



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA – FAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO AGRONÔMICA DE ROCHAS
SILICÁTICAS COM POTENCIAL DE USO COMO FONTES
ALTERNATIVAS DE NUTRIENTES E CORRETIVOS DA ACIDEZ
DO SOLO**

DOUGLAS RAMOS GUELFY SILVA

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF

ABRIL/2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO AGRONÔMICA DE ROCHAS
SILICÁTICAS COM POTENCIAL DE USO COMO FONTES ALTERNATIVAS
DE NUTRIENTES E CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO**

DOUGLAS RAMOS GUELFY SILVA

ORIENTADOR: CARLOS ROBERTO SPEHAR, PhD
CO-ORIENTADOR: GIULIANO MARCHI, DOUTOR

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: 004/2012

BRASÍLIA/DF
ABRIL/2012

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO AGRONÔMICA DE ROCHAS
SILICÁTICAS COM POTENCIAL DE USO COMO FONTES ALTERNATIVAS
DE NUTRIENTES E CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO**

DOUGLAS RAMOS GUELFY SILVA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM AGRONOMIA.**

APROVADA POR:

Carlos Roberto Spehar, Ph.D, Universidade de Brasília (UnB), CPF: 122.262.116-94,
e-mail: spehar@unb.br (Orientador)

Cícero Célio de Figueiredo, D.Sc., Universidade de Brasília (UnB), CPF: 029.754.447-02,
e-mail: cicerocef@unb.br (Examinador interno)

Tairone Paiva Leão, D.Sc., Universidade de Brasília (UnB), CPF: 713.262.271-49,
e-mail: tleao@unb.br (Examinador interno)

Alcides Gatto, D.Sc., Universidade de Brasília (UnB), CPF: 483.150.010-00,
e-mail: alcidesgatto@unb.br (Examinador externo)

Thomaz Adolpho Rein, D.Sc. Embrapa Cerrados (CPAC), CPF: 027.990.018-07,
e-mail: rein@cpac.embrapa.br (Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 30 de abril de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO AGRONÔMICA DE ROCHAS SILICÁTICAS COM POTENCIAL DE USO COMO FONTES ALTERNATIVAS DE NUTRIENTES E CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO

Guelfi-Silva, Douglas Ramos

Caracterização e avaliação agronômica de rochas silicáticas com potencial de uso como fontes alternativas de nutrientes e corretivos da acidez do solo/Douglas Ramos Guelfi Silva; orientação de Carlos Roberto Spehar. – Brasília, 2012.

173 p. ; il.

Tese de doutorado (D) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2012.

1. Agrominerais 2. Micronutrientes. 3. Eficiência da adubação potássica. 4. *Oriza sativa*. 5. *Lactuca sativa* Spehar, C. R. II. Título. PhD.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GUELFÍ-SILVA, D. R. **Caracterização e avaliação agronômica de rochas silicáticas com potencial de uso como fontes alternativas de nutrientes e corretivos da acidez do solo**. 2012. 173 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Douglas Ramos Guelfi Silva

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Caracterização e avaliação agronômica de rochas silicáticas com potencial de uso como fontes alternativas de nutrientes e corretivos da acidez do solo.

GRAU: Doutor ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Tese de Doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Tese de Doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Douglas Ramos Guelfi Silva

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento”.

“Espíritos grandiosos sempre encontraram oposição violenta de mentes medíocres”.

Albert Einstein

DEDICO

A Deus, pela benção da vida e presença constante ao meu lado.

A minha esposa Fernanda, minha mãe Doris, meus avós Luiz (in memoriam) e Judith “Déia” e a toda a minha família e amigos, em especial ao Giuliano Marchi.

OFEREÇO

A Deus e a todos os meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Doris Alice Ramos Guelfi e Newton Roberto Silva (*in memorian*) por todo o apoio nessa grande caminhada da vida, e aos meus avós Judith Ramos Guelfi (Déia) e Luiz Guelfi (*in memorian*) pela parceria em todos os momentos. Essa Tese de Doutorado é pra vocês! A primeira da nossa família!

A minha esposa, que em todos os momentos difíceis esteve ao meu lado. Te amo, Fernanda! Aqui não teria páginas suficientes e tempo para escrever meu agradecimento por tudo o que fez.

A minha família, em especial à tia Deborah, Alex (tio), Efren (primo), Flávia (prima), Helena (prima), Carolina (prima), Luciano (primo), tia Alice, José Martins “tio Zé” (*in Memorian*), Elaine (prima), Celso (primo), Bruna (prima), “Celsinho” (primo), Fábio (primo), João Henrique (primo), Geralda (prima), Aline (prima), Rafael (primo) e tia Cida.

À família que ganhei quando conheci minha esposa e que foi fundamental para que pudesse vencer mais essa etapa: meu “pai” William, minha “mãe” Nádia, meus “irmãos” Eduardo e Roberta, minhas “avós” Nércia e Zalfa e meu avô “Alfeu”.

Ao Robélio, Walquíria, Clarice, Cecília, Luiz Felipe e André por todo apoio, carinho e acolhimento.

Aos amigos e parceiros: André Ferreira Pereira, Ronaldo Liberato Dourado, Bruno Ceolin, Edilene Marchi, Frederico Pinto da Silva, Silvio Junio Ramos, Ana Rosa, Marcos André Silva Souza e Danilo de Araújo Soares.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que por meio de edital do ano de 2008, financiou pesquisas para o uso eficiente e fontes alternativas de nutrientes para a agricultura brasileira, concedendo apoio financeiro que possibilitou a execução da minha Tese de Doutorado.

Ao meu orientador, Carlos Roberto Spehar pelo apoio, paciência e pela pronta disponibilidade que sempre teve quando precisei.

Ao meu co-orientador, Giuliano Marchi, uma das melhores pessoas que já conheci, e que considero como um irmão. Obrigado por tudo!

Aos membros da banca examinadora: Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo, Pesquisador Dr. Thomaz Adolpho Rein, Prof. Dr. Tairone Paiva Leão e ao Prof. Dr. Alcides Gatto, pela disponibilidade e sugestões apresentadas.

Aos pesquisadores da Embrapa Cerrados: Thomaz Adolpho Rein e Éder de Souza Martins e aos professores da Universidade de Brasília, Marilusa Pinto Coelho, Ana Maria Resende Junqueira, Carlos Alberto da Silva Oliveira, José Ricardo Peixoto, pela amizade, apoio, paciência e ensinamentos.

Aos meus grandes parceiros na carreira profissional, que com seu conhecimento e experiência têm me dado muito apoio nessa fase inicial da minha carreira: Valdemar Faquin (meu eterno orientador), Antônio Eduardo Furtini Neto, Alfredo Scheid Lopes, Nilton Curi, Luiz Roberto Guimarães Guilherme e Geraldo César de Oliveira.

Aos colegas professores do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras: Marx Leandro Naves Silva, Yuri Lopes Zinn, Carlos Alberto Silva, João José Granate de Sá e Melo Marques, Janice Guedes de Carvalho, Fatima Maria de Souza Moreira, José Maria de Lima, José Oswaldo Siqueira, Mozart Martins Ferreira, Vicente Gualberto, Moacir Souza Dias Junior e Marco Aurélio Vitorino Ribeiro pelo estímulo e amizade.

Aos técnicos de laboratório: Roberto Lelis Mesquita, Cristina Aparecida B. Ribeiro, Humberto D. Fernandes, Gilson Antônio Fernandes, Doroteo de Abreu, João Gualberto e Carlos Antônio Ribeiro “Carlinhos” pela ajuda nas análises e todo apoio nos laboratórios.

Às secretárias do Departamento de Ciência do Solo/UFLA: Maria Alice e Dirce pela disponibilidade e amizade.

Aos funcionários: Pezão (Canelada), Cleusa, Miriam, “Seu” Antônio, Jean, Milton e Émerson pelo excelente convívio e auxílio nas mais diversas atividades.

E a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho científico.

ÍNDICE

RESUMO GERAL -----	14
GENERAL ABSTRACT -----	16
INTRODUÇÃO GERAL-----	18
REVISÃO DE LITERATURA-----	20
1 Rochagem: uma breve síntese conceitual-----	20
2 Elementos-traço em solos-----	28
2.1 Elementos-traço em fertilizantes e corretivos-----	31
3 Procedimentos analíticos para avaliação de elementos-traço em fertilizantes, corretivos e produtos agrícolas -----	32
3.1 Extração de teores totais de elementos-traço -----	32
4 Níquel (Ni)-----	35
5 Cobre (Cu)-----	41
6 Zinco (Zn)-----	44
OBJETIVO GERAL-----	48
OBJETIVOS ESPECÍFICOS-----	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	48
CAPÍTULO 1-----	69
ROCHAS MOÍDAS UTILIZADAS COMO FONTES ALTERNATIVAS DE NUTRIENTES: LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES	
RESUMO-----	70
ABSTRACT-----	72
INTRODUÇÃO-----	73
MATERIAL E MÉTODOS-----	74
RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	80
CONCLUSÕES -----	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	100
CAPÍTULO 2-----	106
EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO POTÁSSICA NA ALFACE ADUBADA COM ROCHAS MOÍDAS	

RESUMO-----	107
ABSTRACT-----	108
INTRODUÇÃO-----	109
MATERIAL E MÉTODOS-----	111
RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	114
CONCLUSÕES -----	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	130
CAPÍTULO 3-----	135
PRODUÇÃO, NUTRIÇÃO E EFICIÊNCIA NO USO DO POTÁSSIO PELO ARROZ ADUBADO COM ROCHAS MOÍDAS	
RESUMO-----	136
ABSTRACT-----	137
INTRODUÇÃO-----	138
MATERIAL E MÉTODOS-----	139
RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	143
CONCLUSÕES -----	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	164
PERSPECTIVAS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS-----	169
ANEXOS-----	171
Anexo A: Lista de Siglas-----	172

ÍNDICE DE TABELAS

Revisão de Literatura

Tabela 1. Principais rochas brasileiras utilizadas na agricultura em diferentes regiões do país _____	21
Tabela 2. Elementos-traço/micronutrientes em alguns tipos de rocha _____	24
Tabela 3. Alguns tipos de materiais como fonte de macronutrientes _____	24
Tabela 4. Adições globais de elementos-traço ao solo _____	29
Tabela 5. Concentração de elementos-traço em alguns insumos _____	29
Tabela 6. Teores máximos de ET em fertilizantes minerais com nitrogênio, potássio, macronutrientes secundários, para os que têm até 5% de P ₂ O ₅ e para os demais não especificados, em corretivos de acidez, alcalinidade, sodicidade, silicatos e carbonatos de cálcio e magnésio e escória silicatada e fertilizantes orgânicos _____	33
Tabela 7. Limites máximos de elementos-traço admitidos em minerais que contenham o nutriente fósforo, micronutrientes ou com fósforo e micronutrientes em mistura com os demais nutrientes _____	33
Tabela 8. Teores máximos de elementos-traço permitidos em fertilizantes fosfatados _____	34
Tabela 9. Concentração de Ni em vários tipos de rochas _____	37
Tabela 10. Maior fonte de Ni, faixa, teor representativo no solo, na parte aérea da cultura e relação solo/cultura _____	39
Tabela 11. Teores de níquel e quantidades de massa seca em plantas de sorgo cultivadas em solo submetido a cinco tratamentos (testemunha + 4 doses de Ni no lodo de esgoto). Jaboticabal, Estado de São Paulo, 2004 _____	39
Tabela 12. Teores de níquel nos grãos, folha, colmo, raiz e totais relatados em diversos estudos _____	40
Tabela 13. Teor de Cu nas principais rochas e em alguns solos _____	42
Tabela 14. Teores de cobre nos grãos, folha, colmo, raiz e totais relatados em diversos estudos _____	43
Tabela 15. Teor de Zn nas principais rochas e solo _____	45
Tabela 16. Teores de zinco nos grãos, folha, colmo, raiz e totais relatados em diversos estudos _____	46

Capítulo 1

Tabela 17. Teores totais de K_2O , Na_2O , P_2O_5 , CaO , MgO , Cu , Zn e Ni nas rochas moídas _____ 77

Tabela 18. Caracterização das frações granulométricas das rochas moídas _____ 78

Tabela 19. Quantidade total adicionada aos tratamentos das rochas e de micronutrientes ($mg\ vaso^{-1}$) aplicados nos tratamentos _____ 78

Tabela 20. Valores de pH em água das rochas, percentagem de CaO , MgO solúveis, poder de neutralização (PN), reatividade (RE), percentagem de cálcio, magnésio e poder relativo de neutralização total (PRNT) das rochas utilizadas no estudo _____ 80

Capítulo 2

Tabela 21. Eficiência agronômica da adubação potássica e recuperação do potássio aplicado na alface adubada com diferentes doses de rochas moídas _____ 128

Capítulo 3

Tabela 22. Eficiência agronômica da adubação potássica e recuperação do potássio aplicado no arroz adubado com diferentes doses de rochas moídas _____ 161

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1. Valores de pH do solo (a), disponibilidade de cálcio (b), saturação por cálcio (c), disponibilidade de potássio (d) no solo fertilizado com brecha, ultramáfica, biotita, subproduto de mineração (SBM), subproduto de chapada (SBC) e flogopitito _____ 80

Figura 2. Difratoograma de raios X do solo e das rochas moídas utilizadas como fertilizantes alternativos. *Ct: Caulinita; Gb: Gibsita; Gt: Goethita; Tc: Talco; Ft: Flogopita; A 2:1:Argilomineral 2:1; Qz: Quartzo; Ru:Rutilo; Bi:biotita; Mi:Mica; Ol:Olivina; Pi:Piroxênio; Fp:Feldspato* _____ 84

Figura 3. Valores de saturação por potássio (a), disponibilidade de sódio (b), saturação por sódio (c) e saturação por bases (d) no solo fertilizado com brecha, ultramáfica, biotita, subproduto de mineração (SBM), subproduto de chapada (SBC) e flogopitito _____ 88

Figura 4. Disponibilidade de magnésio (a), saturação por magnésio (b) e saturação por alumínio (c) em função da aplicação da brecha, ultramáfica, biotita, subproduto de mineração (SBM), subproduto de chapada (SBC) e flogopitito e saturação por alumínio em função das doses de rochas moídas (b) _____ 92

Figura 5. Disponibilidade de fósforo (Mehlich-1) (a), zinco (DTPA) (b) e cobre (DTPA) (c) do solo fertilizado com diferentes doses de brecha, ultramáfica, biotita, subproduto de mineração (SBM), subproduto de chapada (SBC) e flogopitito _____ 95

Capítulo 2

Figura 6. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O na massa seca da parte aérea (a) e de raízes da alfaca. *Nível de significância de 5% ($p < 0,05$), pelo teste de Scott-Knott _____ 115

Figura 7. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no teor de potássio (a), níquel (b), cobre (c) e zinco (d) na parte aérea da alfaca. *Nível de significância de 5% ($p < 0,05$), pelo teste de Scott-Knott _____ 118

Figura 8. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no acúmulo de potássio (a), níquel (b), cobre (c) e zinco (d) na alfaca. *Nível de significância de 1% ($p < 0,05$), pelo teste de Scott-Knott _____ 122

Capítulo 3

Figura 9. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O na produção de grãos (a), massa seca da parte aérea (b) e de raízes (c) do arroz _____ 143

Figura 10. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no teor de potássio (a), níquel (b) e zinco (c) na parte aérea do arroz _____ 147

Figura 11. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no acúmulo de potássio (a), níquel (b), cobre (c) e zinco (d) na parte aérea do arroz _____ 151

Figura 12. Efeito de doses potássio (K_2O) aplicadas por rochas moídas multinutrientes no teor (a) e acúmulo de cobre (b), (c) na parte aérea do arroz _____ 153

Figura 13. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no teor de potássio (a), níquel (b), cobre (c) e zinco (d) nos grãos do arroz _____ 155

Figura 14. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no acúmulo de potássio (a), níquel (b), cobre (c) e zinco (d) nos grãos do arroz _____ 158

RESUMO GERAL

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO AGRONÔMICA DE ROCHAS SILICÁTICAS COM POTENCIAL DE USO COMO CORRETIVO DA ACIDEZ E FONTES ALTERNATIVAS DE NUTRIENTES

A agricultura brasileira é uma das mais ecoeficientes do mundo, utilizando-se menos recursos como terras, água e insumos com menor impacto a meio ambiente e maior retorno econômico ao agricultor contribuindo significativamente no produto interno bruto. Entretanto, uma crise no setor de fertilizantes em 2008, que promoveu o aumento do preço das matérias-primas trouxe de volta a discussão sobre a dependência da agricultura brasileira em relação à importação de fertilizantes. Esse problema tem renovado o interesse na avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental de uso de fontes alternativas de nutrientes, principalmente os materiais fornecedores de potássio. As importações de fertilizantes potássicos superaram taxas de 90% ao ano do total utilizado na agricultura nacional. Dentre as fontes alternativas multinutrientes pode-se citar as rochas silicáticas, mudando de passivo ambiental (estéril) a fertilizantes. Na maioria dos casos são consideradas rejeitos que precisam ser descartados e não tem valor econômico em relação a atividade principal que é a mineração. Quando utilizadas na agricultura as rochas silicáticas além de serem fornecedores de potássio e outros nutrientes, em menor quantidade, promovem alterações nos atributos relacionados à acidez e também podem atuar como condicionador do solo. Nesse contexto, é necessária uma boa caracterização desses materiais antes da aplicação em solos agrícolas para se conhecer a quantidade de nutrientes ou possíveis contaminantes que estão sendo adicionados, bem como, uma avaliação agronômica de rochas silicáticas, seus efeitos na nutrição e produção das culturas para que suas normas de utilização no setor agropecuário sejam definidas pelos órgãos

governamentais. Para se obter informação sobre essas questões, algumas rochas e rejeitos que poderiam tornar-se fontes de potássio foram caracterizadas e avaliadas sobre os possíveis efeitos no solo e nas plantas, usando alface e arroz como indicadores.

Palavras-chave: agrominerais, micronutrientes, eficiência da adubação potássica, *Oriza sativa*, *Lactuca sativa*

GENERAL ABSTRACT

CHARACTERIZATION AND AGRONOMIC EVALUATION OF SILICATIC ROCKS WITH POTENTIAL TO USE AS ACIDITY AMENDERS AND ALTERNATIVE SOURCES OF NUTRIENTS

The Brazilian agriculture is one of the most eco efficient in the world, requiring less resource in land, water and inputs and ensuring reduced environmental impact for economical yield. It represents a significant contribution to the gross national production. A crisis in the fertilizer producing sector in 2008, however, has promoted a rapid rise in raw materials utilized in the industry, bringing back the discussion on the national dependence of imported mineral nutrient sources. This constraint has renewed interest in evaluating technical, economical and environmental feasibility of alternative sources of nutrients, mainly the ones for potassium. The imported K sources represent 90 % of total being used in the country. Among the nutrient alternative sources, there are the silicatic rocks, moving from sterile environmental passive into fertilizers. In most cases they are classified as reject to be disposed of without value, related to mining or cast industry. In agriculture these rocks can provide potassium and other macro and micro nutrients, causing changes in soil attributes, such as acidity, and act as conditioners. With this prospect, a detailed characterization of these materials before being used in soils is necessary to assess nutrient availability and possible contaminants being added. Studies on silicatic rocks, with respective effects in crop nutrition and production, are thus needed to define limits of uses and impacts on agricultural production providing support for government policies and norms aimed at these alternative sources of mineral nutrients. To achieve information on these matters, some rocks and

rejects that could become K sources were characterized and evaluated on their respective effect on soil and on plants, by using lettuce and rice as indicators.

Key-words: agro-mineral, micronutrients, potassium fertilization efficiency, *Oriza sativa*, *Lactuca sativa*

INTRODUÇÃO GERAL

Alguns tipos de rochas moída aplicadas *in natura* têm se mostrado promissoras quanto ao fornecimento de potássio (K) para culturas agrícolas (RESENDE et al., 2006a). O potencial dessas rochas para suprimento de K tem sido estudado por diversos autores, para uso na agricultura, devido à elevação do preço dos fertilizantes no mundo (BADR; SHAFEI; EL-DEEN, 2006; MOURA et al., 2007; NASCIMENTO et al., 2008; RESENDE et al., 2006a, 2006b; SOUZA FILHO et al., 2006). Ademais, a maioria dos solos brasileiros é naturalmente pobre em K e as reservas confirmadas de cloreto de potássio (KCl) ainda não estão em fase de exploração. O uso dessas rochas alternativas tem crescido, porém com limitações em alguns aspectos, entre eles o risco à saúde pela presença de elementos-traço (Ets).

O termo elementos-traço têm sido usado em detrimento da expressão “metais pesados” para definir metais catiônicos e aniônicos que normalmente estão presentes em concentração menor que $100 \mu\text{g g}^{-1}$ em solos e plantas (ESSINGTON, 2004; PIERZYNSKI; SIMS; VANCE, 1994; SPARKS, 1995). O termo tem ampla citação em diversas publicações que tratam desse assunto (ESSINGTON, 2004; HAYES; TRAINA, 1998; KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001; MACBRIDE; SPIERS, 2001; SPARKS, 1995; STUMM; MORGAN, 1996), substituindo metal pesado, a qual nunca foi definida por órgãos oficiais na área de química (INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY - IUPAC, 1997). Assim, tem se tornado obsoleta e sem sentido (DUFFUS, 2001).

Os Ets são elementos com uma concentração média menor do que 100 partes por milhão de átomos (ppma) ou menos de $100 \mu\text{g g}^{-1}$ (IUPAC, 1997).

Ets como cádmio (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg), incluindo-se os micronutrientes ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn) e níquel (Ni) podem ser introduzidos na

cadeia alimentar pela adição de fertilizantes (SHARPLEY; MENZEL, 1987). No caso de fertilizantes inorgânicos solúveis e rochas utilizadas como fonte de nutrientes o impacto da concentração de metais deve ser analisado (THE FERTILIZER INSTITUTE - TFI, 2000).

Os Ets podem estar presentes em fertilizantes como produtos secundários indesejados ou como contaminantes. Entretanto, há alguns elementos-traço, por exemplo, zinco (Zn), Fe e Cu que são nutrientes de plantas e estão incluídos em formulações de fertilizantes. Sabe-se, a priori, que a exposição a elementos-traço (nutrientes ou não) em níveis suficientemente altos representa risco à saúde.

Entretanto, essa abordagem não poderia ser utilizada para fertilizantes alternativos preparados a partir de rocha moída, porque sua disponibilidade para as plantas e absorção pelo organismo humano são bem diferentes dos fertilizantes solúveis convencionais. Sabe-se que os elementos-traço podem ser levados para ambientes agrícolas pelos fertilizantes de rocha, mas as taxas de intemperismo das partículas adicionadas ao solo são incertas (HODSON; LANGAN, 1999) e sua solubilidade é muito menor que a dos fertilizantes convencionais (VAN STRAATEN, 2006).

Geralmente, os parâmetros para o controle da poluição do solo baseiam-se na quantidade total de elementos-traço aplicados durante a fertilização ao longo dos anos. No caso de fertilizantes convencionais de alta solubilidade, essa metodologia tem sido aplicada adequadamente. Entretanto, no caso de fertilizantes de rocha moída, o teor total de um metal não serve como parâmetro adequado para uma análise porque grande parte das partículas de rocha contendo metais não será dissolvida prontamente e esses elementos-traço podem ser solubilizados apenas após muitos anos.

O conhecimento da concentração de elementos-traço em rochas alternativas é fundamental, especialmente em condições de agricultura intensiva e solos tropicais, onde há possibilidade de uso elevado de insumos agrícolas, como fertilizantes e corretivos.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi caracterizar e realizar avaliação agronômica de rochas silicáticas com potencial de uso como fontes alternativas de nutrientes e corretivos da acidez do solo.

REVISÃO DE LITERATURA

1. ROCHAGEM: UMA BREVE SÍNTESE CONCEITUAL

Existe uma relação histórica entre desenvolvimento da agricultura nas principais civilizações e a geologia/geografia. A agricultura sempre ocorreu em solos naturalmente férteis de planícies aluviais ao longo de rios ou em áreas vulcânicas. O uso de materiais fertilizantes, tais como estrume animal, cinzas minerais/rochas moídas (como, por exemplo, gesso), confunde-se com os primórdios da atividade agrícola.

O uso de rochas que se apresentam próximas dos núcleos de consumo, como fonte natural de nutrientes, dentro do conceito “pão proveniente das rochas” (bread from stones), apresentado por Hensel, em 1890/94 é defendido, desde o século XIX, por Missoux (1853/54) e Hensel (como se referiu). Esse conceito foi retomado muito mais tarde e depois por Fyfe (2006) e seus colaboradores (1981, 1987, 1989, 2000), como é referido por Van Straaten (2007).

Apesar de ser uma prática bastante antiga no Japão e Europa, só recentemente o Brasil começou a conhecer mais sobre a aplicação de pó de rocha para a recuperação, remineralização e manutenção da fertilidade do solo (Tabela 1).

Tabela 1. Principais rochas brasileiras utilizadas na agricultura em diferentes regiões do mundo.

Tipo de material	Local	Fonte
Flogopitito - Carbonatito	Catalão (GO)	UnB – IG, Embrapa Cerrados (fase experimental)
Rejeitos de pedreiras (Patos de Minas – MG)	João Pinheiro – Fruta D’Anta (MG)	UnB – CDS – Projeto Fertilização da Terra pela Terra
Carbonatito – Ugandito – Flogopita/Biotita		Embrapa Cerrados – “Pó de rocha – custos comparativos”
Xisto	São Mateus do Sul – (PR)	Revista Petrobras nº108
Serpentinito, micaxisto	Jaramataia (AL)	Amparo, 2004
Granito intemperizado	Ipirá (BA)	Amparo, 2004
Micaxisto, rocha ultramáfica		Amparo, 2004
“Itafértil” (rocha ultramáfica, filito)	Produto de venda	Amparo, 2004
Folhelhos	PE, BA, PI, SC, SP, PR	Amparo, 2004
Granitos	BA, SC	Amparo, 2004
Basaltos	SC, SP, PR	Amparo, 2004
Arenitos	SC, SP, PR	Amparo, 2004
Calcários	BA, SP, GO	Amparo, 2004
Basalto	Ilha Maurício	Van Straaten, 2007
Flogopitito (rejeito de garimpo de esmeralda – fonte de K)		Ação transversal (MCT/FINEP)
Flogopitito (fonte de K e condicionador de solo)	Norte de BA (próximo a Juazeiro/Petrolina)	(MCT/FINEP)
Brecha alcalina (fonte de K e condicionador de solo)	Rio Verde – Sudoeste de GO	(MCT/FINEP)
Biotita Xisto (rejeito de mineração de ouro – fonte de K e condicionador de solo)	Chapada – Centro – Oeste de GO/Mara Rosa	(MCT/FINEP)
Ultramáfica alcalina (fonte de K, corretivo de acidez e condicionador de solo)	Lajes (SC)	(MCT/FINEP)

Continuação...

Biotita Xisto (rejeito de garimpo de esmeralda – Fonte de K e condicionador de solo)	Paraíso do Tocantins (TO)	(MCT/FINEP)
Apatito/Carbonatito	Centro-Oeste de MT	(MCT/FINEP)
FosBahia (fosfato natural em exploração)	Irecê/Centro-Norte da BA (próximo a Xique-Xique)	(MCT/FINEP)
Itafós (fosfato natural em exploração)	Campos Belos (GO)	(MCT/FINEP)
Rochas fosfáticas (b)	Vários países	Van Straaten (2007)
a) Em pilhas compostas	Índia e vários outros países	Bangar et al. (1985), Sing e Amberger (1990, 1991, 1998) e Singh et al. (1983) citados por Van Straaten (2007)
b) com estrume verde	Quênia	Jama et al. (2000), Jama e Van Straaten (2006) e Sanchez et al. (1997) citados por Van Straaten (2007)
c) Biosolubilização com microrganismos	Vários países	Vários autores em Van Straatem (2007)
d) Com resíduo da indústria do couro	Sul, Sudeste da Ásia e em alguma regiões da África	Van Straatem (2007)
e) Inoculação com Mycorrhizae		Marschner e Dell (1994) citados por Van Straatem (2007)
Com Pirita (oxidação H ₂ SO ₄)	Laboratório	Lowell e Weil (1995)
g) Com carvão sulfuroso	Índia, Sri Lanka	Dahanayake et al. (1991) citados por Van Straaten (2007)

(a) Fonte: Loureiro, Melamed e Neto (2009); (b) (Minérios marginais, rejeitos e materiais considerados estéreis).

Na sua maior parte, os fertilizantes utilizados atualmente refletem numa rápida e efetiva resposta ao aumento da produtividade na agricultura. Entretanto, nos países em desenvolvimento o custo dos fertilizantes, defensivos agrícolas e sementes são fatores limitantes ou impeditivos para a sua utilização.

Neste contexto, a rochagem pode contribuir para a redução no consumo de fertilizantes industriais que exigem grande quantidade de energia para sua fabricação e ser um agente de produtividade e qualidade aos agricultores.

A rochagem é uma prática importante para uma agricultura sustentável, apresentando baixo valor agregado ao alcance de pequenos até o grandes agricultores. A integração de forma sistêmica e proativa das instituições de pesquisa, desenvolvimento, universidades, organismos governamentais e privados, envolvendo por pesquisadores, professores, e técnicos, em sinergia, podem contribuir, para uma nova fundamentação técnica que viabilize a regulamentação da rochagem em prol da agricultura brasileira (ANDRÉA, 2003).

