



VANESSA MARTINS

**SOLUBILIZAÇÃO DE FONTES DE POTÁSSIO E
SEU EFEITO EM ATRIBUTOS DO SOLO E NO
CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO CAPIM-
MARANDU**

**Lavras - MG
2013**

VANESSA MARTINS

**SOLUBILIZAÇÃO DE FONTES DE POTÁSSIO E SEU EFEITO EM
ATRIBUTOS DO SOLO E NO CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO
CAPIM-MARANDU**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do curso de Doutorado em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme

Coorientador

Dr. Giuliano Marchi

LAVRAS - MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Martins, Vanessa.

Solubilização de fontes de potássio e seu efeito em atributos do solo e no crescimento e nutrição do capim-marandu / – Lavras : UFLA, 2013.

95 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Luiz Roberto Guimarães Guilherme.

Bibliografia.

1. Fertilizante alternativo. 2. Tratamento termoquímico. 3. *Brachiaria* brizantha. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.83

VANESSA MARTINS

**SOLUBILIZAÇÃO DE FONTES DE POTÁSSIO E SEU EFEITO EM
ATRIBUTOS DO SOLO E NO CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO
CAPIM-MARANDU**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do curso de Doutorado em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 04 de Julho de 2013.

Dr. Éder de Souza Martins	EMBRAPA CERRADOS
Dra. Ana Rosa Ribeiro Bastos	UFLA
Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto	UFLA
Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva	UFLA

Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme
Orientador

**LAVRAS - MG
2013**

Aos meus pais, José Reis e Vânia, pelo imenso amor, orientação, incentivo e pelo exemplo de vida;

Aos meus irmãos, Tiago e André, pelo carinho que sempre me deram...

Ofereço

A minha filha Laura, que é o maior presente de Deus, e que participou de todas as etapas desta tese, sempre renovando minhas energias com muita alegria, sempre compreensiva nos momentos em que a privei de minha companhia.

Filha, você é a razão da minha vida. Te amo muito!

Dedico

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pela saúde, proteção e por me dar forças para vencer mais essa etapa;

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), por meio do Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade de realizar o curso;

Ao meu orientador, professor Luiz Roberto Guimarães Guilherme, pelos sábios ensinamentos;

Ao professor Douglas Guelfi, pela ajuda na execução dos trabalhos, aos pesquisadores, Giuliano Marchi e Éder Martins, pela concessão da bolsa do projeto, sugestões e colaboração;

Ao professor Dr. Alfredo Scheid Lopes, pela sincera amizade, apoio sempre presente e pela valiosa orientação;

Aos membros da banca pelas críticas e sugestões apresentadas para a melhoria do trabalho, aos professores do Departamento de Ciência do Solo, (DCS/UFLA), pelos conhecimentos transmitidos durante o curso;

Aos laboratoristas, Humberto, Gilson, Lú, Cristina, João Gualberto e em especial ao Roberto, pela atenção e colaboração nas análises laboratoriais e aos demais funcionários do DCS, meu profundo agradecimento pelo auxílio na condução deste trabalho e pelo ótimo convívio ao longo desses anos;

Aos bolsistas e amigos, Ana Stella e Maurício, pela ajuda prestada e pela prontidão de sempre. A todos os colegas do DCS pela amizade;

Aos amigos: Dani, Regla, Rodolfo, Ana Paula, Viviane, Nilma, Geila, Fábio, Lauana, Bombinha, Ana P, Graci, Tati, Lucas, JP, Marcelo, pelas conversas e pelos bons momentos juntos, e ao Julian, pela paciência e boa vontade de me ajudar nas análises estatísticas;

A todos os demais amigos e familiares que torceram pelo meu sucesso profissional.

RESUMO GERAL

O custo atual do cloreto de potássio relacionado a grande dependência de sua importação para suprir a demanda nacional, sugerem a necessidade de estudos que procurem avaliar a eficiência de fontes alternativas de potássio (K). O objetivo deste estudo foi: testar os métodos de solubilização alcalina e de calcinação de rochas e subproduto contendo K com e sem adição de calcário, e quantificar a absorção de K desses materiais tratados pelo capim-marandu, cultivado em casa de vegetação. Para isso foram conduzidos dois experimentos, um em laboratório para testar métodos que aumentassem a solubilidade do K e outro, em casa de vegetação, onde o capim marandu foi cultivado em um Latossolo Vermelho distrófico textura média. Os tratamentos (cinco doses de K, dez fontes e três repetições) foram realizados em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 5x10x3. As fontes potássicas utilizadas foram cloreto de potássio, verdete, verdete tratado com NH_4OH , fonolito, ultramáfica, subproduto proveniente do processamento metalúrgico de manganês e a mistura de 75% dessas fontes potássicas com 25% de calcário. As misturas com 25% de calcário foram calcinadas a 800°C por uma hora em mufla. As fontes foram aplicadas aos vasos nas doses de 0, 150, 300, 450 e 600 kg ha^{-1} de K_2O . O processo de calcinação e resfriamento a temperatura ambiente proporcionou maior disponibilidade de K, devido à obtenção do estado vítreo das amostras. As fontes alternativas de composição química variada e o subproduto, quando misturadas ao solo e incubadas por 45 dias, alteraram seu pH, e seu teor de P, K^+ , Ca^{+2} e Al^{+3} . A produção de massa seca da parte aérea foi dependente do suprimento de potássio, sendo que a forma de K trocável (Mehlich-1) foi o que mais contribuiu para a produção de massa seca. A ultramáfica e a mistura 25:75R apresentaram as maiores índices de eficiências agronômicas para a produção de matéria seca da parte aérea da braquiária.

Palavras-chave: Tratamento termoquímico. Fertilizante alternativo. *Brachiaria brizantha*

GENERAL ABSTRACT

The high current price of potassium chloride and its dependence on imported materials to supply the local demand suggest the need of studies that evaluate the efficiency of alternative sources of potassium (K) fertilizers, especially those based on local raw materials. The objective of this work was: a) to evaluate methods of alkaline solubilization and calcinations of rocks and a by-product containing K, with or without limestone addition, on the K solubility; and b) test K absorption of these treated materials by marandu grass, grown under greenhouse conditions. Two experiments were conducted, the first, in laboratory, to test methods which could lead to an increase of K solubility, and the second, in greenhouse, where marandu grass was cultivated in a Red dystrophic Oxisol. Treatments were applied in a completely randomized block experimental design, with five K rates, ten sources of K, and three replicates. Potassium sources were: potassium chloride (control), verdete, verdete treated with NH_4OH , phonolite, ultramafic, residue derived from metallurgical processing of manganese, and the proportion of 75% of K fertilizers to 25% of limestone. Mixtures containing 25% of limestone were calcined at 800°C during 1 hour. Fertilizers were mixed to the soil at rates of 0, 150, 300, 450 and 600 kg ha^{-1} of K_2O . The calcination process and rapid cooling provided greater availability of K, due to the vitreous state of the samples. The alternative K sources of variable chemical composition and the by product when mixed with soil and incubated for 45 days, presented variation on soil pH, and on P, K^+ , Ca^{+2} and Al^{+3} contents. Above ground dry matter production was dependent of K supply being exchangeable K (Mehlich-1) the form that most contributed to brachiaria dry matter production.

Keywords: Thermo-chemical treatment. Alternative fertilizer. *Brachiaria Brizantha*

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE		
1	INTRODUÇÃO GERAL.....	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	20
	REFÊRENCIAS	22
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS		
	Artigo 1: Solubilização de potássio em misturas de verdete e calcário tratadas termoquimicamente.....	25
	Artigo 2: Alterações nos atributos químicos do solo pela adição de fontes alternativas multinutrientes.....	49
	Artigo 3: Eficiência agrônômica de fertilizantes alternativos multinutrientes na nutrição e produção do Capim Marandu	73

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os solos brasileiros, de forma geral, são ácidos, pobres devido a sua gênese e ação do intemperismo e deficientes em nutrientes. Para torná-los produtivos, são utilizadas grandes quantidades de fertilizantes e corretivos agrícolas que são insumos agropecuários importantes para assegurar a produção de alimentos em quantidades suficientes para atender as necessidades da população brasileira e mundial. A demanda por esses insumos englobam cerca de 40% dos custos variáveis de produção (MARTINS et al., 2008).

O Brasil tem importado em torno de 90% do fertilizante potássico utilizado na agricultura anualmente, especialmente na forma de cloreto de potássio (KCl). Consequentemente é necessário buscar alternativas econômicas aos fertilizantes tradicionais (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM, 2013).

Após o nitrogênio (N), o potássio (K) é o nutriente requerido em maiores quantidades pelas culturas. Entretanto, diferentemente do N, que pode ser disponibilizado por processos de fixação biológica, não existem fontes renováveis de K, de modo que sua disponibilidade às plantas depende essencialmente das reservas do solo e da aplicação de fertilizantes. Nas condições brasileiras, o problema agrava-se pelo fato da baixa proporção de minerais contendo K e apresentarem baixa capacidade de retenção de cátions, o que favorece a lixiviação do K oriundo dos fertilizantes, para fora da zona de crescimento radicular (CURI; KÄMPF; MARQUES, 2005; VILELA; SOUSA; SILVA, 2004).

A produção de potássio fertilizante no Brasil está restrita ao complexo mina/usina Taquari Vassouras, em Sergipe, que possui uma capacidade nominal de produção de 500 mil tano⁻¹ de KCl, correspondendo a 300 mil tano⁻¹ de K₂O equivalente. A capacidade de produção foi aumentada

a partir de 1998, e desde então, vem apresentando produção superior à meta prevista no projeto base. Assim, a produção interna de KCl vem crescendo nos últimos anos. Embora esse crescimento não tenha um comportamento linear, uma vez que apresenta pequenas oscilações anuais, observa-se um incremento na produção, entre 2008 e 2011, de 10,59% (DNPM, 2013).

Em 2011, foram produzidas 625,3 mil t de KCl (com teor de 67,78% de K_2O equivalente) correspondendo a 424 mil t de K_2O equivalente, a produção doméstica de KCl representou 8,44% do consumo aparente, porém o complexo mina/usina Taquari Vassouras, possui condições de ser explorada somente até 2017. Em virtude da pequena produção, comparada à grande demanda interna pelo produto, o Brasil situa-se no contexto mundial como grande importador de potássio fertilizante, tendo como principais fornecedores em 2011, a Bielorrússia (35,74%), o Canadá (35,21%), a Alemanha (12,66%), Israel (6,45%) e a Rússia (5,83%) (DNPM, 2013).

O uso de rochas silicáticas pode ser uma estratégia para diminuição desta dependência e o aumento da sustentabilidade da produção. Estas rochas são encontradas bem distribuídas no território nacional e geralmente são muito abundantes (MARTINS et al., 2010). O Brasil dispõe de imensas reservas de minerais silicáticos potássicos de baixa solubilidade, situadas próximas às áreas de consumo, mas que exigem o desenvolvimento de uma tecnologia de transformação capaz de torná-las fontes eficientes de fertilizante (MARTINS et al., 2008). O conhecimento da mineralogia e das formas de K nos solos, em conjunto com outros atributos, pode contribuir para melhor predição do suprimento, fixação e disponibilidade desse nutriente para as plantas (CURI; KÄMPF; MARQUES, 2005).

Não obstante o potássio ser um elemento requerido em grande quantidade pelas plantas forrageiras, a sua importância muitas vezes tem sido negligenciada, talvez, partindo-se do conhecimento de que esse nutriente é reciclado através da urina e das fezes dos animais em pastejo, porém sua adição tem proporcionado incrementos significativos na produção de massa seca da parte aérea da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, quando

esta é cultivada em meio deficiente de K, como demonstrado pelos experimentos de Gama-Rodrigues et al. (2002) e Mattos e Monteiro (1998).

Há muito tempo estuda-se a possibilidade de uso de outras fontes de potássio, procurando aproveitar a exploração de matérias-primas abundantes no país, entretanto, à maioria das fontes alternativas apresenta baixa solubilidade, o que atualmente inviabiliza a sua utilização como fonte direta de K as planta sendo necessário algum tipo de tratamento para a solubilização do K.

Devido à enorme geodiversidade que ocorre no nosso país, a alternativa de aplicação de fontes alternativas configura-se como uma excelente alternativa de fornecimento de nutrientes, podendo contribuir para alcançar padrões de fertilidade compatíveis com as necessidades das plantas a serem cultivadas. Como vantagens atribuídas às fontes alternativas podem-se citar o fornecimento de vários nutrientes simultaneamente, pois elas apresentam composição variada, promovem o aumento da CTC dos solos, devido à formação de minerais de argila durante o processo de alteração da rocha. É uma alternativa viável em termos econômicos e ecológicos pelo baixo custo do processo de beneficiamento, e por apresentar liberação lenta e gradual de nutrientes que diminui as perdas por lixiviação e favorece uma ação de longo prazo do insumo aplicado (MARTINS et al., 2008).

Em vista do exposto, este trabalho foi conduzido com o objetivo de:

- a) Propor alternativas para aumentar a solubilidade do potássio, de rochas silicáticas e do subproduto proveniente de extração de manganês;
- b) Avaliar, em casa de vegetação, a disponibilidade de diferentes fontes alternativas em fornecer K para o solo e conseqüentemente para a produção e nutrição do capim-marandu.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Potássio

O potássio é o sétimo elemento mais abundante na crosta terrestre, estando largamente distribuído, mas devido a sua alta reatividade e afinidade com outros elementos, nunca ocorre em sua forma elementar. Ocorre em rochas, solos, oceanos, lagos e salinas residuais, embora, raramente seja observado um teor superior a 10%.

O K é um elemento móvel no floema das plantas, deslocado aos tecidos meristemáticos jovens caso ocorra deficiência. Ao contrário do nitrogênio (N), enxofre (S) e fósforo (P), o K não se combina com outros elementos para formar protoplasma, gorduras e celulose, sendo sua função principal catalítica por natureza, suas principais funções são: ativação enzimática, regulação osmótica e controle de abertura de estômatos, regulação de energia (síntese de ATP), translocação de assimilados, absorção de N e síntese de proteínas e amido (enchimento de grãos) (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Os macronutrientes cálcio (Ca) e magnésio (Mg) competem com o K na absorção pelas plantas, portanto, é esperado que solos com altos níveis de Ca e Mg, requerem altos níveis de K para uma nutrição satisfatória das culturas. Assim, a disponibilidade de K é mais dependente das concentrações destes dois cátions do que propriamente da quantidade de K presente no solo (NASCIMENTO; MONTE; LOUREIRO, 2005).

2.2 Fontes tradicionais de potássio

Em termos mundiais, mais de 95% da produção de K é usada como fertilizante, sendo 90% dessa produção na forma de KCl. Por conter de 58 a 62% de K₂O solúvel em água, o KCl é mais competitivo economicamente que os outros fertilizantes, entretanto, devido ao alto teor de cloro, não pode ser utilizado em algumas culturas, como o abacaxi, batata e o fumo, por

prejudicar seu valor comercial (MALAVOLTA; PIMENTEL-GOMES; ALCARDE, 2000).

As reservas de sais de potássio no Brasil estão localizadas em Sergipe e no Amazonas. Em Sergipe, nas regiões de Taquari/Vassouras e Santa Rosa de Lima, as reservas são predominantemente do mineral silvinita (KCl + NaCl). A atual detentora dos direitos de lavra dessa jazida é a Vale, que a arrendou da Petrobrás. A quantidade de potássio fertilizante importada em 2011 esteve 25,4% acima da verificada no ano de 2010, em virtude da pequena produção interna, comparada à grande demanda pelo produto (ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA, 2011).

2.3 Rochagem como opção para o fornecimento de nutrientes

Há décadas, rochas portadoras de K vêm sendo estudadas como opção para o fornecimento do nutriente às plantas ou em rotas alternativas para obtenção de fertilizantes. A taxa de dissolução das rochas e minerais e a reação entre as superfícies dos minerais com a solução do solo é acelerada sob altas temperaturas e regimes de umidade, o potencial de aplicação de minerais contidos nas rochas é elevado, pois os solos são caracterizados por baixos teores de nutrientes por causa do elevado intemperismo e lixiviação, e assim altamente receptivo a adição de nutrientes em quantidades elevadas, quando comparadas com a aplicação em solos de condições temperadas.

A rochagem é uma técnica de fertilização baseada na adição de pó de rocha ao solo. Determinados tipos de rocha ou minerais possuem a capacidade de alterar positivamente a fertilidade dos solos sem afetar o equilíbrio do ambiente. Esta técnica tem despertado a atenção de pesquisadores em todo o mundo como uma das alternativas às fontes convencionais de nutrientes ou complementar de fertilização e tem sido indicada, a princípio, para as pequenas propriedades, agricultura familiar e até mesmo, para agricultura orgânica (LAPIDO-LOUREIRO; NASCIMENTO, 2009), visto que a Lei nº10. 831, de 23 de dezembro de

2003, que dispõe sobre a agricultura orgânica, e a Instrução Normativa nº 007 de 17 de maio de 1999 relaciona entre os insumos permitidos as “farinhas e pós de rochas” (BRASIL, 2003).

Esta técnica tem como característica uma solubilização mais lenta que os fertilizantes comerciais, constituem uma fonte de nutrientes para plantas cultivadas durante longos períodos, promove o aumento da CTC dos solos, devido à formação de minerais de argila durante o processo de alteração da rocha. É uma alternativa viável em termos econômicos e ecológicos devido ao baixo custo do processo de beneficiamento e devido à liberação lenta e gradual de nutrientes que diminui as perdas por lixiviação e favorece uma ação de longo prazo do insumo aplicado.

Em geral, dentre os nutrientes fornecidos pelas rochas estão o potássio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre, além de alguns micronutrientes, elementos benéficos às plantas, como silício e elementos-traços também podem ser encontrados.

Para Souza et al. (2010) as aparentes desvantagens das baixas concentrações e solubilidades dos agrominerais podem ser encaradas na verdade como vantagens em condições tropicais. As rochas, ao sofrerem o intemperismo, liberam gradualmente os nutrientes e geram argilas que elevam a CTC do solo. Conseqüentemente levam a um enriquecimento dos solos tropicais que, geralmente, se apresentam lixiviados, com baixa fertilidade, baixa CTC, além de um maior efeito residual.

Um fator extremamente importante na escolha das rochas é a mineralogia, sendo esta indicadora do potencial de solubilidade dos minerais e da capacidade de liberação de K (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004). Algumas rochas mostraram significativa liberação de K em testes de laboratório, solos incubados e em cultivos controlados (casa de vegetação), apresentando potencial promissor para uso como fontes de K quando moídas e utilizadas de maneira análoga ao calcário (CASTRO et al., 2006; RESENDE et al., 2006), outro fator importante a ser considerado é à distância dessas fontes às áreas agrícolas.

Trabalho conduzido com diversas rochas silicáticas, como carbonatito, brecha piroclástica, biotita xisto e ultramáfica alcalina, evidenciou elevações nos teores de K analisados no solo, após 30 e 60 dias de incubação (SCHUNKE et al., 2006).

Eichler e Lopes (1983) estudando o verdete (11,4% de K_2O) descartou a possibilidade de utilização direta (simplesmente moído), devido à baixa disponibilização de K às plantas. Este autor também testou a calcinação do verdete com calcário magnesiano em diferentes proporções, concluindo que a mistura em partes iguais de verdete e calcário magnesiano, calcinada a 1100 °C é uma alternativa viável de K para a cultura do milho, fonte de cálcio e magnésio, corretivo de acidez do solo, e apresentou também efeito residual maior que o cloreto de potássio após o terceiro cultivo. A maior limitação desta tecnologia é o elevado custo energético utilizado no processo térmico de calcinação.

Para Harley & Gilkes (2000), Martins et al.(2008) e Straaten (2006), o principal desafio no uso de agrominerais como fertilizantes é fornecer os nutrientes nas quantidades e no tempo adequado a cada cultura.

Por outro lado, Theodoro e Assad (2000) relatam que a baixa solubilidade das rochas faz delas um importante componente potencial para a fertilização, principalmente para áreas com problemas de salinidade e locais sujeitos a chuvas frequentes, evitando que os nutrientes sejam rapidamente lixiviados.

Apesar da baixa concentração de nutrientes dos materiais usados na rochagem, como normalmente ocorre com as rochas brasileiras, a grande diversidade associada à grande amplitude de ocorrência destas rochas, aumenta as chances de se obter agrominerais que proporcionem efeitos positivos, quando aplicados como fertilizantes ao solo (THEODORO; LEONARDOS, 2006).

Resende et al. (2006) avaliando as rochas biotita xisto, brecha alcalina e ultramáfica, aplicadas para cultura do milho num Latossolo Vermelho Amarelo argiloso, observaram que a concentração de K nos

tecidos, bem como seu acúmulo nas plantas, aumentou com o incremento das doses dos agrominerais, assim como ocorreu para o KCl. Destaque para a rocha ultramáfica, que apresentou maior eficiência relativa no suprimento de potássio, poder corretivo da acidez e a liberação de outros nutrientes, mostrando que a aplicação de um agromineral pode trazer vários efeitos benéficos ao solo e aos cultivos.

Castro et al. (2006) avaliaram as rochas biotita e ultramáfica alcalina na fertilização de girassol cultivado em vasos, observaram que a rochagem com estes agrominerais influenciou tanto a produção quanto o acúmulo de K nos tecidos do girassol, com eficiência agronômica comparável à do KCl.

Ribeiro et al. (2010) avaliaram em vasos, cultivando soja, o efeito da aplicação de pó das rochas silicáticas, ultramáfica alcalina, brecha piroclástica e flogopitito sobre um Latossolo Amarelo distrófico, pobre em K. Observaram que a rocha ultramáfica e a brecha alcalina se mostraram mais promissoras como fontes de K e ainda liberaram P para o solo. A rocha ultramáfica alcalina também elevou o pH do solo, ressaltando o poder corretivo desta rocha.

