.

LI, T.; WANG, H.; WANG, J.; ZHOU, Z.; ZHOU, J. Exploring the potential of phyllosilicate minerals as potassium fertilizers using sodium tetraphenylboron and intensive cropping with perennial ryegrass. **Scientific Reports**, v.4, p.1-7, 2015.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R.F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p.1-64.

MACHADO, R.V.; ANDRADE, F.V.; PASSOS, R.R.; RIBEIRO, R.C.C.; MENDONÇA, E.S.; MESQUITA, L.F. Characterization of Ornamental Rock Residue and Potassium Liberation Via Organic Acid Application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, 2016. dx.doi.org/10.1590/18069657rbc20150153.

MAGNO, Lucas. Ordenamento territorial da mineração no Brasil e conflitos ambientais. **Revista Geografias**, v. 1, n. 20, p. 84-107, 2015.

MARTIN, H. C.; SANTOS, V. M. L. Avaliação de impactos ambientais em empresa de mineração de cobre utilizando redes de interação. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas**, v. 17, p. 3246-3257, 2013.

McBRIDE, M.B.; **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994. 406p.

MELO, Vander de Freitas; ALLEONI, Luís Reynaldo Ferracciú. **Química e Mineralogia do Solo: Parte I - Conceitos Básicos**. Viçosa - Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. 695 p.

NOBERTO, Maria Nilvania da Silva et al. **Efeito dos substratos rejeito de vermiculita, fibra e pó de coco verde no enraizamento de alporques de faveleira (*cnidoscolus quercifolius pohl*)**. Centro de Saúde e Tecnologia Rural. Unidade Acadêmica de Engenharia Florestal Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais-PPGCF. Campus de Patos-PB. 2013.

PORTELLA, Márcio Oliveira. Efeitos colaterais da mineração no meio ambiente. **Revista Brasileira de Políticas Públicas**, v. 5, n. 3, 2015.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C.; REZENDE, S.B. Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações. Editora UFLA, Lavras, Minas Gerais. 2005. 192 p.

RODRIGUES, Rogério Dantas; FREIRE, Antonio Lucineudo; NETO, João Nascimento. USO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO E MATERIAIS ORGÂNICOS NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE SABIÁ (*Mimosa caesalpinifolia Benth*). **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 11, n. 1, 2014.

RODRIGUES, Thaiza Fernandes et al. A AÇÃO DOS METAIS PESADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO SOBRE A SAÚDE E O MEIO AMBIENTE. **Semioses**, v. 11, n. 2, p. 82-87, 2017.

RODRIGUES, Vinícius William Borges. **Reatividade e eficiência agronômica do hidropotássio e pó de rocha sienítica ultrapotássica como fontes de silício e potássio para as plantas**. 2017.

SÁ, F.V.S.; ARAUJO, J.L.; NOVAES, M.C.; OLIVEIRA, S.R. Crescimento inicial de craibeira em solo salinizado corrigido com enxofre elementar. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 647-660, 2013.

SANTOS, João Felinto dos et al. Produção de feijão sob doses de Pó de Rocha (MP4) em sistema agroecológico. In: **V Congresso Latinoamericano de Agroecología-SOCLA (7 al 9 de octubre de 2015, La Plata)**. 2015.

SANTOS, W.O.; MATTIELLO, E.M.; VERGUTZ, L.; COSTA, F.R. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. **Journal of Plant nutrition and Soil Science**, v.179, p. 547-556, 2016.

SILVA, D.R.G.; MARCHI, G.; SPEHAR, C.R.; GUILHERME, L.R.G.; REIN, T.A.; SOARES, D.A.; ÁVILA, F.W. Characterization and nutrient release from silicate rocks and influence on chemical changes in soil. **Rev Bras Cienc Solo**. 2012;36:951-62. doi:10.1590/s0100-06832012000300025

SILVA, J. P. S. Impactos ambientais causados por mineração. **Revista Espaço da Sophia**, v. 1, 2007.

SILVA, Lismara Aparecida Ferreira da. **Viabilidade de utilização de remineralizadores como alternativa a fertilizantes convencionais**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SILVA, Rafael Cipriano da. **Intemperismo de minerais de um remineralizador**. 2016. 183 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2016.

SOUSA, F.Q.; ARAUJO, J.L.; SILVA, A.P.; PEREIRA, F.H.; SANTOS, R.V.; LIMA, G.S. Crescimento e respostas fisiológicas de espécies arbóreas em solo salinizado tratado com corretivos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 173-181, 2012.

SOUSA, L.D.A.; MACHADO, A.O.D.V.; LEITE, J.Y.P. **Liberção de potássio a partir de rejeito de vermiculita**. XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa (ENTMME), Salvador, 2011.

STAMFORD, N. P. et al. Effect of gypsum and sulfur with *Acidithiobacillus* on soil salinity alleviation and on cowpea biomass and nutrient status as affected by PK rock biofertilizer. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 287-292, 2015.

TRAJANO, E. V. A.; SANTOS, R. V.; BAKKE, O. A.; VITAL, A. F. M.; SANTOS, Y. M.; QUARESMA, J. M.; SALVIANO, V. M. **Crescimento do pinhão manso em substratos com resíduos de mineração do semiárido-PB**. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE MAMONA, 4.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS, 1., 2010, João Pessoa. Inclusão social e energia: anais. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010.

UGARTE, José Fernandes de Oliveira; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Vermiculita**. CETEM/MCTI, 2008.

VIEIRA, G. REZENDE, E. N. Mineração de areia e meio ambiente: é possível harmonizar? **Revista do Direito Público**, v. 10, n. 3, p.181-212, 2015.