Além disso, é relatado que esta tecnologia tem a capacidade de alterar positivamente os parâmetros de fertilidade do solo e também a reestruturação física dos solos. De modo geral, as rochas ou seus subprodutos devem ser fontes naturais de fósforo, potássio, cálcio e magnésio, além de uma série de outros micronutrientes indispensáveis a nutrição das plantas (FYFE; LEONARDOS; THEODORO, 2006; KROMBERG; LEONARDOS; FYFE, 1987; LEONARDOS; FYFE; KRONBERG, 1976; LEONARDOS; THEODORO, 1999; LEONARDOS; ULBRICH; GASPAR, 1991; LEONARDOS; THEODORO; ASSAD, 2000; THEODORO, 2000, 2005; THEODORO et al., 2007, 2008; THEODORO; LEONARDOS, 2006).

São numerosas as rochas passíveis de aplicação na remineralização de solos. Há grandes famílias de rochas com potencial elevado de concentrarem não só micronutrientes benéficos, mas também prejudiciais às plantas (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2. Elementos-traço/micronutrientes em alguns tipos de rocha⁽¹⁾.

Tipo de rocha	Elementos-traço (micronutrientes)
Rochas ígneas ultramáficas	Cr, Co, Ni, Fe, Mn
Basaltos (rocha máfica)	Cu, Zn, Mn, Fe, Co, Ni, V
Granitos (rocha fêlsica)	Ba, Li, W, Rb, Mo, Cu, Zn, Cl, Si
Carbonatitos (>50% de carbonatos)	F, Nb
Xisto negro	Cu, Pb, Zn, Cd, U, Au, Se, Ni, Mo, V, Fe, B
Xisto vermelho/arenito	U, V, Se, As, Mo, Pb, Cu

⁽¹⁾Fonte: Levinson (1974)

Tabela 3. Alguns tipos de materiais como fonte de macronutrientes^(a).

Tipo de material	Macronutrientes
Rochas ultrabásicas	Mg, Ca
Basalto/Gabro	Mg, Ca
Carbonatito	Ca, Mg, K, P ^(b)
Rochas silicáticas alcalinas (sienitos e nefelina sienitos) ^(c)	K
Rochas ácidas (granitos e gnaisses)	K
Gipsita e rejeitos industriais (principalmente fosfogesso)	S, Ca
Calcários (calcíticos e dolomíticos)	Ca, Mg

^(a)Fonte: Levinson (1974); ^(b)Principalmente quando ricos em mica, em particular flogopita; ^(c)Em especial seus correspondentes efusivos: fonolitos e traquitos.

Resultados positivos têm sido obtidos nas pesquisas com aplicação de anfibólitos, granitos e granodioritos (THEODORO et al., 2008) e de basaltos (ALMEIDA; SILVA; RALISCH, 2006, 2007a, 2007b). Com alteração positiva nas características dos solos. As plantas reagiram positivamente à aplicação de pó de rocha.

A aplicação de biotita xisto, brecha alcalina, ultramáfica não mostraram diferença de resposta quando comparadas a uma fonte solúvel de K⁺ para atender a demanda do milho. A rocha ultramáfica se destacou por apresentar maior eficiência relativa no suprimento de K, além de

mostrar efeitos benéficos adicionais ao desenvolvimento das plantas, como poder corretivo da acidez e liberação de outros nutrientes e como condicionador de solo (RESENDE, 2006c).

Em casa de vegetação, cultivos sucessivos com girassol e soja em um Latossolo Vermelho Eutroférico muito argiloso e em um Neossolo Quartzarênico (arenoso), indicaram que as rochas ultramáficas e biotita podem apresentar eficiência comparável à do KCl (CASTRO et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2006). Testes realizados com biotita e brecha, para a sucessão soja/milheto em Argissolo e Vertissolo da região de Petrolina – PE, também demonstraram que essas rochas contribuem para o fornecimento de K e outros nutrientes, estimulando o crescimento de plantas (MENDES et al., 2006; SILVA et al., 2006a, 2006b).

No entanto, é necessário salientar que não são todos os tipos de rocha que apresentam bons resultados. Os rejeitos de lavra em pegmatitos mostraram resultados pouco satisfatórios (FERNANDES, 2008).

Carnalita, biotita, leucita, sienito nefelínico, micaxisto, feldspato potássico, cloritaxisto, muscovita e verdete foram outros tipos de rocha avaliados que não apresentaram resultados positivos (LOPES et al., 1972; DUTRA, 1980; FAQUIN, 1982; EICHLER; LOPES, 1983; LEITE, 1985;). Os materiais foram aplicados puros, em misturas com outros produtos fertilizantes, “in natura” ou após sofrerem algum processo químico (acidificação) ou térmico com o objetivo de aumentar sua reatividade e solubilização. Tentou-se desenvolver termofosfatos potássicos, processos de tratamento de rochas com teores mais elevados de K_2O , rotas hidrometalúrgicas de extração de nutrientes de rochas, entre outros.

Termofertilizantes derivados de rochas silicáticas potássicas compostas por minerais com baixa solubilidade, como os verdetes de Minas Gerais (rocha rica em illita), foram obtidos por transformação em materiais vitrificados com elevada solubilidade, e testados com sucesso como fonte de potássio.

Rochas ricas em feldspatos potássicos (minerais de baixa solubilidade) foram transformadas em kalsilita (silicato potássico de alta solubilidade) pela reação com soluções hidrotermais, comportando-se de forma similar ao KCl como fonte de potássio (FAQUIN, 1982; LEITE, 1985).

Contudo, na maioria das vezes, a eficiência agrônômica das rochas dependeu da sua origem e composição, de fatores do solo, do tempo de incubação, do tratamento químico ou térmico aplicado e das culturas utilizadas. Em geral, a possibilidade de utilização direta dessas rochas foi descartada devido à baixa disponibilização de K às plantas.

Foram necessários tratamentos químicos ou térmicos para aumentar a solubilidade das rochas, o que se mostrou inviável economicamente pelo elevado custo do processamento industrial. Enfim, as estratégias testadas não representaram vantagem competitiva em relação ao fertilizante solúvel tradicional (KCl).

Muitas vezes, resultados insatisfatórios com o uso de rochas como fonte de nutrientes, estão relacionados ao desconhecimento das características mineralógicas do material utilizado. Alguns dos estudos citados utilizaram basalto, feldspato, moscovita e zeólita, materiais que contêm K, mas que apresentam solubilidade muito baixa. A mineralogia, indicador do potencial de solubilidade dos minerais e da capacidade de liberação de K, é fator extremamente importante na escolha de rochas para aplicação direta ao solo (NASCIMENTO; LOUREIRO, 2004).

Tendo em vista que as rochas que vêm sendo testadas são de composição complexa e relativamente pouco conhecidas quanto aos aspectos de sua mineração e processamento industrial (moagem) e de seu comportamento na interação com o meio onde são aplicadas (solo, plantas, organismos, ambiente), existem vários desafios a serem superados pela pesquisa.

A granulometria de moagem é um fator que vem sendo avaliado tanto em termos de eficiência no processamento industrial, quanto à influência no desempenho agrônômico das fontes. Cada mineral ou minério tem a sua mobilidade própria, que é caracterizada pela probabilidade de

quebra, e pela distribuição de tamanhos gerada. Dessa forma, a etapa de moagem deve ser bem estudada antes do dimensionamento e escolha do equipamento, e muito bem controlada na operação industrial, pois o bom desempenho desta depende da utilização eficiente e direcionada da energia disponível (RESENDE, 2006a). Vale ressaltar, que é preferível a utilização agrícola de rochas/rejeitos sem maior preparação que a fornecida pelas empresas de mineração/industriais, de forma que não se agreguem custos à sua utilização. Apesar disso, a moagem mais fina é factível e aumenta a área específica e solubilidade dos minerais.

Os elementos potencialmente prejudiciais nas rochas e a sua dinâmica no sistema solo-planta ainda precisam ser mais bem caracterizadas. O efeito danoso da presença de Ets depende basicamente da quantidade acumulada e das formas químicas em que se apresentam no solo. A ocorrência dos Ets em formas solúveis, trocáveis, oclusas, precipitadas ou complexadas é que define o potencial poluidor (MCBRIDE; SPIERS, 2001) e o impacto na qualidade do solo e água e toxidez às plantas e outros organismos.

A Agência de proteção ambiental dos EUA (USEPA) adota como nível de toxidez o teor do elemento-traço que provoque redução de 50% no crescimento de plantas (KING, 1996). Até o momento, as rochas estudadas não promoveram redução de crescimento ou aparecimento de sintomas visuais que pudessem ser associados a problemas desse tipo. De qualquer forma, a pesquisa com essas rochas deve contemplar o acompanhamento mais detalhado da dinâmica e biodisponibilidade de elementos traço e outros elementos críticos em relação ao potencial de contaminação dos produtos agrícolas e do ambiente.

2. ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS

Com o crescente desenvolvimento da agricultura, dos centros urbanos e das atividades industriais e de mineração, a produção de resíduos orgânicos (subprodutos) vem aumentando, os quais podem vir a constituir fontes de contaminação ambiental, devido à possível presença de elevadas concentrações de elementos químicos.

Os Ets são encontrados em solos, sedimentos e sistemas aquáticos (GUILHERME et al., 2005) e podem ser adicionados ao solo por ações naturais ou antropogênicas. As ações naturais compreendem o intemperismo de rochas e minerais, as emissões vulcânicas e outras ações antropogênicas como: os aterros sanitários, atividades industriais e de mineração, aplicações de corretivos, fertilizantes e de defensivos agrícolas, entre outros (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4. Adições globais de elementos-traço aos solos^(a).

Fonte	As ^(b)	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Se
	Gg ano ⁻¹						
Resíduos agrícolas	0-6	0-3	4,5-90	0-1,5	6-45	1,5-27	0-7,5
Resíduos animais	1,2-4,4	0,2-1,2	10-60	0-0,2	3-36	3,2-20	0,4-1,4
Resíduos de madeira	0-3,3	0-2,2	2,2-18	0-2,2	2,2-23	6,6-8,2	0-3,3
Rejeito urbanos	0,09-0,7	0,88-7,5	6,6-33	0-0,26	2,2-10	18-62	0,04-0,62
Lodo de esgoto municipal	0,01-0,24	0,02-0,34	1,4-11	0,01-0,8	5-22	2,8-9,7	0,01-0,14
Resíduos orgânicos diversos	0-0,25	0-0,01	0,01-0,48	-	0,17-3,2	0,02-1,6	0-0,08
Resíduos de manufatura de metais	0,01-0,21	0-0,08	0,65-2,4	0-0,08	0,84-2,5	4,1-11	0-0,19
Cinzas de queima de carvão	6,7-37	1,5-13	149-446	0,37-4,8	56-279	45-242	4,1-60
Fertilizantes inorgânicos	0-0,02	0,03-0,25	0,03-0,038	-	0,2-0,55	0,42-2,3	0,02-0,1
Turfa	0,04-0,5	0-0,11	0,04-0,19	0-0,02	0,22-3,5	0,45-2,6	0-0,41
Descartede produtos comerciais	36-41	0,78-1,6	305-610	0,55-0,82	6,5-32	195-390	0,1-0,2
Deposição atmosférica	8,4-18	2,2-8,4	5,1-38	0,63-4,3	11-37	202-263	1,3-2,6

(a) Fonte: Guilherme et al. (2005);

(b) As = arsênio, Cd= cádmio, Cr = cromo, Hg = mercúrio, Ni = níquel, Pb = chumbo, Se = selênio

Tabela 5. Concentração de elementos-traço em alguns insumos⁽¹⁾.

Elemento	Composto de lixo	Lodo de esgoto	Fertilizante fosfatado	Calcário	Fertilizante nitrogenado	Estercos	Pesticida
mg kg ⁻¹							
As	-	2-26	2-1200	0,1-24	2-120	3-150	220-600
Cd	13,8	2-1500	0,1-170	0,04-0,1	0,05-8,5	0,3-0,8	200-850
Cr	153	20-40600	66-245	10-15	3-19	5,2-55	-
Hg	-	0,1-55	0,01-1,2	0,05	0,3-3	0,09-26	8-420
Ni	67	16-5300	7-38	10-20	7-38	7,8-30	-
Pb	252	50-3000	7-225	20-1250	2-1450	6,6-3500	600
Se	-	2-10	0,5-25	0,08-0,1	-	2,4	-

⁽¹⁾Fonte: Chitolina et al. (2001) e Guilherme et al. (2005)

No geral, sua concentração em solos, sob condições naturais é aceita como benigna, ou de pouco risco, porque o crescimento de plantas ou a qualidade da água não são afetados adversamente. Entretanto, há locais onde, mesmo sem a adição de materiais contendo Ets, sua concentração excede os limites admissíveis para solos devido a processos naturais de enriquecimento ou de fatores pedogênicos. Nos locais onde esses níveis de Ets são altos e em situações onde possam estar presentes em formas muito móveis no solo, podendo vir a ser biodisponíveis, o risco se eleva (GUILHERME et al., 2005).

O conteúdo total de Ets em solos tem refletido a extensão da contaminação das atividades humanas e processos naturais de intemperismo de solos, mas o comportamento depende de sua forma química ou iônica. Esta é muito influenciada pelo pH, quantidade presente, solubilidade, origem (pedogênica ou antropogênica) e a interação com os colóides do solo. A sua disponibilidade pode ainda ser afetada pelas reações mediadas biologicamente e a redução/oxidação seqüencial ocorrendo no solo.

A poluição do solo tem merecido atenção especial nos últimos anos por apresentar sérios riscos à saúde humana e à qualidade do ambiente (GUILHERME; ANDERSON, 1998). Dentre as atividades que mais contribuem para a poluição do solo com esses agentes destacam-se a mineração e a indústria metalúrgica, principalmente a de metais não ferrosos. Isso porque ao promoverem a extração de alguns metais, produzem grandes quantidades de rejeitos, muitas vezes com elevados teores de Ni, Cr, Cu, Pb, Cd e Zn, que afetam severamente a vegetação (BAKER, 1993) e as atividades biológicas do solo, como respiração e decomposição, no local e em áreas adjacentes (VANGRONSVELD; COLPAERT; TICHELEN, 1997).

Os solos possuem características únicas quando comparados aos outros componentes da biosfera (ar, água e biota), pois não são apenas dreno para contaminantes, mas também atuam como tampão natural que controla o transporte de elementos químicos e outras substâncias para a

atmosfera, a hidrosfera e a biota (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001). Os impactos negativos causados pelos elementos-traço ao solo e água têm despertado grande interesse do público devido principalmente à contaminação de uma parcela significativa de populações vizinhas às fontes geradoras desse elemento (RAWLINS, 1997).

2.1. ELEMENTOS-TRAÇO EM FERTILIZANTES E CORRETIVOS

Fertilizantes podem ser definidos como todos os produtos de origem orgânica ou inorgânica que podem ser usados na agricultura como fonte de nutriente para as plantas.

Alguns insumos ou subprodutos usados com finalidade corretiva ou nutricional na agricultura representam uma possível fonte de contaminação do ambiente por Ets (CAMPOS et al., 2005). Embora menos importantes do ponto de vista quantitativo, esses insumos (fertilizantes inorgânicos, calcários, esterco e lodos de esgoto) podem se constituir em fontes de poluição não pontuais de solos e sistemas aquáticos. Entretanto, um aumento significativo do teor de elementos-traço nos solos pela aplicação de fertilizantes pode levar décadas (MCBRIDE; SPIERS, 2001).

Deve ser enfatizado, no caso de fertilizantes solúveis, que não somente a concentração do elemento-traço no insumo, mas também a dose aplicada deve ser levada em consideração quando se pretende avaliar a quantidade que está sendo adicionada ao solo.

Dentre os fertilizantes que adicionam elementos-traço ao solo, destacam-se os fosfatados. As fontes de fósforo (P), fosfatos utilizados na agricultura, como os fosfatos naturais, parcialmente acidulados e os solúveis, são obtidos a partir das rochas ricas no elemento e apresentam concentrações variadas de ETs, dependendo da rocha usada (MCLAUGHLIN et al., 1999). Em muitos solos agrícolas tais elementos podem se acumular em concentrações superiores ao dobro das encontradas em áreas virgens, devido ao uso repetitivo e em excesso dos fertilizantes (GIMENO-GARCIA et al., 1996; MARCHIORI JUNIOR, 2003).

No Brasil, alguns trabalhos têm sido realizados com o objetivo de determinar as concentrações de ETs em fertilizantes. Os resultados são bastante variáveis. Para Cd os valores encontrados oscilam entre zero e 77 mg kg⁻¹ (BIZARRO et al., 2008; CAMPO et al., 2005; GONÇALVES; PESSOA, 2002; MALAVOLTA; MORAIS, 2006).

É importante enfatizar, mesmo que os teores de ETs nos solos não alcancem valores alarmantes, estes elementos podem permanecer em formas biodisponíveis e ou bioacessíveis por muitos anos (ALLOWAY, 1990).

3. PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS PARA AVALIAÇÃO DE ELEMENTOS-TRAÇO EM FERTILIZANTES, CORRETIVOS E PRODUTOS AGRÍCOLAS

3.1. EXTRAÇÃO DE TEORES TOTAIS DE ELEMENTOS-TRAÇO

A legislação brasileira que regulamenta a utilização dos fertilizantes na agricultura estabelece que seja indicada a garantia mínima dos nutrientes para as plantas (BRASIL, 2004 a, b). Assim, as análises químicas realizadas na inspeção dos fertilizantes inorgânicos não incluíam até 2006 a determinação de ETs potencialmente tóxicos, nem mencionavam sobre métodos para determinação ou limites de sua tolerância em fertilizante (BIZARRO, 2007).

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) propôs limites máximos para alguns ETs tóxicos em fertilizantes (Tabelas 6 e 7). Na Instrução Normativa 27 de junho de 2006 (BRASIL, 2006) que dispõe sobre os fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes, para serem produzidos, importados ou comercializados no Brasil. Nela constam os limites estabelecidos referentes às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, elementos-traço, pragas e plantas daninhas.

Tabela 6. Teores máximos de ET'S em fertilizantes minerais com nitrogênio, potássio, macronutrientes secundários, para os que têm até 5% de P₂O₅ e para os demais não especificados, em corretivos de acidez, alcalinidade, sodicidade, silicatos e carbonatos de cálcio e magnésio e escórias silicatadas e fertilizantes orgânicos¹.

Elemento-traço	Valor máximo na massa total de fertilizante		
	Coluna A ⁽²⁾	Coluna B ⁽³⁾	Coluna C ⁽⁴⁾
	----- mg kg ⁻¹ -----		
As	10	-	20
Cd	20	20	3
Cr	200	-	200
Hg	0,20	-	1
Ni	-	-	70
Pb	100	1000	150
Se	-	-	80

⁽¹⁾Brasil (2006); ⁽²⁾fertilizantes minerais com nitrogênio, potássio, macronutrientes secundários, para os que tem até 5% de P₂O₅ e para os demais não especificados; ⁽³⁾corretivos de acidez, alcalinidade, sodicidade, silicatos e carbonatos de cálcio e magnésio e escória silicatada; ⁽⁴⁾fertilizantes orgânicos.

Tabela 7. Limites máximos de elementos-traço admitidos em minerais que contenham o nutriente fósforo, micronutrientes ou com fósforo e micronutrientes em mistura com os demais nutrientes.

Elementos-traço	Valor admitido em miligrama por quilograma (mg kg ⁻¹) por ponto percentual (%) de P ₂ O ₅ e por ponto percentual de somatória de micronutrientes		Valor máximo admitido em miligrama por quilograma (mg kg ⁻¹) na massa total do fertilizante	
	Coluna A	Coluna B	Coluna C aplicável aos fertilizantes minerais mistos e complexos com garantia de macronutrientes primários e micronutrientes	Coluna D aplicável aos fertilizantes fornecedores de exclusivamente de micronutrientes e aos fertilizantes com macronutrientes secundários e micronutrientes
	P ₂ O ₅	Somatória de garantia de micronutrientes		
Arsênio (As)	2,00	500,00	250,00	4000,00
Cádmio (Cd)	4,00	15,00	57,00	450,00
Chumbo (Pb)	20,00	750,00	1000,00	10000,00
Cromo (Cr)	40,00	500,00	-	-
Mercúrio (Hg)	0,05	10,00	-	-

A Instrução Normativa 24 de junho de 2007 (BRASIL, 2007) trata dos os métodos reconhecidos para determinação de elementos tóxicos em fertilizantes, corretivos agrícolas, condicionadores de solo e substratos para plantas. Tais métodos estão descritos na Agência de Proteção Ambiental dos EUA (UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA, 1998) e na Divisão de Serviços de Agricultura e Ambiente – Divisão da AES, Flórida em Métodos para fertilizantes e tem como princípio, extrair totalmente os ETs das amostras. Os limites para teores de elementos-traço em fertilizantes na IN 27 também podem ser comparados a valores estipulados por outras instituições internacionais (Tabela 8).

Tabela 8. Teores máximos de elementos-traço permitidos em fertilizantes fosfatados⁽¹⁾.

Instituição	País	Teor			
		As	Cd	Hg	Ni
		mg kg ⁻¹			
OCDE ⁽²⁾	Suíça	-	50	-	-
	Finlândia	-	50	-	-
	Suécia	-	100	-	-
	Noruega	-	100	-	-
	Dinamarca	-	110	-	-
	Bélgica	-	210	-	-
	Alemanha	-	210	-	-
	Áustria	-	275	-	-
	-	-	<2	-	-
-	-	22-556	-	-	
AAPFCO ⁽³⁾	EUA ^(*)	13	10*	61	250
USEPA ⁽⁴⁾	Califórnia	2	4*	20	-
	Washington	13	165	61	-
	Austrália	-	300	-	-
	Japão	50	8	100	-

⁽¹⁾Fonte: Malavolta e Moraes (2006); ⁽²⁾ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO; ⁽³⁾ASSOCIAÇÃO AMERICANA DE CONTROLE OFICIAL DE FERTILIZANTES (<http://www.aapfco.org/aapfcorules.html#SUIP25>); ⁽⁴⁾Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos; ^(*) mg de ETs a cada 1% de P₂O₅.

4. NÍQUEL (Ni)

Recentemente, o Ni passou a fazer parte da categoria de micronutrientes, ou seja, é um elemento essencial para às plantas superiores porque atende os critérios diretos e indiretos de essencialidade (MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 1986). Esse elemento químico é essencial para o funcionamento de diversas enzimas, dentre elas a urease, enzima que quebra a molécula de uréia em amônia e dióxido de carbono.

A uréia [CO(NH₂)₂] se origina da amida arginina sob ação da enzima arginase. A deficiência de Ni, impedindo a ação da urease, leva ao acúmulo de uréia, o que causa manchas necróticas nas folhas. Como consequência da deficiência, o metabolismo de ureídeos, aminoácidos e de ácidos orgânicos é perturbado. Os ácidos, oxálico e málico, se acumulam (BAI et al., 2006). Esses fatos sugerem que o Ni possa exercer múltiplos papéis nas plantas. As manchas necróticas, associadas com a deficiência, coincidem com locais de acumulação de uréia ou dos ácidos oxálico e láctico, o que indica também mudanças no metabolismo do carbono (C), em particular diminuição na respiração.

A deficiência de Ni em leguminosas leva a um acúmulo tóxico de uréia nas folhas. Sementes de cereais deficientes em Ni mostraram-se inviáveis e apresentaram baixa germinação (BRADY; WEIL, 2002). Sementes de ervilhas, feijões, trigo, mamona, tremoço, soja, e arroz pré-tratadas com Ni apresentaram maior percentual de germinação (NIELSEN, 1984).

A soja sem adição de Ni no substrato mostra necrose na ponta dos folíolos, consequência do acúmulo de uréia que atinge o nível de 25 g kg⁻¹; não completa o ciclo de vida e se o teor for menor que 10 µg kg⁻¹ ocorre diminuição no crescimento em cerca de 10% (MALAVOLTA, 2006; TAN et al., 2000). Em experimentos de campo descritos em 1973 foi demonstrado que a adição de até 40 g ha⁻¹ de Ni aumentou a nodulação e a produção de grãos de soja (BERTRAND, 1973).

A absorção de Ni é um processo ativo, sensível a inibidores metabólicos (KOCHIAN, 1991). É possível a utilização de canais não específicos e a participação de metalóforos (WELCH, 1995) Ca^{2+} e Mg^{2+} inibem a absorção de Ni não competitivamente, enquanto Cu^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} fazem-no competitivamente. A mobilidade de Ni no floema é alta: na senescência até 70% do Ni acumulado na parte aérea pode se deslocar para a semente. Uma alta proporção do Ni na planta está na forma de compostos orgânicos, com peso molecular entre 1.000 e 10.000.

Em tecidos de folhas maduras de várias espécies a suficiência de Ni ocorre entre os teores de 0,1-5 mg kg^{-1} , e o excesso (toxidez) com teores entre 10-100 mg kg^{-1} (KABATA; PENDIAS, 2001). Liu e Wang (1993) determinaram a fitotoxicidade de Ni em arroz e milho e concluíram que houve redução de produção com as doses de Ni entre 14 e 403 mg kg^{-1} de solo, sendo este efeito mais acentuado para o milho.

Em estudos conduzidos em pomares de em pecã, no Sudeste da Costa do Golfo e das Planícies Costeiras dos EUA foram identificados sintomas de deficiência de (WOOD et al., 2006). Pulverização foliar de sulfato de níquel ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), no outono, promoveu o transporte para os tecidos dormentes de ramos e gemas numa proporção suficiente para o crescimento normal das plantas. Na primavera seguinte, as folhas das plantas tratadas tinham aspecto normal, apresentando 7 mg kg^{-1} de Ni, enquanto as deficientes tinham 0,5 mg kg^{-1} e os solos dos pomares mostrando deficiência severa apresentavam de 0,4 a 1,4 kg ha^{-1} de Ni .

O Ni é um metal de transição que pode ocorrer em vários estados de oxidação, mas, somente Ni^{2+} é estável nas condições de pH e de potencial que o solo é capaz de apresentar.

As principais formas de ocorrência de Ni no solo são: sítios usuais ou específicos de adsorção; adsorvido ou ocluído em sesquióxidos; fixo na rede cristalina de minerais de argilas, em resíduos orgânicos e microrganismos; na solução do solo em forma iônica livre ou complexado com ligantes minerais ou orgânicos (ADRIANO, 1996).

A disponibilidade de Ni é inversamente relacionada com o pH. Em estudos conduzidos, em um Latossolo Roxo distrófico e Nitossolo Vermelho, a calagem, seguida por aumento do pH do solo, diminuiu o teor de Ni extraível com DTPA e reduziu o efeito fitotóxico de altas doses do elemento sobre o feijoeiro (ANTON, 1990).

A quantidade de Ni no solo é também influenciada pelo material de origem, com a crosta terrestre em média 75 mg de Ni/kg o qual pode refletir no solo por meio da liberação desse elemento para a fase líquida tornando-se disponível para a absorção pelas raízes das plantas.

BRADY & WEIL (2002) afirmam que as rochas ultramáficas, especialmente, a serpentinita tem altos teores de Ni em sua composição.

As concentrações de Ni nos solos variam de 1 a 200 mg kg⁻¹, com média de 20 mg kg⁻¹ (PAIS; JONES JUNIOR, 1997).

De acordo com MCGRATH & CEGARRA (1995), a reação do solo exerce grande influência na retenção de Ni, que se precipita facilmente na superfície dos óxidos. O elemento encontra-se ligado ao sulfato em solos ácidos e na forma de carbonatos e complexos orgânicos em solos com pH até 8,0.

Segundo EGREJA FILHO (2000), o Ni apresenta grande afinidade com a matéria orgânica, especialmente nos casos em que essa provém de materiais adicionados aos solos.

O Ni encontra-se entre os elementos-traço mais comuns em solos. De acordo com CARIDAD CANCELA (2002), os teores totais desse elemento em amostras de solos não contaminadas do Estado de São Paulo variaram de 14,8 a 50,2 mg kg⁻¹. Teores fitotóxicos de Ni, em torno de 100 mg kg⁻¹ foram encontrados em Nitossolo Vermelho (ROOVERS et al., 1983). Resultados semelhantes foram obtidos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2001-2006), cuja faixa foi um pouco mais ampla, de 1,55 a 73,5 mg kg⁻¹. ASHER (1991) relata que em plantas que crescem em solos não contaminados, sem presença de serpentina,

os teores na massa seca variaram entre 0,1 e 5 mg kg⁻¹. Em plantas acumuladoras o teor de Ni pode chegar a 1000 mg kg⁻¹. De maneira geral, a toxidez por esse elemento se manifesta quando o teor está na faixa de 24 – 308 mg kg⁻¹ (ANTON, 1990). Em solos com presença de serpentina, material de origem rico em Ni, os teores no podem variar entre 20 - 1000 mg kg⁻¹. Já Adriano (1986) relata que as médias mundiais ficam entre 20 e 40 mg kg⁻¹ e em solos com presença de serpentina, ficam entre 100 e 7000 mg kg⁻¹.

Segundo MALAVOLTA (2006) os corretivos, fertilizantes, lodo de esgoto, queima de combustíveis fósseis, óleos residuais e deposição atmosférica em áreas rurais (2 kg Ni m⁻²) e deposição atmosférica em áreas urbanas (88 kg Ni m⁻²) são fontes de Ni nos solos agrícolas.

O teor de Ni em rochas moídas usadas para fins de fertilização agrícola também é relevante (Tabela 9).

Tabela 9. Concentração de Ni em vários tipos de rochas⁽¹⁾.