Guelfi-Silva et al.(2013) realizaram um experimento em casa de vegetação, com um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média, testando seis fontes alternativas de nutrientes (brecha, ultramáfica, biotita xisto, flogopitito, subproduto de mineração e subproduto de chapada) para a produção e nutrição da alface. Os autores verificaram que as fontes promoveram melhorias na nutrição e aumentos na produção da alface. Afirmaram que as rochas silicáticas moídas e os subprodutos de mineração constituem uma opção para adubação em sistemas de produção orgânica e convencional

2.4 Potássio em gramíneas forrageiras

Vários estudos indicam que a resposta em produtividade seja nula ou muito pequena à adubação potássica em condições de pastejo, especificamente para gramíneas forrageiras. Essa suposta ausência de efeitos

positivos na produção seria explicada pela elevada reciclagem de K proporcionada pelas fezes e urina dos animais em pastejo e pelo retorno desse mesmo nutriente decorrente dos tecidos mortos da parte aérea e raízes da forragem não consumida pelos animais (MONTEIRO; WERNER, 1997).

De acordo com Coutinho et al. (2004) a baixa resposta de gramíneas forrageiras à adubação potássica está geralmente relacionada com teores médios ou altos de K no solo, mas em solos com teores baixos ou muito baixos, a adubação potássica tem proporcionado significativos incrementos na produção de gramíneas forrageiras estabelecidas em solos.

Andrade et al. (1997) cultivando *Brachiaria decumbens* em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico com teor inicial de K de 2,6 mmol_c dm⁻³ obtiveram respostas positivas ao fornecimento de K na produção de massa seca apenas no quinto e sexto cortes da forrageira. Esse teor inicial de K no solo, de acordo com Raij et al. (1996), é considerado médio e, portanto, os efeitos positivos da adubação potássica só foram evidentes após a concentração de K no solo ser sensivelmente reduzida.

Diversas abordagens têm sido utilizadas na avaliação da necessidade de K por gramíneas forrageiras. Mattos e Monteiro (1998) avaliaram o efeito de doses de K (0; 9,75; 39; 78; 156; 234; 312 e 468 mg L⁻¹) em experimento com solução nutritiva em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (dois cultivos) e puderam constatar que o aumento de K na solução propiciou incrementos na massa seca da parte aérea e raízes, no perfilhamento e também na concentração do nutriente nos tecidos dessa forrageira. As máximas produções de massa seca foram obtidas com as doses de 365 e 399 mg L⁻¹ de K. Os autores ainda detectaram que os primeiros sintomas de deficiência de K, nos tratamentos sem adição de K, iniciaram aos 10 dias após transplante, caracterizados por uma clorose na borda das folhas, que se acentuava em direção à nervura principal.

Ferrari Neto (1991) utilizando a técnica do elemento faltante conduziu um experimento em Latossolo Vermelho e verificou que a produção de massa seca dos capins colônia (*Panicum maximum* Jacq) e

braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf) foram influenciados pelo K, com a omissão desse nutriente resultando em queda na produção de 38,2% em relação ao tratamento completo.

Ferragine e Monteiro (1999) trabalhando com *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk estudaram cinco doses de N (42, 140, 238, 336 e 434 mg L⁻¹ de N) em combinação com três doses de K (78, 234, e 390 mg L⁻¹ de K) e observaram que a produção de massa seca no primeiro crescimento foi influenciada conjuntamente por N e K. A maior produção foi obtida com o fornecimento de 434 mg L⁻¹ de N e de 234 mg L⁻¹ de K. Os autores salientam que a adubação nitrogenada deve ser sempre acompanhada de uma adubação potássica equilibrada quando se objetivam altas produtividades.

Outros trabalhos, realizados em condições de campo têm também mostrado a importância da adubação potássica para as gramíneas forrageiras. Gama-Rodrigues et al. (2002) verificaram que em Latossolos Amarelos coesos da região sudeste da Bahia, o teor de K trocável em torno de 1,5 mmol_c dm⁻³ não foi limitante para o estabelecimento da *Brachiariabrizantha* cv. Marandu até aproximadamente 75 dias de crescimento. Após esse período, o aumento dos níveis de K no solo, em condições de disponibilidade adequada de outros nutrientes, produziu efeito benéfico na produção de massa seca, aumentando a oferta de forragem disponível. Observaram ainda que o aumento das doses de K propiciou maior longevidade das folhas verdes expandidas e em expansão.

Costa et al. (2008) estudando os efeitos da combinação de doses de N (0, 25, 50 e 100 mg dm⁻³ de N) e K (0, 25, 50 e 100 mg dm⁻³ de K) na concentração de nutrientes em *Brachiariabrizantha* cv. Xaraés, utilizando amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico com 3,6 mmol_c dm⁻³ de K, verificaram que a adubação potássica aumentou a concentração de K nas plantas, mesmo com altos teores de K no solo. A concentração de K na forrageira variou, dentro da amplitude das doses utilizadas, de 16 a 18,9 g kg⁻¹, correspondendo a um aumento de 18,12% em relação à testemunha.

Faquin et al. (1995) avaliaram o desenvolvimento de *Brachiariadecumbens* adubada com K (0, 50, 100, 200 e 400 mg kg⁻¹ de K) e observaram, nos dois cultivos testados, que a massa seca da parte aérea dessa gramínea é significativamente incrementada ao se elevar o suprimento de K. Na soma dos cortes, o aumento de produção de massa seca foi quase quatro vezes maior do que o tratamento sem K. Verificaram também que para atingir a máxima produção foram necessárias doses de 65 mg kg⁻¹ de K no primeiro e 100 mg kg⁻¹ de K no segundo corte. Observaram ainda que o fornecimento de K também proporcionou melhor perfilhamento das plantas.

Betini et al. (2000) em experimento de casa de vegetação cultivado Capim-Mombaça num solo de textura arenosa, mostraram que o K é um nutriente importante para a nutrição da forrageira, de forma que sua aplicação deve ocorrer em situações onde o P e o N não sejam limitantes ao crescimento e ao desenvolvimento da forrageira em questão, sob pena de a adubação potássica não surtir os efeitos esperados.

2.5 Fontes alternativas em estudo

Os materiais silicáticos com uso potencial na agricultura podem ter diferentes origens e processos de produção (LUZ et al., 2010). Do ponto de vista industrial estes materiais podem ser primários ou secundários. Os materiais primários são extraídos diretamente da natureza, como é o caso do calcário. Os materiais secundários geralmente são formados por subprodutos de outros processos industriais, como é o caso de resíduos de mineração (MARTINS et al., 2008).

Uma das alternativas em estudo é o verdete, o qual é uma rocha composta por cerca de 37% de glauconita, 24% de quartzo, 14% de matriz argilosa, 11% de caulinita, 7% de micas e 7% de óxidos de ferro, entre minerais opacos e fluidos alterados. Ocorre no município de Cedro de Abaeté, na região do Alto Parnaíba (MG) (VALLARELI, 1993). A coloração verde é dada pela presença de ferro, inicialmente ferroso, o qual substitui cátions neutralizados, como K⁺, Na⁺, Ca⁺² e Mg⁺², e parcialmente

ferro férrico, de caráter sedimentar. A porcentagem de K_2O varia entre 5 a 14%.

O fonolito (Planalto de Poços de Caldas, MG), rocha silicática de origem vulcânica, possui caráter fortemente alcalino devido aos altos teores de $Na_2O + K_2O$. A composição mineralógica da rocha é formada principalmente por microclina, ortoclásio, andesina e nefelina, possui potencial para aplicação na agricultura, uma vez que é uma rocha rica em K_2O e sua mineralogia principal é formada por minerais de feldspato.

A ultramáfica alcalina (Lages, SC) é uma rocha formada por uma intrusão ígnea, composto de minerais ferromagnesianos, plagioclásios e carbonatos. Apresenta um teor em minerais máficos (escuros a pretos) muito grande, o que confere, em geral, uma cor preta para as rochas desse grupo. A maior parte destas rochas é também ultra básica, pois contém menos de 45% de sílica.

O subproduto em estudo é proveniente do processamento metalúrgico de manganês, em Sete Lagoas, MG. No processamento, o potássio é separado a partir do minério de ferro e concentrado no resíduo, com granulometria bem fina, em pó.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos apontam a necessidade de um maior aprofundamento nas pesquisas envolvendo fontes alternativas de potássio e outros nutrientes, as quais devem ser testadas para uso em condições variadas de solos, culturas e sistemas agropecuários, e em diferentes regiões do país. Isso se justifica pelo fato de que essas fontes são abundantes e apresentam distribuição ampla e variável no território nacional.

Deve-se ter o acompanhamento do potencial de liberação de cada nutriente e a disponibilidade de elementos críticos em relação ao potencial de contaminação dos produtos agrícolas e do ambiente, avaliando seu efeito residual e a viabilidade econômica.

Outra linha de estudos que se deve investir para o uso destas fontes alternativas de potássio é o uso na agricultura orgânica, visto que esse sistema de cultivo consiste na substituição de fertilizantes de alta solubilidade por outros que apresentem taxas de liberação de nutrientes mais ajustadas à demanda das culturas ao longo do tempo. Considerando que, nos sistemas orgânicos a aplicação de cloreto de potássio é vedada e a de sulfato de potássio é aceita com restrições, o suprimento de K torna-se um ponto crítico para a produção orgânica em solos tropicais.

Dada à natureza complexa dos minerais constituintes dessas fontes, torna-se necessário definir procedimentos analíticos apropriados, que permitam caracterizar satisfatoriamente sua constituição química e a disponibilidade dos elementos presentes. Aprofundar os testes de solubilização alcalina, pois os silicatos são mais solúveis em pH alcalino. A adição de um hidróxido contendo N (que é um macronutriente primário) agregaria mais valor ao produto final, que passaria a conter N e K. Mais uma opção de um produto para adubações de cobertura. Além disso, o NH_4OH é utilizado na formulação de adubos fluidos, e esta rota poderia ser testada para fazer este tipo de adubo.

Um dos resultados esperados é a substituição total ou parcial do potássio importado por fontes alternativas, o que pode significar uma economia significativa na balança comercial brasileira, além da possibilidade de reciclagem de subprodutos de mineração, uma vez que algumas dessas fontes constituem passivos ambientais.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B. et al. Nitrogênio e potássio na produção e composição da forragem de *Brachiaria decumbens* Stapf. **Veterinária**, Jaboticabal, v. 13, n. 3, p. 268-274, jun. 1997.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo, 2011. 235 p.

BETINI, E. et al. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 22, n. 4, p. 1083-1087, 2000.

BRASIL. **Lei nº 10.831**, de 23 de dezembro de 2003. Dispõe sobre a agricultura orgânica e dá outras providências. Brasília, 2003. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/110.831.htm>. Acesso em: 10 mar. 2013.

CASTRO, C. et al. Rochas brasileiras como fontes alternativas de potássio para a cultura do girassol: efeito residual. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 2, p. 17-31, 2006.

COSTA, K. A. de P. et al. Adubação nitrogenada e potássica na concentração de nutrientes do capim-xaraés. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 9, n. 1, p. 86-92, jan. 2008.

COUTINHO, E. L. M. et al. Adubação potássica em forrageiras. In: PEDREIRA, C. G. S.; MOURA, J. C. de; FARIA, V. P. de (Ed.). **Fertilidade do solo para pastagens produtivas**. Piracicaba: FEALQ, 2004. p. 219-277.

CURI, N.; KÄMPF, N.; MARQUES, J. J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 2005. p. 91-122.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Potássio**. Disponível em:

<https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7403>. Acesso em: 8 mar. 2013.

EICHLER, V. E.; LOPES, A. S. Disponibilidade do potássio do verde de Abaeté, calcinado com e sem calcário magnesiano, para a cultura do milho (*Zea mays L.*), em solo de textura argilosa. **Ciência e Prática**, Bebedouro, v. 7, p. 136-146, 1983.

FAQUIN, V. et al. O potássio e o enxofre no crescimento da braquiária e do colônio em amostras de um Latossolo da região Noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 19, n. 1, p. 87-94, jan. 1995.

FERRAGINE, M. C.; MONTEIRO, F. A. Combinação de doses de nitrogênio e potássio na nutrição mineral de capim-braquiária. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 56, n. 1, p. 25-33, 1999.

FERRARI NETO, J. **Limitações nutricionais para o colônio (*Panicum maximum* Jacq) e braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf) em Latossolo da região Noroeste do Estado do Paraná**. 1991. 126 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1991.

GAMA-RODRIGUES, A. C. et al. Produção e partição de matéria seca em *Brachiaria brizantha* em resposta à fertilização potássica e às datas de corte. **Agronomia**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 1/2, p. 23-28, 2002.

GUELFY-SILVA, D. R. et al. Agronomic efficiency of potassium fertilization in lettuce fertilized with alternative nutrient sources. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 267-277, abr./jun. 2013.

HARLEY, A.; GILKES, R. J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 56, n. 1, p. 11-36, 2000.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; NASCIMENTO, M. Importância e função dos fertilizantes numa agricultura sustentável e competitiva. In: LAPIDO-

LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.).

Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade. Rio de Janeiro: CETEM/Petrobrás, 2009. p. 81-132.

LUZ, A. B. et al. Rochas, minerais e rotas tecnológicas para produção de fertilizantes alternativos. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (Org.). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. v. 1, p. 61-88.

MALAVOLTA, E.; PIMENTEL-GOMES, F.; ALCARDE, J. C. **Adubos e adubações**. São Paulo: Nobel, 2000. 200 p.

MARTINS, E. S. et al. Agrominerais: rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. In: _____. **Rochas e minerais industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p. 205-223.

_____. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (Org.). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. v. 1, p. 89-104.

MATTOS, W. T.; MONTEIRO, F. A. Respostas de braquiária brizantha a doses de potássio. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 428-437, 1998.

MONTEIRO, F. A.; WERNER, J. C. Reciclagem de nutrientes nas pastagens. In: PEIXOTO, A. M.; MOURA, J. C. de; FARIA, V. P. de (Ed.). **Fundamentos do pastejo rotacionado**. Piracicaba: FEALQ, 1997. p. 55-84.

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

NASCIMENTO, M.; MONTE, M. B. M.; LOUREIRO, F. E. L. **Rocha e minerais industriais:** usos e especificações. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. 199 p.

RAIJ, B. et al. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo; Fundação IAC, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RESENDE, A. V. et al. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 1, p. 19-42, 2006.

RIBEIRO, L. S. et al. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 3, p. 891-897, maio/jun. 2010.

SCHUNKE, R. M. et al. Liberação de potássio das rochas, carbonatito, biotita xisto e brecha piroclástica, em solo Latossolo Vermelho Distrófico. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 27.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 11.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 9.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 6., 2006, Bonito. **Anais...** Bonito: SBCS/SBM/EMBRAPA-Agropecuária Oeste, 2006. 1 CD-ROM.

SOUZA, F. N. S. et al. Potencial de rejeito mineral na produção de grãos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2010, Brasília. **Anais...** Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2010. p. 289-295.

STRAATEN, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 78, n. 4, p. 731-747, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

THEODORO, S. H.; ASSAD, M. L. Remineralization for sustainable agriculture: a tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 56, n. 1, p. 3-9, Jan. 2000.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 78, n. 4, p. 715-720, dez. 2006.

VALLARELI, J. V. Ardósias Verdete de Cedro do Abaeté na produção de termofosfato potássico fundido e sua eficiência agrônômica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 65, n. 4, p. 363-375, dez. 1993.

VILELA, L.; SOUSA, D. M. G. e; SILVA, J. E. Adubação potássica. In: SOUSA, D. M. G. e; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2004. p. 169-183.

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1 - SOLUBILIZAÇÃO DE POTÁSSIO EM MISTURAS DE VERDETE E CALCÁRIO TRATADAS TERMOQUIMICAMENTE

(Versão Preliminar Normas Revista Pesquisa Agropecuária Tropical)

RESUMO

O Brasil se situa, no contexto mundial, como grande importador de fertilizante potássico. No entanto dispõe de reservas de rochas silicáticas potássicas de baixa solubilidade, sendo necessário o desenvolvimento de alternativas de beneficiamento capazes de aumentar sua solubilidade para o suprimento da demanda deste nutriente para a agricultura. O objetivo deste estudo é a obtenção de novas rotas tecnológicas para a produção de fontes alternativas de potássio a partir do verdete. Nessa pesquisa, prepararam-se misturas de verdete com calcário, dos quais foram realizados testes de calcinação e solubilização alcalina. Foi analisado o potássio solúvel em água e ácido cítrico dessas misturas por fotometria de chama. A composição mineralógica das misturas foi determinada por meio de difratometria de raios-X e a quantificação do potássio feita pela microscopia eletrônica de varredura com microanalisador. O processo

de calcinação e resfriamento à temperatura ambiente proporcionou maior disponibilidade de potássio que os outros métodos empregados. Porém, o aumento da proporção de calcário em relação ao verdete ocasionou diminuição na solubilidade de potássio. O tratamento da relação calcário:verdete na proporção 0:100, calcinado por uma hora a 800°C e tratado com NH_4OH e a proporção 25:75 submetidas à calcinação liberaram, proporcionalmente, maior quantidade de potássio para a solução que as não calcinadas.

Termos de indexação: calcinação, solubilização alcalina, fonte alternativa de potássio.

ABSTRACT

POTASSIUM SOLUBILIZATION FROM VERDETE AND LIMESTONE MIXTURES THERMOCHEMICALLY TREATED

Brazil imports a large amount of potassium fertilizers every year, however considerable reserves of potassium bound in silicate minerals of low solubility are aplenty in several regions. Thus, it is necessary to develop ore processing studies to increase solubility of these potassium minerals in a way they can be used in the agriculture economically and efficiently sound. The goals of this study were the

search for a new technological route to produce alternative sources of potassium fertilizers. In the present study calcination and alkaline solubilizing tests of verdete and limestone mixtures were performed. Potassium solubility in water and in citric acid was analyzed by flame photometry. Verdete and lime mixtures were analyzed by its mineralogical composition, and the K quantification in its structure was made by a scanning electron microscope with micro-analyzer. The calcination process followed by fast cooling provided increases in K availability. However the increase of limestone content in the limestone:verdete proportions caused a reduction in the K solubility. Treatment limestone:verdete in the proportion 0:100, after calcination at 800°C during one hour and then treated with NH₄OH, and the 25:75 calcination proportion released, proportionally, higher amounts of K to the solution as compared with not calcined samples.

Index terms: calcination, alkaline extraction, alternative source of potassium.

INTRODUÇÃO

Atualmente, a adubação potássica de solos agrícolas é realizada empregando-se sais solúveis em água, principalmente o cloreto de potássio (KCl). Em virtude da pequena produção brasileira,

8,44% do consumo aparente, comparada à grande demanda interna pelo produto, o Brasil situa-se no contexto mundial como grande importador de fertilizante potássico, principalmente dos países Bielorrússia (35,74%), Canadá (35,21%), Alemanha (12,66%), Israel (6,45%) e Rússia (5,83%). Situação agravada pela única mina em operação no Brasil localizada no Complexo Taquari-Vassouras em Sergipe, que possui condições de produção somente até 2017 (DNPM 2011).

O Brasil dispõe de reservas de minerais potássicos de baixa solubilidade, especialmente na forma de rochas silicáticas, situadas em posições estratégicas sob aspecto geográfico (Martins et al. 2010), mas que exigem o desenvolvimento de rotas tecnológicas de transformação capazes de torná-las fontes eficientes de fertilizantes (Luz et al. 2010). Por outro lado, a utilização direta do pó de rochas silicáticas pode ser uma alternativa viável em termos econômicos e ecológicos, visto seu baixo custo de produção. Esses materiais, dependendo das características mineralógicas das rochas de origem, tem baixa solubilidade mais lenta que os fertilizantes convencionais, porém, fornecem também outros macro e micronutrientes, presentes em sua composição, e alguns desses materiais ainda possuem

propriedades favoráveis para se elevar o pH do solo (Lapido-Loureiro & Nascimento 2009).

A mineralogia, indicador do potencial de solubilidade dos minerais e da capacidade de liberação de K, é fator fundamental na seleção de rochas para aplicação direta ao solo (Nascimento & Lapido-Loureiro 2004). Os silicatos de potássio naturais apresentam comportamentos agronômicos muito diferentes entre si, desde os de solubilidade elevada, como a kalsilita, até os de liberação muito lenta, como o K-feldspato (Manning, 2010). Os silicatos de liberação muito lenta podem apresentar utilização limitada em aplicações diretas, necessitando de processos de beneficiamento mais energéticos para aumentar sua solubilidade (Leite 1985, Valarelli 1993).

O verdete é uma designação regional para um conjunto de rochas areno-pelíticas e pelíticas de cor verde, presentes na Formação Serra da Saudade do Grupo Bambuí e formadas no final do Neoproterozóico, sendo que a porcentagem de K varia entre 7 e 14% (Lima et al. 2007). A composição mineralógica é variável, dependendo das diferenciações das camadas, mas em geral apresenta os seguintes minerais, em ordem decrescente de abundância: glauconita, quartzo, clorita, caulinita, micas, feldspatos e minerais opacos (Lima et al. 2007, Toledo Piza et al. 2011). A cor verde típica

dos verdetes deve-se à presença de glauconita, em especial devido ao Fe^{2+} que substitui cátions como K^+ , Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} na estrutura deste mineral (Lima et al. 2007). O potássio está presente na glauconita, nas micas e no K-feldspato. O objetivo desse trabalho é a caracterização de rotas tecnológicas para a produção de fontes alternativas de potássio, utilizando métodos de solubilização alcalina e de calcinação do verdete com e sem adição de calcário, com a finalidade de aumentar a solubilidade do K.

MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de verdete (V) coletadas no município de Cedro de Abaeté, na região do Alto Paranaíba (MG), moídas e passadas em peneiras de 0,25 mm, foram misturadas com dois tipos de calcário (C): um contendo baixo teor de Mg (CaO 52,84% e MgO 2,87%, doravante denominado CC), equivalente à classificação antiga de calcário calcítico (PN = 102,17%, PRNT = 93,21% e ER = 91,23%) e, outro, com alto teor de Mg (CaO 35,92% e MgO 14,44%, doravante denominado CD), equivalente à classificação antiga de calcário dolomítico, (PN = 106,25%, PRNT = 91,44% e ER = 86,01%) nas seguintes proporções: 75%C:25%V; 50%C:50V; 25%C:75%V; 0C:100V, com três repetições.

Após a homogeneização, metade da quantidade de cada mistura foi calcinada em mufla a 800°C por uma hora e resfriadas à temperatura ambiente e a outra metade foi mantida *in natura* (25°C). Essas amostras são doravante denominadas 800 e 25, respectivamente. As misturas tratadas termicamente possuem solubilidades variadas (Tabela 1).

Tabela 1. Porcentagem de K₂O solúvel dos calcários usados nas misturas

	% K ₂ O Total	% K ₂ O (H ₂ O)	% K ₂ O (ác. cítrico)
CC 25°C	0,050	0,003	0,009
CC 800°C	0,100	0,006	0,015
CD 25°C	0,030	0,001	0,010
CD 800°C	0,012	0,012	0,020

CC calcário calcítico, CD calcário dolomítico; 25°C *in natura* e 800°C calcinada

A quantificação do K diretamente nas amostras tratadas foi feita utilizando microscópio eletrônico de varredura (MEV) LEO EVO 40 XVP com sistemas de microanálise de raios-X da Bruker (Quantax EDS e Software Espirit) (Tabela 2).

Tabela 2 Porcentagem de K₂O das misturas de verdete quantificadas pela microscopia eletrônica de varredura com microanalisador EDS.

Misturas*	% K ₂ O		
	25°C	800°C	800°C Trat
	média ± desvio padrão		
75CC:25V	3,37 ± 0,42	4,21 ± 0,56	3,78 ± 0,12
50CC:50V	4,09 ± 0,11	7,76 ± 0,31	6,97 ± 0,38
25CC:75V	5,96 ± 0,51	6,02 ± 0,68	7,69 ± 0,35
75CD:25V	4,73 ± 0,48	3,71 ± 0,33	3,80 ± 0,48
50CD:50V	5,35 ± 0,16	5,29 ± 0,23	5,93 ± 0,56
25CD:75V	6,11 ± 0,73	6,38 ± 0,39	7,26 ± 0,33
0CC:100V	7,67 ± 0,16	8,29 ± 0,46	8,58 ± 0,26

*% CC calcário calcítico, V verdete, CD calcário dolomítico, 25°C amostras *in natura* e 800°C calcinada

Um outro tratamento avaliado foi a solubilização da amostra de verdete, tanto em *in natura* quanto calcinada, adicionando-se 10 mL de NH₄OH concentrado (pH 14,1) em 2 g da amostra. A suspensão foi agitada por 1 hora a 200 rpm em agitador mecânico horizontal. As amostras foram secas ao ar livre e, em seguida, a solubilidade do K em água e em ácido cítrico foi realizada, tanto das amostras *in natura*, quanto das amostras calcinadas, que também foram calcinadas ou mantidas em *natura* (doravante denominadas 25T e 800T, respectivamente).

A composição mineralógica das amostras do verdete puro, misturado com o calcário, *in natura* e calcinado foi determinada por

meio de difratometria de raios-X, as amostras foram maceradas e passadas em peneiras de 150 micrômetros, submetidas à difração de raios-X pelo método do pó, em aparelho PW Phillips 1840, com ajuste angular (2θ) utilizando a radiação cobalto $K\alpha$ com filtro de níquel.

Após a preparação das misturas, foi analisado o K solúvel em água e ácido cítrico a 2%, por fotometria de chama, segundo Brasil (2007). Os dados referentes ao K solúvel foram submetidos a análises de variância por meio do programa estatístico Sisvar (Ferreira 2008). As médias dos resultados foram comparadas utilizando o teste de Scott-knott a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os maiores valores de K solúvel em água foram obtidos a partir das misturas tratadas com NH_4OH tanto para as misturas com CC quanto para com CD (Figuras 1 e 2). As porcentagens de K_2O solúvel foram calculadas em relação ao total existente em cada mistura.

Quando comparado apenas o efeito da calcinação não houve diferenças significativas no aumento K solúvel em água, porém quando associado a calcinação e tratamentos com NH_4OH (800T) nas misturas, obteve-se um aumento significativo na solubilidade. Os

maiores valores foram obtidos nas misturas 0:100V *in natura* e tratado com NH_4OH (25T), 25CC:75V e 50CC:50V (800T) e (25T) para ambas as misturas (Figura 1).

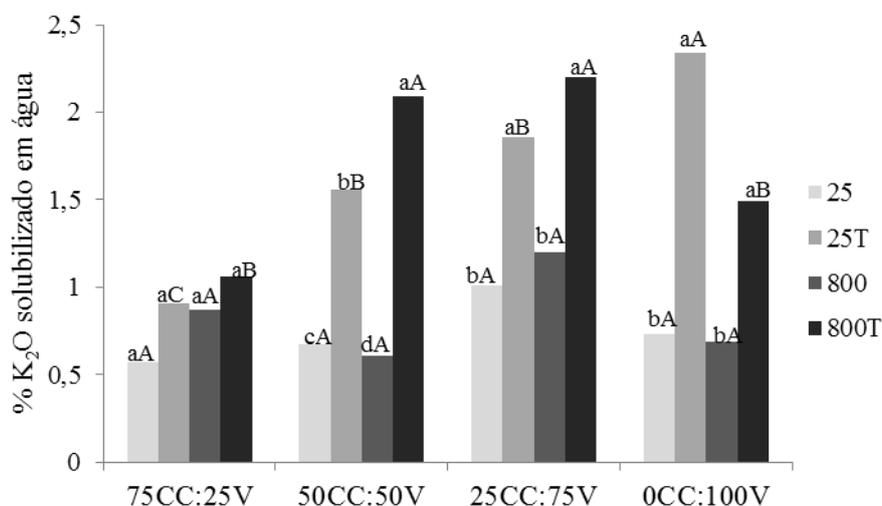


Figura 1. Porcentagem de K_2O solúvel em água em misturas do verdete com calcário calcítico (VCC), tratadas (25T e 800T) e não tratadas com NH_4OH (25 e 800), calcinadas (800 e 800T) e *in natura* (25 e 25T). Mesma letra maiúscula (refere-se à comparação das misturas nas diferentes temperaturas e tratamentos), e mesma letra minúscula (refere-se à comparação dos diferentes tratamentos em cada mistura), não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott.

O tratamento das misturas com o NH_4OH mostrou efeito positivo na liberação de potássio para a solução, principalmente quando foi associado com calcinação, visto que os maiores valores foram obtidos a 800T, com exceção do verdete puro (0C:100V). Isto

pode ser explicado pelo efeito fundente dos carbonatos (Figura 1), facilitando a quebra de estrutura dos minerais contidos no verdete. A mistura fundida ao ser resfriada transforma-se em vítrea, e evita a recristalização do material fundido, isto é, torna-se amorfa, com as fases contendo K solúvel em água, e ácidos fracos. Portanto a presença de calcário possibilitou uma maior extração de K, por auxiliar na transformação de fases.

Hellmann (1994), estudando a dissolução de feldspatos, encontrou uma forte evidência por dissolução não-estequiométrica a uma temperatura elevada a pH básico.

Comportamento semelhante foi obtido nas misturas do verdete com calcário com maior teor de magnésio (CD). Quando calcinadas e tratadas com NH_4OH (800T), obtiveram-se aumentos significativos na liberação de K para a solução, destacando a mistura 25CD:75V (Figura 2).

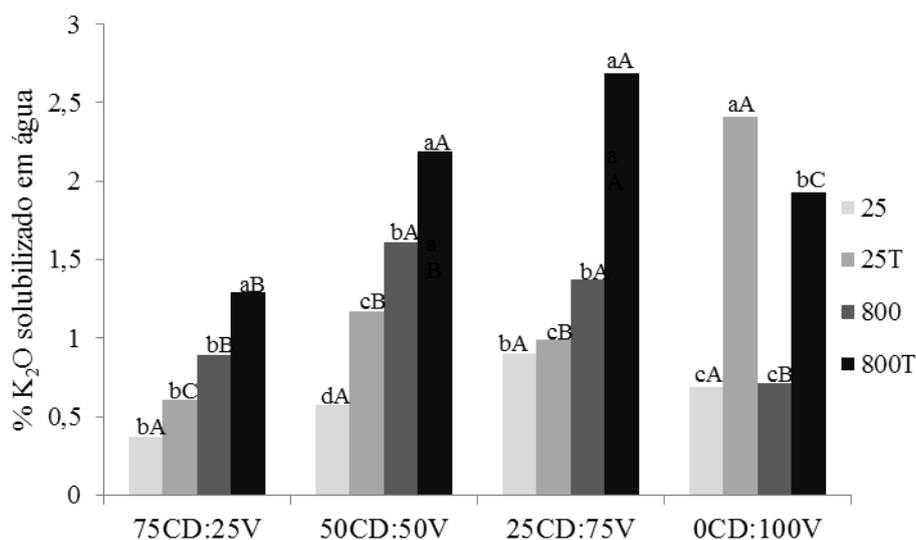


Figura 2. Porcentagem de K_2O solúvel em água em misturas do verdete com calcário dolomítico (VCD), tratadas (25T e 800T) e não tratadas com NH_4OH (25 e 800), calcinadas (800 e 800T) e *in natura* (25 e 25T). Mesma letra maiúscula (refere-se à comparação das misturas nas diferentes temperaturas e tratamentos), e mesma letra minúscula (refere-se à comparação dos diferentes tratamentos em cada mistura), não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott.

A maior quantidade de K solúvel em ácido cítrico foi obtida em amostras calcinadas e sem tratamento com NH_4OH (Figura 3), com exceção do verdete sem calcário que apresentou 21% e 15% K_2O solubilizado quando calcinado e pré-tratado com NH_4OH respectivamente (Figuras 3 e 4).

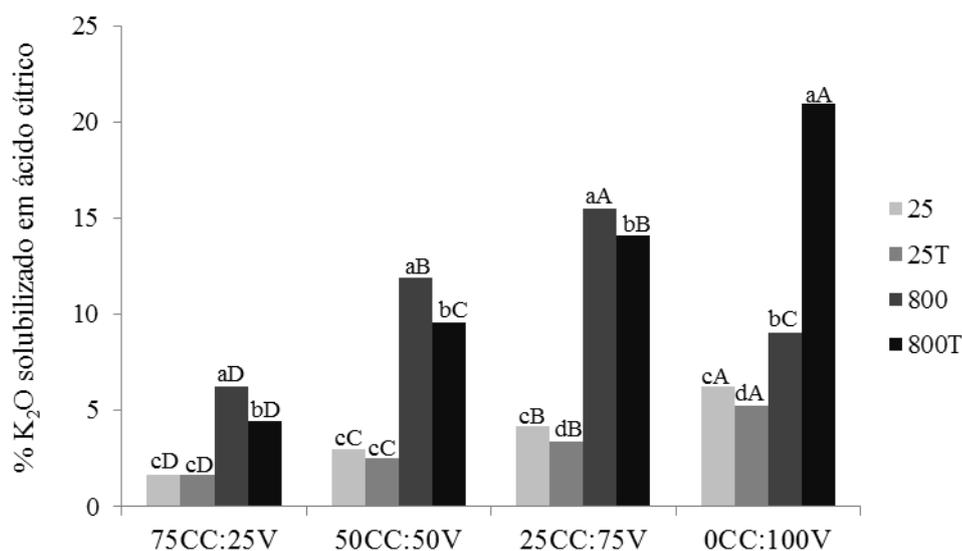


Figura 3. Porcentagem de K_2O solúvel em ácido cítrico em misturas do verdete com calcário calcítico (VCC), tratadas (25T e 800T) e não tratadas com NH_4OH (25 e 800), calcinadas (800 e 800T) e *in natura* (25 e 25T). Mesma letra maiúscula (refere-se à comparação das misturas nas diferentes temperaturas e tratamentos), e mesma letra minúscula (refere-se à comparação dos diferentes tratamentos em cada mistura), não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott.

O K solubilizado em ácido cítrico foi maior nas misturas do calcário com maior teor de cálcio do que magnésio, pois a calcita perde CO_2 em temperaturas mais baixas que a dolomita, havendo uma concentração do K na amostra. O cálcio diminui o ponto de fusão da mistura e não se recristaliza durante o resfriamento, pois a recristalização acarreta perda de solubilidade (Sanjad et al. 2004).

Para as misturas do verdete com CD, os maiores valores de potássio solúvel em ácido cítrico também foram obtidos quando as

amostras foram submetidas ao processo de calcinação sem pré-tratamento com NH_4OH , sendo maior na mistura 25CD:75V (Figura 4).

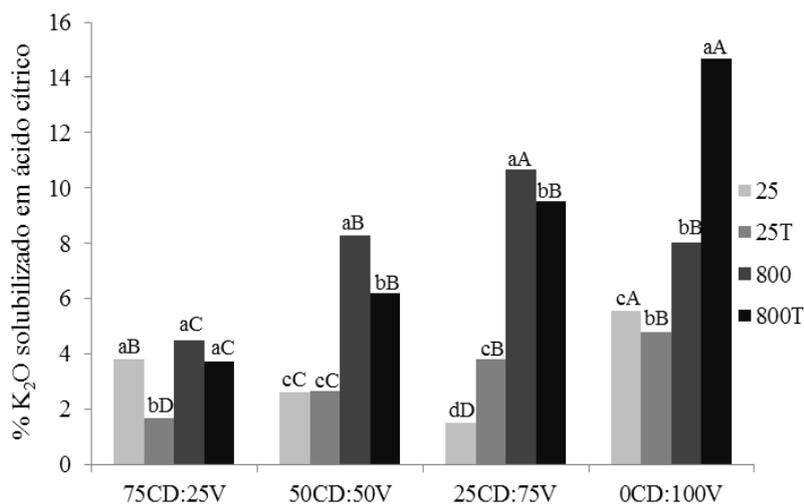


Figura 4. Porcentagem de K_2O solúvel em ácido cítrico em misturas do verdete com calcário dolomítico (VCD), tratadas (25T e 800T) e não tratadas com NH_4OH (25 e 800), calcinadas (800 e 800T) e *in natura* (25 e 25T). Mesma letra maiúscula (refere-se à comparação das misturas nas diferentes temperaturas e tratamentos), e mesma letra minúscula (refere-se à comparação dos diferentes tratamentos em cada mistura), não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott.

O processo de calcinação promoveu o enriquecimento em alguns minerais presentes originalmente na rocha, a temperatura de calcinação não foi suficiente para colapsar a estrutura dos minerais potássicos, apenas promoveu a desidroxilação da caulinita, isto é, perda de água estrutural. A caulinita transformou-se em um material

de baixa cristalinidade, podendo ser uma importante fonte de formas não trocáveis de K ao longo do tempo, pois o K fica adsorvido na superfície externa (Figuras 5 e 6).

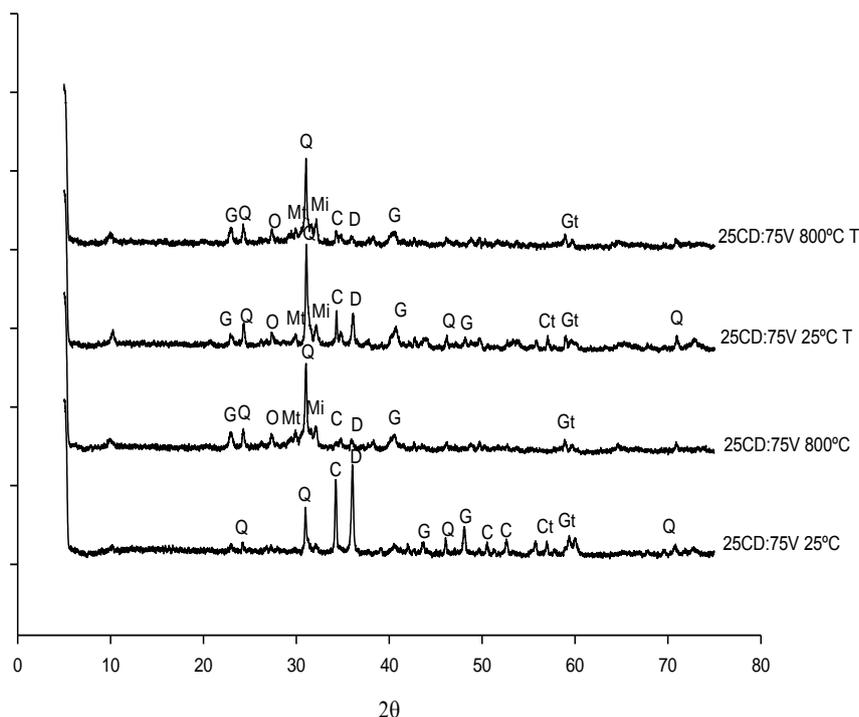


Figura 5. Difratomogramas de raios-X (espaçamento em graus 2 teta) da mistura do verdete (75%) com calcário dolomítico (25%) G = glaucônita, Gt = goethita, Q = quartzo, Mi = microclina, O = ortoclásio, Mt = montmorilonita, C = calcita, Ct = caulinita, D = dolomita

A glaucônita é um silicato lamelar hidratado de potássio e ferro, com lamelas compostas por 3 folhas (2 tetraédricas e 1 octaédrica), sendo que, nas folhas octaédricas há a substituição isomórfica de mais da metade dos íons Al^{3+} por Fe^{2+} . Portanto, a

glaucionita é um mineral micáceo que é semelhante à illita, sendo difícil a sua discriminação em difratometria de raios-X (Gamero et al. 2004).

O processo de calcinação promoveu maior disponibilidade de sílica e bases (K e Mg), pois ocorrem reações entre as bases dos carbonatos e os silicatos. (Figuras 5 e 6). Neste processo, os minerais de baixa cristalinidade podem se recristalizarem em novos minerais hidratados, propiciando a formação de montmorilonita que apresenta estrutura defeituosa devido à substituição isomórfica dos átomos de Mg ou Fe pelos os átomos de Al nos octaedros e os átomos de Al pelos os átomos de Si nos tetraedros (Melo et al. 2002).

O pré-tratamento com NH_4OH nas misturas dificultou o processo de fusão, conseqüentemente na mudança de fase, apresentando maior intensidade do pico da calcita e ainda presença da caulinita (Figuras 5 e 6).

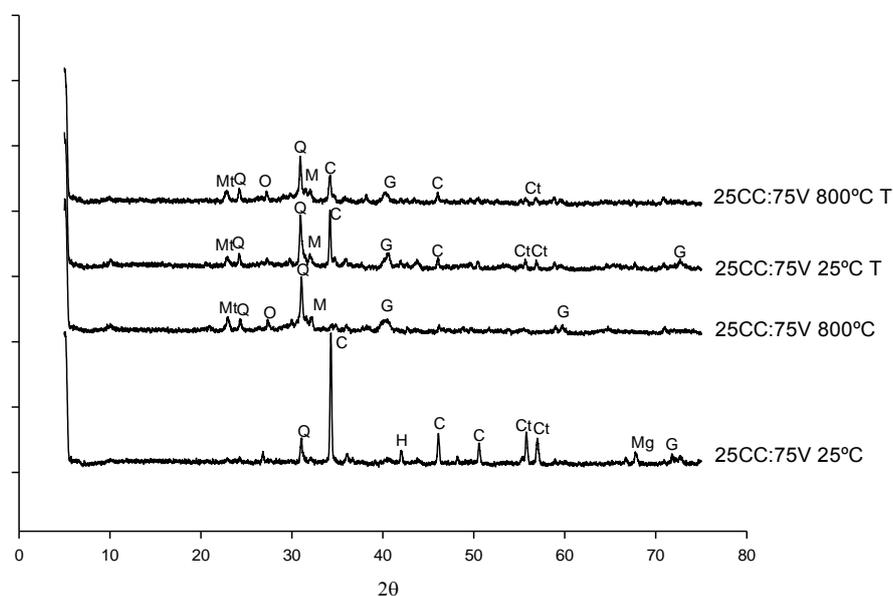


Figura 6. Difratoogramas de raios-X (espaçamento em graus 2 teta) da mistura do verdete (75%) com calcário calcítico (25%). G = glaucônita, Q = quartzo, O = ortoclásio, Mt = montmorilonita, C = calcita, Ct = caulinita, M = microclina, H = hematita, Mg = magnetita.

As misturas 50CC:50V e 50CD:50V, calcinadas apresentaram maior intensidade nos picos de quartzo, montmorilonita e microclina e, a 25°C presença de caulinita, maior intensidade no pico da calcita e também maior intensidade no pico da dolomita para a mistura com CD (Figuras 7 e 8).