Rocha	Faixa	Média
	mg kg ⁻¹	
Crosta terrestre	80	
Solos do mundo	6 -92	24
Ígneas ultramáficas	270-3600	2000
Ígneas basálticas	45-410	140
Ígneas graníticas	2-20	8
Folhelhos e argilitos	20-250	68
Folhelhos pretos	10-500	50
Calcários	-	20
Arenitos	-	2
Solos do Cerrado (material de origem)		
Sedimentar	-	8
Basalto	-	38
Gnaise	-	22

⁽¹⁾Fonte: Malavolta (2006).

Após aplicado, os teores no solo, cultura e uma relação solo/cultura, que seria a taxa em que as plantas podem absorver Ni do solo, devem ser levados em consideração com relação à eficiência das plantas na absorção do nutriente provindo dessas fontes (Tabela 10).

Tabela 10. Maior fonte de Ni, faixa, teor representativo no solo, na parte aérea da cultura e relação solo/cultura⁽¹⁾.

Elemento	Fonte	Conteúdos representativos			
		Faixa (kg ha ⁻¹ 15cm ⁻¹)	Teor no solo (kg ha ⁻¹ 15cm ⁻¹)	Teor na cultura (kg parte aérea ⁻¹)	Relação solo/cultura
Ni	Silicatos*	10-2200	45	0,1	2250

⁽¹⁾Fonte: Brady e Weill (2002); *Especialmente serpentinas.

Quantidades de Ni presente nas partes das plantas de sorgo (folha, colmo, raiz e grão) são apresentadas na tabela 11. Verifica-se, que as quantidades desse metal se localizam em maior parte na raiz, vindo a seguir, no grão, na folha e no colmo.

Tabela 11. Teores de níquel e quantidades de massa seca em plantas de sorgo cultivadas em solo submetido a cinco tratamentos (testemunha + 4 doses de Ni no lodo de esgoto). Jaboticabal, Estado de São Paulo, 2004⁽¹⁾.

Tratamento (mg Ni kg ⁻¹)	Parte da planta				
	Grão	Folha	Colmo	Raiz	Total
	mg Ni kg ⁻¹				
Testemunha	0,65	3,52	0,40	1,54	6,01
329	1,53	2,54	0,40	3,95	8,41
502	2,13	2,10	0,24	7,62	12,09
746	3,67	1,77	1,08	8,66	15,18
1119	3,55	1,58	0,60	10,58	16,31

⁽¹⁾Fonte: Revoredo (2006)

Na tabela 12, podem ser observados valores da distribuição de Ni em alguns estudos envolvendo esse nutriente e seu teor em diferentes partes da planta.

Tabela 12. Teores de níquel nos grãos, folha, colmo, raiz e totais relatados em diversos estudos.

Tratamento	Solo	Grão	Parte aérea	Raiz	Planta	Referências
Testemunha	-	0,65	3,52	1,54	Sorgo	Revoredo (2006)
Testemunha	-	2,5	-	-		Malavolta (1992)
Esterco	-	2,7	-	-		Malavolta (1992)
Super Triplo (SFT)	-	1,4	-	-		Malavolta (1992)
Esterco + SFT	-	3,3	-	-		Malavolta (1992)
10 t ha ⁻¹ de biossólido	-	7,2	-	-		Boareto et al. (1992)
Solos cultivado com teor de 0,29 mg dm ⁻³ de Ni*	-	0,12	2,34	-	Café	Santos e Oliveira (2001)
Testemunha	4,23	0,46	1,15	-	Milho	Oliveira et al. (2005)
Testemunha	14,47	0,18	-	-	Milho	Rangel (2003)
Testemunha	7,49	-	0,136	-	Tomate	Ramalho et al. (1999)
Testemunha	7,49	-	0,124	-	Pepino	Ramalho et al. (1999)
Testemunha	7,49	-	0,07	-	Repolho	Ramalho et al. (1999)
Testemunha	7,49	-	0,048	-	Pimentão	Ramalho et al. (1999)
Testemunha	33,9	-	0,53	-	Alface	Jordão et al. (2006b)
Testemunha	11,25	-	0,068	-	Pimentão	Ramalho et al. (1999)

* Na casca 0,09 mg Ni Kg⁻¹, bebida (mg litro⁻¹) 0,10 mg Ni kg⁻¹

WANG et al. (1997) relataram que o acúmulo de Ni em plantas de trigo foi maior nas folhas e nos colmos do que nos grãos.

Para MELO et al. (2004), o Ni, em plantas de milho, tende a se acumular nas folhas e grãos, apresentando como teor crítico na matéria seca 11,0 mg kg⁻¹, mas têm sido relatados trabalhos que revelam teores de Ni entre 0,22 e 0,34 mg kg⁻¹ para grãos de milho cultivado em solos não contaminados e teores entre 1,6 e 5,2 mg kg⁻¹ para a massa seca de milho cultivado em solos que receberam lodo de esgoto (REIS, 2002).

5. COBRE (Cu)

O cobre aparece como íons Cu^{2+} na maioria dos solos e como íons Cu^{2+} onde o nível de oxidação é baixo. As concentrações de Cu no solo são grandemente influenciadas pelo material de origem (TROEH; THOMPSON, 2007).

Esse elemento-traço ocorre em minerais primários, frequentemente associado ao enxofre na forma de sulfetos, como a calcopirita, a calcocita e a bornita. Aparece como componente-traço em minerais constituintes de rochas ígneas e em minerais secundários na forma de óxidos, carbonatos e silicatos. Normalmente, os minerais de Cu apresentam elevada solubilidade, razão pela qual não devem estar presentes em solos intemperizados. O Cu como elemento isolado caracteriza-se pela baixa solubilidade, sendo fortemente retido pela fase sólida do solo. O conteúdo de Cu nos solos varia muito (FERREIRA; CRUZ, 1991). O teor de Cu em algumas rochas e solos pode ser observado na tabela 13.

Tabela 13. Teor de Cu nas principais rochas e em alguns solos⁽¹⁾.

Rocha	Faixa		Média
	mg kg ⁻¹		
Crosta terrestre	-		50
Solos do mundo	6-80		24
Ígneas ultramáficas (basaltos)	30-160		90
Ígneas basálticas (granitos)	4-30		15
Ígneas graníticas (piroxênios)	10-40		15
Folhelho e argila	30-150		50
Folhelhos pretos	20-200		70
Rochas vulcânicas	5-20		
Sedimentos argiláceos	40-60		2
Calcários	5-20		
Arenitos	2-40		
Litosfera			70
Crosta terrestre	24-55		
Solos (geral)	2-100		20-30
Turfosos	15-40		
Arenosos	2-10		
Gleissolos e Cambissolos	10-40		
Chernozêmicos	1-100		30
Tropicais	8-128		
Material de origem	Teor (mg kg ⁻¹)		
Sedimentar	10		
Basalto	159		
Gnaisse	34		

⁽¹⁾Fonte: Adaptado de Bakker (1993).

São reconhecidos seis compartimentos de Cu no solo. O primeiro são os íons e complexos minerais e orgânicos solúveis na solução do solo. Os outros compartimentos são o Cu trocável, complexos orgânicos estáveis no húmus, adsorvido a óxidos hidróxidos de Al, Fe, Mn. E por último o Cu adsorvido na argila e no húmus e o presente na rede cristalina dos minerais de Cu do solo. A concentração na solução do solo geralmente é muito baixa, 0,001 µM (MALAVOLTA, 2006). A maioria do Cu no solo está associada às frações orgânicas do solo (SIMS, 1996).

A solubilidade do Cu é muito dependente de pH. A diminuição na sua disponibilidade é de 100 vezes para cada aumento de unidade de pH. Sua maior disponibilidade ocorre na faixa de pH de 5 a 6,5.

O Cu é um micronutriente que, em suas formas iônicas, é altamente tóxico em elevadas concentrações. Conseqüentemente, quase todo o Cu nas plantas está presente como complexo. Como outros elementos-traço, Cu em excesso é ligado a fitoquelatinas, peptídeos contendo enxofre derivados da glutathione, que complexam elementos-traço (EPSTEIN & BLOOM, 2006).

Por ser um elemento de transição capaz de transferir elétrons o Cu funciona no transporte de elétrons e na captura de energia por proteínas e enzimas oxidativas (FRAÚSTO DA SILVA; WILLIAMS, 1991).

O Cu também está envolvido na fotossíntese e respiração das plantas, e na utilização de ferro. Ele estimula a lignificação das paredes celulares (BRADY & WEIL, 2002). Na tabela 14, podem ser observados os teores de Cu em diferentes solos e plantas que foram compilados de diferentes estudos.

Tabela 14. Teores de cobre nos grãos, folha, colmo, raiz e totais relatados em diversos estudos.

Tratamento	Solo	Grão	Parte aérea	Raiz	Planta	Referências
	mg kg ⁻¹					
Dados de mil amostras de solos dos EUA	1-191	-	-	-	-	Kubota (1983)
Teor médio no solo	10-80	-	-	-	-	Krauskopf (1972)
Solo cultivado a uma distância de 300 metros da fonte contaminante	77	4,30	-	-	arroz	Silva (2007)
Testemunha	2,75		8,5		milho	Borges (2007)
36 m ³ de lodo de curtume/ha	2,75		8,75		milho	Borges (2007)
72 m ³ de lodo de curtume/ha	2,75		7,75		milho	Borges (2007)
144 m ³ de lodo de curtume/ha	2,75		8,0		milho	Borges (2007)
288 m ³ de lodo de curtume/ha	2,75		8,0		milho	Borges (2007)

De acordo com SILVA (2007), as raízes limitam a translocação de Cu para a parte aérea fato que reflete na diminuição dos teores de Cu nos grãos de arroz. Já para o Zn isso não acontece da mesma maneira porque a translocação é maior.

6. ZINCO (Zn)

O Zn ocorre na solução do solo na forma de Zn^{2+} que também é a forma absorvida pelas plantas. Sua concentração diminui cerca de 100 vezes para cada aumento de uma unidade de pH. A faixa de maior disponibilidade de Zn nos solo ocorre entre 5,0 a 6,5. Em solos com adequado teor de matéria orgânica a maior parte do Zn da solução ocorre em forma complexadas ou queladas com radicais orgânicos.

O Zn está presente em diversas rochas básicas e ácidas, situação condicionada, em parte, pelo fato de que a substituição isomórfica de Mg por Zn nos silicatos se dá com certa facilidade. Aparece como elemento acessório em minerais primários, tais como olivina, hornblenda, augita, biotita, e magnetita. Formas comuns de compostos que contêm o elemento envolvem sulfetos (esfalerita), carbonatos, silicatos e fosfatos (SOUZA & FERREIRA, 1991).

O teor total de Zn no solo depende grandemente da composição do material de origem (KIEKENS, 1993). Dessa forma, na tabela 15 são apresentados os teores de Zn em alguns tipos de rochas e solos.

Tabela 15. Teor de Zn nas principais rochas e solo⁽¹⁾.

Rocha	Faixa	Média
	mg kg ⁻¹	
Crosta terrestre	-	75
Solos do mundo	17-236	67
Ígneas ultramáficas (basaltos)	100	-
Ígneas basálticas (granitos)	40	15
Folhelho e sedimentos argilosos	80-120	-
Arenitos, calcários e dolomitas	10-30	-
Material de origem	Teor (mg kg ⁻¹)	
Sedimentar	22	
Basalto	79	
Gnaisse	87	

⁽¹⁾Fonte: Malavolta (2006).

No solo o Zn se distribui em cinco frações, a saber: Zn da solução do solo; trocável; adsorvido, quelatizado ou complexado; argilas e óxidos metálicos insolúveis (argilas 2:1, por exemplo) e minerais primários (KIEKENS, 1993).

Apesar de o Zn ser um micronutriente essencial, este elemento pode afetar o crescimento e metabolismo normal de espécies vegetais, quando presente em níveis tóxicos no ambiente (MARSCHNER, 1995).

O Zn desempenha um papel na síntese proteica, na formação de alguns hormônios do crescimento, e no processo de reprodução de determinadas plantas (BRADY & WEILL, 2002).

As plantas provavelmente apresentam algum mecanismo de restrição à transferência de Zn para a parte aérea. BONNECARRERE et al. (2004) mencionam a tendência do zinco de se acumular nas raízes, principalmente, quando absorvido em grandes quantidades. OLIVEIRA et al. (2005), trabalhando com lodo de esgoto contaminado com zinco, relata, também, uma menor translocação de zinco da raiz para parte aérea e desta para os grãos de arroz.

A concentração de zinco considerada tóxica nas folhas de arroz é de 673mg kg⁻¹ na massa seca (FAGERIA, 2000). Na tabela 16, são mostrados alguns dados de teores de Zn em solo, grãos parte aérea e raiz em diferentes culturas.

Tabela 16. Teores de zinco nos grãos, folha, colmo, raiz e totais relatados em diversos estudos.

Tratamento	Solo	Grão	Parte aérea	Raiz	Planta	Referências
	mg kg ⁻¹					
0 kg de Zn aplicado (kg/ha) (1° cultivo)	0,5		14		milho	Galvão (1985)
27 kg de Zn aplicado (kg ha ⁻¹) (1° cultivo)	4,2		36		milho	Galvão (1985)
0 kg de Zn aplicado (kg ha ⁻¹) (2° cultivo)	0,4		14		milho	Galvão (1985)
27 kg de Zn aplicado (kg ha ⁻¹) (2° cultivo)	3,4		24		milho	Galvão (1985)
0 kg de Zn aplicado (kg ha ⁻¹) (3° cultivo)	0,4		13		milho	Galvão (1985)
27 kg de Zn aplicado (kg ha ⁻¹) (3° cultivo)	3,5		24		milho	Galvão (1985)
Sem aplicação de Zn com 0,7 mg dm ⁻³ no solo	0,42		40		milho	Andreotti (2001)
Com aplicação de 10 mg dm ⁻³ Zn com 0,7 mg/dm ³ no solo	2,78		98		milho	Andreotti (2001)
Dose de 125 mg dm ⁻³ via lodo de esgoto	-		717,2		mamoneira	Zeittouni (2009)
Dose de 125 mg dm ⁻³ via lodo de esgoto	-		1800		girassol	Zeittouni (2009)
Dose de 125 mg dm ⁻³ via lodo de esgoto	-		564		pimenta	Zeittouni (2009)
Dose de 125 mg dm ⁻³ via lodo de esgoto	-		899		tabaco	Zeittouni (2009)
Sem aplicação de Zn (Latossolo Vermelho Amarelo, horizonte A)	-		123,97	2713,7	arroz	Andrade (2008)
Sem aplicação de Zn	-		135,59	1817,5	arroz	Andrade (2008)

Continuação...

(Latosolo Vermelho Amarelo, horizonte B)					
Sem aplicação de Zn (Neossolo Flúvico)	-	194,41	4707,5	arroz	Andrade et al. (2008)
Dose de lodo 2531 kg ha ⁻¹ correspondendo a aplicação de 81 kg de Zn ha ⁻¹ (Latosolo Vermelho Amarelo, horizonte A)	-	3817,2	258,97	arroz	Andrade (2008)
Dose de lodo 2531 kg ha ⁻¹ correspondendo a aplicação de 81 kg de Zn ha ⁻¹ (Latosolo Vermelho Amarelo, horizonte B)	-	1000	6103	arroz	Andrade (2008)
Dose de lodo 2531 kg/ha correspondendo a aplicação de 81 kg de Zn ha ⁻¹ (Neossolo Flúvico)	-	392,6	9821,5	arroz	Andrade (2008)
Solo cultivado a uma distância de 300 metros da fonte contaminante	-	62,5	47,17	arroz	Silva (2007)
Testemunha lodo de esgoto	-	53	15,73	milho	Nogueira (2008)
Testemunha	0,8		25,5	milho	Borges (2007)
36 m ³ de lodo de curtume ha ⁻¹	0,8		23,5	milho	Borges (2007)
72 m ³ de lodo de curtume ha ⁻¹	0,8		28,5	milho	Borges (2007)
144 m ³ de lodo de curtume ha ⁻¹	0,8		27,5	milho	Borges (2007)
288 m ³ de lodo de curtume ha ⁻¹	0,8		23,0	milho	Borges (2007)

OBJETIVO GERAL:

O objetivo deste trabalho foi caracterizar e realizar avaliação agronômica de rochas silicáticas com potencial de uso como fontes alternativas de nutrientes e corretivos da acidez do solo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- i) Caracterizar seis rochas silicáticas com potencial de uso na agricultura como fontes alternativas de nutrientes e corretivos de acidez do solo.
- ii) Avaliar as alterações nos atributos químicos no solo fertilizado com seis rochas silicáticas.
- iii) Determinar os teores e acúmulo de potássio, níquel, cobre e zinco na parte aérea do arroz e da alface e, também, nos grãos de arroz.
- iv) Obter valores de índices de eficiência da adubação potássica na alface e no arroz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADRIANO, D. C. **Trace elements in the terrestrial environment**. New York: Springer-Verlag, 1986. 533 p.

ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soil**. New York: J. Wiley, 1990. 339 p.

ALMEIDA, E. de; SILVA, F. J. P. da; RALISCH, R. Powdered rock to revitalise soils. **LEISA Magazine**, Wageningen, v. 22, n. 4, p. 12-13, Dec. 2006.

ALMEIDA, E. de,; SILVA, F. J.R P.; RALISCH. Polvo de roca para revitalizar los suelos en el sur de Brasil. **LEISA - Revista de Agroecologia**, v. 22, p. 31-33. 2007.

ALMEIDA, E.de, SILVA, F. JR P. & RALISCH. Revitalização dos solos em processos de transição agroecológica no sul do Brasil. **Agriculturas** - v. 4, p. 7-10, 2007.

ANDRADE, A. F. M.; SOBRINHO, N.M.B.A.; MAGALHÃES, M.O.L.; NASCIMENTO, V.S.; MAZUR, N. Zinco, chumbo e cádmio em plantas de arroz (*Oryza Sativa* L.) cultivadas em solo após adição de resíduo siderúrgico. **Revista Ciência Rural**, v.38, p. 1877-1885, 2008

ANDRÉA, P. d'. A rochagem na agricultura de processos. **Revista Agroecologia Hoje**, Botucatu, n. 20, p. 22-23, ago./set. 2003.

ANDREOTTI, M.; SOUZA, E.C.A. de; CRUSCIOL, C.A.C. Componentes morfológicos e produção de matéria seca de milho em função da aplicação de calcário e zinco. **Scientia Agricola**, v. 58, p.321-327, 2001.

ANTON, D.F.P. **Toxidez do níquel em arroz e feijão**. Tese de Doutorado. Piracicaba. Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1990. 144p.

ASHER, C. J. Beneficial elements, functional nutrients and possible new essential elements. In: MORTVEDT, J. J. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. 2nd ed. Madison: Soil Science Society America, 1991. p. 703-724.

BADR, M.A.; SHAFEI, A.M.; EI-DEEN, S.H.S. The dissolution of K and P-bearing minerals by silicate dissolving bacteria and their effect on sorghum growth. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**. v.2, p.5-11, 2006.

BAI, C.; REILLY, C. C.; WOOD, B. W. Nickel deficiency disrupts metabolism of ureides, amino acids, and organic acids of young pecan foliage. **Plant Physiology**, v. 140, p.433-443, 2006.

BAKER, D. E. Cooper. In: ALLOWAY, B. J. A. (Ed.). **Heavy metals in soils**. New York: Blackie; J. Wiley, 1993. p. 151-176.

BERTRAND, D. Importance du nickel, comme oligo-élément, pour les *Rhizobium* des nodosités des légumineuses. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences**, San Francisco, v. 276, p. 1855-1858, 1973.

BETTINELLI, M.; BEONE, G.M.; SPEZIA, S.; BAFFI, C. Determination of heavy metals in soils and sediments by microwave-assisted digestion and inductively coupled plasma optical emission spectrometry analysis. **Analytica Chimica Acta**, v. 424, p.289-296, 2000.

BIZARRO, V.G.; MEURER, E.J.; TATSCH, F.R.B. Teor de cádmio em fertilizantes comercializados no Brasil. **Ciência Rural**, v.38, p.247-250, 2008.

BIZARRO, V.G. **Teor e biodisponibilidade de cádmio em fertilizantes fosfatados**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. 65p.

BOARETO, A. E. et al. Níquel e cádmio em grãos de feijão produzidos em solo adubado com lodo de esgoto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIZADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBCS, 1992. p. 100-401.

BONNECARRÈRE, R.A.G.; LONDERO, F.A.A.; SANTORS, O.; SCHMIDT, D.; PILAU, F.G.; MANFRON, P.A.; NETO, D.D. Resposta de genótipos de arroz irrigado à aplicação de zinco. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, v.10. p.214-222, 2004.

BORGES, J.D.; BARROS, R.G.; SOUZA, E.,R.B; OLIVEIRA JÚNIOR, J.P.; LEANDRO, W.M.; OLIVEIRA, I.P.; CARNEIRO, F.M.; NAVES, R.V.; SONNENBERG, E. Teores de micronutrientes nas folhas de milho fertilizadas com lodo de curtume. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 2, p. 1-6, 2007.

BRADY, N. C.; WEIL, R. Y. **The nature and properties of soils**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 958 p.

BRASIL. Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes e biofertilizantes destinados à Agricultura. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 15 jan. 2004a. Seção 1, p. 2.

BRASIL. Instrução Normativa nº 24, de 20 de junho de 2007. Reconhece os métodos constantes do anexo desta Instrução Normativa, conforme o art. 71 do anexo do Decreto nº 4954, de 14 de janeiro de 2004b. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 21 jun. 2007. Seção 1, p. 23.

BRASIL. Instrução Normativa nº 27, de 05 de junho de 2006. Dispõe fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes para serem produzidos, importados ou comercializados, deverão atender aos limites estabelecidos nos Anexos I, II, III, IV e V desta Instrução Normativa no que se refere às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, elementos-traço, pragas e ervas daninhas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 9 jun. 2006. Seção 1, p. 15.

CAMPOS, M.L. ; SILVA, F.N.; FURTINI-NETO, A.E.; GUILHERME, L.R.G. ; MARQUES, J.J. ; ANTUNES, A.S. Determinação de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco em fosfatos de rocha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.361-367, 2005.

CARIDAD CANCELA, R. **Contenido de macromicronutrientes, metales pesados y otros elementos en suelos naturales de São Paulo (Brasil) y Galicia (España)**. Tesis (Doctorado) - Universidad de A Coruña, A Coruña, España. 2002. 573p.

CASTRO, C. de et al. Rochas silicáticas como fontes alternativas de potássio para a cultura do girassol. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 27., 2006, Bonito. **Anais...** Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste, 2006. (Documentos, 82). 1 CD-ROM.

CHITOLINA, J. C. et al. **Decomposição da matéria orgânica de compostos de lixo urbano e posterior preparo de extratos nítrico-perclórico**. Campinas: EMBRAPA Informática Agropecuária, 2001. 12 p. (EMBRAPA Informática Agropecuária. Circular Técnica, 1).

DUFFUS, J. H. "Heavy metals" – a meaningless term. **Chemistry International Research**, v.23, p.163-167, 2001.

DUTRA, L.G. **Minerais potássicos, acidificados ou não, utilizados como fontes de nutrientes para o milho (*Zea mays* L.) em casa de vegetação**. Tese de Doutorado. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1980. 83p.

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

EGREJA, FILHO, F.B. **Extração seqüencial de metais pesados em solos altamente intemperizados: utilização de componentes-modelo e planejamento com misturas ternárias na otimização do modelo.** Tese de Doutorado. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 2000. 287p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas.** Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.

ESSINGTON, M. E. **Soil and water chemistry: an integrative approach.** Boca Raton: CRC, 2004. 534 p.

FAGERIA, N.K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, p.390-395, 2000.

FAQUIN, V. **Efeito do tratamento térmico do sienito nefelínico adicionado de calcário dolomítico, na disponibilidade de potássio ao milho (*Zea mays* L.), em casa de vegetação.** Dissertação de Mestrado. Piracicaba: Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1982. 115p.

FERNANDES, M. **Viabilidade agronômica do uso do rejeito de garimpos do Distrito de pegmatítico de Araçuaí/MG.** Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais/ Instituto de Geociências, 172p. 2008.

FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. Micronutrientes no solo: cobre. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p.131-157.

FERREIRA, D. F. **Sisvar 4.3**. 2000. Disponível em: <<http://www.dex.ufla.br/danielff/sisvar>>.

Acesso em: 13 ago. 2010.

FYFE, W. S, LEONARDOS, O. H. & THEODORO, S.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Acadêmia. Brasileira de Ciências**, v.78, p.721-730. 2006.

FRANCO, G. **Tabela de Composição de Alimentos**. 9ª ed. São Paulo: Editora Atheneu, 1999.

FRAUSTO, da SILVA, J.J.R.;R.J.P.WILLIAMS. The biological chemistry of the elements: The inorganic chemistry of life. **Clarendon Press**, 1991. 561p.

GALRÃO, E.Z. & D.M.G. SOUZA. Resposta do trigo à aplicação de cobre em um solo orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9. p.149-153, 1985.

GEBHARDT, S. E, HOLDEN JM. Consequences of changes in the dietary reference intakes for nutrient databases. **Journal Food Composition and Analysis**, v.19, p.91-95, 2006.

GIMENO-GARCIA, E.; ABREU, V.; BOLUDA, R. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilisers and pesticide to rice farming soils. **Environmental Pollution**, v.92, p.19-25, 1996.

GONÇALVES Jr, A.C.; PESSOA, A.C.S. Fitodisponibilidade de cádmio, chumbo e cromo, em soja cultivada em Argissolo Vermelho eutrófico a partir de adubos comerciais. **Scientia Agraria**, v.3, p. 19-23, 2002.

GUILHERME, L.R.G. & ANDERSON, S.J. **Cooper sorption kinetics in two oxide-rich soils (Oxisols): effect of phosphate pretreatment**. In: JENNE, E.A., ed. Adsorption of metals by geomedia: variables, mechanisms, and model applications. San Diego, Academic Press, 1998. p.209-228.

GUILHERME, L.R.G.; MARQUES, J.J.G.S.M.; PIERANGELI, M.A.P.; ZULIANI, D.Q.; CAMPOS, M.L.; MARCHI, G. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. In: **Tópicos em Ciência do Solo**, 2005. v.4, p.345-390.

HAYES, K. F.; TRAINA, S. J. Metal speciation and significance in ecosystem health. In: HUANG, P. M. (Ed.). **Soil chemistry and ecosystem health**. Madison: Soil Science Society of America, 1998. p. 45-84. (SSSA Special Publication, 52).

HODSON, M. E.; LANGAN, S. J. Considerations of uncertainty in setting critical loads of acidity of soils: the role of weathering rate determination. **Environmental Pollution**, v.106, p.73-81, 1999.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. **Compendium of chemical terminology**. 2. ed. Oxford: Blackwell Scientific, 1997. Disponível em: <<http://goldbook.iupac.org/T06421.html>>. Acesso em: 15 out. 2009.

JORDÃO, C.P.; FIALHO, L.L.; CECON, P.R.; MATOS, A.T.; NEVES, J.C.L.; MENDONÇA, E.S.; FONTES, R.L.F. Effects of Cu, Ni and Zn on lettuce grown in metal-enriched vermicompost amended soil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.172, p.21-38, 2006.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3. ed. Boca Raton: CRC, 2001. 413 p.

KIEKENS, L. Zinc. In: ALLOWAY, B. J. (Ed.). **Heavy metals in soils**. Glasgow: Blackie; J. Wiley, 1993. p. 261-278.

KING, L.D. Soil heavy metals. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E. & FONTES, M.P.F. (Eds.) **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: UFV/SBCS, 1996. p.823-836.

KOCHIAN, L.V. 1991. Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants. In: Micronutrients in Agriculture, **Soil Science Society of American**. Madison. 760p.

KRAUSKOPF, K.B. Geochemistry. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M. & LINSAY, W.L., eds. Micronutrients in agriculture. Madison, **Soil Science Society of America**, 1972. p. 7-40.

KRONBERG, B. I; LEONARDOS, O. H. & FYFE, W. S. The chemistry of some brazilian soils element mobility during intense weathering". **Chemical Geology**, v.60, p.361-370. 1987.

KUBOTA, J. Cooper status of United States soils and forage plants. **Agronomy Journal**. v. 75, p. 913-918, 1983.

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**. Dissertação de Mestrado. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1985. 146p.

LEONARDOS, O. H.; FYFE, W. S.; KRONBERG, B. I. Rochagem: método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., 1976, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: Sociedade Brasileira de Geologia, 1976. p. 137-145.

LEONARDOS O. H. & THEODORO, S. H. Fertilizing tropical soils for sustainable development. In: FORMOSO MLL AND CERRI CC. Proceedings International Workshop on Tropical Soils Rio de Janeiro. **Acadêmia Brasileira de Ciências**, p.143–153. 1999.

LEONARDOS O.H, THEODORO S.H & ASSAD M.L. Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.56, p.3-9. 2000

LEONARDOS, O. H.; ULBRICH, M. N. C.; GASPAR, J. C. The Mata da Corda Volcanic rocks. In: INTERNATIONAL KIMBERLITE CONFERENCE FIELD GUIDEBOOK, 5., 1991, Araxá. **Proceedings...** Araxá: CPRM, 1991. p. 65-72.

LEVINSON, A. A. **Introduction to exploration geochemistry**. Maywood: Applied, 1974. 924 p.

LIU, C.L.; WANG, Y.P. Effect of nickel contamination in different soils on the growth of crops.

Journal of the Chinese Agricultural Chemical Society, v.31, p.172-182, 1993.

LOPES, A.S.; FREIRE, J.C.; AQUINO, L.H.; FELIPE, M.P. Contribuição ao estudo da rocha potássica - Verdete de Abaeté (Glauconita) para fins agrícolas. **Agros**, v.2, p32-42, 1972.

LOUREIRO, E. de V. L.; MELAMED, R.; Neto, J. de F. **Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro. Cetem/MCT, 2009.645p.

MACBRIDE, M.D. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University, 1994. 406p.

MALAVOLTA, E. Fertilizantes, corretivos e produtividade: mitos e fatos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargil, 1992. p. 89-154.

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Ceres, 2006a. 638p.

MALAVOLTA, E.; MORAIS, M. F. Sobre a sugestão dos elementos-traço tóxicos em fertilizantes e sobre a portaria 49 de 25/04/2005 da Secretária de Defesa Agropecuária do Ministério da Agricultura, Pecuária e abastecimento. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 114, p. 10-14, 2006.

MARCHI, G. **Organic acids and trace element extractability in sewage sludge-treated soils.**

Tese de Doutorado. Lavras: Universidade de Federal de Lavras. 115p. 2005.

MARCHIORI, J.R.M. **Levantamento inicial de chumbo, cádmio, níquel, cromo e cobre em pomares de produção comercial no Estado de São Paulo.** Tese de Doutorado. Jaboticabal:

Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. 2003. 138p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** 2. ed. London: Academic, 1986. 674 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** 2. ed. San Diego : Academic, 1995. 902 p.

MATTIAZZO-PREZOTTO, M.E. **Comportamento de cobre, cádmio, crômio, níquel e zinco adicionados a solos de clima tropical em diferentes valores de pH.** Tese (Livre Docência).

Piracicaba: Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 1994. 197p.

McBRIDE, M. B.; SPIERS, G. Trace element content selected fertilizers and dairy manures as determined by ICP-MS. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 2, p. 139-156, 2001.

McGRATH, S. P.; CEGARRA, J. Chromium and nickel. In: ALLOWAY, B. J. (Ed.). **Heavy metal in soils.** London: Blackwell Academic, 1995. p. 152-178.

MELO, G. M. P.; MELO, V. P.; MELO, W. J. **Elementos-traço no ambiente decorrente da aplicação de lodo de esgoto em solo agrícola**. Brasília: MMA, 2004. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/cbf6214/lodometal.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2004.

MENDES, A. M. S. et al. Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de nutrientes para milho: 1., micronutrientes. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006, Aracajú. **Anais...** Aracajú: UFS/SBCS, 2006. 1 CD-ROM.

NASCIMENTO, C.T.C.; FERREIRA, F.J.F.; ANDRADE, L.R.M.; GASPAR, J.C.; PIRES, A.C.B. Radiação gama e resistividade elétrica em solo com aplicação de carbonatito e fertilizantes agrícolas no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.26, p.21-29, 2008.

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

NIELSEN, F. H. Nickel. In: _____. **Biochemistry of the essential ultratrace elements**. New York: Plenum, 1984. p. 293-308.

NOGUEIRA, T.A.R. et al. Cádmio, cromo, chumbo e zinco em plantas de milho e em Latossolo após nove aplicações anuais de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2195-2207, 2008.

OLIVEIRA, C. et al. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto enriquecido com cádmio e zinco na cultura do arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** v.29, p.109-116, 2005.

OLIVEIRA, K.W.; MELO, W.J.; PEREIRA, G.T.; MELO, V.P. E MELO, G.M.P. Heavy metals in Oxisols amended with biosolids and cropped with maize in a long-term experiment. **Scientia Agricola**, v.62, p. 381-388, 2005.

OLIVEIRA, F. A.; CASTRO, C.; SALINET, L. H. Adubação potássica residual com rochas silicáticas para a cultura da soja. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 27., 2006, Bonito. **Anais...** Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste, 2006. (Documentos, 82). 1 CD-ROM.

PAIS, I.; JONES JUNIOR, J. B. **The handbook of trace elements**. Boca Raton: Saint Lucie, 1997. 223 p.

PIERZYNSKI, G. M.; SIMS, J. T.; VANCE, G. F. **Soils and environmental quality**. Boca Raton: Lewis, 1994. 313 p.

RAMALHO, J.F.G.P.; AMARAL SOBRINHO N.M.B. E VELLOSO, A.C.X. Contaminação da microbacia de caetés com metais pesados pelo uso de agroquímicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1289-1303, 1999.

RANGEL, O.J.P. Disponibilidade de Cu, Mn, Ni, Pb e Zn em latossolo cultivado com milho após a aplicação de lodo de esgoto. Dissertação de Mestrado. Lavras: Universidade Federal de Lavras. 88p, 2003.

RAWLINS, B. G. **Preliminary investigation of mining-related arsenic contamination in the provinces of Mendoza and San Juan (Argentina) and Minas Gerais (Brazil)**. London: British Geological Survey Technology Report, 1997. 27 p.

REIS, T.C. **Distribuição e biodisponibilidade do níquel aplicado ao solo como NiCl₂ e lodo de esgoto**. Tese de Doutorado. Piracicaba: Universidade de São Paulo/ Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2002. 118p.

RESENDE, A.V.; MACHADO, C.T.T.; MARTINS, E.S.; NASCIMENTO, M.T.; SILVA, L.C.R.; LINHARES, N.W. Rochas moídas como fonte de potássio para o milho em solo de Cerrado. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** 162. 20p, 2006c.

RESENDE, A.V.; MACHADO, C.T.T.; MARTINS, E.S.; SENA, M.C.; NASCIMENTO, M.T.; SILVA, L.C.R.; LINHARES, N.W. Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. **Espaço & Geografia**, v.9, p.135-161, 2006b.

RESENDE, A.V.; MARTINS, E.S.; SENA, M.C.; MACHADO, C.T.T.; KINPARA, D.I.; OLIVEIRA FILHO, E.C. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço & Geografia**, v.9, 17-40, 2006a.

REVOREDO, M.D.; MELO, W.J.; Disponibilidade de níquel em solo tratado com lodo de esgoto e cultivado com sorgo. **Bragantia**, v.65, p.679-685, 2006.

ROOVERS, H. O.A. CAMARGO, J.M.A.S. VALADARES. Níquel total e solúvel em DTPA em solos do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p.217-220, 1983.

SANTOS, E.J. & E. OLIVEIRA. Determination of mineral nutrients and toxic elements in Brazilian solúvel coffe by ICP-AES. **J. Food composition and Analisis**, v. 14, p. 523-531, 2001.

SHARPLEY, A.N.; MENZEL, R.G. The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment. **Advances in Agronomy**, v.41, p. 297-324, 1987.

SILVA, D. J. et al. Avaliação do potencial de rochas silicáticas no crescimento de culturas anuais no submédio São Francisco: 1., soja e milho. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 27., 2006, Bonito. **Anais...** Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste/SBCS, 2006a. (Documentos, 82). 1 CD-ROM.

SILVA, D. J. et al. Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de macronutrientes para soja. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006, Aracajú. **Anais...** Aracajú: UFS/SBCS, 2006b. 1 CD-ROM.

SILVA, M.L.S.; VITTI, G.C.; TREVIZAM, A.R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p. 527-535, 2007.

SIMS, J.T. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper and zinc. **Soil Science Society American Journal**, v.50, p.367-373, 1986.

SOUZA FILHO, L.F.S.; CRUZ, J.L.; SOUZA, L.F.S.; CALDAS, R.C.; MAGALHÃES, A.F.J.; CONCEIÇÃO, H.; SOUSA, J.S. Eficiência de um flogopitito como fonte de potássio para o desenvolvimento inicial do mamoeiro. **Espaço & Geografia**, v.9, p.215-229, 2006.

SOUZA, E.C.A.; FERREIRA, M.E. Micronutrientes no solo: zinco. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p.219-242.

SPARKS, D.L. **Environmental soil chemistry**. San Diego, Academic Press, 1995. 267p.

STUM, W & MORGAN, J.J. **Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters**. 3.ed. New York, John Wiley & Sons, 1996. 1022p.

TAN, X.W. H. IKEDA & M. ODA. 2000. Effects of nickel concentration in the nutrient solution in the nitrogen assimilation and growth of tomato seedlings in hydroponic cultures supplied with urea or nitrate as the sole nitrogen source. **Scientia Horticulturae**, v. 84, p.265-273.

THE FERTILIZER INSTITUTE. **Health evaluation of selected metals in inorganic fertilizers post application**. Washington: The Weinberg Group, 2000. 56 p.

THEODORO, S.H.A. **Fertilização da Terra pela Terra: Uma Alternativa de Sustentabilidade para o Pequeno Produtor Rural**. Tese de Doutorado. Brasília: Universidade de Brasília/Centro de Desenvolvimento Sustentável. 231 p. 2000.

THEODORO, S. C. H. **Rochas para plantas: o resgate de uma produção alimentar sadia**. São Paulo: SUFFIB, 2005. 1 CD-ROM.

THEODORO, S. H. et al. Stonemeal technology: changing the poverty scenario in Brazil. In: CONFERENCE ON ROCKS FOR CROPS, 2., 2008, Nairobi. **Proceedings...** Nairobi, 2008. 1 CD-ROM.

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

THEODORO, S.H., LEONARDO, O.H., ROCHA, E. L & REGO, K.G. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. **Revista Espaço & Geografia**, v.9, p. 263:292, 2007.

TROEH, Frederick; THOMPSON, Louis M. **Solos e Fertilidade do Solo**. Durval Dourado Neto e Manuella Nóbrega Dourado (Tradução). Ed. Andrei, São Paulo – SP, 2007, p. 19, 718p.

UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 3051**. Washington, 1998. Disponível em: <<http://www.epa.gov/SW-846/3051a.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2009.

VANGRONSVELD, J.; COLPAERT, J. V.; TICHELEN, K. K. van. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: physicochemical and biological evaluation of the durability of soil treatment and revegetation. **Environmental Pollution**, v. 94, p. 131-140, 1997.

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

VAN STRAATEN, P. **Agrogeology – The use of Rocks for Crops**. Universidade de Guelph. 2007. 440p.

WANG, P.; QU, E.; LI, Z.; SHUMAN, L.M. Fractions and availability of nickel in loessial soil amended with sewage sludge. **Journal of Environmental Quality**, v.26, p.795-801, 1997.

WANG, W.S.; SHAN, X.Q.; WEN, B. & ZHANG, S.Z. Relationship between the extractable metals from soils and metals taken up by maize roots and shoots. **Chemosphere**, v.53, p.523-530, 2003.

WELCH, R.M. Micronutrient nutrition of plants. **Critical Review in Plant Sciences** v.14, p.49-82, 1995.

WOOD, B. W.; REILLY, C. C.; NYCZEPIR, A. P. Field deficiency of nickel in trees: symptoms and causes. **Acta Horticulturae**, v. 721, p. 83-97, 2006.

ZEITTOUNI, C.F.; BERTON, R.S.; ABREU, C.A. de. Fitoextração de cádmio e zinco de um latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados. **Bragantia**. v. 66, p.649-653, 2009.

**CAPÍTULO 1: Caracterização e liberação de nutrientes de rochas silicáticas e suas
alterações nos atributos químicos do solo**

GUELFÍ-SILVA, D.R.G.; MARCHI, G.; SPEHAR, C. R.; SOARES, D.A.; GUILHERME,
L.R.G.; REIN, T.A

(Trabalho aceito para publicação na Revista Brasileira de Ciência do Solo, volume 36,
número 3, 2012).

CARACTERIZAÇÃO E LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES DE ROCHAS SILICÁTICAS E SUAS ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

RESUMO

O crescimento da agricultura brasileira tem gerado um aumento da importação de fertilizantes para atender a demanda por fontes de potássio, aumentando os preços no mercado interno. Esse fato tem contribuído para a viabilidade de utilização de fontes alternativas de nutrientes, como as rochas moídas. Porém, faz-se necessário conhecer o potencial de liberação dos nutrientes, bem como as alterações no solo causadas por esses materiais. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de rochas moídas na disponibilidade de nutrientes e sua ação sobre outros atributos químicos do solo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras com os seguintes tratamentos: brecha, ultramáfica, biotita xisto, subproduto de mineração, subproduto de chapada e flogopitito. Doses de 0 (controle), 200, 400 e 600 kg de K_2O ha^{-1} foram adicionadas a um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico e incubadas por 100 dias. Em seguida, foram determinados os valores de pH (água); Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos com KCl 1 mol L^{-1} ; potássio (K^+), fósforo (P) e sódio (Na^+) extraídos pelo Mehlich-1; níquel (Ni^{2+}), cobre (Cu^{2+}) e zinco (Zn^{2+}) extraídos com solução extratora DTPA; saturação por alumínio (m); saturação da CTC potencial por cálcio, magnésio, potássio e sódio e a saturação por bases (V). Os resultados mostraram que as rochas moídas afetaram a disponibilidade de nutrientes e outros atributos químicos do solo, aumentando a acidez do solo. Nas doses aplicadas, a ultramáfica e o subproduto de chapada foram as rochas que mais influenciaram o pH do solo, enquanto o subproduto de mineração

e a ultramáfica as rochas que disponibilizaram mais potássio. Maior disponibilidade de Zn e Cu ocorreu com a aplicação do subproduto de chapada e mineração.

Palavras-chave: correção do solo, disponibilidade de nutrientes, fertilizante multinutriente, pó de rocha, rocha potássica.

**CHARACTERIZATION OF SILICATE ROCKS AND RESPECTIVE EFFECTS ON
SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES BY EXTRACTANTS IN GREENHOUSE
INCUBATION**

ABSTRACT

The expansion of Brazilian agriculture has increased the dependence on imported fertilizers to supply the growing demand for potassium sources and increased intern market prices. This fact has contributed to turn viable the utilization of alternative nutrient sources, such as ground rocks. It is necessary, however, to know the potential of nutrient release and what kind of changes these materials might cause in soils. This study aimed to evaluate ground rock application on nutrient availability and on other soil chemical attributes. The experiment was conducted in a greenhouse, at Soil Science Department of the Federal University of Lavras, with the following alternative fertilizers treatments: breccia, biotite schist, ultramafic, two mining rejects and flogopitite. Doses of 0 (control), 200, 400, and 600 kg K₂O ha⁻¹ were added to a dystrophic Red-Yellow Latosol (Oxisol) and incubated for 100 days. Soil was evaluated for pH (water); Ca²⁺ and Mg²⁺, extracted with KCl mol L⁻¹; K, P and Na extracted by Mehlich-1; Ni²⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺ extracted with DTPA; aluminum saturation; calcium, magnesium, potassium, and sodium saturation of CEC and the base saturation rate. Alternative rock fertilizers affected nutrient availability and other soil chemical attributes, promoting changes in soil acidity. Ultramafic and mining rejects (Chapada byproducts) were the silicate rocks that most influenced the soil pH, while another, mining byproduct, and ultramafic have provided high levels of potassium. Highest availability of Zn and Cu in soil occurred after the two mining rejects application.

Key-words: multi-nutrient fertilizer, nutrient availability, potassic rock, rock powder, soil amelioration.

INTRODUÇÃO

O Brasil produz cerca de 8% dos sais de potássio necessários para suprir a demanda interna por fertilizantes (OLIVEIRA, 2008). O restante é importado de países como Canadá, Rússia, Bielorrússia e Alemanha, gerando forte dependência internacional.

Na sua maior parte, os fertilizantes potássicos utilizados atualmente refletem a rápida e efetiva resposta ao aumento da produtividade na agricultura. Entretanto, nos países em desenvolvimento o custo dos fertilizantes, defensivos agrícolas e sementes são fatores limitantes ou impeditivos para a sua utilização.

Neste contexto, a rochagem pode contribuir para a redução da dependência externa para a utilização de fertilizantes minerais economicamente viáveis dentro de determinadas distâncias a partir de seu ponto de produção. A técnica consiste na aplicação de rochas moídas *in natura* ao solo, contendo quantidades variáveis de diversos nutrientes, de uma para outra, que proporcionam melhoria da fertilidade do solo em médio e longo prazo, dependendo de sua solubilidade e reação com o solo. De modo geral, as rochas ou seus subprodutos são fontes naturais de fósforo, potássio, cálcio e magnésio, além de outros micronutrientes indispensáveis a nutrição das plantas (LEONARDOS et al., 1991, 1999 e 2000; THEODORO & LEONARDOS 2006; FYFE, LEONARDOS & THEODORO 2006).

Rochas moídas como a brecha, flogopitito, ultramáfica, biotita, subproduto de chapada, dentre outras, foram selecionadas por sua solubilidade e teores baixos de metais

pesados, e quando aplicadas ao solo fornecem, principalmente, o K (Resende et al., 2006a). Entretanto, esses fertilizantes alternativos levam ao solo além dos nutrientes desejados, outros elementos químicos, como o sódio. Além disso, reagem com o solo promovendo alterações em seu pH (MOREIRA, 2006).

Outros estudos conduzidos com rochas moídas como o basalto moído (basalto microcristalino e olivina-basalto), carbonatito, brecha piroclástica, biotita xisto e ultramáfica alcalina, também têm evidenciado elevações dos teores de K no solo (ESCOSTEGUY, 1998; ANDRADE et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2006).

Dentre os fatores que interferem na solubilidade das rochas, e disponibilidade de seus nutrientes para as plantas, destacam-se a origem e composição da rocha, granulometria, tratamento químico ou térmico prévio, características do solo, tempo de incubação, e espécies de plantas utilizadas.

Diante da escassez de informação e metodologias para se compararem subprodutos em geral, quanto a sua solubilidade, reação com o solo e disponibilidade de nutrientes para as plantas, existe a necessidade de mais estudos sobre o uso de rochas moídas utilizadas como fertilizantes alternativos na agricultura. Este trabalho objetivou avaliar o efeito da aplicação de seis rochas moídas em três doses baseadas em potássio, na disponibilidade de nutrientes e sobre outros atributos químicos do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico com textura média foram coletadas em Itutinga, MG, sob vegetação natural, na profundidade de 0 a 20 cm. O solo apresentou as seguintes características físicas e químicas (EMBRAPA, 1999): pH (água) =

4,9; M.O = 0,8 dag kg⁻¹; K = 22 mg dm⁻³; S = 5,4 mg dm⁻³; P_(Mehlich1) = 0,9 mg dm⁻³; Ca = 0,1 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,1 cmol_c dm⁻³; Al = 0,1 cmol_c dm⁻³; H+Al = 1,7 cmol_c dm⁻³; SB = 0,3 cmol_c dm⁻³; t = 0,4 cmol_c dm⁻³; T = 2,0 cmol_c dm⁻³; Fe = 27,4 mg dm⁻³; Zn = 0,6 mg dm⁻³; Cu = 0,4 mg dm⁻³; B = 0,0 mg dm⁻³; Mn = 0,4 mg dm⁻³; Areia = 600 g kg⁻¹; Silte = 170 g kg⁻¹; Argila = 230 g kg⁻¹.

O solo foi acondicionado em vasos na quantidade de 3,7 kg para a realização do experimento em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo (DCS) da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 3x6+1, com quatro repetições, sendo três tratamentos relativos às doses de potássio (0-controle; 200, 400, 600 kg K₂O ha⁻¹) e seis representados pelos fertilizantes alternativos (Brecha, Ultramáfica, Biotita, Subproduto de Mineração, Subproduto de Chapada e Flogopitito). As rochas silicáticas moídas e os subprodutos utilizados nesse estudo tem origem de diversos processos e regiões do país que são apresentados a seguir:

1) Brecha vulcânica alcalina (afloramento de rocha em Santo Antônio da Barra, GO), - Rocha formada em condutos vulcânicos. Composta por feldspatóides, zeólitas e vidro vulcânico. Esta rocha é a única delas que não é proveniente de um processo de mineração.

2) Ultramáfica alcalina (pedreira de Lages, SC) - Rocha formada por uma intrusão ígnea. Composta por minerais ferromagnesianos (olivina, piroxênio e flogopita), plagioclásios e carbonatos. Coletada em uma antiga pedreira destinada à produção de material de construção.

3) Biotita xisto (Subproduto de mineração de Chapada - SBC, Novorizonte, GO) - Rocha formada por processos hidrotermais de alteração de rochas graníticas e que geraram minério de cobre e ouro. Composta por biotita e muscovita, tendo como acessórios quartzo e carbonatos. Este material é proveniente de processo de moagem e flotação, onde não foi envolvido processos de transformação química da rocha.

4) Biotita xisto (rejeito de esmeralda de Nova Era e Itabira, MG) - Rocha formada por processos hidrotermais da passagem de fluidos de composição granítica sobre rochas ultramáficas, que gerou a esmeralda. Composta por biotita e quartzo. Este material está acumulado em rejeitos de garimpo de esmeralda;

5) Flogopita xisto (flogopitito, rejeito de esmeralda de Campo Formoso, BA) - Rocha formada por processos hidrotermais da passagem de fluidos de composição granítica sobre rochas ultramáficas, que gerou a esmeralda. Composta por flogopita e serpentina. Este material está acumulado em rejeitos de garimpo de esmeralda;

6) SBM (Subproduto de mineração de manganês - SBM, Belo Horizonte, MG) – Resíduo de processo metalúrgico de manganês. No processamento, o potássio é separado do minério e concentrado no resíduo.

As quantidades de rochas moídas a serem aplicadas foram definidas com base na concentração de óxido de potássio (Tabela 17).

Tabela 17. Teores totais de K₂O, Na₂O, P₂O₅, CaO, MgO, Cu, Zn e Ni nas rochas moídas⁽¹⁾.

Rochas	K ₂ O ⁽²⁾	Na ₂ O ⁽²⁾	P ₂ O ₅ ⁽²⁾	CaO ⁽²⁾	MgO ⁽²⁾	Cu ⁽³⁾	Zn ⁽³⁾	Ni ⁽³⁾
	----- % -----					----- mg kg ⁻¹ -----		
Brecha	2,18	0,31	0,94	9,03	7,09	59,9	128,7	73,9
Ultramáfica	3,10	1,71	1,22	13	18,50	87,4	113,1	651,9
SBC ⁽⁴⁾	3,39	1,62	0,19	3,19	3,88	437,5	123,0	2,8
SBM ⁽⁵⁾	11,80	0,72	0,42	3,58	0,70	816,8	28.184,2	380,3
Biotita xisto	2,07	0,86	0,06	5,27	13,8	9,9	290,5	146,4
Flogopitito	7,71	0,16	0,2	0,98	22,89	9,1	902,7	1425,2

⁽¹⁾Rochas moídas a 0,3 mm para esta análise. ⁽²⁾Métodos 4A; 4B do laboratório Acmelabs (Canadá) que tem com princípio a fusão da amostra em metaborato/tetraborato de lítio. ⁽³⁾Método 3052. ⁽⁴⁾Subproduto de chapada. ⁽⁵⁾Subproduto de mineração.

As quantidades em toneladas por hectare correspondentes as doses de 200, 400 e 600 kg de K₂O ha⁻¹ foram, respectivamente: Brecha (13,64; 27,28; 40,92 t de rocha ha⁻¹), Ultramáfica (9,59; 19,18; 28,77 t de rocha ha⁻¹), Subproduto de chapada (8,77; 17,54; 26,31 t de rocha ha⁻¹), subproduto de mineração (2,52; 5,04; 7,56 t de rocha ha⁻¹), biotita xisto (14,36; 28,72; 43,08 t de rocha ha⁻¹) e flogopitito (3,86; 7,72; 11,58 t de rocha ha⁻¹).

A umidade do solo foi mantida através de pesagens diárias dos vasos, amostrando-se aleatoriamente um vaso de cada tratamento, definindo-se a partir daí as quantidades de água em base de peso, a serem repostas por regas realizadas na superfície dos vasos. Esse controle da umidade foi realizado baseando-se na manutenção de água em 60% do volume total de poros (VTP). As rochas foram adicionadas em sua granulometria original (Tabela 18), da forma que foram obtidas e que serão, provavelmente, utilizadas no campo, sem mais gastos energéticos de moagem que possam aumentar seu custo.

Tabela 18. Caracterização das frações granulométricas das rochas moídas.

Rochas	Distribuição das partículas das rochas por tamanho				
	1 mm	0,42 mm	0,250 mm	0,125mm	< 0,125mm
-----%-----					
Biotita	9,88	30,14	25,02	23,36	11,60
Flogopitito	11,55	27,43	35,76	13,62	11,64
SBM	26,58	28,34	8,60	32,42	4,06
Brecha	32,85	31,69	9,28	22,01	4,17
Ultramáfica	22,14	20,84	14,29	22,29	20,44
SBC	21,13	23,75	13,85	22,64	18,63

Além do K, as fontes utilizadas nesse estudo também são fornecedoras de micronutrientes que foram adicionados em quantidades variadas nos diferentes tratamentos (Tabela 19). O valor de pH em água das rochas demonstra que esses materiais podem elevar o pH dos solos (Tabela 20).

Tabela 19. Quantidade total adicionada aos tratamentos das rochas e de micronutrientes (mg vaso⁻¹) aplicados nos tratamentos.

Rochas	Dose 200 kg de K ₂ Oha ⁻¹				Dose 400 kg de K ₂ Oha ⁻¹				Dose 600 kg de K ₂ Oha ⁻¹			
	Total de				Total de				Total de			
	rocha	Ni	Cu	Zn	rocha	Ni	Cu	Zn	rocha	Ni	Cu	Zn
aplicado												
-----mg vaso ⁻¹ -----												
Brecha	20,45	1,51	1,22	2,63	40,91	3,02	2,44	5,26	61,36	4,53	3,66	7,89
Ultramáfica	14,38	9,37	1,26	1,63	28,77	18,74	2,52	3,26	43,15	28,11	3,78	4,89
SBC ⁽¹⁾	13,15	0,04	5,75	1,61	26,31	0,08	11,5	3,22	39,46	0,12	17,25	4,83
SBM ⁽²⁾	3,78	1,44	3,09	106,53	7,56	2,88	6,18	213,06	11,34	4,32	9,27	319,59
Biotita	24,54	3,59	0,24	7,13	43,08	7,18	0,48	14,26	64,62	10,77	0,72	21,39
Flogopitito	5,78	8,24	0,005	5,22	11,56	16,48	0,01	10,44	17,34	24,72	0,015	15,66

⁽¹⁾Subproduto de chapada. ⁽²⁾Subproduto de mineração.

Tabela 20. Valores de pH em água das rochas⁽¹⁾, percentagem de CaO, MgO solúveis, poder de neutralização (PN), reatividade (RE), percentagem de cálcio, magnésio e poder relativo de neutralização total (PRNT) das rochas utilizadas no estudo⁽²⁾.

Rochas	pH água	CaO	MgO	PN	RE	PRNT ⁽³⁾	Ca Mg	
							-----%-----	
Biotita	8,2	0,07	1,45	1,65	68,40	1,13	0,05	0,84
Flogopitito	8,5	0,13	0,57	0,45	82,32	0,37	0,09	0,34
SBM	10,8	2,73	0,55	11,29	87,92	9,92	1,95	0,33
Brecha	8,3	2,23	1,34	4,78	71,20	3,41	1,59	0,80
Ultramáfica	9,4	10,84	8,95	39,47	71,24	28,12	7,74	5,39
SBC	7,6	2,07	1,62	5,99	98,32	5,89	1,48	0,97

⁽¹⁾Moreira (2006); ⁽²⁾Brasil (2007); ⁽³⁾PRNT = PN (%) x RE (%) / 100.

O solo utilizado no estudo e as rochas foram analisados em difratômetro de raios-X (DRX), dotado de goniômetro vertical e geometria θ para determinação da fração mineralógica. Para isso, foi utilizada uma variação angular de 2-100° (2 θ), radiação de CuK α ($\lambda = 1.5450$) e velocidade de exposição de 1°2 θ min⁻¹.

As unidades experimentais foram compostas por vasos plásticos com 3,7 kg de solo misturado às rochas moídas que permaneceram incubadas por um período de 100 dias.

A umidade do solo incubado com as rochas silicáticas moídas foi mantida através de pesagens diárias dos vasos, amostrando-se aleatoriamente um vaso de cada tratamento, definindo-se a partir daí as quantidades de água em base de peso, a serem repostas por regas realizadas na superfície dos vasos. Esse controle da umidade foi realizado baseando-se na manutenção de água em 60% do volume total de poros (VTP).

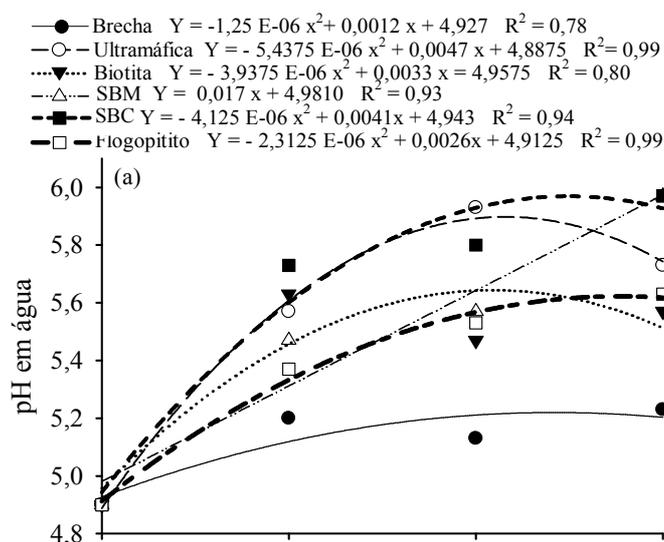
Após esse período, foram coletadas amostras na camada de 0-15 cm para análise dos seguintes atributos químicos do solo: pH (água); Ca e Mg extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; K, P e Na extraídos pelo Mehlich 1; Ni, Cu e Zn extraídos com a solução extratora DTPA.