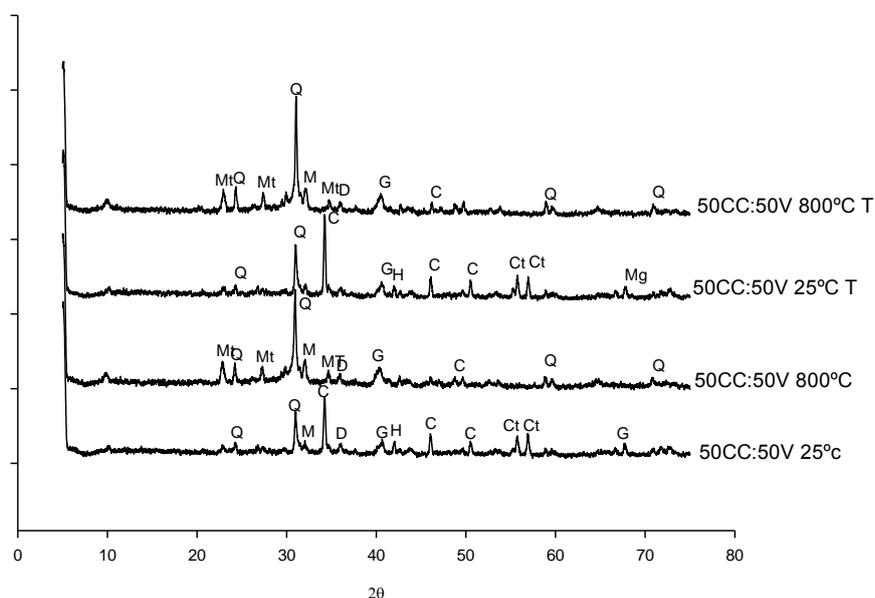


Figura 7. Difratoformas de raios-X (espaçamento em graus 2 teta) da mistura do verdete (75%) com calcário calcítico (25%). G = glauconita, Q = quartzo, Mt = montmorilonita, C = calcita, Ct = caulinita, M = microclina, H = hematita, Mg = magnetita.

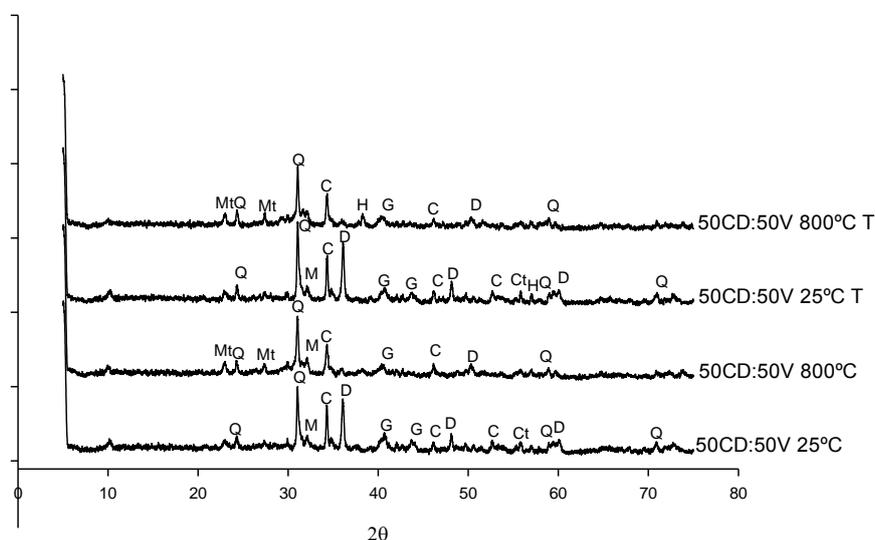


Figura 8. Difratoformas de raios-X (espaçamento em graus 2 teta) da mistura do verdete (75%) com calcário dolomítico.(25%) G = glauconita, Q =quartzo, O = ortoclásio, Mt = montmorilonita, C = calcita, Ct = caulinita, M = microclina, H = hematita, Mg = magnetita.

O pré-tratamento com NH_4OH para essas proporções também dificultou o processo de solubilização. Praticamente não houve diferenças nos espectros, apenas aumentando a intensidade dos picos da caulinita e também na mistura com CC aumentando o pico da calcita.

O aumento da proporção de calcário em relação à do verdete (3:1), ocasionou diminuição na solubilidade de potássio, pois a maior quantidade de carbonatos propicia uma diminuição da temperatura de queima, com isso, o processo de calcinação não foi suficiente para a alteração de fases (Figuras 9 e 10). A contribuição deles em teor de potássio é quase nula (Tabela 1), sua função nas misturas se restringe em promover a alteração de fase promovendo liberação de K dos minerais contidos nas rochas.

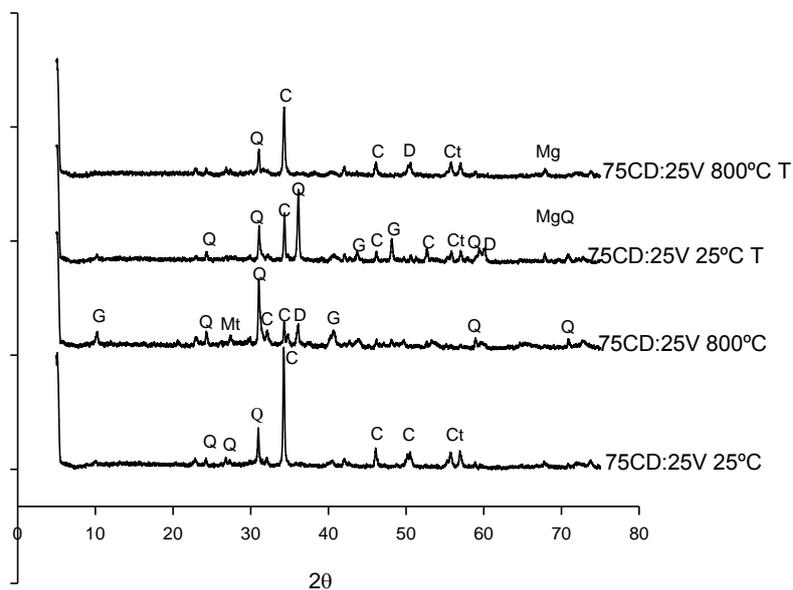


Figura 9. Difratoqramas de raios-X (espaçamento em graus 2 teta) da mistura do verdete (75%) com calcário dolomítico (25%) G = glaucônita, Q = quartzo, C = calcita, Ct = caulinita, Mg = magnetita.

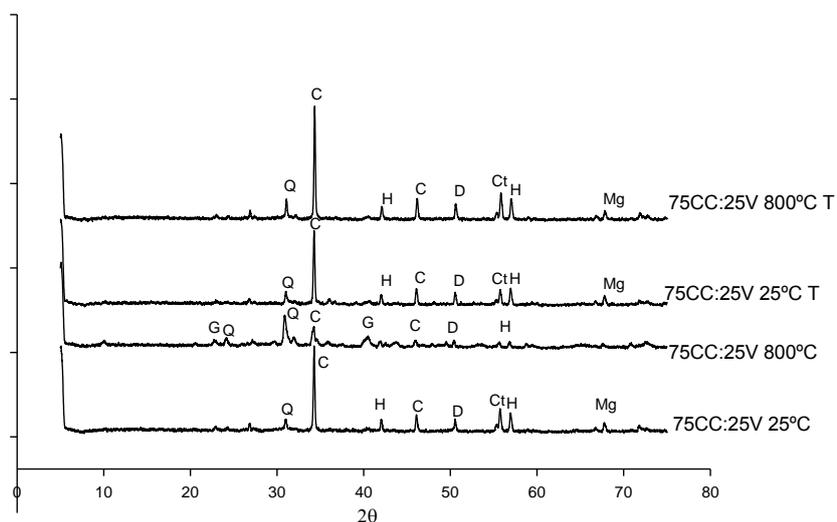


Figura 10. Difratoqramas de raios-X (espaçamento em graus 2 teta) da mistura do verdete (75%) com calcário calcítico (25%) G = glaucônita, Q = quartzo, C = calcita, Ct = caulinita, H = hematita, Mg = magnetita.

Quanto maior a quantidade de calcita adicionada, a temperatura e tempo de calcinação alcançados não foram suficientes para conseguir um equilíbrio termodinâmico, sendo que uma grande porção de Ca ficou sem combinação.

O difratograma do verdete sem o calcário não apresentou diferença na composição química em nenhum dos tratamentos aplicados, porém a maior quantidade de K solúvel foi a 800°C tratado com NH₄OH (Figura 3), provavelmente devido à semelhança dos raios iônicos, podendo o amônio deslocar o potássio dos sítios de troca no mineral (Figura 11).

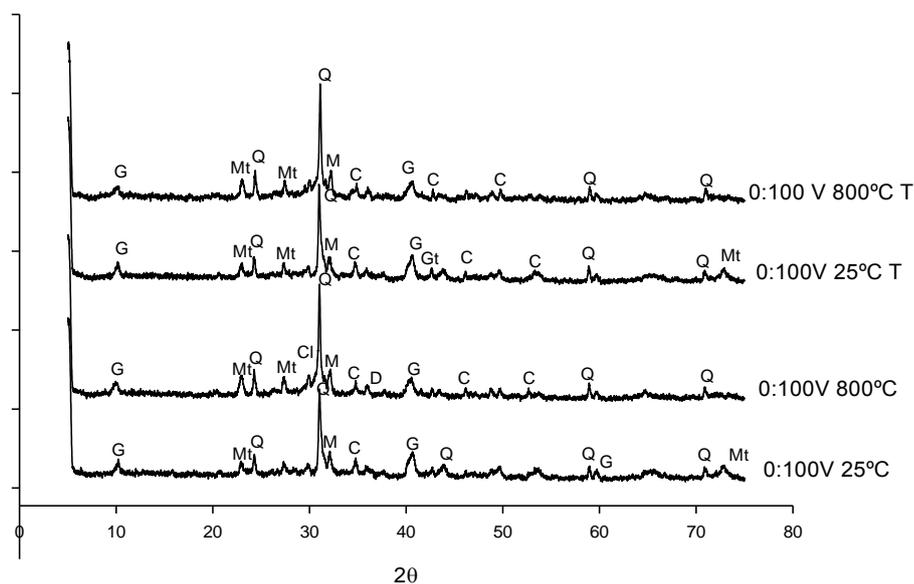


Figura 11. Difratogramas de raios-X (espaçamento em graus 2 teta) de amostras do verdete. G = glauconita, Q = quartzo, O = ortoclásio, Mt = montmorilonita, C = calcita, M = microclina, H = hematita, Mg = magnetita, D = dolomita.

CONCLUSÕES

O processo de calcinação proporcionou maior solubilização do K.

O aumento da proporção de calcário em relação à do verdete ocasionou diminuição na solubilidade de potássio, pois a maior quantidade de carbonatos propicia uma diminuição da temperatura de queima, com isso, o processo de calcinação não foi suficiente para a alteração de fases, visto que a contribuição de K nos calcários é praticamente nula.

O tratamento 0C:100V calcinado por uma hora na temperatura de 800°C e tratado com NH₄OH e a mistura 25CC:75V submetidas à calcinação liberaram maior quantidade de K para a solução, um aumento de 3,4 e 3,7 vezes em relação a amostra *in natura*, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL Instrução Normativa nº 28, de 27 de julho de 2007. Aprova os Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes Minerais, Orgânicos, Organo-Minerais e Corretivos, disponíveis na Coordenação-Geral de Apoio Laboratorial-CGAL/SDA/MAPA, na Biblioteca Nacional de Agricultura – BINAGRI e no sítio do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 31 jul. 2007. Seção 1, p. 11.

Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM, Brasília, 2011. Potássio. Disponível em:https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivArquivo=7404 Acesso em: 21 mar. 2013.

FERREIRA, D.F. SISVAR: Um programa para análises e ensino de estatística. *Revista Symposium*, Recife, v. 6, n. 2, p. 36-41, 2008.

GAMERO, R.M.P., TORRADO, P.V., FERREIRA, T.O. Mineralogia e físico química dos solos de mangue do rio Iriri no canal de Bertioga. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, p. 233-243, 2004.

HELLMANN, R. The albite-water system; Part I, The kinetics of dissolution as a function of pH at 100, 200, and 300 degrees C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, London, v. 58, p. 595-611, 1994.

LAPIDO-LOUREIRO, F.E.V.; NASCIMENTO, M. Importância e função dos fertilizantes numa agricultura sustentável e competitiva. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.). *Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: CETEM/Petrobrás, 2009. p.81-132.

LEITE, P. C. *Efeitos de tratamentos térmicos em misturas de verdete de Abaeté, fosfato de Araxá e calcário magnesiano, na disponibilidade de potássio e fósforo*. 1985. 146 f. Dissertação (Mestrado em agronomia) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1985.

LIMA, O.N.B.; UHLEIN, A.; BRITTO, W. Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 4, p. 204-215, 2007.

LUZ, P.H.C.; OTTO, R.; VITT, G.C.; QUINTINO, T.A.; ALTRAN, W.S.A.; IKEDA, R. Otimização da aplicação de corretivos agrícolas e fertilizantes. IPNI, *Informações Agronômicas*, n. 129, 2010.

MANNING, D.A.C. Mineral sources of potassium for plant nutrition: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 30, n. 2, p. 281-294, 2010.

MARTINS, E.S.; RESENDE, A.V.; OLIVEIRA, C.G.; FURTINI NETO, A.E. Materiais Silicáticos como Fontes Regionais de Nutrientes e Condicionadores de Solos. In: F. R. C. Fernandes; A. B. da Luz; Z. C. Castilhos. (Orgs.). *Agrominerais para o Brasil*. 1ed., Rio de Janeiro, RJ: CETEM, 1:89-104, 2010.

MELO, V.F.; NOVAIS, R.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FONTES, M.P.F.; SINGH, B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do Grupo Barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 29- 41, 2002.

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

SANJAD, T.A.B.C.; ANGÉLICA, R.S.; OLIVEIRA, M.M.; COSTA, W.A.M. Caracterização mineralógica de azulejos de Salvador e Belém dos séculos XVI, XVII e XIX REM: *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 57, n. 4, p. 255-260, 2004.

TOLEDO PIZA, P.A., BERTOLINO, L.C., SILVA, A.A.S., SAMPAIO, J.A., LUZ, A.B. Verdete da região de Cedro do Abaeté (MG) como fonte alternativa para potássio. *Geociências*, v. 30, p. 345-356, 2011.

VALARELLI, J.V., NOVAIS, R.F., VAZ DE MELO, M.T. et al. “Ardósias verdetes de cedro do Abaeté na produção de termofosfato potássico fundido e sua eficiência agrônômica” In: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 65, p. 343-375. 1993.

**ARTIGO 2 - ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO
SOLO PELA ADIÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS
MULTINUTRIENTES**

(Versão Preliminar Normas Revista Brasileira de Ciência do Solo)

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de rochas silicáticas e de um subproduto de mineração de manganês e suas alterações nos atributos químicos do solo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em vasos com 5 kg de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média, com disponibilidade de K^+ (Mehlich-1) de $0,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de solo. As fontes alternativas de nutrientes foram: verdete, verdete calcinado e tratado com NH_4OH , fonolito, ultramáfica, rejeito proveniente do processamento metalúrgico de manganês e a proporção de 75% dessas fontes com 25% de calcário calcítico. As misturas que apresentam 25% de calcário foram calcinadas a 800°C por uma hora em mufla. As fontes foram aplicadas aos vasos nas doses de 0; 150; 300; 450 e; 600 kg ha^{-1} de K_2O , em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. As fontes alternativas de nutrientes foram aplicadas e incorporadas ao solo e permaneceram incubadas por um período de 45 dias, com umidade em torno de 70% da capacidade de campo. Foram coletadas amostras de solo para análises químicas e de fracionamento das formas de potássio no solo após o período de incubação e observou-se que as fontes estudadas alteraram a disponibilidade de nutrientes de maneira diferenciada e os atributos químicos do solo. As misturas de rochas silicáticas calcinadas com calcário promoveram maior aumento nos valores de pH do solo: ultramáfica, verdete,

fonolito, rejeito. Com a aplicação da mistura de rejeito o K^+ trocável do solo passou de 22 mg dm^{-3} para 233 mg dm^{-3} , o P disponível (Mehlich-1) aumentou de $0,47 \text{ mg dm}^{-3}$ para $7,9 \text{ mg dm}^{-3}$ quando incorporado a ultramáfica, sendo que este tratamento também foi o que mais disponibilizou silício para o solo, e o Ca^{2+} de $0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ alcançou $2,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ quando aplicado a mistura de ultramáfica. O rejeito de mineração foi o tratamento que disponibilizou maior quantidade de Zn^{2+} e Mn^{2+} chegando a valores de 61 e 396 mg dm^{-3} respectivamente. As fontes alternativas de composição química variada quando misturadas ao solo e incubadas por 45 dias alteram a disponibilidade de nutrientes e os atributos químicos do solo, sendo importantes fontes de nutrientes para o solo.

Termos de indexação: acidez do solo, disponibilidade de nutrientes, pó de rocha, fracionamento do potássio.

SUMMARY: Changes in soil chemical properties alternative sources by the addition of multinutrients

The objective of this research was to evaluate the effect of applying ground rocks and a by-product of manganese mining and their alterations in soil chemical attributes. The experiment was conducted under greenhouse conditions in pots with 5 kg of soil (Red-yellow dystrophic Oxisol), where the potassium (K) content (Mehlich-1) was $0.06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. The treatments were applied in a completely randomized block design, with five K rates, ten sources of this mineral and three replicates. The K fertilizers used were: potassium chloride (control), verdete, verdete treated with NH_4OH , phonolite, ultramafic, by-product derived from metallurgical processing of manganese and

the proportion of 75% of these K fertilizers and 25% of limestone. The mixtures that contained 25% of limestone were heated at 800 ° C during 1 hour on a muffle. The fertilizers were applied at rates of 0, 150, 300, 450 and 600 kg ha⁻¹ of K₂O in a completely randomized design with three replications. The alternative sources of K were applied and incorporated into the soil, which was incubated for 45 days, at 70 % (w/w) moisture. After the incubation period, soil chemical analysis and K fractionation determinations indicated the K fertilizers altered the nutrient availability and soil chemical properties. The mixtures of heated silicate rocks with limestone promoted higher increases in soil pH in decreasing order: ultramafic>verdete>phonolite>by-product. Applying the residual by-product increased soil exchangeable K from 22 mg dm⁻³ to 233 mg dm⁻³, the available P (Mehlich-1) increased from 0.47 mg dm⁻³ to 7.9 mg dm⁻³ when ultramaphic was incorporated, and Ca⁺² of 0.2 cmol_c dm⁻³ reached 2.9 cmol_c dm⁻³ when the ultramaphic mixture was applied. The by-product residue was the treatment that released the greatest amounts of Zn²⁺ and Mn⁺², reaching values of 61 and 396 mg dm⁻³, respectively. The alternatives sources of variable chemical composition when mixed to the soil and incorporated for 45 days alters nutrient availability and the soil chemical attributes, and are important sources of nutrients.

Index terms: soil acidity, nutrient availability, rock powder, multi-nutrient fertilizer.

INTRODUÇÃO

Decorrente da grande área cultivada e pelo fato de a maior parte de seus solos apresentarem baixa disponibilidade de nutrientes, o Brasil é um grande consumidor de fertilizantes minerais de alta solubilidade no mundo. Dentre eles, destaca-se o KCl, do qual a maior parte utilizada é importada (DNPM, 2011).

Atualmente se conhecem rochas no Brasil que são ricas em potássio, porém apresentam menor solubilidade que o KCl. Os feldspatos alcalinos, os feldspatóides e as micas são considerados potenciais fontes alternativas de K para a fabricação de fertilizantes na forma de sais, de termofosfatos ou para aplicação direta ao solo (Nascimento & Loureiro, 2004). Das rochas preliminarmente estudadas por (Resende et al., 2005), a biotita xisto, brecha alcalina, carbonatito, flogopitito e ultramáfica alcalina foram as apresentaram maior potencial. Essas rochas possuem quantidades variáveis de diversos elementos químicos que têm função de nutrientes no desenvolvimento das plantas.

Dada a enorme geodiversidade que ocorre no Brasil, a tecnologia da aplicação de pó de rocha (rochagem) configura-se como uma alternativa ao fornecimento de nutrientes ao solo. As rochas silicáticas ou rejeitos de mineração normalmente contêm nutrientes de plantas em quantidades e disponibilidades que variam em função da composição dos minerais presentes nas rochas, que contribuem para aumentar a fertilidade do solo, e em geral, são fontes de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), muitas vezes incluindo micronutrientes, tais como o zinco (Zn) e manganês (Mn), que são essenciais para a nutrição das plantas (Van Straaten, 2007).

Apresentam liberação lenta e gradual de nutrientes que diminui as perdas por lixiviação e favorece uma ação de longo prazo do insumo aplicado. Em alguns casos, além do K e de outros nutrientes apresentam efeito alcalinizante, atuando como condicionadores de solo (Resende et al., 2005).