Também foram calculadas: a saturação por alumínio (m), saturação por cálcio, magnésio, potássio, sódio da CTC potencial e a saturação por bases (V) do solo.

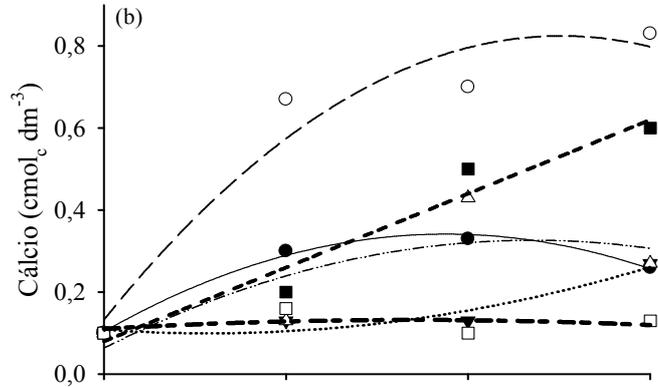
Os dados foram submetidos à análise de variância e, sendo detectadas diferenças, aplicou-se o teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade, por meio do software SISVAR 4.3[®] (FERREIRA, 2003) para as comparações entre médias e, para os efeitos de doses e rochas e sua interação, aplicaram-se análises de regressão, sendo os modelos matemáticos escolhidos segundo as equações com melhores ajustes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

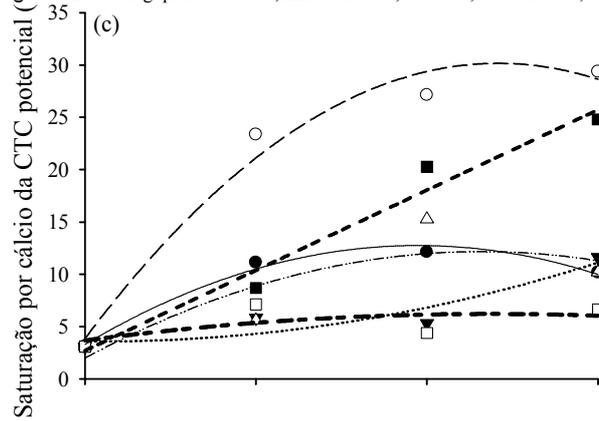
As doses de potássio, os tipos de rochas moídas e a interação entre esses fatores influenciaram significativamente ($p < 0,05$) a disponibilidade de nutrientes e outros atributos químicos do solo (Figura 1).



- Brecha $Y = -1,6875 \text{ E-}06 x^2 + 0,0013 x + 0,1035 \text{ R}^2 = 0,99$
- Ultramáfica $Y = -2,75 \text{ E-}06 x^2 + 0,0028x + 0,1320 \text{ R}^2 = 0,99$
- ▼ Biotita $Y = 6,87 \text{ E-}07 x^2 - 0,002 x + 0,1085 \text{ R}^2 = 0,91$
- △ SPM $Y = 1,1875 \text{ E-}06 x^2 + 0,0011 + 0,0635 \text{ R}^2 = 0,61$
- SBC $Y = 0,009 x + 0,08 \text{ R}^2 = 0,95$
- Flogopitito $Y = 1,1875 \text{ E-}07 x^2 + 0,0001 x + 0,1105 \text{ R}^2 = 0,10$



- Brecha $Y = -6,225 \text{ E-}05 x^2 + 0,04885 x + 3,3050 \text{ R}^2 = 0,98$
- Ultramáfica $Y = -0,0001 x^2 + 0,1089 x + 3,8495 \text{ R}^2 = 0,97$
- ▼ Biotita $Y = -2,231 \text{ E-}05 x^2 - 0,0008 x + 3,6015 \text{ R}^2 = 0,61$
- △ SBM $Y = -4,731 \text{ E-}05 x^2 + 0,0439 x + 2,0045 \text{ R}^2 = 0,72$
- SBC $Y = 0,0383 x + 2,7170 \text{ R}^2 = 0,95$
- Flogopitito $Y = -1,12 \text{ E-}05 x^2 + 0,0107 + 3,6860 \text{ R}^2 = 0,36$



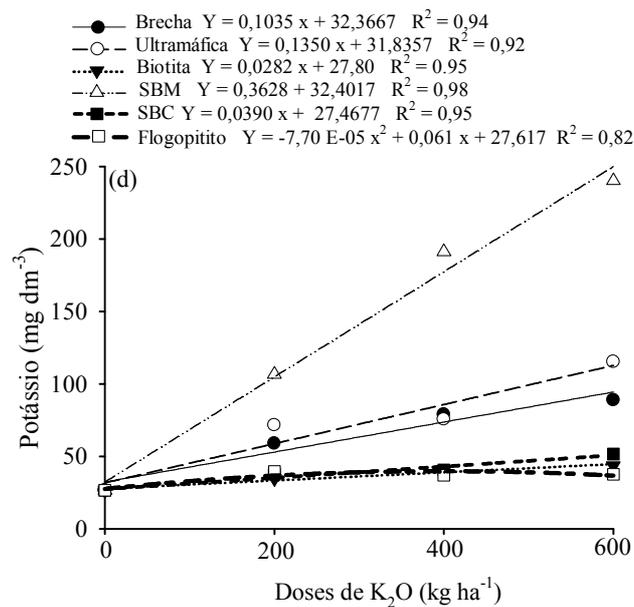


Figura 1. Valores de pH do solo (a), disponibilidade de cálcio (b), saturação por cálcio (c), disponibilidade de potássio (d) no solo fertilizado com brecha, ultramáfica, biotita, subproduto de mineração (SBM), subproduto de chapada (SBC) e flogopitito.

De maneira geral, a elevação dos valores de pH foi proporcional às doses aplicadas, sendo este efeito também relacionado com o tipo de rocha. Dentre todas as rochas moídas aplicadas, a ultramáfica e os subprodutos de mineração e chapada foram aquelas que promoveram maiores elevações no pH do solo.

RIBEIRO et al., (2010) em estudos conduzidos em casa de vegetação com brecha (coletada em Goiás), ultramáfica (Santa Catarina) e flogopitito (Bahia) todas com partículas menores que 0,3 mm, relataram resultados semelhantes ao desse estudo no que se refere às variações de pH do solo. Enquanto que, MACHADO et al., 2005, observaram que, dentre os atributos químicos de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso localizado na região do

Cerrado Brasileiro o pH e a acidez potencial foram afetados pelas rochas brecha, ultramáfica e biotita xisto.

As variações do pH no solo fertilizado com as rochas moídas também podem ser explicadas pelos diferentes valores do poder relativo de neutralização total, PRNT (Tabela 20). No caso da brecha, biotita e flogopitito, os valores de PRNT são muito baixos, o que reflete em menor efeito nas alterações de pH. É importante ressaltar que nenhum desses materiais tem especificações ou garantia mínima necessária para serem comercializados como corretivos da acidez (PN mínimo = 67%; Soma da porcentagem de óxido de cálcio (% CaO) e magnésio (% MgO) mínima = 38%; e PRNT mínimo = 45%) (Instrução Normativa 35, Mapa 2006).

Comportamento semelhante ao do pH ocorreu para a disponibilidade de cálcio (Figura 1b) e para a saturação por cálcio (Figura 1c). O teor de cálcio no solo encontrava-se na classe de disponibilidade “muito baixo” ($0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; CFSEMG 1999) antes da aplicação das rochas moídas e, após a incubação de 100 dias, apenas o solo tratado com a rocha ultramáfica passou para a classe de disponibilidade “baixo”. Em relação à saturação da CTC do solo por cálcio, o ideal é que permaneça no intervalo de 40 a 60% (LOPES, 1992). Nenhum dos tratamentos elevou esse atributo químico para a faixa ideal. Isso demonstra que as rochas moídas estudadas, nas variadas doses de rochas aplicadas (t ha^{-1}), para suprir o potássio, promovem a liberação de cálcio para o solo, bem como a correção de sua acidez.

Essas alterações nos teores de cálcio ocorreram devido a liberação desse nutriente de minerais como piroxênios e feldspatos presentes em algumas dessas rochas moídas (Figura 2). Os piroxênios são alterados no solo e, posteriormente, liberam cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e Fe^{2+} . Já os feldspatos, que podem ser potássicos (KAlSi_3O_8) ou calcosódicos

($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ e $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), quando sofrem alguma alteração no solo liberam K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (CURI, 2007; MEURER, 2006) promovem o aumento da disponibilidade desses elementos no solo.

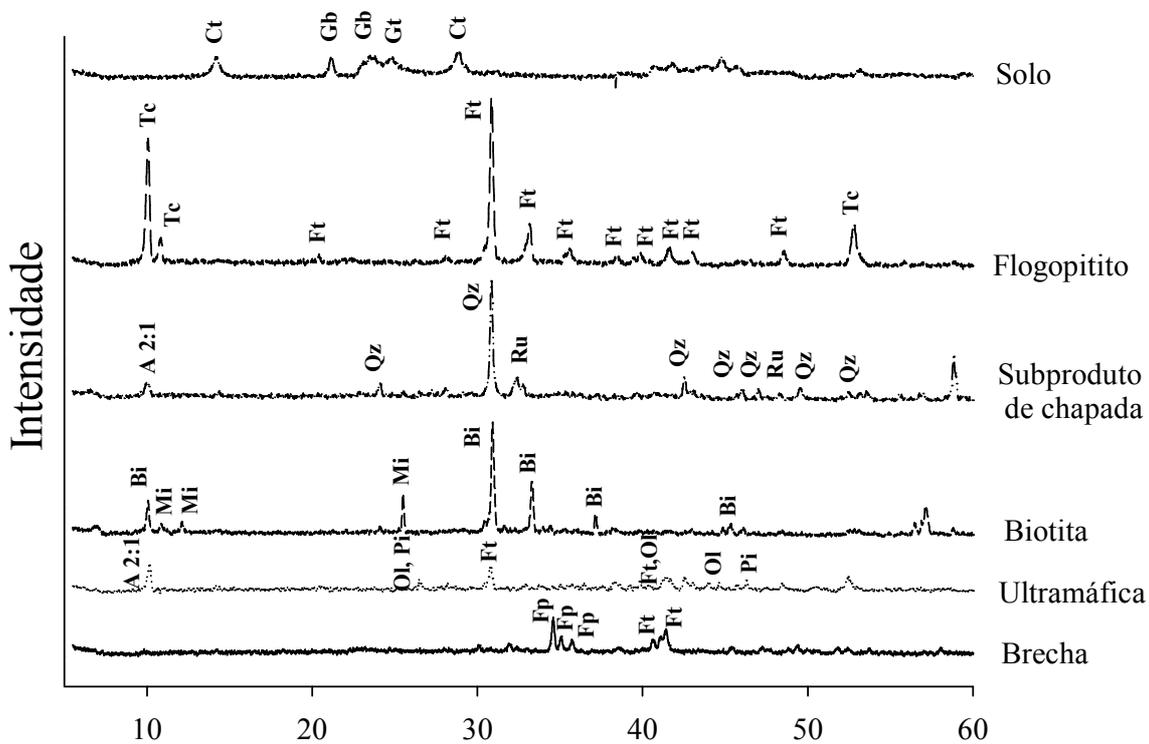


Figura 2. Difratoograma de raios X do solo e das rochas moídas utilizadas como fertilizantes alternativos. Ct: Caulinita; Gb: Gibsita; Gt: Goethita; Tc: Talco; Ft: Flogopita; A 2:1: Argilomineral 2:1; Qz: Quartzo; Ru: Rutilo; Bi: biotita; Mi: Mica; Ol: Olivina; Pi: Piroxênio; Fp: Feldspato.

Os resultados da difratometria de raios-X (Figura 2) mostraram a presença dos minerais flogopita ($\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$) e talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) no flogopitito. A flogopita é um mineral que pertence ao grupo das micas, filossilicato 2:1 (tetraedro-octaedro-tetraedro) com uma intercamada de cátions não hidratados equilibrando a alta carga negativa permanente (DEER et al., 1962).

No subproduto de chapada foi observada a ocorrência de argilo minerais 2:1, quartzo (SiO_2) e rutilo (TiO_2). Já na biotita foi identificada a presença de minerais silicatados do grupo dos filossilicatos dentre essas biotita e micas. A presença desses minerais nessas rochas é um indicativo da possível liberação de K^+ e Mg^{2+} da rocha para o solo.

No caso do subproduto de mineração, também avaliado neste trabalho, o resultado de sua difratometria de raios-X não foi inserido na figura 2. O motivo foi a ocorrência de uma elevação no background (ruído) indicando a presença de materiais de menor grau de cristalinidade o que impossibilitou a identificação dos minerais presentes no subproduto de mineração.

Os principais minerais presentes na rocha ultramáfica foram argilo minerais do tipo 2:1, olivina ($\text{Mg,Fe}_2\text{SiO}_4$) que é um mineral do grupo dos neossilicatos comum em rochas ígneas e metamórficas, piroxênios que são minerais do grupo dos inossilicatos de cadeia simples e feldspatos.

A mineralogia das rochas moídas utilizadas como fertilizantes alternativos é diversificada o que demonstra um potencial diferente de liberação de nutrientes de cada uma das rochas para o solo. Os teores de K^+ no solo aumentaram após 100 dias da aplicação das rochas moídas no solo (Figura 1d). A liberação de K^+ da rocha para o solo aumentou com o incremento nas doses de rochas moídas aplicadas.

As rochas moídas que liberaram mais potássio, em ordem decrescente, foram as seguintes: subproduto de mineração > ultramáfica > brecha > subproduto de chapada > biotita > flogopitito.

Antes da aplicação das rochas moídas, a disponibilidade de K^+ no solo (22 mg dm^{-3}) estava na classe “baixa” ($16 - 40 \text{ mg dm}^{-3}$); (CFSEMG 1999). Após 100 dias da aplicação e incubação rochas moídas no solo, o teor de K^+ passou para a classes “médio” ($41 - 70 \text{ mg dm}^{-3}$) ou “bom” ($71 - 120 \text{ mg dm}^{-3}$) em todos tratamentos, as exceções foram o flogopitito ($39,7 \text{ mg dm}^{-3}$), subproduto de chapada ($37,7 \text{ mg dm}^{-3}$) na dose de $200 \text{ kg de K}_2\text{O}$ e biotita nas doses de 200 ($34,7 \text{ mg dm}^{-3}$) e $400 \text{ kg de K}_2\text{O}$ (40 mg dm^{-3}), que mesmo após a incubação mantiveram o K^+ classe de disponibilidade “baixa”. Para o subproduto de mineração nas doses de 400 (191 mg dm^{-3}) e $600 \text{ kg de K}_2\text{O}$ (240 mg dm^{-3}), a classe de disponibilidade mudou para “muito bom” ($> 120 \text{ mg dm}^{-3}$).

Os tipos de minerais, o arranjo do K^+ na estrutura mineralógica das rochas e a granulometria (100% de granulometria menor que $0,150 \text{ mm}$ e 45% menor que $0,075 \text{ mm}$ garantindo uma reatividade 100%) desses materiais podem interferir na liberação do K^+ presente nas rochas (MOREIRA, 2006).

Os principais minerais encontrados nas rochas moídas que tem potencial para liberação de potássio foram flogopita (Flogopitito); micas e biotita (Biotita); feldspatos (Ultramáfica), feldspatos e flogopita (Brecha) (Figura 2).

Com exceção do subproduto de mineração as rochas que liberam mais K^+ foram a ultramáfica e brecha que tem feldspatos em sua mineralogia. O K^+ desses minerais não é prontamente disponível devido a ligação forte que este elemento tem com os tetraedros de SiO_4 e AlO_4 que compensa a deficiência de cargas da estrutura do mineral.

Para que ocorra a liberação do K^+ presente na estrutura do mineral para o solo deve ocorrer uma reação de troca entre cátions em meio ácido da seguinte maneira: $KAlSi_3O_8 + H^+ \rightarrow HAlSiO_8 + K^+$ (CURI, 2005).

Na brecha foram encontrados na fase mineral a flogopita e feldspatos. Os feldspatos são do grupo dos tectosilicatos e são muito importantes em termos de liberação de nutrientes, pois quando são alterados fornecem K^+ e Ca^{2+} , Na^+ e Fe^{2+} (CURI, 2007; MEURER, 2006).

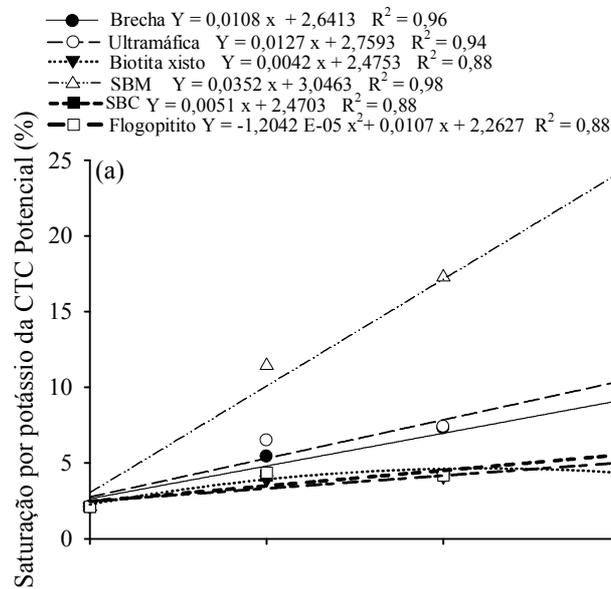
No caso da biotita e flogopita os principais minerais fornecedores de potássio são do grupo das micas, biotita e flogopita (micas escuras). As micas possuem estrutura em camadas (2:1) compostas por lâminas tetraedrais e octaedrais e o K^+ ocupa o espaço entrecamada ficando ligado fortemente às moléculas de oxigênio do tetraedro. Dessa forma, essa ligação que é muito forte impede a expansão das camadas ocasionando baixa liberação do K^+ do mineral para o solo. Parte da liberação de K^+ da biotita e da flogopita que possuem lâminas trioctaedrais é explicada em função da composição das lâminas octaedrais desses minerais (CURI, 2005).

Nas micas trioctaedrais o comprimento da ligação K-O é maior (0,3 nm) do que nas dioctaedrais (0,285 nm) o que faz com que micas trioctaedrais tenham ligação K-O mais fraca. Além disso, nas micas dioctaedrais existe uma força de repulsão ocasionada pelos íons Al^{3+} octaedrais sobre o íon H^+ da oxidrila que desvia o H em direção ao octaedro vago distanciando ainda mais o K (BROWN et al., 1978). Dessa forma, a proximidade entre íons H^+ e os íons de K^+ nas micas trioctaedrais proporciona repulsão e ligação mais fraca do K quando comparados a micas dioctaedrais (CURI, 2005).

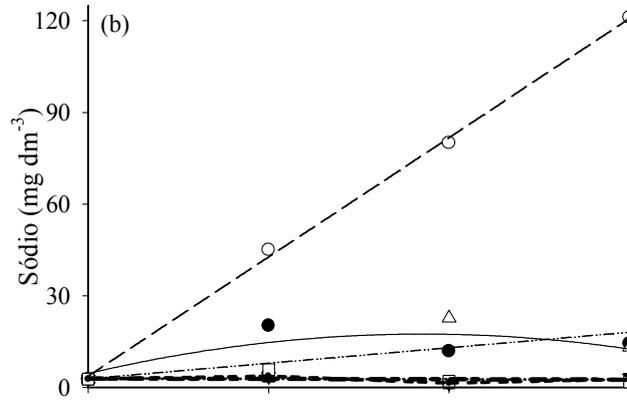
A saturação por potássio da CTC potencial (T) variou entre 3,9 e 23,7% (Figura 3a). O valor considerado ideal para essa característica é de 2 a 5% (LOPES, 1992), de acordo

com a exigência da cultura. No caso do subproduto de mineração e da ultramáfica na dose de 600 kg de K₂O, os valores ficaram bem acima do intervalo considerado ideal.

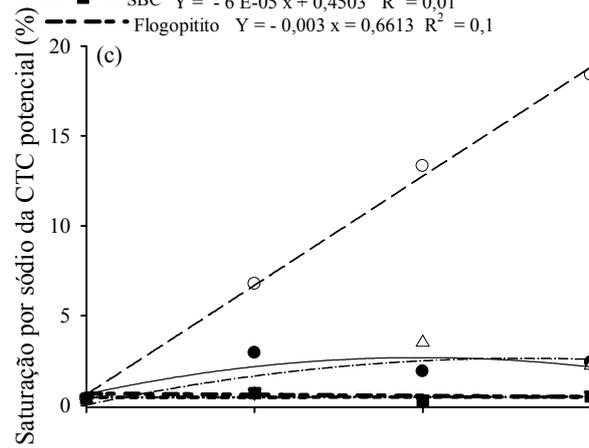
A ultramáfica também aumentou significativamente os teores de Na⁺ no solo, atingindo o valor máximo de 121,13 mg dm⁻³, seguida da brecha e do subproduto de mineração que atingiram valores de 20,23 e 13,20 mg dm⁻³, respectivamente (Figuras 3b e 3c). O teor elevado de Na⁺ de alguns tratamentos refletiu no aumento da porcentagem de saturação da CTC por sódio que atingiu valor máximo de 18,4% com a aplicação da ultramáfica, tendo como base a dose de 600 kg de K₂O ha⁻¹.



- Brecha $Y = -9,35 \text{ E-}05 x^2 + 0,0695 x + 4,5951 \quad R^2 = 0,57$
- Ultramáfica $Y = 0,195 x + 3,7377 \quad R^2 = 0,99$
- ▼ Biotita $Y = -0,0006 x + 2,9467 \quad R^2 = 0,02$
- △ SBM $Y = -6,2958 \text{ E-}05 x^2 + 0,0631 x + 0,3933 \quad R^2 = 0,58$
- SBC $Y = -0,0011 x + 3,0147 \quad R^2 = 0,10$
- Flogopitito $Y = -0,0006 x + 2,9467 \quad R^2 = 0,03$



- Brecha $Y = -1,2854 \text{ E-}05 x^2 + 0,0102 x + 0,6292 \quad R^2 = 0,64$
- Ultramáfica $Y = 0,0303 x + 0,6223 \quad R^2 = 0,99$
- ▼ Biotita $Y = -6 \text{ E-}05 x + 0,4503 \quad R^2 = 0,01$
- △ SBM $Y = -9,5417 \text{ E-}06 x^2 + 0,0099 x + 0,0357 \quad R^2 = 0,64$
- SBC $Y = -6 \text{ E-}05 x + 0,4503 \quad R^2 = 0,01$
- Flogopitito $Y = -0,003 x + 0,6613 \quad R^2 = 0,1$



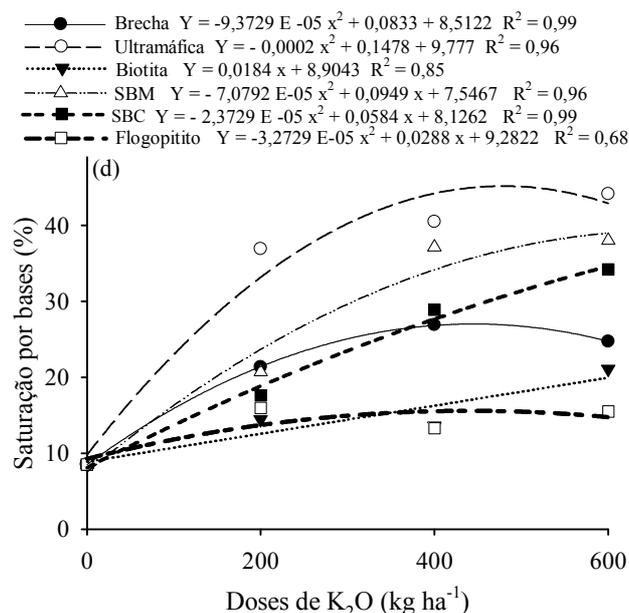


Figura 3. Valores de saturação por potássio (a), disponibilidade de sódio (b), saturação por sódio (c) e saturação por bases (d) no solo fertilizado com brecha, ultramáfica, biotita, subproduto de mineração (SBM), subproduto de chapada (SBC) e flogopitito.

Os altos teores de Na^+ ocasionados com a aplicação da rocha ultramáfica e da brecha são explicados pela liberação desse elemento presente em minerais que estão na composição dessas rochas, alguns dos feldspatos presentes provavelmente são tipo plágiossios (NaAlSiO_3) e tem na sua composição o Na^+ que é liberado para o solo (MEURER, 2006) elevando os teores de Na^+ no solo fertilizado.

De acordo com RICHARDS (1954), um valor de saturação da CTC (T) por Na^+ igual ou superior a 15% afeta algumas propriedades físicas do solo, dentre elas a condutividade hidráulica. Isso ocorre porque o Na^+ é um cátion que provoca o aumento da dupla camada difusa, o que promove a dispersão dos colóides que passam a se movimentar no perfil do solo. Posteriormente, esses colóides dispersos e em movimentação podem obstruir os poros do solo, fato que interfere na condutividade hidráulica, infiltração e

aeração e, conseqüentemente, na fertilidade desses solos. Por conseguinte, a aplicação de materiais de rocha aos solos deve levar em consideração o teor de Na^+ solúvel dos materiais para sua utilização agrícola.

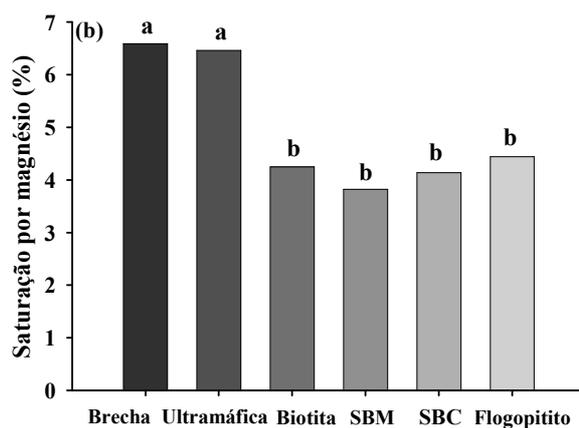
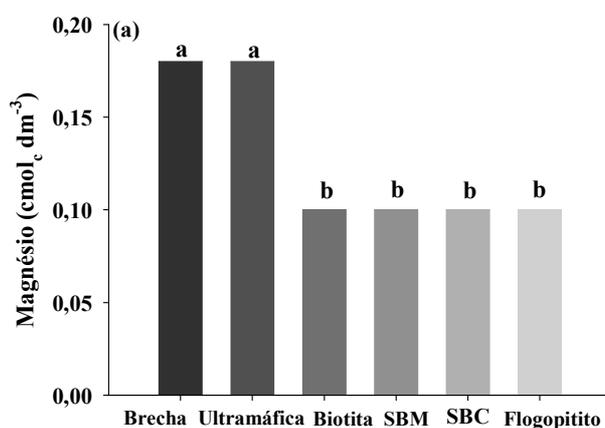
As alterações causadas pela aplicação de diferentes doses de rochas moídas na disponibilidade de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ refletiram em aumento da saturação por bases do solo (Figura 3d). A saturação por bases aumentou com o incremento nas doses de rochas aplicadas, com exceção do tratamento com o flogopitito. Os maiores valores de saturação por bases ocorreram com a aplicação da ultramáfica, subproduto de mineração e chapada, confirmando o relativo poder corretivo dessas rochas (Tabela 20).

Para os teores e saturação por magnésio no solo houve efeito significativo apenas para o efeito de fontes. As doses de rochas moídas influenciaram o teor de magnésio e a saturação da CTC por magnésio (Figuras 4a, 4b). O teor de Mg (Figura 4a) e a saturação por Mg (Figura 4b) foram mais elevados com a aplicação da brecha e ultramáfica que as outras rochas. Antes da aplicação das rochas o teor de Mg ($0,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) no solo estava na classe “muito baixo” (CFSEMG 1999); após adição das rochas brecha e ultramáfica a classe de disponibilidade mudou para “baixo” ($0,18 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Em relação à saturação da CTC por Mg, que inicialmente era igual a 5%, o ideal é que os valores se fiquem na faixa entre 10-20% (Lopes, 1989), porém, nenhuma das rochas elevou esse atributo para esse intervalo. O máximo valor foi de 6,59% de saturação da CTC por Mg com a aplicação da brecha.

Em estudos que avaliaram diferentes doses de basalto moído e olivina cristalina (0, 2,5, 5, 12,5, 25 e 50 g de rocha kg^{-1} , o que corresponde aproximadamente a 0, 5, 10, 25, 50 e 100 t rocha ha^{-1}); (granulometria das rochas $< 0,074 \text{ mm}$), como fonte de nutrientes em dois tipos de solo e em diferentes períodos de incubação, verificou-se aumento na

disponibilidade de Mg no solo, porém não suficiente para atingir valores considerados adequados (ESCOSTEGUY, 1998).

Dentre os minerais que estão presentes nas rochas moídas estudadas a flogopita e o talco (Flogopitito); argilominerais 2:1 (Subproduto de chapada); biotita (Biotita); argilominerais 2:1, piroxênios, feldspatos e olivinas (Ultramáfica) e; feldspato e flogopita (brecha) são potenciais fontes de magnésio que pode ser liberado para o solo (CURI, 2007; MEURER, 2006).



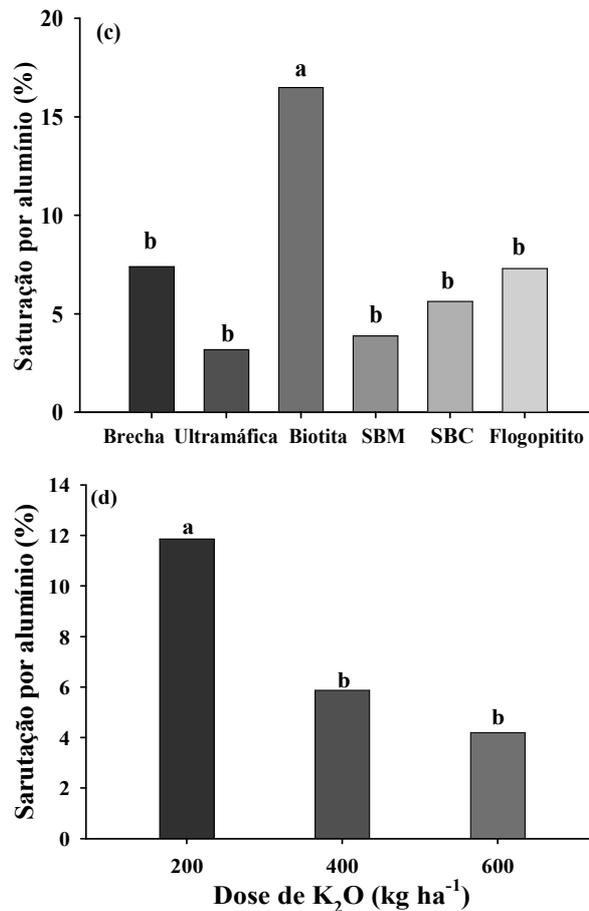
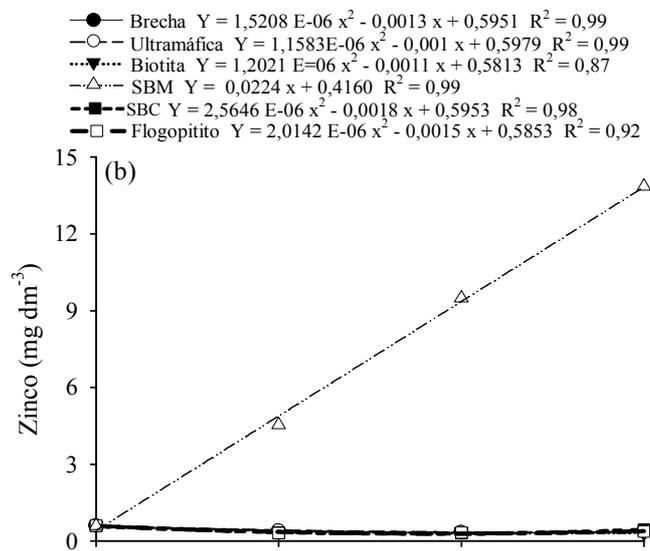
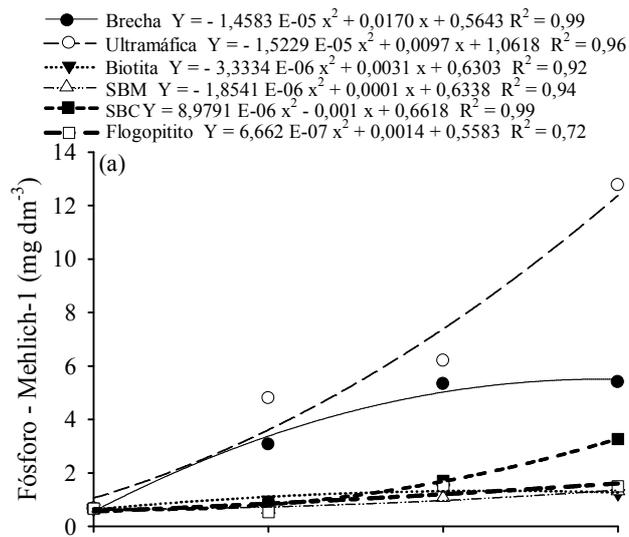


Figura 4. Disponibilidade de magnésio (a), saturação por magnésio (b) e saturação por alumínio (c) em função da aplicação da brecha, ultramáfica, biotita, subproduto de mineração (SBM), subproduto de chapada (RC) e flogopitito e saturação por alumínio em função das doses de rochas moídas (b).

A saturação da CTC efetiva por alumínio, que inicialmente era de 25% (alumínio trocável: $Al^{3+} = 0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), caiu significativamente como resultado do efeito de fontes e doses isoladamente (Figuras 4c, 4d). Observa-se, que a biotita promoveu menor redução desse atributo químico quando comparado as outras rochas moídas (Figura 4c). Houve diminuição da saturação da CTC por alumínio com a elevação das doses de rocha moída (Figura 4d).

A disponibilidade de fósforo no solo aumentou com a elevação das doses das rochas moídas aplicados no solo (Figura 5a). Conforme relatado por RESENDE et al. (2006b) o extrator Mehlich-1 é eficiente na predição da disponibilidade de K^+ no solo após a aplicação de rochas moídas, diferentemente do observado quando esse extrator é utilizado em solos fertilizados com fosfatos naturais de origem apatítica onde a disponibilidade pode ser superestimada.

A rocha que liberou mais fósforo (P) para o solo foi a ultramáfica e elevou os teores de P no solo de $0,9 \text{ mg dm}^{-3}$ (muito baixo), antes da incubação, para $12,77 \text{ mg dm}^{-3}$ (médio) após a incubação.



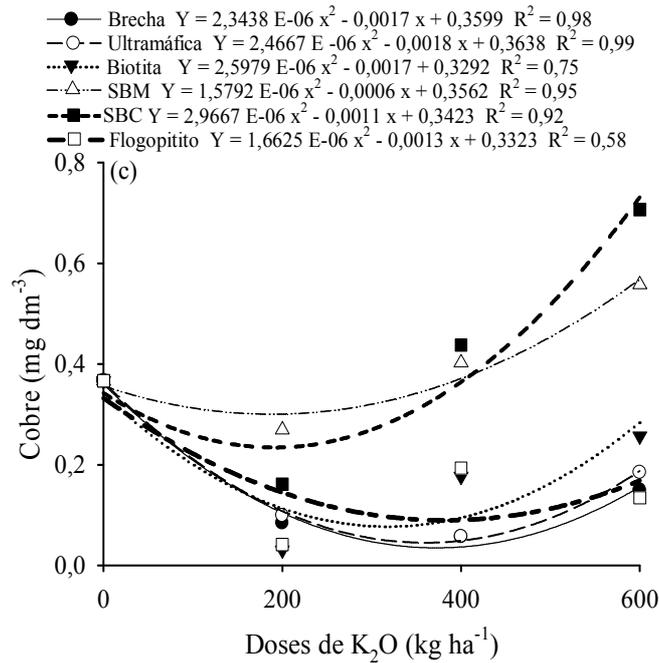


Figura 5. Disponibilidade de fósforo (Mehlich-1) (a), zinco (DTPA) (b) e cobre (DTPA) (c) do solo fertilizado com diferentes doses de brecha, ultramáfica, biotita, subproduto de mineração (SBM), subproduto de chapada (SBC) e flogopitito.

Além do K^+ a rocha ultramáfica contribuiu para o aumento da disponibilidade de P em um Latossolo Amarelo distrófico (RIBEIRO et al., 2010). A maior disponibilidade de P em solo com a aplicação da rocha ultramáfica pode ser explicada devido às rochas do grupo das máficas possuírem naturalmente em sua composição teores mais elevados de P (TUERKIAN, 1962) o que contribuiu para o aumento dos teores de P disponíveis no solo. Isso também pode ser confirmado pelo maior teor total de P_2O_5 presente nessa rocha (Tabela 17).

O subproduto de mineração foi o fertilizante alternativo que liberou mais Zn^{2+} , sendo que os demais tiveram baixa liberação desse micronutriente da rocha para o solo (Figura 5b). A ordem de liberação do Zn^{2+} dos fertilizantes para o solo foi a seguinte:

subproduto de mineração > subproduto de chapada > ultramáfica > brecha > flogopitito > biotita.

Mesmo o subproduto de chapada possuindo menor teor total de Zn (123 mg kg^{-1}) que a biotita ($290,5 \text{ mg kg}^{-1}$) e o flogopitito ($902,7 \text{ mg kg}^{-1}$) ele proporcionou maiores teores de Zn^{2+} no solo. Como as rochas moídas foram aplicadas com base no teor de K_2O a quantidade de flogopitito aplicada sempre foi menor em relação ao subproduto de chapada e biotita xisto, respectivamente o que explica em parte essas diferenças. Já a biotita tem maiores concentrações de Zn e foi aplicada em maior quantidade que o subproduto de chapada, porém, liberou menos Zn^{2+} para o solo. Isso pode ter ocorrido devido a adsorção de Zn^{2+} no solo e em minerais de menor tamanho de partícula, como por exemplo, minerais amorfos e do tipo 2:1, presente no subproduto de chapada (Figura 2). Como discutido anteriormente (Figura 1a) houve alteração do pH causada pela aplicação das rochas no solo. Esse aumento do pH promove também o aumento das cargas dependentes de pH (cargas negativas) e, conseqüentemente aumento na adsorção de zinco ocasionando redução de sua disponibilidade no solo.

O Zn está presente em diversas rochas básicas e ácidas devido à substituição isomórfica de Mg por Zn nos silicatos ocorrer facilmente. Além disso, o Zn aparece como elemento acessório em minerais primários como a olivina (mineral presente na rocha ultramáfica), hornblenda, augita, biotita e magnetita. Outras formas comuns de compostos que tem Zn em sua composição envolvem sulfetos (esfarelita), carbonatos, silicatos e fosfatos (SOUZA & FERREIRA, 1991; RAIJ, 1991).

Os valores de Zn^{2+} no solo ficaram acima do nível crítico ($> 1,2 \text{ mg dm}^{-3}$); (RAIJ & CANTARELLA, 1997) apenas no tratamento onde foi aplicado o subproduto de mineração em todas as doses de K_2O .

A liberação de Cu^{2+} das rochas para o solo ocorreu mais intensamente com a utilização do subproduto de chapada e de mineração, respectivamente (Figura 5c). No geral, foi proporcional ao incremento nos valores das doses de rochas aplicadas. A menor disponibilidade de Cu, ($0,0307 \text{ mg dm}^{-3}$) ocorreu com a aplicação de 200 kg ha^{-1} de K_2O , por meio da rocha biotita xisto, e o maior com a utilização do subproduto de chapada na dose de 600 kg ha^{-1} de K_2O ($0,7067 \text{ mg dm}^{-3}$).

A elevação do pH, causada pelo aumento das doses de rocha aplicadas (Figura 1a), diminuiu a disponibilidade dos micronutrientes Cu e Zn na solução do solo e nos pontos de troca catiônica, com o aumento das doses de rocha aplicadas, o que ocasionou, na maioria dos tratamentos com as rochas, menor disponibilidade de Cu em relação ao tratamento controle. Além disso, ao longo dos 100 dias de incubação pode ter ocorrido complexação do Cu com a matéria orgânica do solo. Em termos gerais, o poder de formação de complexos diminui na seguinte ordem: $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn}$. Dessa forma, o Cu é o micronutriente que tem maior interação com compostos orgânicos do solo (ABREU et al., 2007).

O subproduto de mineração possui maior teor de Cu^{2+} em relação ao subproduto de chapada, porém, a aplicação foi feita em quantidades menores porque seu teor de K_2O é maior (Tabela 17). Esse fato explica o motivo da maior liberação de Cu^{2+} do subproduto de chapada.

Para o Ni, não houve interação significativa para as doses de K_2O , as rochas moídas e a interação entre esses fatores.

CONCLUSÕES

As rochas silicáticas e os subprodutos, utilizados como fonte de potássio alteraram a disponibilidade de nutrientes e os atributos químicos do solo o que os torna viáveis para serem utilizados como corretivos da acidez, fonte de macro e micronutrientes.

A variação na composição química das rochas silicáticas e dos subprodutos afetou a liberação de nutrientes da rocha para o solo.

As seis rochas moídas empregadas no estudo promoveram alterações na acidez do solo o que resultará em menor necessidade de calcário em áreas onde forem aplicadas.

Nas doses das rochas aplicadas, a ultramáfica e o subproduto de chapada foram as rochas que mais alteraram o pH do solo e o subproduto de mineração e a ultramáfica as rochas que disponibilizaram mais potássio.

Após a aplicação da ultramáfica ocorre um desbalanço de íons, com altos valores de saturação por sódio da CTC potencial e valores fora da faixa adequada para a saturação por cálcio e magnésio.

A maior disponibilidade de cobre e zinco ocorreu com a aplicação do subproduto de chapada e mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C.A.; LOPES, A.S.; SANTOS, G.C.G. Micronutrientes. In: _____. NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 645736, 2007.

ANDRADE, L.R.M.; MARTINS, E.S.; MENDES, I.C. **Avaliação de uma rocha ígnea como corretivo de acidez e disponibilização de nutrientes para as plantas**. Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 57. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002, 19 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes Minerais, Orgânicos, Organominerais e Corretivos**. Brasília. 2007. 141p.

BRASIL. Instrução Normativa nº 27, de 05 de junho de 2006. Dispõe fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes para serem produzidos, importados ou comercializados, deverão atender aos limites estabelecidos nos Anexos I, II, III, IV e V desta Instrução Normativa no que se refere às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, elementos-traço, pragas e ervas daninhas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 9 jun. 2006. Seção 1, p. 15.

BRASIL. Instrução Normativa nº 35 de 4 de julho de 2006. Dispõe sobre as especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 12 jul. 2006. Seção 1, p. 32.

BROWN, G.; NEWMAN, A.C.D.; RAYNER, J.H.; WEIR, A.H. The structures and chemistry of soil clay minerals. In: _____. GREENLAND, D.J.; HAYES, M.H. (Ed.). **The chemistry of soil constituents**. Chichester: John Wiley & Sons, 1978. p. 29-178.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa - MG, 1999. 359 p.

CURI, N.; KÄMPF, N. & MARQUES, J.J. Mineralogia e formas de potássio em solos do Brasil. In: _____. YAMADA, T. & ROBERTS, T.L., eds. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p.71-92.

DEER, W.A., HOWIE R.A., ZUSSMAN, J. **Rock-forming minerals - Sheet silicates**. London. Longman. 1962, 270p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Solos. Embrapa Informática Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia 1999. 370p.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; KLAMT, E. Basalto moído como fonte de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.11-20, 1998.

FERREIRA DF. 2003. **Sisvar versão 4.2**. DEX/UFLA.

FYFE, W.S, LEONARDOS, O.H. & THEODORO, S.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.78, p.721-730, 2006.

LEONARDOS, O. H.; ULBRICH, M. N. C.; GASPAR, J. C. The Mata da Corda Volcanic rocks. In: INTERNATIONAL KIMBERLITE CONFERENCE FIELD GUIDEBOOK, 5., 1991, Araxá. **Proceedings...** Araxá: CPRM, 1991. p. 65-72.

LEONARDOS O.H. & THEODORO, S.H. Fertilizing tropical soils for sustainable development. In: FORMOSO MLL AND CERRI CC. Proceedings International Workshop on Tropical Soils Rio de Janeiro. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 143–153. 1999.

LEONARDOS O.H.; THEODORO S.H.; ASSAD M.L. Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.56, p.3–9, 2000.

LOPES, A.S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. Tradução e Adaptação. 2. ed. Piracicaba, Potafos, 1992. 177p.

MACHADO, C.T.T.; RESENDE, A.V.; MARTINS, E.S.; SOBRINHO, D.A.S.; NASCIMENTO, M.T.; FALEIRO, A.S.G.; LINHARES, N.W.; SOUZA, A.L. & CORAZZA, E.J. Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de potássio para culturas anuais: II. Fertilidade do solo e suprimento de outros nutrientes. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 30, 2005, Recife. **Anais...** CDROM. Recife, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

MEURER, E. J. (ed) **Fundamentos de química do solo**. 3 ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. 285 p.

OLIVEIRA, F.A.; CASTRO, C.; MOREIRA, A.; ROSA, J.L. Eficiência da adubação residual com rochas brasileiras para a cultura da soja. **Espaço & Geografia**, v.9, p.231-246, 2006.

MOREIRA, A.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F.A.; SALINET, L.H.; SFREDO, G.J. Efeito residual de rochas brasileiras como fertilizantes e corretivos da acidez do solo. **Espaço & Geografia**, v.9, p.163-177, 2006.

OLIVEIRA, L.A.M.; DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**, 2008. Disponível em <http://www.dnpm.gov.br>, data de acesso: 12/11/2010.

RAIJ, B. van. Geoquímica de micronutrientes. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p.99-111.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: _____. RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Fundação IAC, 1997.** p.233-243. (Boletim, 100).

RESENDE. A.V.; MARTINS, E.S.; SENA, M.C.; MACHADO, C.T.T.; KINPARA, D.I.; OLIVEIRA FILHO, E.C. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço & Geografia**, v.9, p.17-40, 2006a.

RESENDE. A.V.; MACGADO, C.T.T.; MARTINS, E.S.; NASCIMENTO, M.T.; SENA, M.C.; SILVA, L.C.R.; LINHARES, L.W. **Rochas moídas como fontes de potássio para o milho em solo de Cerrado.** Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 162. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2006b, 20 p.

RESENDE. M.; CURTI, N.; REZENDE, S.B.de; CORRÊA, G.F. **Pedologia: bases para distinção de ambientes.** Editora UFLA, 2007. 322p.

RIBEIRO, L.S.; SANTOS, A.R.; SOUZA, L.F.S.; SOUZA, J.L. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.891-897, 2010.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington, US Department Agriculture, (USDA Agricultural Handbook, 60), 1954. 160p.

SOUZA, E.C.A.; FERREIRA, M.E. Micronutrientes no solo: zinco. In: _____.
FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba:
POTAFOS/CNPq, 1991. p.219-242.

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

TUREKIAN, K.K.; WEDEPOHL, K.H. Distribution of the elements in some units of the
earth. **Geological Society of American Bulletin**, v.72, p. 175-192, 1962.

Capítulo 2:

Eficiência da adubação potássica na alface adubada com rochas moídas

GUELFÍ-SILVA, D.R.G.; MARCHI, G.; SPEHAR, C. R.; SOARES, D.A.; FAQUIN, V.

(Trabalho submetido à Revista Ciência Agronômica)

RESUMO

EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO POTÁSSICA NA ALFACE ADUBADA COM ROCHAS MOÍDAS

Objetivou-se com o presente trabalho avaliar o efeito da aplicação de rochas moídas na nutrição, produção e eficiência da adubação potássica na alface. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em vasos com 3,7 kg de amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com textura média. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado e os tratamentos foram distribuídos em arranjo fatorial 4 x 6, sendo seis rochas moídas, utilizadas como fertilizantes alternativos multinutrientes (brecha, ultramáfica, biotita xisto, subproduto de mineração, flogopitito e rejeito de chapada), e quatro doses de potássio (0-controle; 200; 400; 600 kg K₂O ha⁻¹), com quatro repetições. Foram determinados o teor e o acúmulo de potássio (K), cobre (Cu), zinco (Zn) e níquel (Ni) na parte aérea da alface e com esses dados foram calculados dois índices de eficiência da adubação potássica. Os resultados mostraram que as doses das diferentes rochas moídas promoveram alterações na nutrição, produção e eficiência da adubação potássica e de micronutrientes, tornando-as uma opção viável para adubação em sistemas de produção orgânico e convencional.

Palavras chave: Fertilizante Multinutriente. *Lactuca sativa* L. Rochagem.

ABSTRACT

EFFICIENCY OF POTASSIC FERTILIZATION IN LETTUCE AS AFFECTED BY DIFFERENT GROUND POTASSIC ROCKS

The objective of this work was to evaluate the effect of crushed rocks in nutrition, production and efficiency of potassic fertilization in lettuce. The experiment was carried under greenhouse conditions in pots with 3.7 kg of Oxisol samples. The experimental design was in completely randomized design, in a factorial layout 4 x 6, comprising six crushed rocks used as alternative multinutrient fertilizer (brecchia, biotite schist, ultramafic, two mining byproducts and phlogopitite), and four potassium doses (0-control; 200; 400; 600 kg K₂O ha⁻¹), with four replicates. The nutrient concentration, potassium, copper, zinc, nickel accumulation in shoot dry mass of lettuce were determined. This data were used to evaluate the index of efficiency of potassic fertilization. The results showed that rates of crushed rocks promoted alterations in nutrition, production and potassium use efficiency indexes became it an option to use like as an alternative fertilizer in several cropping systems.

Key-words: *Lactuca sativa* L. Multinutrient fertilizer. Stonemeal.

INTRODUÇÃO

O potássio (K) está presente na porcentagem de 2,6% na crosta terrestre sendo o terceiro elemento mineral que é nutriente de plantas, após ferro e cálcio. O potássio mineral nas rochas encontra-se predominantemente em silicatos que liberam esse nutriente para o solo pelo processo de intemperização contínua (WILPERT; LUKES, 2003).

As reservas de sais de potássio utilizados para produção de fertilizantes no Brasil, em sua maior parte, são compostas por minerais de baixa solubilidade em água devido à resistência das estruturas dos minerais a serem rompidas nas condições naturais do solo (OLIVEIRA; SOUZA, 2001). Aliado a isso, a baixa eficiência de uso de nutrientes na agricultura brasileira contribui para a dependência ainda maior da importação.

A fonte de potássio mais utilizada no país é o cloreto de potássio (KCl) com consumo de 4,8 milhões de toneladas de potássio (em produto KCl); (OGASAWARA, 2010), sendo que 95% desse total é importado. Porém, em determinados sistemas de cultivo, como no caso da agricultura orgânica a utilização de fertilizantes minerais, como o KCl não é permitida. Porém, a viabilidade de utilização não depende somente do sistema de cultivo, mas da distância entre o local de aplicação e o de produção. As rochas moídas ainda não são consideradas pela legislação como fertilizantes ou condicionadores do solo pelos órgãos federais de fiscalização. Entretanto, tais produtos tornam-se uma alternativa viável para adubação nos diversos sistemas de produção agrícolas (VAN STRATEEN, 2006; GUARÇONI & FANTON, 2011; FYFE et al., 2006).

Em grande parte das regiões do país existem rochas que são subprodutos da exploração de atividades de mineração. Esses subprodutos atualmente, na maior parte dessas regiões são considerados um passivo ambiental se deixados sem utilização.

Entretanto, esses materiais possuem nutrientes que podem ser utilizados para adubação, proporcionando a esses materiais uma finalidade importante. A viabilidade de sua utilização vai depender, principalmente, da distância do local de transporte até a propriedade agrícola, de maneira semelhante ao que ocorre com o calcário.

Atualmente, o país possui uma área de 35.000 hectares de alface plantados por pequenos agricultores e que geram, em torno de cinco empregos diretos por hectare (COSTA & SALA, 2005). Os estados de São Paulo e Minas Gerais são os maiores produtores dessa hortaliça (PIMENTEL et al., 2009). Na região Centro-Oeste do Brasil grande parte da produção está na área dos municípios de Goiânia, Anápolis e no entorno de Brasília (IEA, 2010). Todas essas regiões estão próximas a locais onde ocorre a disponibilidade de rochas que podem ser moídas e utilizadas como fontes alternativas de nutrientes como o potássio e, também para correção da acidez do solo. Dentre estas, pode-se citar a Brecha (Rio Verde - GO), Subproduto de Chapada (Chapada - GO), Biotita Xisto (Nova Era - MG), Subproduto de Mineração (Sete Lagoas - MG), Verdete de Abaeté (Cedro de Abaeté - MG), Ultramáfica (Lages - SC) e Flogopitito (Campo Formoso - BA), dentre outras.

Dessa forma, o uso de rochas potássicas moídas como fontes de nutrientes e corretivos da acidez do solo, aliada a maior eficiência da adubação e com o mínimo de impacto ambiental em áreas agrícolas, se viabilizada, é uma alternativa para os agricultores brasileiros. Nesse sentido, o presente estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito de rochas moídas utilizadas como fertilizantes multinutrientes, que foram selecionados dentre diversos materiais promissores em termos de fornecimento de potássio, na nutrição e eficiência da adubação potássica na cultura da alface.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, no período de novembro de 2011 a março de 2011. Amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, com textura média, foram coletadas em Itutinga, MG, sob vegetação natural, na profundidade de 0 a 20 cm. Posteriormente, o solo coletado foi seco ao ar, destorroado, passado em peneira com abertura de quatro milímetros, homogeneizado e colocado nos vasos de cultivo na quantidade de 3,7 kg. Concomitantemente, foram coletadas amostras de solo que foram utilizadas para caracterização química e física dos solos dos vasos de cultivo: pH (água) = 4,9; M.O = 0,8 dag kg⁻¹; K = 22 mg dm⁻³; S = 5,4 mg dm⁻³; P_(Mehlich1) = 0,9 mg dm⁻³; Ca = 0,1 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,1 cmol_c dm⁻³; Al = 0,1 cmol_c dm⁻³; H+Al = 1,7 cmol_c dm⁻³; SB = 0,3 cmol_c dm⁻³; t = 0,4 cmol_c dm⁻³; T = 2,0 cmol_c dm⁻³; Fe = 27,4 mg dm⁻³; Zn = 0,6 mg dm⁻³; Cu = 0,4 mg dm⁻³; B = 0,0 mg dm⁻³; Mn = 0,4 mg dm⁻³; Areia = 600 g kg⁻¹; Silte = 170 g kg⁻¹; Argila = 230 g kg⁻¹.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado e os tratamentos foram distribuídos em arranjo fatorial 3x6+1, sendo seis rochas moídas, utilizadas como fertilizantes alternativos multinutrientes (brecha, ultramáfica, biotita xisto, subproduto de mineração, flogopitito e rejeito de chapada), e quatro doses de potássio (0-controle; 200; 400; 600 kg K₂O ha⁻¹), com quatro repetições. As quantidades de rochas moídas foram definidas com base na concentração de óxido de potássio (Tabela 17).

As quantidades totais de rochas, em toneladas por hectare, correspondentes às doses de 200; 400; 600 kg de K_2O ha^{-1} foram, respectivamente: Brecha (13,64; 27,28; 40,92 t de rocha ha^{-1}), Ultramáfica (9,59; 19,18; 28,77 t de rocha ha^{-1}), Subproduto de chapada (8,77; 17,54; 26,31 t de rocha ha^{-1}), subproduto de mineração (2,52; 5,04; 7,56 t de rocha ha^{-1}), biotita xisto (14,36; 28,72; 43,08 t de rocha ha^{-1}) e flogopitito (3,86; 7,72; 11,58 t de rocha ha^{-1}). As rochas adicionadas, antes das análises químicas foram moídas e passadas em peneiras com abertura de 0,3 mm. Além do K, as fontes utilizadas nesse estudo também são fornecedoras de micronutrientes, como nos casos do Ni, Cu e Zn, que foram adicionados ao solo de cultivo em quantidades variadas, de acordo com a dose de K_2O aplicada, nos diferentes tratamentos (Tabela 18).

Após a adição das rochas aos vasos foi realizada a semeadura de 10 sementes de alface cv. Vera por vaso no dia 01/12/2011. Após a germinação das sementes, quando as plantas apresentavam folhas definitivas, foi realizado desbaste em cada vaso permanecendo, para o cultivo, somente três plantas.

A umidade do solo foi mantida através de pesagens diárias dos vasos, amostrando-se aleatoriamente um vaso de cada tratamento, definindo-se a partir daí as quantidades de água em base de peso, a serem repostas por regas realizadas na superfície dos vasos. Esse controle da umidade foi realizado baseando-se na manutenção de água em 60% do volume total de poros (VTP).

A adubação de manutenção, foi realizada com reagentes (p.a) em todos os tratamentos, com 300 mg kg^{-1} de P no plantio, 150 mg kg^{-1} de N em três coberturas, e 50 mg kg^{-1} de S junto com a segunda das coberturas nitrogenadas.

O experimento foi colhido aos 71 dias após a semeadura, quando as plantas foram seccionadas rente ao solo. Do material colhido foram separadas as folhas e o sistema radicular que foi retirado dos vasos com o auxílio de jato d'água dirigido sobre o substrato. Todo o material da planta foi acondicionado em sacos de papel e seco a 75°C em estufa com circulação de ar forçada até peso constante. Após a secagem, determinou-se o peso da massa seca de raiz e parte aérea. Posteriormente, a massa seca de parte aérea foi moída em moinho Willey, sendo dela retiradas amostras equivalentes a dois gramas, as quais foram submetidas à digestão nitroperclórica para determinação nos extratos os teores de K, Ni, Cu e Zn.

O controle de qualidade das análises foi realizado com o uso de padrão de referência do NIST (National Institute of Standards and Technology) BCR[®] 414 – Plankton que possui teores conhecidos de Ni (18,8 mg kg⁻¹), Cu (29,5 mg kg⁻¹) e Zn (111,6 mg kg⁻¹), quantidades essas mais próximas àquelas esperadas para alface, dentre os padrões de referência disponíveis e a taxa de recuperação foi de 82, 92 e 91% para Ni, Cu e Zn, respectivamente.

Os valores de acúmulo de K, Ni, Cu e Zn foram determinados pelo produto entre o peso seco e o teor desses nutrientes na parte aérea das plantas de alface. Após a obtenção desses dados foram calculados os seguintes índices de eficiência da adubação potássica:

- Recuperação do potássio Aplicado (RKA) = Acúmulo de K na parte aérea (mg) com adubação potássica - Acúmulo de K na parte aérea (mg) sem adubação / Dose de K₂O aplicada (mg) x 100; em % (FAGERIA, 2010).

- Eficiência Agronômica do K Aplicado (EAK) = massa seca da parte aérea com adubação potássica (mg) – massa seca parte aérea sem adubação potássica (mg)/ Dose de K₂O (mg); em mg de massa seca de parte aérea/mg K₂O aplicado (FAGERIA, 2010).