Nesse sentido, é essencial o conhecimento da mineralogia e das formas de K nos solos, em conjunto com outros atributos, que podem contribuir para melhor predição do suprimento, fixação e disponibilidade desse nutriente para as plantas cultivadas.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de fontes alternativas contendo potássio e suas alterações nos atributos químicos do solo e quantificar as diferentes formas de potássio no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média foram coletadas no município de Itutinga, MG, na camada de 0-20 cm. A análise do solo apresentou os seguintes valores: pH (água) = 4,6; $K^+ = 0,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $Si = 5,83 \text{ mg dm}^{-3}$, $S = 10,3 \text{ mg dm}^{-3}$, $P = 0,42 \text{ mg dm}^{-3}$; $Ca^{2+} = 0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $Mg^{2+} = 0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $Al^{3+} = 0,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $(H + Al) = 3,43 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $SB = 0,36 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $CTC \text{ a pH } 7,0 (T) = 3,78 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $Fe = 18,1 \text{ mg dm}^{-3}$; $Zn = 2,52 \text{ mg dm}^{-3}$; $Cu = 0,71 \text{ mg dm}^{-3}$, $B = 0,1 \text{ mg dm}^{-3}$; $Mn = 0,1 \text{ mg dm}^{-3}$; areia = 692 g kg^{-1} ; silte = 25 g kg^{-1} ; argila = 283 g kg^{-1} ; P-resina = $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ e P-remanescente = $18,95 \text{ mg L}^{-1}$. Os extratores foram: KCl 1 mol L^{-1} para Ca, Mg e Al; Mehlich-1 de K, P, Fe, Zn, Mn, Cu e Na.

As rochas moídas e o subproduto de mineração utilizados neste estudo são originários de diferentes processos e regiões do país: Fonolito (Planalto de Poços de Caldas, MG), rocha vulcânica alcalina (altos teores de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$); ultramáfica alcalina (Lages, SC) rocha formada por uma intrusão ígnea, composto de minerais ferromagnesianos, plagioclásios e carbonatos; rejeito do processamento metalúrgico de manganês (Sete Lagoas, MG), em que, no processamento, o potássio é separado a partir do minério de ferro e concentra-se no rejeito; verdete (Cedro de Abaeté, MG) é um tipo de ardósia de coloração verde clara, de matriz argilosa e com presença de óxido de ferro, em glauconita.

As rochas moídas foram aplicadas e incorporadas ao solo de cada vaso (5 kg de solo por vaso), deixando-os em um período de incubação de 45 dias, com a umidade em torno de 70% da capacidade de campo. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em arranjo fatorial contendo 9 tratamentos: fonolito; mistura de calcário:fonolito (25:75F); verdete; mistura de calcário:verdete (25:75V); verdete tratado com NH_4OH e calcinado (Verdete NH_4OH); ultramáfica; mistura de calcário:ultramáfica (25:75U); rejeito de mineração de manganês e sua mistura calcário:rejeito (25:75R). As misturas foram realizadas com 25% de calcário contendo baixo teor de Mg (CaO 52,84% e MgO 2,87%, doravante denominado calcítico) e calcinadas a 800°C por uma hora em mufla. A quantidade de cada tratamento foi dimensionada de forma a suprir 0, 150, 300, 450 e 600 kg ha^{-1} de K_2O , correspondendo a 0,31, 0,62, 0,94, 1,25 g de K por vaso, respectivamente e três repetições. A quantidade de rocha e do rejeito aplicada ao solo foi definida com base na concentração total K_2O , sendo, verdete 5,10%,

ultramáfica 3,10%, fonolito 5,45%, rejeito 10,3%, quantificado pelo método 3052 (USEPA, 1998).

Após os 45 dias de incubação, amostras de solo foram coletadas para análise do pH em (H₂O), Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, P, Zn e Mn, saturação de alumínio (m%), capacidade de troca de cátions potencial (CTC a pH 7,0) e saturação por bases (S%).

O fracionamento do potássio foi realizado utilizando-se métodos específicos para cada forma: o K total foi extraído por digestão em micro-ondas pelo método 3052 (USEPA, 1998), K trocável pelo extrator Mehlich-1 (Embrapa, 1997) e o K não trocável por solução fervente de ácido nítrico 1 mol L⁻¹ (Pratt, 1973). O K⁺ solúvel foi extraído por água fervente (Brasil, 2006). O K foi determinado por fotometria de chama.

Os dados obtidos foram submetidos a testes de média e análise de regressão por meio do software estatístico SISVAR 5.3 ® (Ferreira, 2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As doses de K, tipos de rocha e as respectivas interações influenciaram significativamente a disponibilidade de nutrientes e alteraram os atributos químicos do solo incubado (p<0,05).

Em geral, os valores de pH aumentaram proporcionalmente à dose e também variaram com a fonte alternativa (Figura 1 e Quadro 1). As misturas de rochas silicáticas calcinadas com calcário foram as que promoveram maiores elevações de pH do solo: 25:75U>25:75V>25:75F>25:75R em ordem decrescente de elevação do pH, apresentando PRNT de 29, 17, 30 e 48% respectivamente, com

eficiência relativa (ER%) superior a 70%. Quando não foram misturados com o calcário, o aumento do pH foi linear em função da dose, com exceção dos tratamentos verdete e verdete tratado com NH_4OH , em que não houve alteração em função da dose (quadro 1). O solo utilizado nesta pesquisa possui baixa CTC (T) ($3,78 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sendo pouco tamponado a ação de materiais neutralizantes de acidez.

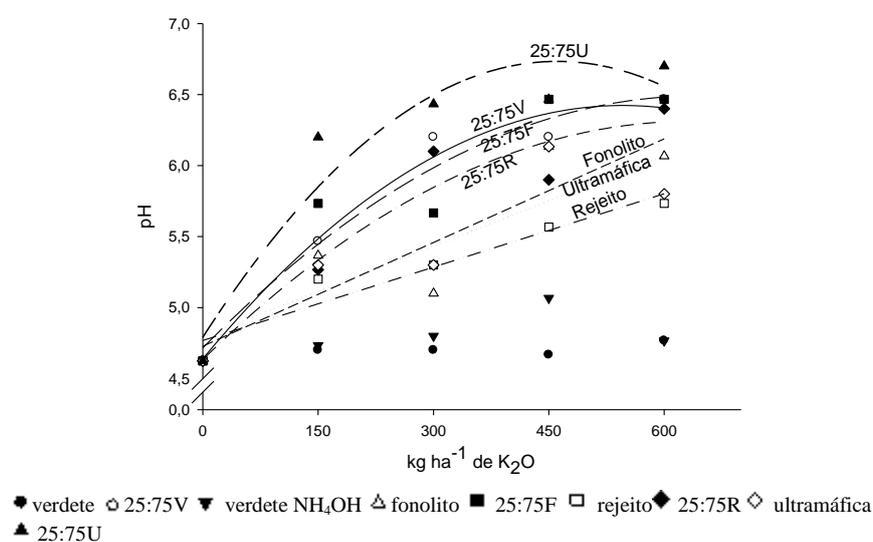


Figura 1. pH do solo em função dos tratamentos e das doses de K depois de 45 dias de incubação em vasos.

A variação de pH também pode ser explicada pelos valores diferentes de carbonato total presentes em cada rocha, ultramáfica (13,1 e 18,5), verdete (4,83 e 3,68), fonolito (1,52 e 0,27) e rejeito (3,58 e 0,79) mg kg^{-1} de CaO e MgO respectivamente.

A disponibilidade de cálcio e a soma de bases (SB) aumentaram com o a elevação nas doses de K_2O para a maioria dos tratamentos (Figuras 2a, 2b e Quadro 1) com exceção do fonolito, verdete, verdete tratado com NH_4OH e rejeito. Antes da adição dos

tratamentos, a disponibilidade de Ca^{+2} era muito baixa ($0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e após o período de incubação os fertilizantes promoveram aumento na disponibilidade de Ca^{+2} ($2,90 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Pode-se destacar a mistura de ultramáfica + calcário (75U:25C) que passou da classe de disponibilidade "muito baixa" para classe "bom" ($2,41 - 4,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (CFSEMG, 1999). Dentre os tratamentos aplicados que não foram calcinados com calcário, apenas a ultramáfica contribuiu para o aumento de Ca^{+2} no solo.

Quadro 1. Equações de regressão para pH, teor de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e soma de bases (SB) para cada tratamento aplicado após 45 dias de incubação.

Tratamento	Equação	R ²	Doses de K ₂ O (kg ha ⁻¹)				
			0	150	300	450	600
-----pH do solo-----							
25:75V	Y=-000006x ² +0,006x+4,65	0,9*	4,62	5,47	6,20	6,20	6,47
Fonolito	Y= 0,0024x+4,73	0,8*	4,62	5,36	5,10	6,13	6,06
25:75F	Y=-000004x ² +0,0055x+4,72	0,9*	4,62	5,73	5,66	6,46	6,46
Ultramáfica	Y= 0,001X+4,8	0,8*	4,62	5,30	5,30	6,13	5,80
25:75U	Y=-0,000009x ² +0,008x+4,8	0,9*	4,63	6,20	6,43	6,47	6,70
Rejeito	Y= 0,002X+4,77	0,9*	4,62	5,20	5,30	5,56	5,73
25:75R	Y=-0,000004x ² +0,005x+4,62	0,9*	4,62	5,26	6,10	5,90	6,40
-----Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³ -----							
25:75V	Y= -000006x ² +0,0067x+0,16	0,9*	0,20	1,13	1,53	2,06	1,93
25:75F	Y= 0,004x+0,31	0,9*	0,20	0,96	1,47	2,10	2,47
Ultramáfica	Y= -000004x ² +0,0038x+0,17	0,8*	0,20	0,67	0,77	1,40	1,00
25:75U	Y= -0,000012x ² +0,01x+0,24	0,9*	0,20	1,16	2,93	2,40	2,90
25:75R	Y= 0,0022x+0,27	0,9*	0,20	0,67	1,00	1,17	1,57
-----Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³ -----							
25:75V	Y= 0,000089x+0,1	0,6*	0,10	0,10	0,13	0,17	0,17
Ultramáfica	Y=-0,000001x ² +0,0009x+0,15	0,9*	0,10	0,20	0,23	0,30	0,20
25:75U	Y=-0,000001x ² +0,00051x+0,1	0,7*	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20
-----soma de bases cmol _c dm ⁻³ -----							
25:75V	Y=-0,000007x ² +0,0071x+0,36	0,9*	0,36	1,31	1,76	2,34	2,19
25:75F	Y= 0,004x+0,47	0,9*	0,36	1,21	1,74	2,51	2,89
Ultramáfica	Y= -0,000005x ² +0,053x+0,31	0,8*	0,36	0,97	1,14	1,96	1,39
25:75U	Y= -000012x ² +0,012x+0,42	0,9*	0,36	1,89	3,28	2,71	3,27
Rejeito	Y= 0,0009x+0,45	0,81	0,36	0,77	0,74	0,78	1,09
25:75R	Y= 0,0029x+0,46	0,97	0,36	1,02	1,45	1,61	2,26

*Significativo a 5% pelo teste de Scott Knott. Não significativo para: pH (verdete, verdete NH₄OH), Ca²⁺ (verdete, verdete NH₄OH, fonolito e rejeito), Mg²⁺ (verdete, verdete NH₄OH, fonolito, 25:75F, rejeito e 25:75R) e SB (verdete, verdete NH₄OH e fonolito).

Elevações na disponibilidade de magnésio ocorreram no solo incubado com a ultramáfica e a mistura de 25% de calcário +75% da ultramáfica e verdete. (Figura 2c e Quadro 1).

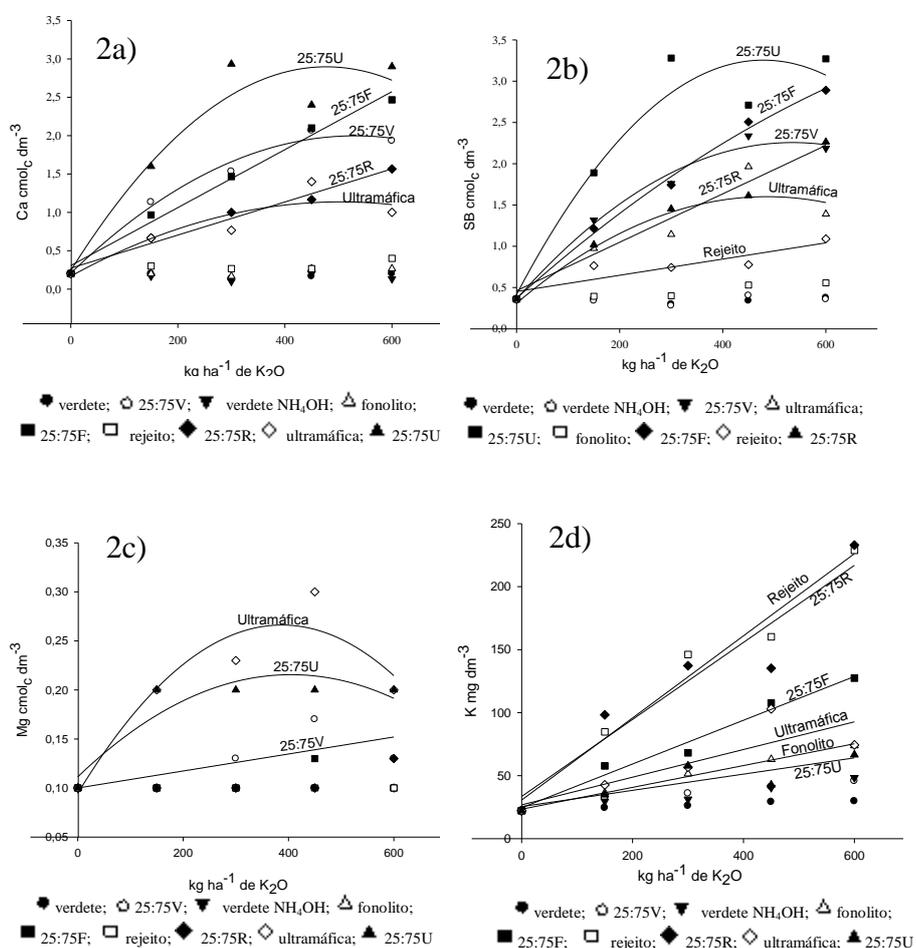


Figura 2. Disponibilidade de a) cálcio (Ca^{2+}), b) soma de bases (SB), c) magnésio (Mg^{2+}) e d) potássio (K^+) no solo em função dos tratamentos e das doses de K_2O após 45 dias de incubação.

A mineralogia das rochas é diversificada, o que explica o comportamento da liberação de nutrientes diferenciada para o solo. As taxas de liberação de K^+ aumentaram, depois do período de 45 dias de incubação do solo com as fontes multinutrientes, com exceção do verde puro, em mistura com calcário e tratado com NH_4OH (Figura 2d e Quadro 2). Embora esse silicato seja rico em K, ele apresenta minerais de baixa solubilidade, pois suas estruturas não são rompidas

com facilidade por meios naturais, sendo necessário um tratamento mais energético para a extração do elemento.

Quadro 2. Equações de regressão para o teor de K^+ para cada tratamento aplicado após 45 dias de incubação.

Tratament	Equação	R^2	Doses de K_2O ($kg\ ha^{-1}$)				
			0	150	300	450	600
			----- K^+ $mg\ dm^{-3}$ -----				
Fonolito	$Y=0,087x+23,39$	0,9*	22,17	36,40	51,48	62,92	73,84
25:75F	$Y=0,124x+24,54$	0,9*	22,17	57,72	68,12	107,64	127,40
Ultramáfica	$Y=0,109x+26,82$	0,7*	22,17	42,64	56,68	102,96	74,36
25:75U	$Y=0,064x+25,47$	0,7*	22,17	34,84	57,72	42,64	66,56
Rejeito	$Y=0,326x+30,64$	0,9*	22,17	84,68	146,12	160,16	228,80
25:75R	$Y=0,06x+25,47$	0,7*	22,17	98,28	137,28	135,20	232,96

Significativo a 5% pelo teste de Scott Knott. Não significativo para: Verdete, verdete NH_4OH e 25:75V. Método 3052 (USEPA, 1996).

O aumento resultou em um efeito linear e positivo sobre o K^+ trocável do solo, ou seja, quanto maiores às doses de K_2O aplicadas, maiores foram às concentrações do K trocável liberado. Os resultados evidenciam maior liberação de K do rejeito ($229\ mg\ dm^{-3}$) e de sua mistura 25:75R ($233\ dm^{-3}$), que por se tratar de um subproduto da mineração de manganês, que passou por um processo metalúrgico, tem a liberação de elementos facilitada. A liberação de K no solo tratado, em sequência decrescente, foi: Rejeito>25:75R>25:75F>ultramáfica>fonolito> 25:75U.

O teor inicial de K^+ trocável no solo antes da incubação era de $22\ mg\ dm^{-3}$, (Quadro 2) perto do mínimo para o crescimento da planta, ou seja, o teor considerado "baixo" ($16-40\ mg\ dm^{-3}$) (CFSEMG, 1999). Após os 45 dias de incubação, mesmo na menor dose aplicada, alguns dos tratamentos já atingiram o nível "médio" ($41-70\ mg\ dm^{-3}$), ultramáfica, 25:75F, rejeito e 25:75R, e com o

aumento das doses alcançou o nível de "alto" (71-120 mg dm⁻³) (Figura 2d e Quadro 2).

O aumento da disponibilidade de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ alterou a saturação por bases (V%) do solo (Figura 3 e Quadro 3), em geral, proporcionalmente às taxas de aplicação. Maiores valores foram obtidos pela aplicação das misturas com calcário, confirmando o efeito corretivo da acidez destes tratamentos, como vistos pelos valores de PRNT de cada tratamento.

Quadro 3. Equações de regressão para % de saturação por bases e por alumínio para cada tratamento aplicado após 45 dias de incubação.

Tratament	Equação	R ²	Doses de K ₂ O (kg ha ⁻¹)				
			0	150	300	450	600
----- saturação por bases (V%)-----							
Verdete	Não significativo		9,36	10,96	9,65	11,47	15,22
V NH ₄ OH	Não significativo		9,36	10,80	9,29	13,95	11,54
25:75V	Y=-0,0002x ² +0,207x+10	0,9*	9,36	39,57	50,44	62,85	59,71
Fonolito	Y= 0,018x+9,24	0,9*	9,36	12,78	12,49	18,13	19,95
25:75F	Y=-0,0001x ² +0,17x+10	0,9*	9,36	38,68	46,38	66,01	69,31
Ultramáfica	Y=-0,0002x ² +0,16x+8	0,9*	9,36	28,71	35,56	53,69	41,43
25:75U	Y=-0,0003x ² +0,28x+12	0,9*	9,36	53,01	72,64	69,49	75,36
Rejeito	Y= 0,039x+10,83	0,9*	9,36	20,09	22,19	26,43	35,13
25:75R	Y=-0,00007x ² +0,12x+10	0,9*	9,36	29,50	43,48	46,85	61,85
----- saturação por alumínio (m %)-----							
Verdete	Não significativo		50,2	54,29	57,42	54,31	52,07
V NH ₄ OH	Não significativo		50,2	52,62	58,82	45,04	50,71
25:75V	Y=0,0003x ² -0,26x+45,08	0,9*	50,2	2,25	0,00	0,00	0,00
Fonolito	Y=-0,0359x+50,78	0,8*	50,2	43,87	45,28	30,78	29,83
25:75F	Y=-0,00029x ² -0,246x+47	0,9*	50,2	9,73	0,00	0,00	0,00
Ultramáfica	Y=0,0003x ² -0,258x+44,5	0,8*	50,2	12,29	12,49	2,91	5,32
25:75U	Y=0,0003x ² -	0,8*	50,2	0,00	0,00	0,00	0,00
Rejeito	Y=0,00016x ² +0,165x+45,	0,8*	50,2	20,31	15,23	11,52	0,00
25:75R	Y=0,00025x ² -0,22x+46,3	0,9*	50,2	9,22	4,92	0,00	0,00

*Significativo a 5% pelo teste de Scott Knott.

De forma coerente com a sua ação corretiva de acidez a mistura 25:75U (PRNT de 29%) promoveu maior saturação por bases (75%). Ribeiro et al. (2010) demonstraram que a ultramáfica alcalina tem se mostrado promissora para utilização em solos ácidos, liberando K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , podendo influenciar na absorção de outros nutrientes como Fe, Mn e Zn, resultando em benefícios para o desenvolvimento das plantas e funcionando como condicionador de solo.

Já a saturação por alumínio diminuiu consideravelmente nas diversas fontes utilizadas e doses de K (Figura 3b e Quadro 3). No tratamento com verdete puro e tratado com NH_4OH não houve diferença, estes dois tratamentos também foram os que pouco alteraram o pH do solo (Quadro 1) que contribui para mudanças na saturação de alumínio em comparação aos outros silicatos.

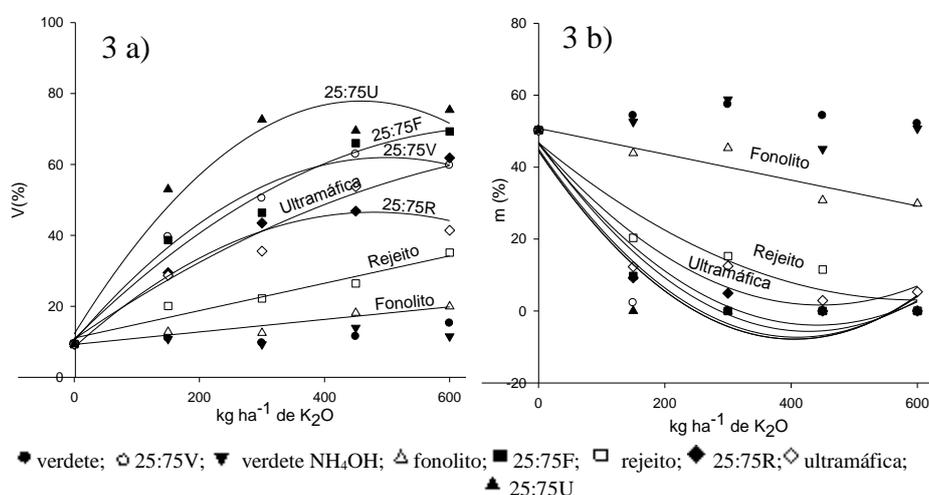


Figura 3. Valores de a) saturação por bases (V) e por b) alumínio (m) do solo em função dos tratamentos e das doses de K depois de 45 dias de incubação em vasos.