Os dados foram submetidos à análise de variância e, sendo detectadas diferenças, aplicou-se o teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade, por meio do software SISVAR 4.3[®] (FERREIRA, 2003) para as comparações entre médias e, para os efeitos de doses e rochas e sua interação, aplicaram-se análises de regressão, sendo os modelos matemáticos escolhidos segundo as equações com melhores ajustes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi observada na análise de variância significância ($p < 0,05$) para o efeito de doses, fontes, bem como para a interação entre esses fatores para a massa seca da parte aérea e raízes, teor e acúmulo de K, Ni, Cu e Zn na parte aérea da alface. As rochas moídas aplicadas promoveram aumento na produção de massa seca de parte aérea da alface com o incremento nas doses de potássio aplicadas (Figuras 6a; 6b).

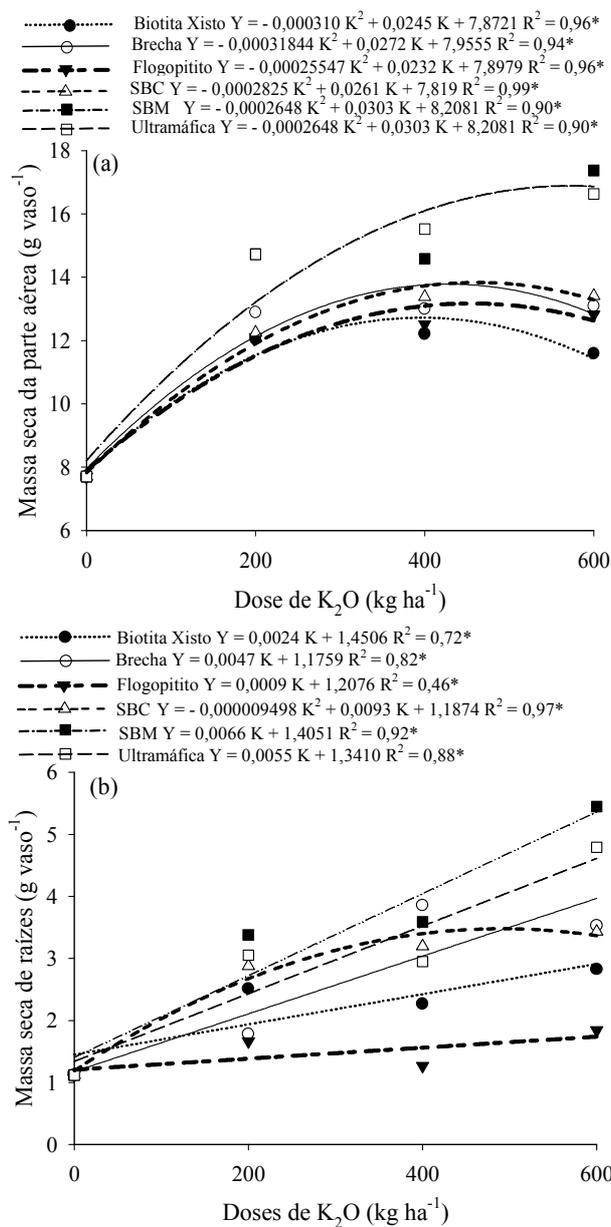


Figura 6. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K₂O na massa seca da parte aérea (a) e de raízes da alfaca. *Nível de significância de 5% (P < 0,05), pelo teste de Scott-Knott,.

A ultramáfica e o subproduto de mineração foram as que se destacaram entre as fontes alternativas de potássio no que se trata de produção de massa seca da parte aérea e de

raiz, pois promoveram maior liberação de nutrientes para o crescimento da alface. As demais fontes promoveram produção de massa seca de parte aérea semelhantes, entre si. A maior produção de massa seca de parte aérea da alface, com todas as rochas, foi obtida na dose de 600 kg de K_2O ha^{-1} , a exceção ocorreu onde aplicou-se a rocha biotita xisto, que proporcionou máxima produção na dose de 400 kg de K_2O ha^{-1} .

A maior produção de massa seca de raízes da alface foi promovida por um maior aproveitamento de nutrientes no solo adubado com as rochas ultramáfica e subproduto de mineração devido ao maior contato das raízes com íons em solução, fato que refletiu no maior crescimento da parte aérea das plantas de alface adubadas com essas rochas moídas.

RESENDE et al. (2006) encontraram resultados semelhantes aos desse estudo, porém para a cultura da soja. Os autores relataram um maior desenvolvimento do sistema radicular da cultura da soja onde houve a aplicação da rocha ultramáfica além de uma maior disponibilidade de K^+ e produção de grãos.

Essa maior resposta em produção de raízes e, conseqüentemente, da parte aérea na alface adubada com a ultramáfica pode ser explicada pelo seu maior poder de correção da acidez do solo (RIBEIRO et al., 2010), sua composição multinutriente (Tabelas 17 e 20) e devido a presença de minerais como os feldspatos em sua composição capazes de liberar outros nutrientes além do K (BAKEN, 2000; WILPERT e LUKES, 2003) tornando-a uma opção para adubação da alface em sistemas de cultivo orgânico.

Os feldspatos, minerais presentes na rocha ultramáfica, são tectossilicatos que ocorrem em rochas ígneas e metamórficas e sua reação de hidrólise, ocorre conforme proposto por PEDRO (1974) podendo ser: total; parcial produzindo filossilicatos, sílica e K solúvel e; parcial produzindo sílica, argilominerais 2:1 (Montmorilonita) e K solúvel.

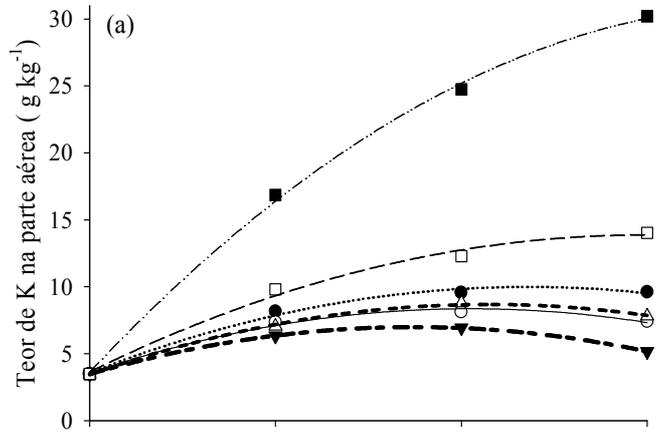
Nessas reações de hidrólise dos feldspatos são geradas oxidrilas (OH⁻) que também contribuem para neutralização da acidez no solo.

A resposta das plantas de alface em produção em função da aplicação das rochas moídas não é função somente da composição mineralógica, mas também está relacionada a fatores determinantes da capacidade e da intensidade de solubilização dos minerais aliados às propriedades físicas e químicas dos solos (RIBEIRO et al., 2010).

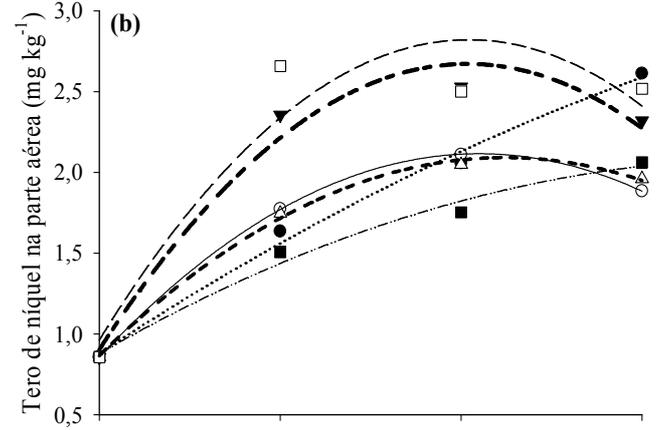
Foi observada menor resposta em crescimento de raízes com a utilização do flogopitito e da biotita xisto, respectivamente e este fato está associado a menor presença de cálcio e fósforo na composição dessas rochas (Tabela 17 e 20) nutrientes com funções importantes no que se trata de crescimento radicular das plantas fato que refletiu em menores valores de produção de alface adubado com o flogopitito e a biotita xisto.

Os teores de K na parte aérea da alface aumentaram com a elevação da quantidade de K₂O aplicada na forma de rocha moída (Figura 7a). O maior teor de K na parte aérea da alface foi de 30,2 g kg⁻¹ no solo adubado com o subproduto de mineração na dose de 600 kg de K₂O ha⁻¹ (Figura 7a).

-●..... Biotita Xisto $Y = -0,0000289 K^2 + 0,0272 K + 3,5712$ $R^2 = 0,99^*$
-○..... Brecha $Y = -0,00002859 K^2 + 0,0234 K + 3,5587$ $R^2 = 0,99^*$
-▼..... Flogopitito $Y = -0,0000289 K^2 + 0,0202 K + 3,4687$ $R^2 = 0,99^*$
-△..... SBC $Y = 0,0000284 K^2 + 0,0244 K + 3,4325$ $R^2 = 0,99^*$
-■..... SBM $Y = -0,00004953 K^2 + 0,0738 K + 3,6262$ $R^2 = 0,99^*$
-□..... Ultramáfica $Y = 0,00002859 K^2 + 0,0342 K + 3,6313$ $R^2 = 0,99^*$



-●..... Biotita Xisto $Y = -0,000001339 K^2 + 0,0037 K + 0,8806$ $R^2 = 0,99^*$
-○..... Brecha $Y = -0,000007138 K^2 + 0,006 K + 0,8571$ $R^2 = 0,99^*$
-▼..... Flogopitito $Y = -0,00001068 K^2 + 0,0087 K + 0,9031$ $R^2 = 0,98^*$
-△..... RC $Y = 0,0000284 K^2 + 0,0244 K + 3,4325$ $R^2 = 0,99^*$
-■..... SBC $Y = -0,000006112 K^2 + 0,0055 K + 0,8662$ $R^2 = 0,99^*$
-□..... Ultramáfica $Y = 0,000011149 K^2 + 0,0091 K + 0,9628$ $R^2 = 0,90^*$



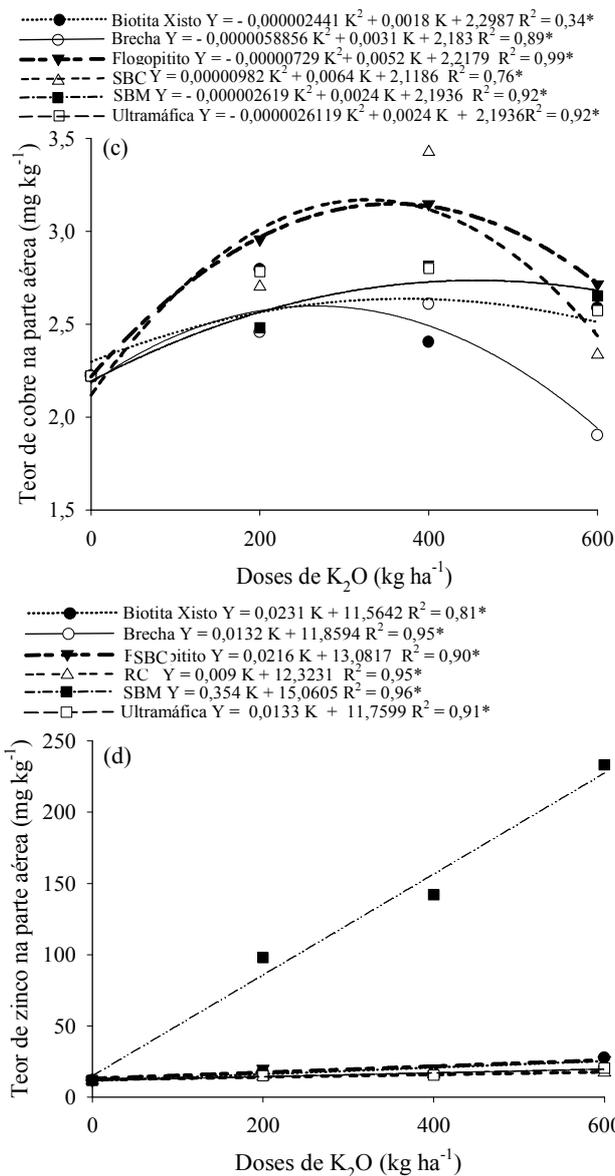


Figura 7. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no teor de potássio (a), níquel (b), cobre (c) e zinco (d) na parte aérea da alfaca. *Nível de significância de 5% ($p < 0,05$), pelo teste de Scott-Knott.

KANO et al. (2010) avaliaram o efeito de doses de potássio fornecidas na forma de cloreto de potássio na cultura da alface e obtiveram teores de K na parte aérea da alface que ficaram entre 14 e 27 g kg⁻¹ sem a aplicação de potássio e na dose de 2,5 g de K₂O por planta.

De acordo com WEIR & CRESSWELL (1993), teores de K na parte aérea da alface, considerados ideais, estão entre 45 a 80 g kg⁻¹.

O teor de níquel na parte aérea da alface adubada com rochas moídas variou na faixa de 0,85 mg kg⁻¹ até 2,61 mg kg⁻¹. De acordo com (ASHER, 1991) plantas que crescem em solos não contaminados por Ni apresentam teores na massa seca na faixa de 0,1 e 5 mg kg⁻¹. Já valores de Ni considerados fitotóxicos estão na faixa de 24 a 308 (MALAVOLTA, 2006) e 10 a 100 mg kg⁻¹ (KABATA; PENDIAS, 2001).

LOPES et al. (2005) em estudos conduzidos com alface cultivada em solo adubado com diferentes doses de lodo de esgoto, com 9,4 mg de Ni kg⁻¹ em sua composição, encontraram teores de Ni na parte aérea da alface em torno de 0,5 mg kg⁻¹.

Para os teores de Cu e Zn as exceções foram a brecha e o subproduto de mineração, respectivamente. No caso do Cu todas as rochas proporcionaram teores semelhantes na parte aérea da alface e a exceção foi a brecha que foi inferior quando comparada estatisticamente as demais rochas moídas (Figura 7c). Já para o Zn, o subproduto de mineração diferenciou-se das demais rochas proporcionando teores de 228 mg de Zn kg⁻¹ na parte aérea da alface (Figura 7d).

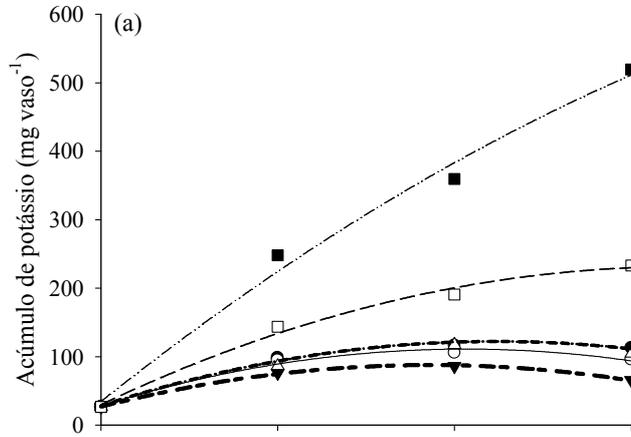
FURLANI & ABREU (2000) obtiveram maior produção de plantas de alface cultivadas em hidroponia, quando o teor foliar de zinco foi de 22,0 mg kg⁻¹, e verificaram que teor superior a 200 mg kg⁻¹ provocava toxidez.

Neste contexto, deve-se ressaltar que o subproduto de mineração, além de K, é uma importante fonte de Zn para as culturas.

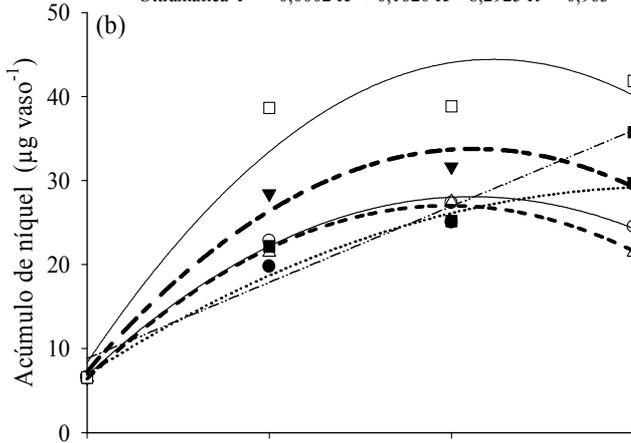
O subproduto de mineração promoveu acúmulo de K na parte aérea da alface superior as demais rochas moídas seguido pela ultramáfica. A sequência decrescente de acúmulo de K nos tratamentos foi a seguinte: subproduto de mineração > ultramáfica > biotita xisto = subproduto de chapada = brecha > flogopitito (Figura 8a).

Excluindo-se o subproduto de mineração a rocha que liberou mais K^+ foi a ultramáfica que como relatado anteriormente tem feldspatos em sua mineralogia, minerais que contribuíram para aumento da disponibilidade de K no solo com efeitos positivos na nutrição potássica da alface adubada com a rocha ultramáfica (Figuras 7a e 8a).

-●..... Biotita Xisto $Y = -0,0005 K^2 + 0,4208 K + 28,3211 R^2 = 0,99^*$
-○..... Brecha $Y = -0,0007 K^2 + 0,4007 K + 28,5707 R^2 = 0,98^*$
-▼..... Flogopitito $Y = -0,0004 K^2 + 0,3261 K + 27,1410 R^2 = 0,99^*$
-△..... SBC $Y = -0,0005 K^2 + 0,4208 K + 28,3211 R^2 = 0,91^*$
-■..... SBM $Y = 0,0004 K^2 + 1,0260 + 34,6710 K R^2 = 0,99^*$
-□..... Ultramáfica $Y = -0,0005 K^2 + 0,6129 K + 29,9786 R^2 = 0,99^*$



-●..... Biotita Xisto $Y = -0,00005444 K^2 + 0,0698K + 6,9166 R^2 = 0,99^*$
-○..... Brecha $Y = -0,0001 K^2 + 0,1009 K + 6,7746 R^2 = 0,99^*$
-▼..... Flogopitito $Y = -0,0001 K^2 + 0,1251 K + 7,2431 R^2 = 0,98^*$
-△..... SBC $Y = -0,0001 K^2 + 0,1038 K + 6,3987 R^2 = 0,99^*$
-■..... SBM $Y = 0,0453 K + 8,8208 R^2 = 0,94^*$
-□..... Ultramáfica $Y = -0,0002 K^2 + 0,1620 K + 8,2925 R^2 = 0,963^*$



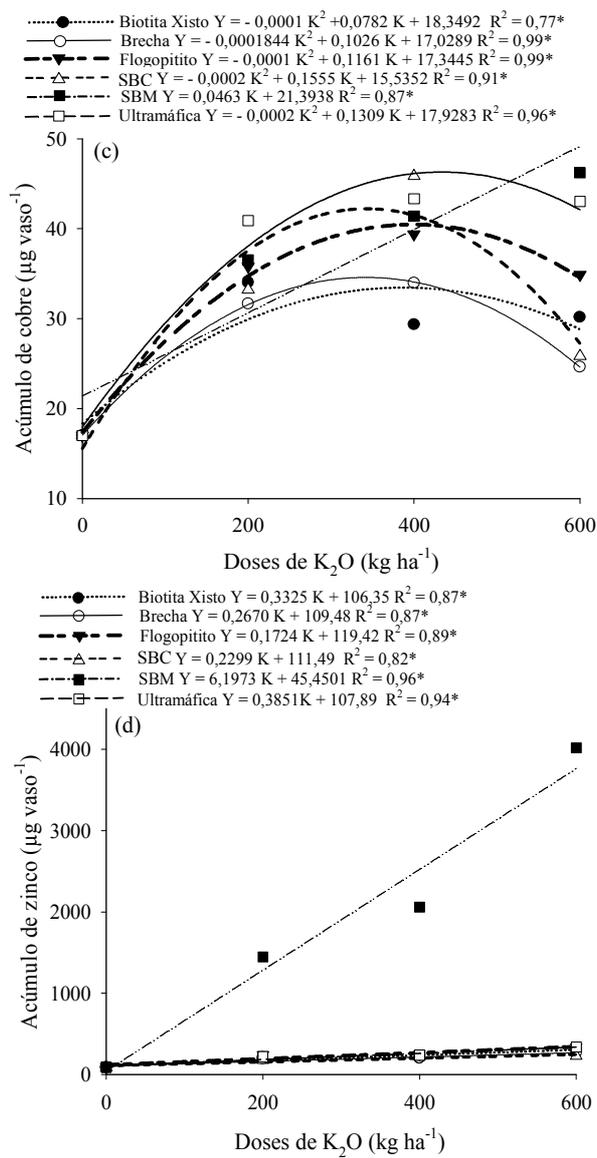


Figura 8. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no acúmulo de potássio (a), níquel (b), cobre (c) e zinco (d) na alfaca. *Nível de significância de 1% ($P < 0,05$), pelo teste de Scott-Knott.

No caso do flogopitito, rocha que promoveu o menor acúmulo de K na parte aérea da alfaca os principais minerais fornecedores de potássio são do grupo das micas como a flogopita (micas escuras). As micas possuem estrutura em camadas (2:1) compostas por lâminas tetraedrais e octaedrais e o K^+ ocupa o espaço entrecamada ficando ligado fortemente às moléculas de oxigênio do tetraedro. Dessa forma, essa ligação que é muito forte impede a expansão das camadas ocasionando baixa liberação do K^+ do mineral para o solo fato que refletiu num menor acúmulo de K na alfaca. A liberação de K^+ da flogopita que possui lâminas trioctaedrais é explicada em função da composição das lâminas octaedrais desses minerais (WILSON, 2004; CURI, 2005).

Nas micas trioctaedrais o comprimento da ligação K-O é maior (0,3 nm) do que nas dioctaedrais (0,285 nm) o que faz com que micas trioctaedrais tenham ligação K-O mais fraca. Além disso, nas micas dioctaedrais existe uma força de repulsão ocasionada pelos íons Al^{3+} octaedrais sobre o íon H^+ da oxidrila que desvia o H em direção ao octaedro vago distanciando ainda mais o K (AZZONE & RUBERTI, 2010; MANNING, 2010). Dessa forma, a proximidade entre íons H^+ e os íons de K^+ nas micas trioctaedrais proporciona repulsão e ligação mais fraca do K quando comparados a micas dioctaedrais (BIGHAM et al., 2000).

Portanto a composição e a estrutura mineralógica do K no flogopitito contribuíram para que essa rocha promovesse um menor teor e acúmulo de potássio na parte aérea da alfaca e menores respostas em produção, efeito contrário ao observado para o subproduto de mineração e ultramáfica.

Além de potássio em doses equivalentes, as rochas moídas também forneceram outros nutrientes de plantas em quantidades variadas (Tabela 19), dentre estes nutrientes ressalta-se a importância da presença e da liberação dos micronutrientes Ni, Cu e Zn que

estão em concentração mais elevada nas rochas tornado-as além de fontes de K potenciais fornecedoras de micronutrientes.

A rocha que proporcionou maior adição de Ni no solo e no acúmulo na alface foi a ultramáfica (Figura 8b). São encontradas concentrações de Ni em rochas ultramáficas na faixa de 270 - 3600 mg de Ni kg⁻¹ com um valor médio de 2000 mg de Ni kg⁻¹ (MALAVOLTA, 2006). Para cada tonelada da rocha ultramáfica moída usada no presente experimento aplicada por hectare, são adicionados 651,9 g de Ni (651,9 mg de Ni kg⁻¹ de rocha).

A dose de 600 kg de K₂O, aplicada por meio da rocha ultramáfica, forneceu 19,14 mg de Ni por vaso e proporcionou um acúmulo na parte aérea das plantas de alface de 0,04184 mg de Ni por vaso. Esses valores refletem que somente parte do total presente na rocha é solubilizado dos minerais presentes na rocha e disponibilizado para a planta a curto prazo.

O subproduto de mineração e a rocha ultramáfica foram as fontes alternativas de nutrientes que promoveram maior acúmulo de Cu na parte aérea da alface. No subproduto de mineração a concentração de Cu dentre as rochas moídas é a maior e, grande parte desse teor total de Cu está em uma forma que pode ser liberada prontamente para o solo refletindo em maior disponibilidade de Cu para absorção pelas raízes e, conseqüentemente, no acúmulo desse micronutriente na parte aérea da alface.

As maiores taxas de aplicação de Cu com base nas doses de K₂O ocorreram nos solos adubados com o subproduto de chapada e mineração, respectivamente (Tabela 21). Entretanto, no caso do subproduto de chapada, a maior taxa de aplicação não promoveu maiores valores de acúmulo na parte aérea da planta o que pode ser explicado pelo fato de que somente parte desse Cu foi liberado dos minerais presentes na rocha moída para a

solução do solo, proporcionando um menor acúmulo de Cu que rochas que apresentam teores menores de Cu que o subproduto de chapada. Além disso, essas rochas possuem diferentes valores de poder relativo de neutralização total promovendo diferentes valores de pH no solo afetando a disponibilidade de micronutrientes.

O maior acúmulo de Zn foi obtido na alface adubada com subproduto de mineração (Figura 8d). Isso ocorreu devido a grande quantidade de Zn disponível ($28.184,2 \text{ mg kg}^{-1}$) presente no subproduto de mineração refletindo em maior disponibilidade no solo e acúmulo na parte aérea da alface.

Os índices de eficiência da adubação potássica apresentaram efeito significativo ($p < 0,05$) para o efeito isolado de doses e rochas moídas. Todos os índices de eficiência da adubação potássica diminuíram com a elevação nas doses de potássio aplicadas na forma de rochas moídas (Tabela 21).

Existem poucas informações sobre a eficiência da adubação potássica na cultura da alface. Entretanto BALIGAR et al., (2001) relata que proporções médias de potássio absorvido pelas culturas, no geral, é de 40% do que é aplicado. É importante ressaltar que esses índices de aproveitamento do potássio são obtidos na maioria das vezes com utilização de fontes solúveis, sendo a principal o cloreto de potássio. No caso de rochas moídas, a solubilidade do K presente nos minerais, em cada fonte utilizada nesse estudo é variável dependente basicamente da granulometria, composição mineralógica, formação e ambiente de solubilização dos minerais presentes nas rochas moídas. Portanto, dificilmente esses materiais proporcionariam uma eficiência agrônômica semelhante à do KCl que é uma fonte solúvel de K. Entretanto, as rochas moídas além de fonte de K liberam outros nutrientes e algumas delas possuem poder de correção da acidez do solo proporcionando melhorias na fertilidade do solo além da liberação do potássio (RIBEIRO et al., 2010).

Por isso podem ser uma alternativa viável de utilização de acordo com a região de disponibilidade, sistema de cultivo e com as características químicas, físicas e mineralógicas de cada uma delas.

A maior eficiência agronômica da adubação potássica ocorreu na alface adubada com a ultramáfica e o subproduto de mineração. A sequência decrescente de eficiência agronômica das rochas foi a seguinte: ultramáfica = subproduto de mineração > brecha = subproduto de chapada = flogopitito = biotita xisto. O principal fator a afetar a eficiência agronômica é a solubilização do K da rocha para a solução do solo. Materiais onde os nutrientes estejam ligados a minerais que possam ser solubilizados de maneira mais rápida, disponibilizaram mais potássio para absorção pelas raízes proporcionando maior produção por kg de K aplicado na forma de rocha moída. O fator planta também é importante, pois quanto maior o volume de exploração do solo pelo sistema radicular maior à absorção de nutrientes. Isso foi observado nos solos cultivados com a ultramáfica e subproduto de mineração que tiveram maior produção de massa seca de raízes (Figura 6b) proporcionando maior valor teor e acúmulo de K na parte aérea da alface (Figuras 7a: 8a), com efeitos na produção (Figura 6a) e na eficiência agronômica da adubação potássica (Tabela 21).

Assim como para a eficiência agronômica, a recuperação do potássio aplicado diminuiu com o incremento nas doses de K_2O aplicadas na forma de rocha moída e foi maior com a aplicação do subproduto de mineração.

Tabela 21. Eficiência agronômica da adubação potássica e recuperação do potássio aplicado na alface adubada com diferentes doses de rochas moídas ⁽¹⁾.

Rocha moída	Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)			Médias
	200	400	600	
	Eficiência agronômica (mg massa seca mg de potássio aplicado ⁻¹) ⁽⁴⁾			
Biotita xisto	11,7a	6,1b	3,5b	7,1B
Brecha	14,0a	7,2b	4,9b	8,7B
Flogopitito	11,9a	6,5b	4,6b	7,7B
SBC ⁽²⁾	12,3a	7,7b	5,1b	8,4B
SBM ⁽³⁾	19,0a	9,3b	8,7b	12,3A
Ultramáfica	19,0a	13,0b	8,0c	13,3A
Médias	14,7a	8,3b	5,8c	
Rocha moída	Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)			Médias
	200	400	600	
	Recuperação do potássio aplicado (%) ⁽⁵⁾			
Biotita xisto	19,4a	12,1a	7,8b	13,1C
Brecha	18,4a	10,6b	6,2b	11,7C
Flogopitito	13,3a	8,0b	3,5b	8,3D
SBC	16,1a	12,3a	7,0b	11,8C
SBM	59,7a	45,0b	44,4b	49,7A
Ultramáfica	31,6a	22,2b	18,6b	24,1B
Médias	26,4a	18,4b	14,6c	

⁽¹⁾ Letras minúsculas comparam doses dentro de cada fonte e média das doses. Letras maiúsculas comparam as médias das fontes pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾ Subproduto de chapada. ⁽³⁾ Subproduto de mineração. ⁽⁴⁾ Eficiência Agronômica do K Aplicado (EAK) = massa seca da parte aérea com adubação potássica (mg) – massa seca parte aérea sem adubação potássica (mg) / Dose de K₂O (mg); em mg de massa seca de parte aérea/mg K₂O aplicado (FAGERIA, 2010). ⁽⁵⁾ Recuperação do potássio Aplicado (RKA) = Acúmulo de K na parte aérea (mg) com adubação potássica - Acúmulo de K na parte aérea (mg) sem adubação / Dose de K₂O aplicada (mg) x 100; em % (FAGERIA, 2010).