As rochas silicáticas, além de disponibilizar nutrientes minerais e melhorar as características físico-químicas como condicionadores de solo, também disponibilizam silício, muito importante no desenvolvimento de diversas culturas (Figura 4a e Quadro 4). Outros efeitos positivos dos silicatos também estão relacionados com as interações silício-fósforo, favorecendo o melhor aproveitamento de fósforo (Carvalho et al., 2001). O tratamento com adição de ultramáfica foi o que mais disponibilizou silício para o solo. Fosfato e silicato competem entre si pelos mesmos sítios de adsorção, de maneira que o segundo pode deslocar (dessorver) o primeiro, e vice-versa, da fase sólida para a líquida. Segundo (Prado & Fernandes, 2001), o silício ocupa os sítios de adsorção de P e, com isso, aumenta a disponibilidade de P na solução do solo.

A rocha ultramáfica e sua mistura disponibilizaram fósforo (P) para o solo, após o período de incubação. O P disponível (Mehlich-1), (Figura 4b e Quadro 4) no solo aumentou de $0,47 \text{ mg dm}^{-3}$ na dose zero para $7,9 \text{ mg dm}^{-3}$ na dose de $450 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$; e $4,5 \text{ mg dm}^{-3}$ na dose de 600. Isso se deve a vários fatores, o pH por exemplo influencia na disponibilidade de P, esse tipo de solo é caracterizado por ser de carga variável, dependente de pH, com o aumento do pH, tem-se maior disponibilidade de P.

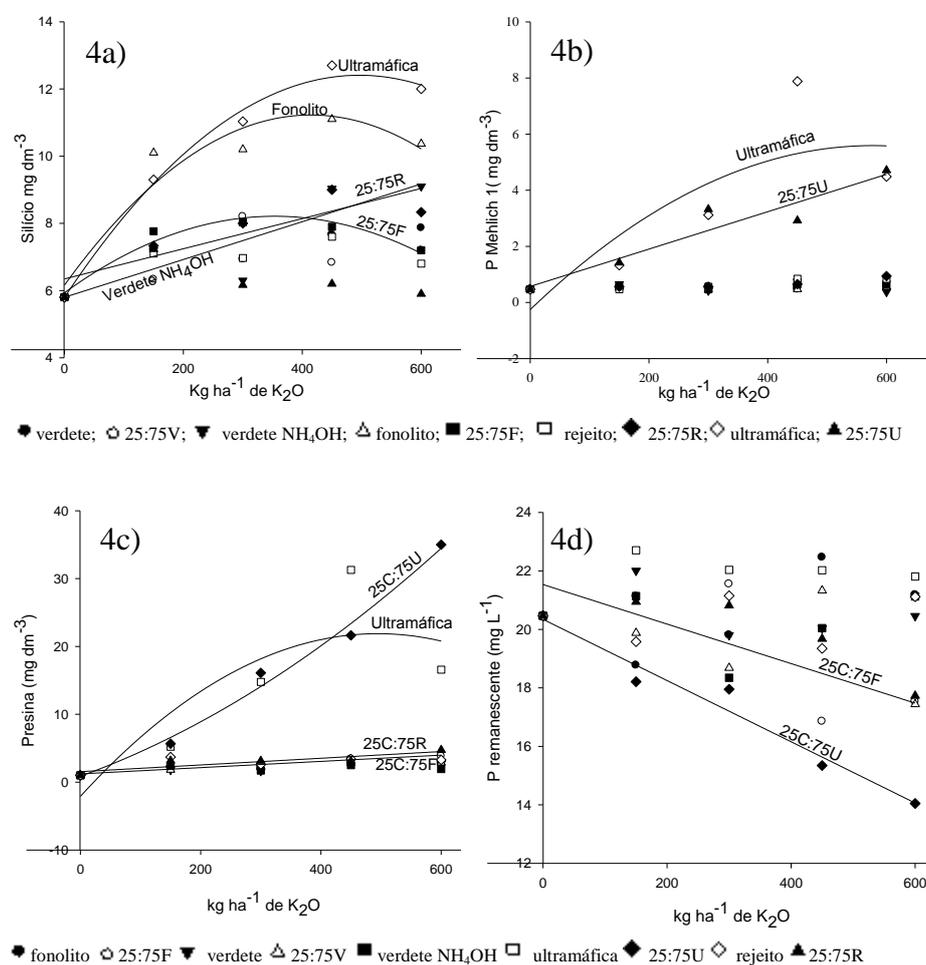


Figura 4. Alteração do teor de: a) silício, P (fósforo) do solo b) extrator Mehlich-1, c) resina e d) remanescente em função dos tratamentos e das doses depois de 45 dias de incubação em vasos

Ribeiro et al. (2010) observaram que as rochas ultramáficas também contribuíram para o aumento do K trocável em um Latossolo Amarelo, bem como do fósforo, sódio, pH e da saturação por bases.

Quadro 4. Equações de regressão para o teor de silício, P extraído por Mehlich-1, resina e P remanescente para cada tratamento aplicado após 45 dias de incubação.

Tratament	Equação	R ²	Doses de K ₂ O (kg ha ⁻¹)				
			0	15	300	45	600
-----Silício mg dm ⁻³ -----							
V NH ₄ OH	Y= 0,0056x+5,8	0,76*	5,8	7,20	6,30	9,0	9,10
Fonolito	Y= -0,00003x ² +0,024x+6,16	0,98*	5,8	10,1	10,2	11,	10,3
25:75F	Y= -0,00002x ² +0,013x+5,93	0,95*	5,8	7,77	8,03	7,9	7,20
Ultramáfica	Y= -0,00003x ² +0,03x+5,79	0,99*	5,8	9,30	11,0	12,	12,0
25:75R	Y= 0,0045x+6,35	0,77*	5,8	7,33	8,00	9,0	8,33
-----P Mehlich-1 mg							
Ultramáfica	Y= -0,000018x ² +0,02x-0,25	0,69*	0,4	1,32	3,12	7,8	4,48
25:75U	Y= 0,0067x+0,57	0,91*	0,4	1,42	3,32	2,9	4,71
-----P resina mg dm ⁻³ ---							
25:75F	Y= 0,0046x+1,22	0,97*	1,0	2,17	2,60	3,4	3,83
Ultramáfica	Y= -0,0001x ² +0,092,09	0,72*	1,0	5,20	14,7	31,	16,5
25:75U	Y= 0,00004x ² +0,32x+0,87	0,99*	1,0	55,6	16,1	21,	35,0
25:75R	Y= 0,0049x+1,55	0,78*	1,0	3,17	3,13	3,1	4,73
-----P remanescente mg							
25:75F	Y= -0,0068x+21,53	0,55*	20,	21,1	21,6	16,	17,5
25:75U	Y= -0,011x+20,34	0,96*	20,	18,2	18,0	15,	14,1

*Significativo a 5% pelo teste de Scott Knott. Não significativo para: Silício (verdete 25:75V, 25:75U e rejeito); P Mehlich-1 (verdete, verdete NH₄OH, 25:75V, fonolito, 25:75F, rejeito e 25:75R); P resina (verdete, verdete NH₄OH, 25:75V, fonolito e rejeito); P remanescente (verdete, verdete NH₄OH, 25:75V, fonolito, ultramáfica, rejeito e 25:75R).

A extração de P por resina do solo tratado com rocha ultramáfica e sua mistura aumentaram em função da elevação do pH (Figura 1c). uma vez que ocorre a precipitação do Al e Fe da solução e redução da adsorção de íons fosfatos, além disso, também pode ocorrer o deslocamento do P do solo pela maior atividade do ácido silícico.

Houve diminuição nos teores de fósforo remanescente quando aplicado 25C:75F e 25C:75U com o aumento das doses (Figura 4d e Quadro 4). Esta redução pode ter sido em função dos maiores valores de Ca no solo (Figura 2a), podendo estar relacionado à complexação do fósforo por cálcio, óxidos de ferro e alumínio.

O rejeito de mineração de manganês e sua mistura (25:75R) foram os tratamentos que disponibilizaram as maiores quantidades de micronutrientes, como Zn^{2+} e Mn^{2+} (Figura 5 e Quadro 5). Os teores de Zn^{2+} aumentaram de valores de 61 para 34 e de 396 para 273 $mg\ dm^{-3}$ para o Mn nos tratamentos rejeito e 25:75R, respectivamente, não ultrapassando os limites permissíveis de Zn para solos agrícolas, conforme CETESB (2005). O zinco está presente em várias rochas básicas e ácidas, devido à substituição isomórfica de Mg^{+2} por Zn^{+2} , comum nos silicatos.

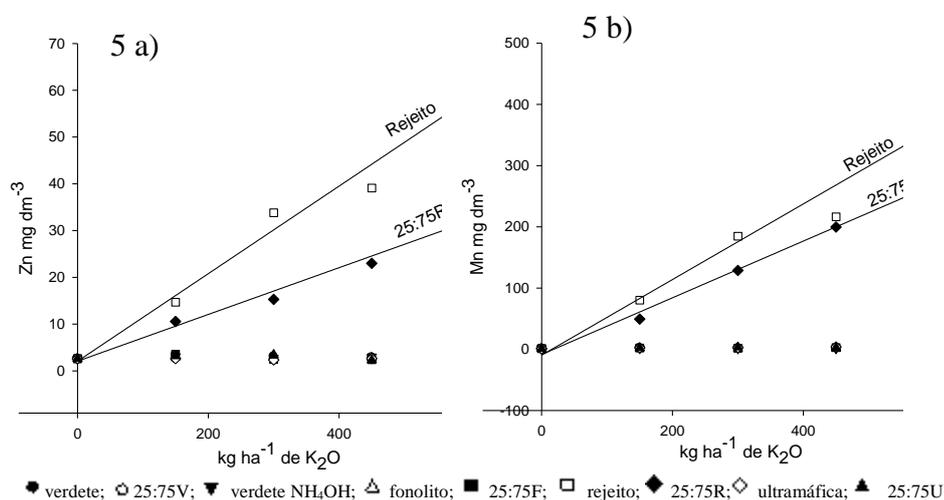


Figura 5. Disponibilidade de a) Zn (zinco) e b) Mn (manganês) do solo em função dos tratamentos e das doses depois de 45 dias de incubação em vasos.

Quadro 5. Equações de regressão para o teor de zinco e manganês, para cada tratamento aplicado após 45 dias de incubação.

Tratam	Equação	R ²	Doses de K ₂ O (kg ha ⁻¹)				
			0	150	300	450	600
-----Zinco mg dm ⁻³ -----							
Rejeito	Y= 0,095x+1,27	0,9	2,6	14,6	33,8	39,1	60,6
25:75R	Y= 0,054x+0,622	0,9	2,6	10,5	15,3	23,0	33,8
-----Manganês mg dm ⁻³ -----							
Rejeito	Y= 0,618x-9,698	0,9	1,0	80,0	184,	216,2	396,2
25:75R	Y= 0,4638,601	0,9	1,0	49,3	128,	199,7	273,3

*Significativo a 5% pelo teste de Scott Knott. Não significativo para: Verdete, verdete NH₄OH, 25:75V, fonolito, 25:75F, ultramáfica, 25:75U.

3.1 Fracionamento do potássio no solo

Os teores do potássio total diferiram significativamente entre os tratamentos e as doses de K₂O aplicados, sendo maior nas maiores doses, com exceção do 25:75V, ultramáfica e 25:75U que diferiram apenas em relação à dose zero (Quadro 6). Os valores de K total variaram entre 233 a 825 mg dm⁻³ (Quadro 6). O teor total de K encontrado nos solos quando incubados com as rochas e suas misturas com calcário, foram semelhantes aos encontrados na fração argila de Latossolos estudados por Melo et al. (2005) (549, 810 e 960 mg dm⁻³), os quais são considerados valores de potássio total baixos. Solos mais jovens, de maneira geral, possuem teores mais expressivos de K (4.220, 4.191, 9.412 mg kg⁻¹), graças, principalmente à maior presença de minerais primários na fração argila.

Diversos trabalhos têm demonstrado alta correlação entre o teor de K extraído do solo pelo ácido nítrico com a absorção desse nutriente por plantas de milho, trigo e eucalipto (Simard et al., 1992; Melo et al., 2005). Neste trabalho, a liberação de formas não trocáveis de K pelo método do HNO₃ 1 mol L⁻¹ apresentou comportamento semelhante com o K trocável (Mehlich-1), visto que os maiores teores

extraídos em ambos extratores foram rejeito, 25:75R, 25:75F e ultramáfica, apresentando correlação positiva entre os extratores.

Foram observadas diferenças marcantes entre os tratamentos para os teores extraídos de K trocável, valores que variaram de 24, 26, 29 e 30 (verdete) a 83, 146, 160 e 233 (rejeito) mg dm^{-3} de K nas doses crescentes de K_2O , respectivamente (Quadro 6).

Quadro 6. Fracionamento do K.

kg ha ⁻¹ K ₂ O	H ₂ O					Mehlich-1					HNO ₃					HF				
	0	150	300	450	600	0	150	300	450	600	0	150	300	450	600	0	150	300	450	600
	-----K (mg kg ⁻¹)-----																			
	Incubação																			
Verdete	16 bA	31 bA	47 aB	52 aA	57 aA	22 aA	24 aC	26 aC	29 aD	30 aD	31 aA	56 aA	60 aC	67 aD	71 aE	233 cA	539 A	530bB	605aB	663aB
V _{NH4OH}	16 bA	26 bA	21 bC	47 aA	16 bC	22 aA	30 aC	32 aC	41 aD	48 aD	31 bA	71 bA	69 bC	108aC	123aD	233 cA	460bA	43 bC	502aC	548aC
25:75V	16 bA	16 bA	36 aB	16 bB	47 aB	22 aA	32 aC	36 aC	41 aD	46 aD	31 cA	87 bA	100bC	129aC	150aC	233 bA	518aA	567aB	577aB	571aC
Rejeito	16 bA	16 bA	16 bC	52 aA	68 aA	22 dA	83 cA	146bA	160bA	213aA	31 dA	98 cA	179bA	216bA	272aA	233 dA	367cC	448bC	514aC	555aC
25:75R	16 cA	21 cA	36 bB	36 bA	68 aA	22 dA	98 cA	137bA	146bA	233aA	31 eA	131dA	193cA	235bA	290aA	233 cA	429bB	520aB	561aB	560aC
Fonolito	16 aA	16 aA	26 aC	26 aB	16 aC	22 bA	36 bC	43 bC	63 aC	74 aC	31 bA	65aA	77aC	87 aD	108aD	233 dA	483cA	626bA	599bB	718aB
25:75F	16 bA	21 bA	63 aA	52 aA	62 aA	22 dA	58 cB	68 cB	108bB	127aB	31 dA	85 cA	98 cC	175bB	237aB	233 dA	492cA	513cB	660bA	825aA
Ultram	16 cA	16 cA	42 bB	42 bA	68 aA	22 dA	43 bC	57 cB	94 aB	74 bC	31 dA	89 cA	133bB	199aB	185aC	233 bA	430aB	459aC	454aC	398aD
25:75U	16 bA	31 aA	36 aB	42 aA	42 aB	22 bA	35 bC	58 aB	56 aC	73 aC	31 cA	85 bA	169aA	149aC	179aC	233 bA	362aC	392aC	377aD	377aD

Mesmas letras maiúsculas na coluna não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott, e mesmas letras minúsculas na linha dentro do mesmo extrator não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

CONCLUSÕES

1. As rochas silicáticas de composição química variada quando misturadas ao solo e incubadas por 45 dias alteram a disponibilidade de nutrientes e os atributos químicos do solo. A maioria dos tratamentos, com exceção para o verdete e verdete calcinado e tratado com NH_4OH , contribuíram para o aumento do pH do solo, destacando as misturas (25:75U, 25:75F, 25:75F e 25:75R), o teor de silício liberado contribuiu para a elevação do teor de P, houve aumento da disponibilidade de K^+ e diminuição da saturação por Al^{3+} . As misturas, principalmente a 25:75U e a ultramáfica pura também aumentaram a disponibilidade de Ca^{2+} , conseqüentemente contribuindo para a elevação da saturação e soma de bases. O rejeito de mineração elevou os teores de Zn e Mn, e também foi o que mais disponibilizou K trocável para o solo.

2. Os valores de K na solução do solo são baixos. Os tratamentos aplicados são de liberação lenta. Houve um aumento dos teores de K com o aumento das doses com exceção do fonolito que não diferiu da dose zero.

3. Houve liberação de formas trocáveis e não trocáveis de K ao mesmo tempo sendo que os maiores valores para os tratamentos rejeito, 25:75R, 25:75F e ultramáfica.

LITERATURA CITADA

BRASIL. Ministério da agricultura. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos. Brasília, 2006.

CETESB. Decisão de diretoria No 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf>. Acesso em 10 dez. 2012.

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A.E., SANTOS, C.D., FERNANDES, L.A., CURI, N., RODRIGUES, D.C. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. *Pesq. agropec. bras.*, 36:557-565, 2001.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação / Antonio Carlos Ribeiro, Paulo Tácito Gontijo Guimarães, Victor Hugo Alvarez V., Editores. – Viçosa, MG, 1999. 359p.

Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM, Brasília, 2011. Potássio. Disponível em: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivArquivo=7404. Acesso em 21 mar. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de método de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.

FERREIRA, D.F. SISVAR: Um programa para análises e ensino de estatística. *R. Symposium*, 6:6-41, 2008.

MELO, V.F.; CORRÊA, G.F.; RIBEIRO, A.N.; MASCHIO, P.A. Cinética de liberação de potássio e magnésio pelos minerais da fração argila de solos do triângulo mineiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:533-545, 2005.

PRADO, R.M. & FERNADES, F.M. Efeito da escoria de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo -Vermelho Amarelo cultivada com cana-de-açúcar. *Pesq. agropec. bras.*, 36:199-1204, 2001.

PRATT, P.F. Potassium. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1*. Madison, American Society of Agronomy, 1973. p.1022-1032. (Agronomy Series, 9).

RESENDE, A.V.; MACHADO, C.T.T.; MARTINS, E.S.; NASCIMENTO, M.T.; SOBRINHO, D.A.S.; FALEIRO, A.S.G.; LINHARES, N.W.; SOUZA, A.L. & CORAZZA, E.J. Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de potássio para culturas anuais: Respostas da soja e do milho. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 30., 2005. Anais. Recife: UFRPE/SBCS, 2005. CD-ROM.

RIBEIRO, L.S.; SANTOS, A.R.; SOUZA, L. F. DA S.; SOUZA, J.S. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. R. Bras. Ci. Solo, 34:891-897, 2010.

SIMARD, R.R.; De KIMPE, C.R.; ZIZKA, J. Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. Soil Sci. Soc. Am. J, 56:1421-1428, 1992.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Test Methods for Evaluation Solid Waste Physical and Chemical Methods: microwave assisted acid digest of sediments, sludges, soils and oils, SW - 846; U.S. Government Printing Office: Washington, DC, 1998.

VAN STRAATEN, P. Agrogeology - The use of rocks for crops. Cambridge, Enviroquest, 2007. 440p.

**ARTIGO 3 - EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE
FERTILIZANTES ALTERNATIVOS MULTINUTRIENTES NA
NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO DO CAPIM-MARANDU**

(Versão Preliminar Normas Revista Brasileira de Ciência do Solo)

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar, em casa de vegetação, a eficiência agronômica de fontes alternativas de multinutrientes e seus efeitos na nutrição e produção do capim-marandu. O experimento foi realizado em vasos preenchidos com 5 kg de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média e com disponibilidade de K (Mehlich-1) igual a $0,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 10×5 , com três repetições. Os fertilizantes potássicos utilizados foram: cloreto de potássio (KCl), verdele, verdele tratado com hidróxido de amônio (NH_4OH), fonolito, ultramáfica, subproduto proveniente do processamento metalúrgico de manganês e as misturas desses materiais com calcário (proporção de 75% fertilizante e 25% de calcário) (As misturas que apresentam 25% de calcário foram calcinadas a 800°C por uma hora em mufla). Os fertilizantes alternativos foram aplicados aos vasos nas doses de 0, 150, 300, 450 e 600 kg ha^{-1} de K_2O e permaneceram incubadas ao solo por um período de 45 dias. Posteriormente, foram semeadas sementes de capim-marandu e após 60 dias realizou-se o primeiro corte das plantas e os demais cortes foram realizados em intervalos de 40 dias contados a partir do primeiro corte, totalizando 4 cortes. Quantificou-se a massa seca (MS) de folhas, colmos, bainhas e raízes e em seguida o acúmulo de potássio. Com os dados de massa seca da forrageira e acúmulo de potássio foram determinados o índice de eficiência agronômica (IEA) dos fertilizantes

multinutrientes e a recuperação do K aplicado (RKA). Os resultados mostraram que a adubação potássica proporcionou incrementos na produção de matéria seca, porém houve diminuição em função dos cortes sucessivos. OIEA da mistura do subproduto e da ultramáfica foram maiores que a do KCl e % da recuperação do potássio aplicada do subproduto, 25:75S, ultramáfica, 25:75U e KCl apresentaram os maiores valores. O potássio trocável (Mehlich-1) foi o que mais contribuiu para a produção de massa seca.

Termos de indexação: *Brachiaria brizantha* cv. Marandu; fertilizantes alternativos, potássio, rochas silicatadas, subproduto de mineração.

SUMMARY: *Agronomic efficiency of alternative multinutrient fertilizers on nutrition and production of “marandu” grass*

The objective of this work was evaluate, under greenhouse conditions, the agronomic efficiency of multinutrient alternative fertilizers and its effects on the nutrition and production of “Marandu” grass. The experiment was conducted in 5 kg pots filled with a Dystrophic Red Yellow Latossol, médium texture, with $0.06 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$ available K (Mehlich-1). The experimental design was a completely randomized in a factorial scheme 10 by 5, with 3 replications. The potassium fertilizers used where potassium chloride (KCl), “verdete”, “verdete” treated with ammonium hidroxide, “phonolite”, “ultramafic”, “by-product” resulting from metallurgical processing of manganese and mixtures of these materials with lime (proportion of 75% of fertilizer and 25% lime). The mixtures with 25% lime were calcinated at $800 \text{ }^\circ\text{C}$ for one hour in a muffle. The alternatives fertilizers were applied to the pots at the rates of 0, 150, 300, 450 and 600 kg ha^{-1} de K_2O and remained incubated for a period of 45 days. Following

that seeds of “Marandu” grass were distributed and after 60 days the first cutting of the plants was done. Additional three cuttings were done after 40 days intervals. Leaves dry matter (DM), stems, sheaths and roots dry matter were quantified and K accumulation determined. With the data of dry matter of the grass and K accumulation the agronomic efficiency index (AEI) of the multinutrient fertilizers were evaluated and also the recuperated of applied K (RAK). The results indicated that the potassium fertilizers lead to increments in dry matter production, however with diminishing in dry matter production as a function of successive cuttings. The AEI of the mixture of the “by-product” and of the “ultramafic” were higher than for the KCl treatment and % of potassium recuperated applied from the “by-product”, 25:75S, “ultramafic”, 25:75S and KCl presented the highest values. Exchangeable potash (Mehlich-1) was the variable that had the most contribution to the production of dry matter.

Index terms: Brachiaria brizantha cv. Marandu; alternatives fertilizers, potassium, silicate rocks, by-products of mining.

INTRODUÇÃO

No Brasil a área de *pastagem* com espécies cultivadas está em torno de 115 milhões de hectares, destacando-se, nessa categoria, o gênero *Brachiaria*, (Zimmer & Euclides, 2000). As plantas forrageiras são um alimento fundamental para produção animal em condições tropicais. Dentre as essas plantas destaca-se a *Brachiaria brizantha cv. Marandu* que é muito cultivada no Brasil, pois possui boa tolerância à seca e à cigarrinha, alta facilidade de estabelecimento após a semeadura, é uma boa planta de cobertura do solo e para consorciação

com plantas como milho e soja (citação), alta resposta a adubação, porém baixa tolerância a solos ácidos e ao encharcamento (MAPA, 2002).

Gramíneas forrageiras, como o capim-marandu, são relativamente exigentes em potássio (K), principalmente em sistemas intensivos de exploração das pastagens. De modo geral, o K no solo deve ser elevado para níveis entre 2 a 5% da CTC a pH 7,0 (Monteiro et al., 1995). O principal fertilizante potássico utilizado no país há muitas décadas é o cloreto de potássio. O alto consumo de KCl e a baixa produção interna do fertilizante além de aumentar as importações do setor agrícola promove dependência externa para a compra desse insumo agrícola. Algumas políticas públicas e estratégias estão sendo colocadas em prática para resolver esse problema. Dentre eles pode cita-se o uso de fontes alternativas de nutrientes, como: rochas silicáticas e alguns subprodutos de mineração e agroindústria.

Neste contexto, as rochas silicáticas e os subprodutos surgem como alternativa, pois contêm nutrientes de plantas em quantidades e disponibilidades que variam em função dos minerais presentes na sua composição, que contribuem para aumentar a fertilidade do solo, em médio à longo prazo, dependendo da solubilidade e reação com o solo. No geral, são fontes de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), muitas vezes incluindo elementos traços, tais como o zinco (Zn) e cobre (Cu), que são essenciais para a nutrição das plantas (Theodoro & Leonardos, 2006) e algumas ainda promovem correção e, conseqüentemente, melhorias nos parâmetros relacionados a acidez do solo (Ribeiro et al., 2012; Silva et al., 2012).

Além das rochas, em muitas regiões do país existem materiais que são subprodutos da atividade de mineração, muitos destes subprodutos são considerados um passivo ambiental se não for utilizado, eles contêm nutrientes que pode ser utilizados para fertilização transformando-os em importantes materiais.

O K no solo é usualmente distinguido nas formas: K na solução, K trocável, K não trocável e K total, existe um certo equilíbrio entre essas formas no solo. As plantas absorvem esse nutriente da solução, o qual é tamponado pelas formas trocáveis, que são repostas pelas formas não trocáveis e estruturais. Porém a quantidade de K extraída pelas plantas, com frequência, é superior às formas trocáveis, evidenciando que formas não trocáveis contribuem significativamente para o total de K absorvido pelas plantas (Castilhos & Meurer, 2001).

O conhecimento da mineralogia e das formas de K nos solos, em conjunto com outros atributos, pode contribuir para melhor predição do suprimento, fixação e disponibilidade desse nutriente para as plantas.

O presente trabalho visou avaliar o efeito de rochas silicáticas e subproduto de mineração, que foram selecionados entre diversos materiais promissores em termos de fornecimento de potássio, buscando analisar o índice de eficiência agrônômica das fontes em função da produção por meio de quatro cultivos subsequentes de plantas de *brachiaria* Marandu, e a recuperação do K aplicado pelas plantas, além de analisar a contribuição de cada forma do K, que foi quantificada por meio de vários extratores de potássio no solo quando proveniente de diferentes fontes, e correlacioná-las à produção de massa seca das plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média foram coletadas no município de Itutinga-MG. O solo coletado foi seco ao ar e passado em peneira de dois milímetros para caracterização química e física: pH (água) = 4,6; K^+ = 22,6 mg dm⁻³, S = 10,3 mg dm⁻³, P = 0,42 mg dm⁻³; Ca^{2+} = 0,2 cmol_c dm⁻³; Mg^{2+} = 0,1 cmol_c dm⁻³; Al^{3+} = 0,35 cmol_c dm⁻³; (H + Al) = 3,43 cmol_c dm⁻³; SB = 0,36 cmol_c dm⁻³; CTC a pH 7,0 = 3,78 cmol_c dm⁻³; Fe = 18,1 mg dm⁻³; Zn = 2,52 mg dm⁻³; Cu = 0,71 mg dm⁻³, B = 0,1 mg dm⁻³; Mn = 0,1 mg dm⁻³; areia = 692 g kg⁻¹; silte = 25 g kg⁻¹; argila = 283 g kg⁻¹, P-resina 1,0 mg dm⁻³ e P-remanescente 18,95 mg L⁻¹. As soluções químicas extratoras utilizadas foram: KCl 1 (1M) para Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} e Mehlich-1 para determinação de K, P, Fe, Zn, Mn, Cu e Na.

As fontes foram aplicadas e incorporadas em cada vaso (5 kg de solo por vaso), e homogeneizado, deixando-os em um período de incubação de 45 dias, com a umidade em torno de 70% da capacidade de campo. A quantidade de cada rocha e do subproduto aplicada ao solo foi definida com base na concentração total de óxido de potássio (K₂O), sendo, verdete 5,10%, ultramáfica 3,10%, fonolito 5,45%, subproduto de mineração 10,3%, quantificados pelo método 3052 (USEPA, 1998). Foram aplicadas cinco doses de K para cada fonte alternativa e para o KCl (0, 150, 300, 450 e 600 kg ha⁻¹ de K₂O) com três repetições. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 10 x 5 sendo nove fontes alternativas de nutrientes e o KCl: Fonolito, mistura de fonolito (25:75F), verdete, mistura de verdete (25:75V), verdete tratado com NH₄OH e calcinado (Verdete NH₄OH), ultramáfica, mistura de ultramáfica (25:75U),

subproduto de mineração de manganês e sua mistura (25:75S), as misturas constam com 25% de calcário e calcinadas a 800°C por uma hora em mufla.

Os pós de rochas e subproduto de mineração usados neste estudo são originários de diferentes processos e regiões do país, o fonolito (Planalto de Poços de Caldas, MG), rocha vulcânica alcalina (altos teores de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$); ultramáfica alcalina (Lages, SC) rocha formada por uma intrusão ígnea, composto de minerais ferromagnesianos, plagioclásios e carbonatos; subproduto de mineração, obtido do processamento metalúrgico de manganês (Sete Lagoas, MG); verdete (Cedro de Abaeté, MG) é um tipo de ardósia de coloração verde clara, de matriz argilosa e com presença de óxido de ferro.

Após os 45 dias de incubação, amostras de solo foram coletadas e feitas as análises de fertilidade para complementar os nutrientes necessários ao cultivo da braquiária, tendo sido adicionadas ao solo quantidades suficientes (em mg dm^{-3}) de macronutrientes (N e P = 300, Mg = 30 e S = 50) e micronutrientes (B = 0,5; Mn = 5,0; Zn = 5,0; Mo = 0,1 e Cu = 1,5), na forma de reagentes PA, tendo como referência (Malavolta et al., 1997). Os nutrientes foram aplicados em forma de solução e misturados ao solo para maior uniformização. O nitrogênio e o KCl foram parcelados em quatro aplicações, a calagem foi feita apenas no tratamento controle e no tratamento com KCl para elevação da saturação de base para 50% conforme critério recomendado pela Comissão... (1999), na relação Ca:Mg 3:1.

Foram colocadas 30 sementes por vaso. Após sete dias, houve a emergência das plantas. Dez dias após a emergência, fez-se o desbaste deixando cinco plantas por vasos, quando foi aplicado 1/4 de

cada dose do KCl, o restante da dose foi aplicado parceladamente após cada corte. Após 60 dias do desbaste foi feito o 1º corte das plantas, totalizando 4 cortes e 5 coletas de solos, em cada coleta de solos foi feito o acompanhamento da disponibilidades das diferentes formas de K em cada tratamento aplicado. Os demais cortes foram realizados cada um, 40 dias após o anterior. O fracionamento do potássio foi feito utilizando métodos específicos para cada forma, o K-total foi extraído por digestão em micro-ondas pelo método 3052 (USEPA, 1998), utilizando HNO₃ e HF. O K trocável ou potássio disponível com o extrator Mehlich-1 (Embrapa, 1997) e o K não trocável, por solução fervente de ácido nítrico 1 M (Pratt, 1973). O K em solução por extração fervente em água (Brasil, 2006).

Com o objetivo de se avaliar a massa seca e o acúmulo de nutriente nas partes da planta, estas foram separadas em folhas, colmo + bainha e raiz no último corte. Todo o material colhido foi lavado em água destilada e colocado para secar em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até massa constante e posteriormente pesados e moídos em moinho do tipo Wiley. Após a moagem, as amostras de cada componente da parte aérea de todos os cortes das plantas foram encaminhadas para determinação do teor de K conforme método descrito por (Malavolta et al., 1997). O K foi determinado por fotometria de chama após a digestão nitroperclórica.

Após o último corte da parte aérea, as raízes foram separadas e lavadas em água corrente. A seguir foram colocadas em estufa com circulação forçada de ar a 70°C, até atingir peso constante, para determinação da produção de massa seca.

Foi determinada o índice de eficiência agrônômica (IEA) das fontes para a produção de massa seca total de parte aérea (MSTPA)

(g), considerando o cloreto de potássio (KCl) como referência, descontando a (MSTPA) do controle (tratamento não adubado com K), de acordo com a fórmula:

$$IEA = \frac{\text{Produção MSTPA (fonte)} - \text{Produção MSTPA (controle)}}{\text{Produção MSTPA (KCl)} - \text{Produção MSTPA (controle)}}$$

A recuperação do potássio aplicado (RKA) pela planta foi calculada com base no acúmulo de K na matéria seca total da parte aérea (MSTPA) (mg) descontando o acumulado no tratamento controle (tratamento não adubado com K), em função das doses de K₂O aplicadas, de acordo com a fórmula:

$$RKA = \frac{[(K \text{ acumulado mg PA}) (\text{fonte})] - [(K \text{ acumulado mg PA}) (\text{controle})]}{\text{Dose de K aplicado (mg/vaso)}}$$

Fez-se a correlação entre o K extraído pela H₂O, Mehlich-1, HNO₃ e HF e a (MSPA) da braquiária (soma dos quatro cortes), para saber qual a forma de K mais contribuiu para a produção da massa seca.

Os dados obtidos foram submetidos a testes de média e análise de regressão por meio do software estatístico SISVAR 5,3 ® (Ferreira, 2008), utilizando modelos matemáticos para melhor equação e análise de correlação pelo software SIGMAPLOT 11.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de massa seca de folhas dos tratamentos 25:75S, ultramáfica e 25:75U foram estatisticamente iguais em relação ao KCl, e as menores produtividades foram obtidas nos tratamentos verdete e verdete calcinado e tratado com NH_4OH (Figura 1a e tabela 1). Já a produção de colmo apenas o tratamento 25:75S produziu quantidades semelhantes ao do tratamento KCl, seguidos pelos tratamentos ultramáfica, 25:75U e subproduto (Figura 1b e Quadro 1).

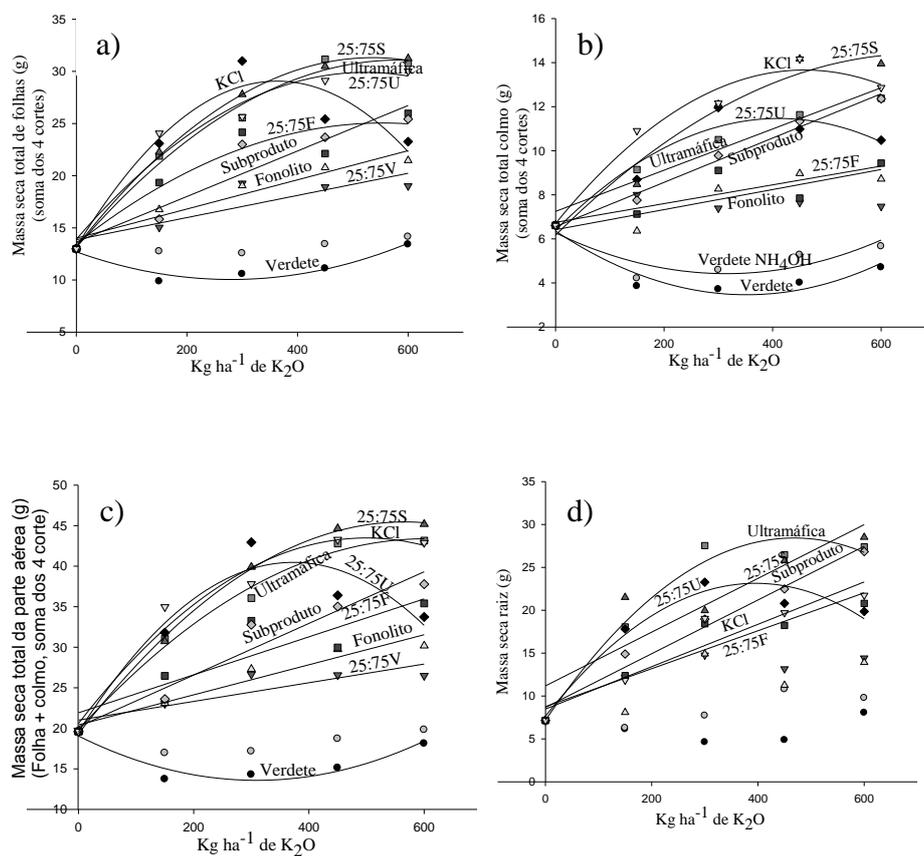


Figura 1. Massa seca total de: a) folhas, b) colmos e c) folhas + colmos e d) raiz de braquiária (g) em função da aplicação de doses de K_2O em quatro cultivos, o primeiro com 60 e os demais com 40 dias.

Quadro 1. Equações de regressão para massa seca total da folha (MSTF), massa seca total de colmos (MSTC), massa seca total da parte aérea (MSTPA) e massa seca de raiz, soma dos quatro cortes.

Tratament	Equação	R ²	Equação	R ²
	MSTF (g)		MSTC (g)	
Verdete	$Y=0,00003x^2-0,02x+12,70$	0,9*	$Y=0,00002x^2-0,016x+6,36$	0,9*
V NH ₄ OH	Não significativo		$Y=0,00002x^2-0,011+6,28$	0,7*
25:75V	$Y=0,011x+13,86$	0,8*	Não significativo	
Fonolito	$Y=0,014x+14,01$	0,9*	$Y=0,0046x+6,42$	0,8*
25:75F	$Y=-0,00004x^2+0,041x+13,47$	0,9*	$Y=0,0043x+6,75$	0,7*
Ultramáfica	$Y=-0,00005x^2+0,061x+13,12$	0,9*	$Y=0,0093x+7,25$	0,9*
25:75U	$Y=-0,00012x^2+0,087x+13,15$	0,9*	$Y=-0,00003x^2+0,025x+6,3$	0,9*
Subproduto	$Y=0,022x+13,64$	0,9*	$Y=0,01x+6,56$	0,9*
25:75S	$Y=-0,00006x^2+0,07x+13,17$	0,9*	$Y=-0,00002x^2+0,025x+6,17$	0,9*
KCl	$Y=-0,00006x^2+0,06x+13,91$	0,9*	$Y=-0,00003x+0,03x+6,70$	0,9*
	MSTPA (F + C)		MS raiz (g)	
Verdete	$Y=0,00006x^2-0,035x+19,05$	0,9*	Não significativo	
V	Não significativo		Não significativo	
25:75V	$Y=0,011x+21,01$	0,87*	Não significativo	
Fonolito	$Y=0,019x+20,42$	0,9*	Não significativo	
25:75F	$Y=0,023x+21,91$	0,8*	$Y=0,022x+8,77$	0,9*
Ultramáfi	$Y=0,00007x^2+0,078x+19,8$	0,9*	$Y=-0,0001x^2+0,091x+7,18$	0,9*
25:75U	$Y=-0,00015x^2+0,11x+19,54$	0,9*	$Y=-0,0001x^2+0,08x+7,65$	0,9*
Subprodu	$Y=0,032x+20,20$	0,9*	$Y=0,031x+8,67$	0,9*
25:75S	$Y=-0,00008x^2+0,09x+19,33$	0,9*	$Y=0,031x+11,18$	0,8*
KCl	$Y=-0,0001x^2+0,091x+20,6$	0,9*	$Y=0,025x+8,48$	0,9*

*Significativo a 5% pelo teste de Scott Knott

Coutinho et al. (2004) afirmam que a adubação potássica tem proporcionado significativos incrementos na produção de gramíneas forrageiras estabelecidas em solos com teores baixos ou muito baixos de K. Como observado neste experimento, utilizando um solo com baixo teor de K trocável no solo (22 mg dm^{-3}), houve resposta positiva

em relação à produção de massa seca total da parte aérea, não sendo significativo apenas quando se utilizou verdete tratado com NH_4OH , sendo que os tratamentos 25:75S, ultramáfica e KCl obtiveram produções semelhantes (Figura 1c e Quadro 1).

A mistura de verdete proporcionou baixa produção de folhas, colmo e raiz, diferentemente do encontrado por Eichler & Lopes (1983), que testaram um fertilizante semelhante obtido da calcinação a 1100°C da mistura de verdete com calcário (em partes iguais), refletindo em uma produção de massa seca da parte aérea do milho equivalente ao KCl no primeiro cultivo e maior nos cultivos subsequentes. Essa diferença pode estar relacionada, além da temperatura e do tempo de aquecimento, com os componentes da mistura e suas proporções. A calcinação com calcário tem a função de reduzir a temperatura de fusão da mistura, o que, segundo Kirsch (1972), favorece a alteração estrutural nos minerais originais e a formação subsequente de outros compostos, com liberação de K.

O verdete é uma rocha rica em minerais como o feldspato potássico e muscovita, de baixa cinética de dissolução, e biotita, que apresenta cinética de dissolução moderada (Martins et al. 2010).

Avaliando por dois anos (três crescimentos), as respostas da *Brachiaria decumbens* à adubação nitrogenada e potássica em um Latossolo Vermelho-Amarelo com $43,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de K, Carvalho et al. (1991) verificaram que, nos tratamentos que não receberam K, as plantas desenvolveram sintomas visuais de deficiência do nutriente nas folhas, o que não ocorreu no presente estudo mesmo sendo cultivada em um solo com apenas 22 mg dm^{-3} .

A relação folha/colmo foi de 1,71, 5,4, 3,0 e 2,6 respectivamente ao primeiro, segundo, terceiro e quarto corte

respectivamente. Em cada fase a natureza da massa seca das plantas apresenta diferentes proporções de folhas, colmos e material morto no perfil da pastagem. Isto significa que a composição da estrutura das plantas se altera ao longo do tempo. Os animais apresentam preferências por determinados ítems, por exemplo, folhas em relação a colmos (L'Huillier et al., 1986). Tem-se considerado um limite crítico para esta relação de 1,0 Pinto et al. (1994), sendo que valores inferiores a este implicariam queda na quantidade e qualidade de forragem produzida. Neste estudo, os valores encontrados foram sempre superiores a 1,0.

O estado nutricional das plantas tem efeito no crescimento de suas raízes (Eshel & Waisel, 1996). A produção de massa seca das raízes para a ultramáfica e sua mistura 25:75U apresentou ajuste ao modelo quadrático e os demais tratamentos ajuste linear, com exceção do verdete, 25:75V, verdete tratado com NH_4OH e fonolito que não foi significativo em relação à dose aplicada. Os tratamentos com ultramáfica e 25:75S excederam a produção em relação ao KCl (Figura 1d e Quadro 1).

Segundo Werner (1986) o fósforo desempenha importante papel no desenvolvimento do sistema radicular, a maior massa seca de raiz encontrada foi exatamente dos tratamentos que mais liberaram P para o solo, 25:75U, 25:75S ultramáfica e subproduto (370, 322, 3178, 313 mg dm^{-3} respectivamente).

O maior índice de eficiência agrônômica em relação à produção de massa seca foi: 25:75S > ultramáfica > KCl > 25:75U > subproduto > 25:75F > fonolito > 25:75V > verdete NH_4OH > verdete, sendo que para os dois últimos o valor foi negativo (Quadro 2).

Quadro 2. Índice de Eficiência agrônômica (IEA) das fontes multinutrientes para a produção de massa seca (MS), considerando o cloreto de potássio (KCl) como referência, soma dos quatro cortes.

Doses kg ha ⁻¹ de K ₂ O	Subprod	25:75S	Fonolito	25:75F	25:75V	Verdete	V.NH ₄ OH	Ultramáf	25:75U	KCl
Eficiência agrônômica (%)										
150	72,89b	135,1a	20,73c	66,77b	21,70c	-65,36d	-48,27d	115,25a	80,74b	100a
300	85,58a	118,6a	41,12b	44,38b	38,72b	-46,97c	-20,12c	135,21a	119,40a	100a
450	82,76b	124,6a	31,87c	55,13b	27,57b	-35,47d	-1,0d	120,21a	85,04b	100a
600	102,54b	137,2a	42,03c	77,35b	33,92c	-14,83d	-3,51d	123,76a	80,87b	100b
Média	85,94	128,88	33,94	60,91	30,48	-40,66	-18,22	123,61	91,51	100

Médias seguidas por letras distintas na mesma linha diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott.

Os coeficientes de correlação entre a produção de massa seca total (soma dos 4 cortes) e o K extraído com o Mehlich-1 foram significativos para o subproduto (r=0,98), 25:75V (r=0,96), KCl (r=0,92), ultramáfica (r=0,91), 25:75F (r=0,90) e 25:75S (r=0,89), evidenciando a contribuição desta forma de K na produção da braquiária.

Para os tratamentos 25:75F, 25:75U, ultramáfica, 25:75S e subproduto em todas as doses, o valor de K extraído do solo pelo Mehlich-1 na média dos quatro cortes foi estatisticamente superior ao extraído pelo KCl (Figura 2a).

As equações de regressão referentes ao K extraído no solo por Mehlich-1 e o acúmulo de potássio na parte aérea do capim marandu, na soma de todos os cortes, encontra-se na (Quadro 2), a análise de variância revelou a variação significativa ($P < 0,05$) na quantidade de potássio acumulado para todos os tratamentos nos componentes da parte aérea do capim em função das doses de potássio aplicadas.

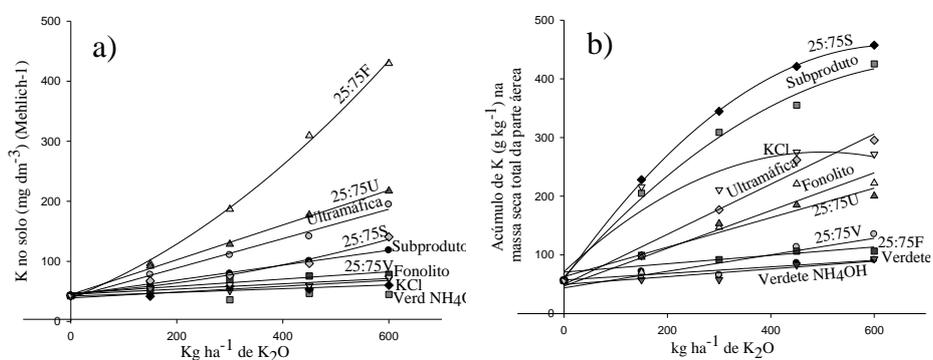


Figura 2. Teor de K no solo a) e acúmulo de K na parte aérea b), em função da aplicação de doses de K₂O em quatro cultivares, o primeiro com 60 e os demais com 40 dias. (Soma das quatro cortes).

Quadro 3. Equações de regressão para teor de K no solo (mg dm^{-3}), extraído por mehlich-1 e acúmulo de K na massa seca total da parte aérea (g kg^{-1}) para cada tratamento aplicado soma dos quatro cortes.

Tratamentos	Equação	R ²	Equação	R ²
	K no solo (mg dm^{-3})		Acúmulo de K MSPA	
Verdete	Não significativo		$Y=0,056x+57,23$	0,8*
V NH ₄ OH	$Y=0,0078x+10,52$	0,7*	$Y=0,066x+49,729$	0,8*
25:75V	$Y=0,015x+11,559$	0,9*	$Y=0,141x+43,855$	0,8*
Fonolito	$Y=0,012x+9,766$	0,9*	$Y=0,322x+46,98$	0,9*
25:75F	$Y=0,00013x^2+0,086x+9,81$	0,9*	$Y=0,075x+70,69$	0,6*
Ultramáfica	$Y=0,061x+9,97$	0,9*	$Y=0,427x+49,61$	0,9*
25:75U	$Y=0,072x+11,18$	0,9*	$Y=0,251x+62,94$	0,9*
Subproduto	$Y=0,031x+10,98$	0,9*	$Y=-0,00068x^2+0,99x+61,98$	0,9*
25:75S	$Y=0,00004x^2+0,014+11,72$	0,9*	$Y=-0,0010x^2+1,255x+58,18$	0,9*
KCl	$Y=0,011x+11,251$	0,9*	$Y=-0,0008x^2+0,816x+71,44$	0,9*

*Significativo a 5% pelo teste de Scott Knott

A recuperação do potássio aplicado (RKA) pela planta com base no acúmulo de K na matéria seca total da parte aérea (MSTPA) em função das doses de K₂O aplicadas encontra-se na tabela 4. O maior aproveitamento do K aplicado se deu nas menores doses, sendo que o subproduto e sua mistura 25:75S apresentaram maiores valores, seguido do KCl, ultramáfica e 25:75U. O verdete, 25:75V e verdete tratado com NH₄OH, apresentaram menor recuperação do K aplicado, isso refletiu nas menores produtividades obtidas.

Um sistema radicular extensivo explora maior volume do solo e absorve mais nutrientes e água e, conseqüentemente, aumenta a eficiência nutricional, como visto na figura 1d, os tratamentos que produziram maior volume de raiz foram os que mais aproveitaram o K aplicado, refletindo em melhores produções (Figura 1c) e acúmulo do K (Figura 2b).

Quadro 4. Recuperação do potássio aplicado (RKA %) pelas plantas com base no acúmulo de K na massa seca da parte aérea em função das doses de K₂O aplicada.

Doses kg ha ⁻¹ de K ₂ O	Subprod	25:75S	Fonolito	25:75F	25:75V	Verdete	V.NH ₄ OH	Ultramáf	25:75U	KCl
Recuperação do K aplicado (%)										
150	103,1 b	117,8 a	19,2 e	22,9 e	4,1 f	1,6 f	13,3 e	63,6 c	43,0 d	84,1 c
300	80,1 a	83,6 a	20,5 c	23,1 c	13,1 d	2,8 e	13,5 d	56,1 b	61,4 b	67,9 b
450	79,5 a	79,0 a	20,5 c	16,5 c	15,1 c	4,0 d	10,7 d	58,5 b	50,6 b	54,9 b
600	66,0 a	72,7 a	19,5 d	16,2 d	16,2 d	7,9 d	15,8 d	61,1 a	38,9 c	48,6 b
Média	82,2	88,3	19,9	19,7	12,1	4,1	13,3	59,8	48,5	63,9

Médias seguidas por letras distintas na mesma linha diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott.

Comparando-se o solo logo após o período de incubação e o solo coletado após o 4º cultivo da braquiária (Figura 3 e Quadro 5), em se tratando de um experimento de vasos fechados (que não há perda por lixiviação), podemos notar a exportação de K do solo para as plantas, para todas as formas de K, tratamentos e doses.

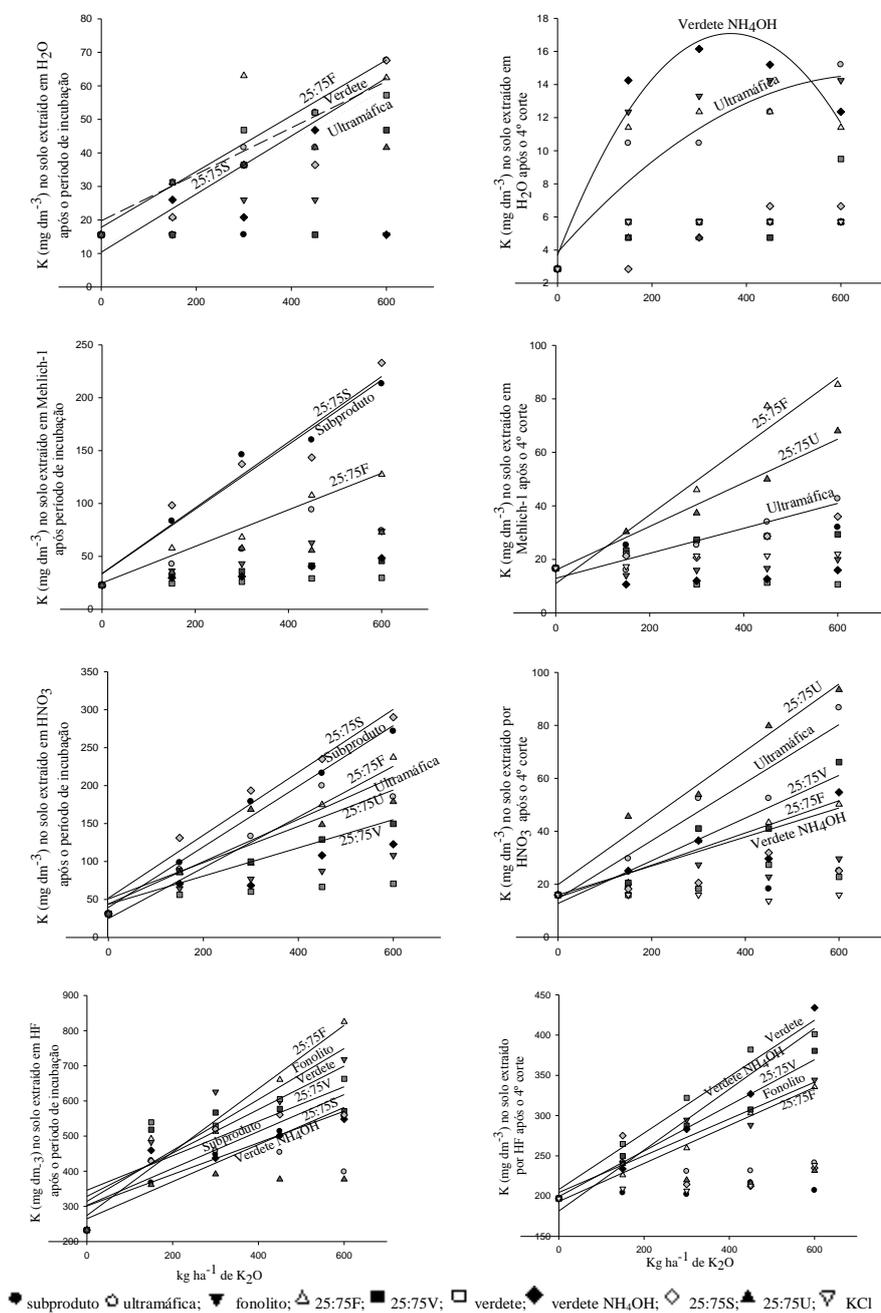


Figura 3. K extraído do solo logo após o período de incubação e após o 4º cultivo da braquiária das quatro formas.

Quadro 5. Equações de regressão para teor de K no solo (mg dm^{-3}), extraído por H_2O , mehlich-1, HNO_3 e HF após o período de incubação e após o 4 cultivo.

Tratamentos	Equação	R ²	Equação	R ²
	K (H_2O) incubação		K (H_2O) após o 4° corte	
Verdete	$Y=0,069x+19,76$	0,94*	$Y=-$	0,88*
V NH_4OH	Não significativo		Não significativo	
25:75V	Não significativo		Não significativo	
Fonolito	Não significativo		Não significativo	
25:75F	$Y=0,083x+17,8$	0,74*	Não significativo	
Ultramáfica	$Y=0,087x+10,4$	0,89*	$Y=-$	0,94*
25:75U	Não significativo		Não significativo	
Subproduto	Não significativo		Não significativo	
25:75S	$Y=0,079x+11,44$	0,87*	Não significativo	
KCl			Não significativo	
	K (Mehlich-1)		K (Mehlich-1) após o 4°	
Verdete	Não significativo		Não significativo	
V NH_4OH	Não significativo		Não significativo	
25:75V	Não significativo		Não significativo	
Fonolito	Não significativo		Não significativo	
25:75F	$Y=0,173x+24,86$	0,98*	$Y=0,128x+10,933$	0,95*
Ultramáfica	Não significativo		$Y=0,047x+1293$	0,93*
25:75U	Não significativo		$Y=0,082x+16$	0,98*
Subproduto	$Y=0,305x+33,55$	0,97*	Não significativo	
25:75S	$Y=0,311x+33,804$	0,93*	Não significativo	
KCl			Não significativo	
	K (HNO_3)		K (HNO_3) após o 4°	
Verdete	Não significativo		Não significativo	
V NH_4OH	Não significativo		$Y=0,051x+19,61$	0,87*
25:75V	$Y=0,186x+43,68$	0,95*	$Y=0,079x+16,72$	0,97*
Fonolito	Não significativo		Não significativo	
25:75F	$Y=0,334x+244,96$	0,96*	$Y=0,046x+18,54$	0,89*
Ultramáfica	$Y=0,279x+44,09$	0,91*	$Y=0,091x+17,94$	0,93*
25:75U	$Y=0,239x+50,731$	0,82*	$Y=0,118x+20,47$	0,97*
subproduto	$Y=0,399x+39,53$	0,99*	Não significativo	
25:75S	$Y=0,415x+51,804$	0,97*	Não significativo	
KCl			Não significativo	
	K (HF) incubação		K (HF) após o 4° corte	
Verdete	$Y=0,618x+328,44$	0,78*	$Y=0,38x+202,76$	0,97*
V NH_4OH	$Y=0,449x+301,13$	0,77*	$Y=0,452x+173,14$	0,91*
25:75V	$Y=0,491x+345,95$	0,62*	$Y=0,450x+177,55$	0,98*
Fonolito	$Y=0,725x+314,21$	0,84*	$Y=0,314x+191,55$	0,91*
25:75F	$Y=0,902x+273,99$	0,95*	$Y=0,348x+169,25$	0,94*
Ultramáfica	Não significativo		Não significativo	
25:75U	Não significativo		Não significativo	
Subproduto	$Y=0,528x+264,84$	0,95*	Não significativo	
25:75S	$Y=0,525x+302,85$	0,81*	Não significativo	
KCl			Não significativo	

*Significativo a 5% pelo teste de Scott Knott

As diferenças entre os tratamentos aplicados causam variações entre os teores de K disponíveis nos solos e conseqüentemente diferenças na produtividade das plantas. Quando se analisou a correlação por tratamento da matéria seca total da parte aérea (MSTPA) (Quadro 6), verificou-se que o K extraído em água (K na solução), foi significativo positivamente para ultramáfica, 25:75U, fonolito, subproduto, 25:75S e negativamente para o verdete e verdete tratado com NH_4OH , e quando extraído em solução Mehlich-1 foi significativo para ultramáfica, 25:75F e subproduto, visto que são as formas prontamente disponíveis. Para o HNO_3 apenas o 25:75S, pois esse extrator também extrai parte do K estrutural que não contribui imediatamente para a produção de massa seca, uma explicação dessa correlação positiva, por se tratar de um subproduto da mineração de manganês, que passou por um processo metalúrgico, facilitando a liberação de elementos, o mesmo pode explicar a falta de correlação entre a produção de MSTPA com o HF para todos os tratamentos, pois é uma reserva disponibilizada em longo prazo.

Quadro 6. Coeficiente de correlação entre K extraído pela H_2O , Mehlich-1, HNO_3 e HF e a (MSTPA) da braquiária (soma dos quatro cortes).

	H_2O	Mehlich-1	HNO_3	HF
	MSTPA			
Verdete	-0,75*	-	-	-
25:75V	-	-	-	-
V NH_4OH	-0,57**	-	-	-
Ultramáfica	0,65*	0,57**	-	-
25:75U	0,52**	-	-	-
Fonolito	0,68*	-	-	-
25:75F	-	0,54**	-	-
Subproduto	0,65*	0,61**	-	-
25C:75S	0,61**	-	0,74*	-
KCl	-	-	-	-

Coeficiente de correlação significativo a 1%* e 5%**; (-) não significativo

CONCLUSÕES

1. A produção de massa seca da parte aérea foi dependente do suprimento de potássio;
2. A ultramáfica e a mistura 25:75S proporcionaram maior eficiência da adubação potássica no capim-marandu;
3. A recuperação do K aplicado, foi maior para a mistura 25C:75S, subproduto, ultramáfica, 25:75U e KCl e menor para o verdete tratado com NH_4OH , 25:75V e verdete;
4. O potássio trocável (Mehlich-1) apresenta correlação com produção de massa seca pelo capim-marandu.

LITERATURA CITADA

- BRASIL. Ministério da agricultura. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos. Brasília, 2006.
- CARVALHO, M.M.; MARTINS, C.E.; VERNEQUE, R. da S.; SIQUEIRA, C. Resposta de uma espécie de braquiária à fertilização com nitrogênio e potássio em um solo ácido. R. Bras. Ci. Solo, 15:195-200, 1991.
- CASTILHOS, R.M.V. & MEURER, E.J. Cinética de liberação de potássio em Planossolo do Estado do Rio Grande do Sul. Ciência. Rural, 31:1-10, 2001.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Interpretação dos resultados de análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H., eds. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª Aproximação. Viçosa, MG, 1999. 310p.

COUTINHO, E.L.M.; SILVA, A.R. da; MONTEIRO, F.A.; RODRIGUES, L.R.A. Adubação potássica em forrageiras. In: PEDREIRA, C.G.S.; MOURA, J.C. de; FARIA, V.P. de (eds.) Fertilidade do solo para pastagens produtivas. Piracicaba, FEALQ, 2004. p.219-277.

EICHLER, V.; LOPES, A.S. Disponibilidade do potássio do verde de Abaeté, calcinado com e sem calcário magnesiano, para a cultura do milho (*Zea mays* L.) em solo de textura argilosa. *Ciência e Prática*, 7:136-156, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de método de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
ESHEL, A. & WAISEL, Y. Multifunction and multifunction of various constituents of one root system. In: WAISEL, Y., ESHEL, A. & KAFKAFI, U., ed. *Plant roots: The hidden half*. 2. ed. New York, Marcel Dekker, 1996. p.175-192.

FERREIRA, D. F. SISVAR: Um programa para análises e ensino de estatística. *R. Symposium*, 6:36-41, 2008.

KIRSCH, H. *Mineralogia aplicada*. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1972. 291p.

L'HUILLIER, P.J.; POPPI, D.P.; FRASER, T.J. Influence of structure and composition of ryegrass and prairie grass-white clover swards on the grazed horizon and diet harvested by sheep. *Grass and Forage Science*, 41:259-267, 1986.

MARTINS, E. S. et al. Agrominerais: rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. In: ADÃO, B. L.; LINS, F. (Eds.). *Rochas e minerais industriais: usos e especificações*. Rio de Janeiro, Cetem, 2010. p. 205-221.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional de plantas. Piracicaba, Potafos, 1997. 319p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Comunicado Técnico. Características Agronômicas das Principais Plantas forrageiras Tropicais. São Carlos SP, 2002.

MONTEIRO, F.A.; RAMOS, A.K.B.; CARVALHO, D.D.; ABREU, J.B.R.; DAIWB, J.A.S.; SILVA, J.E.P.; NATALE, W. Cultivo de *Brachiaria brizantha* Stapf. cultivar Marandu em solução nutritiva com omissão de macronutrientes. *Sci. Agric*, 52:35-141,1995.

PINTO, J.C.; GOMIDE, J.A.; MAESTRI, M. et al. Crescimento de folhas de gramíneas forrageiras tropicais, cultivadas em vasos, com duas doses de nitrogênio. *Rev. Soc. Bras. Zoot.*, 23:327-332, 1994.

PRATT, P.F. Potassium. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1.* Madison, American Society of Agronomy, 1973. p.1022-1032. *Agronomy Series*, 9.

RIBEIRO, L.S., SANTOS, A.R., SOUZA, L.F.S., SOUZA, J.S. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:891-897, 2010.

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 *R. Bras. Ci. solo*, 36:951-962, 2012.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O.; ROCHA, E. L.; REGO, K. G. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. *Rev. Espaço & Geografia*, 9:263-292, 2006.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Test Methods for Evaluation Solid Waste Physical and Chemical Methods : microwave assisted acid digest of sediments, sludges, soils and oils, SW - 846;* U.S. Government Printing Office: Washington, DC, 1998.

ZIMMER, A. H.; EUCLIDES, V. P. B. Importância das pastagens para o futuro da pecuária de corte no Brasil. In: *SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS: Temas Em Evidência*, Lavras, 2000. *Anais. Lavras: 2000.* p.1-49.

WERNER, J.C. Adubação de pastagens. 2. Impr. Nova Odessa, Instituto de Zootecnia, 1986. 49p. *Boletim Técnico*, n.18.