CONCLUSÕES

As rochas moídas podem ser utilizadas com fontes de nutrientes na cultura da alface por promoverem apreciável liberação de potássio e também níquel, cobre e zinco, e consequentemente aumento nos teores e acúmulo desses nutrientes na parte aérea da planta.

A eficiência agronômica e a recuperação do potássio aplicado diminuem com o aumento na quantidade de rocha moída aplicada.

A rocha ultramáfica e o subproduto de mineração se destacaram entre as demais rochas moídas no que diz respeito à nutrição, produção e eficiência da adubação potássica na alface.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHER, C.J. Beneficial elements, functional nutrients and possible new essential elements. In: _____. **Micronutrients in Agriculture**. 2^a ed. p. 703-724. Mortvedt, J.J.; ed. Soil Sci. Soc. America Inc. Madison. 1991. 760p.

AZZONE, R.G.; RUBERTI, E. Evolução composicional dos filossilicatos no perfil intempérico do complexo ultramáfico Alcalino-carbonatítico de Catalão I (GO). **Geologia USP**, v. 10, p. 23-43, 2010.

BAKEN, A. K.; GAUTNEB, H.; SVEISTRUP. T.; MYHR, K. Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. v. 56, p. 53-57, 2000.

BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; H, Z.E. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 32, p. 921–950, 2001.

BIGHAM, J.M.; BHATTI, T.M.; VUORINEN, A.; TUOVINEN, O.H. Dissolution and structural alteration of phlogopite mediated by proton attack and bacterial oxidation of ferrous iron. **Hydrometallurgy**, v. 59, p. 301-309, 2000.

CURI, N.; KÄMPF, N. & MARQUES, J.J. Mineralogia e formas de potássio em solos do Brasil. In: _____. YAMADA, T. & ROBERTS, T.L., eds. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p.71-92.

COSTA, C. P. da; SALA, F. C. A evolução da alfacultura brasileira. **Horticultura Brasileira**, v.23, n.1, 2005.

EPA-3052. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/pdfs/3052.pdf>>. Acesso em 19 fev. 2010.

FAGERIA, N.K.; SANTOS, A.B.; MORAES, M.F. Yield, Potassium Uptake, and Use Efficiency in Upland Rice Genotypes. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 41, p. 2676-2684, 2010.

FERREIRA DF. 2003. **Sisvar versão 4.2**. DEX/UFLA.

FYFE, W.S, LEONARDOS, O.H. & THEODORO, S.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.78, p.721-730, 2006.

FURLANI, P. R.; ABREU, M. F. Toxicidade de zinco em alface cultivada em hidroponia. **Horticultura Brasileira**, v. 18, Supl., p. 797-798, 2000.

GUARÇONI, A.; FANTON, C.J. Resíduo de beneficiamento do granito como fertilizante alternativo na cultura do café. **Ciência Agronômica**, v.42, p.16-26, 2011.

IEA. **Banco de dados:** área e produção dos principais produtos da agropecuária. Disponível em: <<http://www.ica.sp.gov.br/out/banco/menu.php>>. Acesso em: 04 ago. 2010.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413p.

KANO, C.; CARDOSO, A.I.I.; VILAS BOA, R.L. Influencia de doses de potássio nos teores de macronutrientes em plantas e sementes de alface. **Horticultura Brasileira**, v. 28, p. 287-291, 2010.

LOPES, J.C.; RIBEIRO, L.G.; ARAÚJO, M.J.; BERALDO, M.R.B.S. Produção de alface com doses de lodo de esgoto. **Horticultura Brasileira**, v. 18, p. 143-147, 2005.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MANNING, D.A.C. Mineral sources of potassium for plant nutrition: A review. **Agronomy for sustainable development**. v.30, p. 81-294, 2010.

OLIVEIRA, L.A. de; SOUZA, A.E. de. **Potássio. Balanço mineral brasileiro**. 2001. 17p.

OGASAWARA, E.; KULAIF, Y. FERNANDES, F.R.C. A indústria de fertilizantes (Cadeia NPK, enxofre, rocha fosfática e potássio) – Projeções de 2010 a 2030. In: _____. FERNANDES, F.R.C.; LUZ, A.B.; CASTILHOS, Z.C. **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro. 2010. p.145-167.

FERREIRA, D. F. **Sisvar 4.3**. 2000.

PEDRO, F. La pedogenese sous les tropiques humides en la dynamique du potassium. **Proc...** 10th Coll. International Potash Institute (Abidjan), Le Potassium dans les Cultures et les Sols Tropicaux. p. 23-50. Inst. International de la Potassa. Berna. 1974. 603p.

PIMENTEL, M.S.; LANA, A.M.Q.; DE-POLLI, H. Rendimentos agronômicos em consórcio de alface e cenoura adubadas com doses crescentes de composto orgânico. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, p. 106-112, 2009.

RESENDE, A.V.; MARTINS, E.S.; SENA, M.C.; MACHADO, C.T.T.; KINPARA, D.I.; OLIVEIRA FILHO, E.C. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço & Geografia**. v.9, p.17-40, 2006.

RIBEIRO, L.S.; SANTOS, A.R.; SOUZA, L.F.S.; SOUZA, J.L. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.891-897, 2010.

VAN STRAATEN, P.V. Farming with rocks and minerals: Challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. v.78, p.731-747, 2006.

WEIR, R. G.; CRESSWELL, G. C. Plant nutrient disorders 3. **Vegetable crops**. Sydney, 1993. 105 p.

WILPERT, K.; LUKES, M. Ecochemical effects of phonolite rock powder, dolomite and potassium sulfate in a spruce stand on an acidified glacial loam. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. v. 65, p. 115-127, 2003.

WILSON, M.J. Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates. **Clay Minerals**. v. 39, p. 233-236, 2004.

**CAPÍTULO 3: Produção, nutrição e eficiência no uso do potássio pelo arroz adubado
com rochas moídas**

GUELFÍ-SILVA, D.R.; MARCHI, G.; SPEHAR, C. R.; SOARES, D.A.; MARTINS, E.S.;
FAQUIN, V.; REIN, T.A.

(Trabalho submetido à Revista Brasileira de Ciência do Solo)

RESUMO

PRODUÇÃO, NUTRIÇÃO E EFICIÊNCIA NO USO DO POTÁSSIO PELO ARROZ ADUBADO COM ROCHAS MOÍDAS

O presente estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar o efeito de rochas moídas utilizadas como fertilizantes alternativos multinutrientes, que foram selecionadas dentre diversos materiais promissores em termos de fornecimento de potássio, na nutrição e eficiência da adubação potássica na cultura do arroz. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em vasos com 3,7 kg de amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com textura média. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado e os tratamentos foram distribuídos em arranjo fatorial 3x6+1, sendo seis rochas silicáticas (brecha, ultramáfica, biotita xisto, subproduto de mineração, flogopitito e subproduto de chapada), e quatro doses de potássio (0-controle; 200; 400; 600 kg K₂O ha⁻¹), com quatro repetições. Foram determinados o teor e o acúmulo de potássio (K), cobre (Cu), zinco (Zn) e níquel (Ni) na parte aérea e nos grãos de arroz e com esses dados foram calculados dois índices de eficiência da adubação potássica. Os resultados mostraram que as doses de potássio (K₂O), aplicadas pelas diferentes rochas moídas, promoveram alterações na nutrição, produção e eficiência da adubação potássica. A rocha ultramáfica e o subproduto de mineração destacaram-se entre as demais rochas, podendo ser recomendadas como fontes alternativas de K, Ni, Cu e Zn para a cultura do arroz.

Palavras-chave: condicionador de solo, fertilizantes alternativos, eficiência da adubação, nutrição de plantas.

ABSTRACT

NUTRIENT UPTAKE, AND USE EFFICIENCY IN RICE FERTILIZED WITH CRUSHED ROCKS

The objective of this work was to evaluate the effect of crushed rocks in nutrition, production and efficiency of potassic fertilization in rice. The experiment was carried under greenhouse conditions in pots with 3.7 dm³ of Oxisol soil samples. The experimental design was in completely randomized, in a 4 x 6 factorial layout, comprising six crushed rocks used as alternative multinutrient fertilizer (brecchia, biotite schist, ultramafic, two mining byproducts and phlogopitite), and four potassium doses (0-control; 200; 400; 600 kg K₂O ha⁻¹), with four replicates. The nutrient concentration, potassium, copper, zinc, nickel accumulation in shoot dry mass of rice were determinate. This data were used to evaluate the index of efficiency of potassic fertilization. The results showed that input rates of crushed rocks promoted alterations in nutrition, production and potassium use efficiency indexes became it an option to use like as an alternative fertilizer in rice cropping systems.

Key-words: alternative fertilizer, micronutrient, fertilization efficiency, plant nutrition, soil conditioner

INTRODUÇÃO

No Brasil, nas décadas de 70 e 80, foram realizados os primeiros estudos de materiais com baixa cinética de dissolução dos nutrientes. Nessa época, foram testadas novas rotas tecnológicas com o intuito de aumentar a solubilização dos nutrientes presentes em composição variada nas rochas fornecedoras de nutrientes. Dentre essas, destacam-se: a moagem, processos térmicos de fusão (LEITE, 1985), acidificação e solubilização por microrganismos, além de avaliações do potencial agrônomo dessas rochas para as culturas. Na época, esses processos mostraram-se inviáveis, devido à baixa liberação de nutrientes para as plantas, elevado gasto energético no processamento dos materiais e a competição com o cloreto de potássio (KCl).

Atualmente, o contexto da agricultura brasileira é diferente, assim como, as taxas de consumo de potássio (LOPES, 2005). O aumento no consumo de potássio na agricultura nos últimos anos, aliado a forte dependência de importação de fertilizantes contendo esse nutriente em sua composição e a carência de uma fonte de potássio para a agricultura orgânica (BAKKEN et al., 2000) fez com que a utilização dessas rochas viesse à tona novamente (VAN STRATEEN et al., 2006).

As rochas moídas são fertilizantes que podem ser considerados multinutrientes, pois além do potássio, têm em sua composição, minerais silicatados que possuem na sua matriz outros macro e micronutrientes em concentrações variadas, dentre os principais o fósforo, cálcio e o magnésio (WILPERT & LUKES, 2003; RIBEIRO et al., 2010).

Aliado ao fornecimento de macronutrientes, algumas rochas moídas promovem alterações nas características de acidez dos solos devido a seus variados valores de poder relativo de neutralização total (PRNT).

Devido ao fato de as rochas moídas terem de ser aplicadas em quantidades elevadas para fornecer macronutrientes e possuírem composição variada, também acabam por levar ao solo micronutrientes, que, ao longo dos anos, podem ser acumulados no solo (AMARAL SOBRINHO, 1992) e, conseqüentemente, nas diversas partes das plantas cultivadas em áreas onde houve a aplicação desses fertilizantes alternativos.

Diante disso, torna-se necessário avaliar o efeito da liberação dos nutrientes, sua absorção e acúmulo pelas plantas, bem como, a eficiência no uso do K dissolvido dos minerais presentes nesses fertilizantes. Para isso, o presente estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar o efeito de rochas moídas utilizadas como fertilizantes multinutrientes, que foram selecionados dentre diversos materiais promissores em termos de fornecimento de potássio, na nutrição e eficiência da adubação potássica na cultura do arroz.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, no período de novembro de 2010 a abril de 2011. Amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, com textura média, foram coletadas em Itutinga, MG, sob vegetação natural, na profundidade de 0 a 20 cm. Posteriormente, o solo coletado foi seco ao ar, destorroado, passado em peneira com abertura de quatro milímetros, homogeneizado e colocado nos vasos de cultivo na quantidade de 3,7 kg de solo por vaso. Concomitantemente, foram coletadas amostras de solo que foram utilizadas para caracterização química e física dos solos dos vasos de cultivo: pH (água) = 4,9; M.O = 0,8 dag kg⁻¹; K = 22 mg dm⁻³; S = 5,4 mg dm⁻³; P_(Mehlich1) = 0,9 mg dm⁻³; Ca = 0,1 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,1 cmol_c dm⁻³; Al = 0,1 cmol_c dm⁻³; H+Al = 1,7

$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{SB} = 0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $t = 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $T = 2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Fe} = 27,4 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{Zn} = 0,6 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{Cu} = 0,4 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{B} = 0,0 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{Mn} = 0,4 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{Areia} = 600 \text{ g kg}^{-1}$; $\text{Silte} = 170 \text{ g kg}^{-1}$; $\text{Argila} = 230 \text{ g}$ O delineamento experimental foi inteiramente casualizado e os tratamentos foram distribuídos em arranjo fatorial 4×6 , sendo seis rochas moídas, utilizadas como fertilizantes alternativos multinutrientes (brecha, ultramáfica, biotita xisto, subproduto de mineração, flogopitito e subproduto de chapada), e quatro doses de potássio (0-controle; 200; 400; 600 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$), com quatro repetições. As quantidades de rochas moídas foram definidas com base na concentração de óxido de potássio (K_2O) (Tabela 17).

As quantidades totais de rochas, em toneladas por hectare, correspondentes às doses de 200, 400 e 600 $\text{kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$ foram, respectivamente: Brecha (13,64; 27,28; 40,92 t de rocha ha^{-1}), ultramáfica (9,59; 19,18; 28,77 t de rocha ha^{-1}), subproduto de chapada (8,77; 17,54; 26,31 t de rocha ha^{-1}), subproduto de mineração (2,52; 5,04; 7,56 t de rocha ha^{-1}), biotita xisto (14,36; 28,72; 43,08 t de rocha ha^{-1}) e flogopitito (3,86, 7,72, 11,58 t de rocha ha^{-1}). As rochas foram adicionadas em sua granulometria original (Tabela 18), da forma que foram obtidas e que serão, provavelmente, utilizadas no campo, sem mais gastos energéticos de moagem que possam aumentar seu custo.

Além do potássio, as fontes utilizadas nesse estudo também são fornecedoras de micronutrientes, como níquel, cobre e zinco, que foram adicionados ao solo de cultivo em quantidades variadas, de acordo com a dose de K_2O aplicada, nos diferentes tratamentos (Tabela 19).

O valor de pH em água e os valores de poder relativo de neutralização total (PRNT) demonstram que além de fornecer K e micronutrientes as rochas também alteram as características de acidez do solo após sua aplicação (Tabela 20).

Após a adição das rochas aos vasos foi realizada a semeadura de 10 sementes de arroz cv. Curinga por vaso no dia 19/11/2010. Após a germinação das sementes, quando as plantas apresentavam folhas definitivas, foi realizado desbaste em cada vaso permanecendo, para o cultivo, somente duas plantas.

A umidade do solo foi mantida através de pesagens diárias dos vasos, amostrando-se aleatoriamente um vaso de cada tratamento, definindo-se a partir daí as quantidades de água em base de peso, a serem repostas por regas realizadas na superfície dos vasos. Esse controle da umidade foi realizado baseando-se na manutenção de água em 60% do volume total de poros (VTP).

A adubação de manutenção, foi realizada com reagentes (p.a) em todos os tratamentos, com 450 mg kg⁻¹ de P no plantio, 300 mg kg⁻¹ de N em três coberturas, e 50 mg kg⁻¹ de S junto com a segunda das coberturas nitrogenadas, sem adição de micronutrientes.

O experimento foi colhido aos 120 dias após a semeadura, quando as plantas foram seccionadas rente ao solo. Do material colhido foram separadas as folhas e o sistema radicular que foi retirado dos vasos com o auxílio de jato d'água dirigido sobre o substrato. Todo o material da planta foi acondicionado em sacos de papel e seco a 75°C em estufa com circulação de ar forçada até peso constante. Após a secagem, determinou-se o peso da massa seca de raiz e parte aérea. Posteriormente, a parte aérea e de grãos foram moídas, separadamente, sendo delas retiradas amostras equivalentes a dois gramas, as quais foram submetidas à digestão nitroperclórica para determinação nos extratos os teores de K, Ni, Cu e Zn.

O controle de qualidade das análises foi realizado com o uso de padrão de referência do NIST (National Institute of Standards and Technology) BCR[®] 414 – Plankton que possui teores conhecidos de Ni (18,8 mg kg⁻¹), Cu (29,5 mg kg⁻¹) e Zn (111,6 mg kg⁻¹), quantidades essas mais próximas àquelas esperadas para arroz, dentre os padrões de referência disponíveis. A taxa de recuperação foi de 85, 94 e 95% para Ni, Cu e Zn, respectivamente.

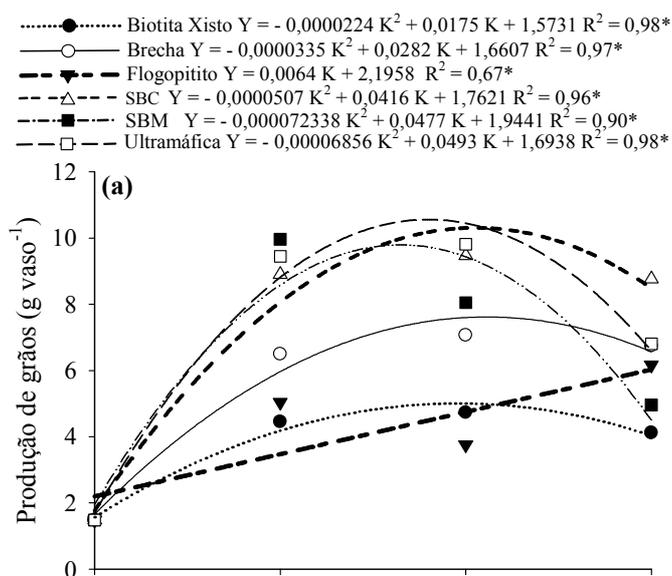
Os acúmulos de K, Ni, Cu e Zn foram determinados pelo produto entre o peso seco e o teor desses nutrientes na parte aérea ou grãos do arroz. Após a obtenção desses dados foram calculados os seguintes índices de eficiência da adubação potássica:

- Eficiência da produção de grãos (EPG) = produção de grãos com adubação potássica (mg) – produção de grãos sem adubação potássica (mg)/Dose de K₂O (mg); em mg de grãos/mg K₂O aplicado (FAGERIA, 2010).
- Recuperação do potássio Aplicado (RKA) = Acúmulo de K na parte aérea (mg) com adubação potássica - Acúmulo de K na parte aérea (mg) sem adubação/Dose de K₂O aplicada (mg) x 100; em % (FAGERIA, 2010).

Os dados foram submetidos à análise de variância e, sendo detectadas diferenças, aplicou-se o teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade, por meio do software SISVAR 4.3[®] (FERREIRA, 2003) para as comparações entre médias e, para os efeitos de doses e rochas e sua interação, aplicaram-se análises de regressão, sendo os modelos matemáticos escolhidos segundo as equações com melhores ajustes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi observada significância na análise de variância ($p < 0,05$) entre doses, fontes, bem como para a interação entre esses fatores para a produção de grãos, massa seca da parte aérea e raízes, teor e acúmulo de K, Ni e Zn na parte aérea e K, Ni, Cu e Zn nos grãos do arroz. As rochas moídas aplicadas promoveram aumento na massa seca de parte aérea e de raízes do arroz com o incremento nas doses de potássio (K_2O) aplicadas pelas rochas moídas, enquanto que o reflexo na produção de grãos foi variado (Figuras 9a, 9b e 9c).



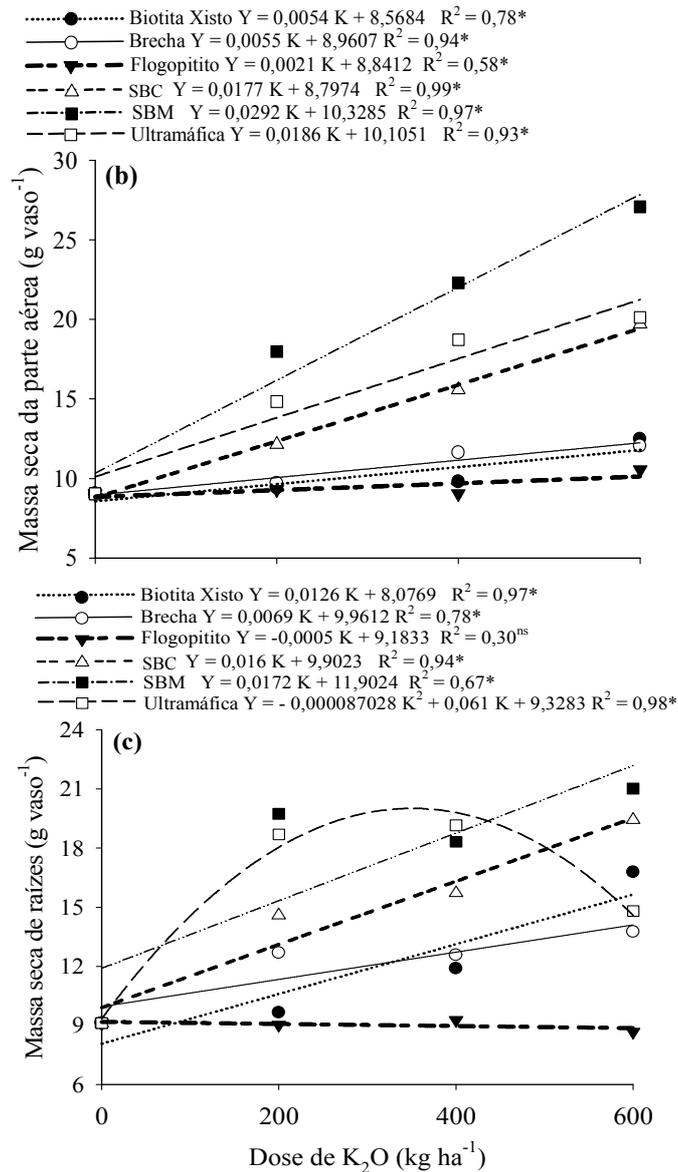


Figura 9. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O na produção de grãos (a), massa seca da parte aérea (b) e de raízes (c) do arroz.

A maior produção de grãos de arroz ocorreu com a aplicação da ultramáfica na dose de $360 \text{ kg de } K_2O \text{ ha}^{-1}$ ($10,56 \text{ g vaso}^{-1}$), enquanto que a menor produção de grãos ocorreu sem a aplicação de rochas moídas ($1,48 \text{ g vaso}^{-1}$). Independentemente da dose de K_2O

aplicada, a biotita xisto e o flogopitito, foram às rochas silicáticas que promoveram menor produção de grãos de arroz. Já, os maiores valores de produção de grãos, independentemente das doses de K_2O , ocorreram com a aplicação do subproduto de chapada e da ultramáfica.

FAGERIA (2010) avaliou o efeito do potássio na produção de diferentes genótipos de arroz e obteve valores entre 10,07 e 16,37 g planta⁻¹, sendo a média dos genótipos testados 13,62 g planta⁻¹.

BARBOSA FILHO et al. (2006) em estudos para avaliar o efeito de diferentes rochas silicáticas na nutrição potássica e na produção do arroz de terras altas verificaram que a rocha ultramáfica se destacou e, foi superior, ao flogopitito e a brecha alcalina não se diferenciando do cloreto de potássio no que se refere a fornecimento de K.

A massa seca da parte aérea e de raízes do arroz mostrou um comportamento linear, ou seja, aumentou com a elevação na dose de K_2O aplicada pelas rochas. A exceção foi para a massa seca de raízes do arroz adubado com a ultramáfica que apresentou efeito quadrático devido à queda de produção na dose máxima. Essa queda na produção de grãos e raízes pode ter sido ocasionada pelo excesso de sódio presente na composição da ultramáfica (Tabela 17) que quando liberado para o solo de cultivo do arroz ocasionou um desbalanço de cátions no solo e aumento da salinidade da solução refletido em um menor crescimento de raízes com efeito negativo na produção de grãos na dose de 600 kg de K_2O ha⁻¹, fator que não foi limitante nas menores doses devido a quantidade menor de rocha aplicada (Tabela 19). CARMONA et al. (2009) destacam os principais efeitos adversos da salinidade e da saturação por sódio no crescimento das raízes de arroz sob diferentes manejos da adubação potássica. Os autores ressaltam uma diminuição pronunciada do crescimento radicular em condições e estresse salino. Essa diminuição ocorreu devido à

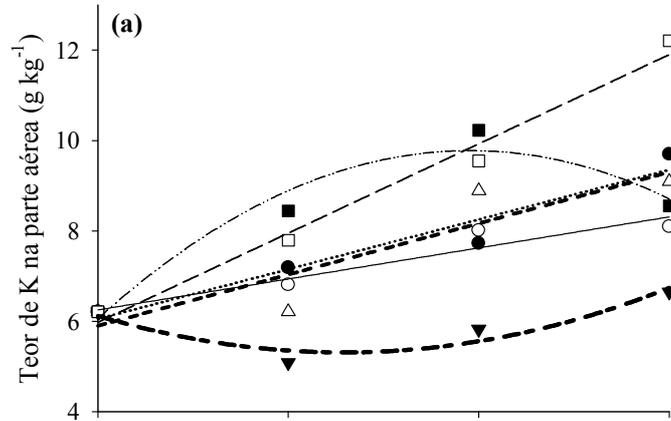
salinidade prejudicar a absorção de nutrientes devido a competição química entre o Ca, Mg e K com o sódio.

O aumento no teor de sódio trocável no solo com a aplicação da rocha ultramáfica também foi verificado por RESENDE et al. (2006) e RIBEIRO et al. (2010) que relatam valores de sódio na CTC potencial variando entre 5 a 16% da saturação por bases do solo com dose máxima de 300 kg de K_2O ha^{-1} aplicado na forma de rochas moídas, brecha e ultramáfica.

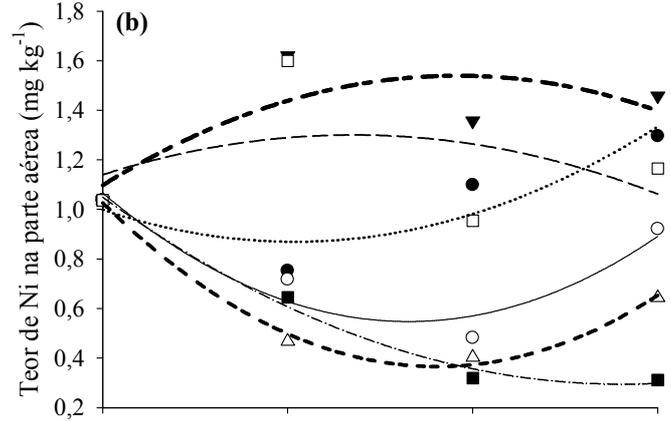
A sequência decrescente da produção de massa seca da parte aérea e de raízes do arroz nos tratamentos com diferentes doses de K_2O aplicados na forma de rochas moídas foi a seguinte: subproduto de mineração > ultramáfica > subproduto de chapada > biotita xisto = brecha = flogopitito. Para cada 100 kg de K_2O ha^{-1} aplicados na forma de subproduto de mineração houve uma resposta em produção de massa seca da parte aérea de 2,92 g $vaso^{-1}$, enquanto que, para o flogopitito esse valor foi de 0,21 g $vaso^{-1}$, o que destaca a diferença entre esses fertilizantes alternativos em liberar nutrientes e melhorar a nutrição do arroz com reflexos positivos em produção de biomassa.

O teor de K na parte aérea do arroz variou no intervalo de 5,09 a 12,21 g kg^{-1} (Figura 10a), fato que ressalta a importância do retorno da parte aérea do arroz a área de cultivo. Isso deve ser feito, pois o K presente nesse resíduo orgânico da colheita dos grãos possa ser utilizado pela cultura a ser cultivada em sucessão, principalmente quando se trata de sistemas orgânicos onde as fontes de potássio passíveis de serem utilizadas são escassas.

-●..... Biotita Xisto $Y = -0,0003422 K^2 + 0,0055 K + 6,055 R^2 = 0,93^*$
- Brecha $Y = 0,0034 K + 6,2523 R^2 = 0,92^*$
- ▼--- Flogopitito $Y = 0,000012172 K^2 - 0,0063 K + 6,1214 R^2 = 0,88^{ns}$
- △--- SBC $Y = 0,0057 K + 5,9025 R^2 = 0,83^*$
- SBM $Y = -0,000024375 K^2 + 0,019 K + 6,06 R^2 = 0,94^*$
- Ultramáfica $Y = 0,099 K + 5,9788 R^2 = 0,98^*$



-●..... Biotita Xisto $Y = 0,000003011 K^2 - 0,012 K + 0,9978 R^2 = 0,99^*$
- Brecha $Y = 0,0000047411 K^2 - 0,031 K + 1,0662 R^2 = 0,90^*$
- ▼--- Flogopitito $Y = -0,0000030120 K^2 + 0,023 K + 1,0972 R^2 = 0,59^*$
- △--- SBC $Y = 0,0000050586 K^2 - 0,037 K + 1,0267 R^2 = 0,99^*$
- SBM $Y = 0,0000024 K^2 - 0,027 K + 1,0493 R^2 = 0,99^*$
- Ultramáfica $Y = -0,000002197 K^2 + 0,0012 K + 1,1398 R^2 = 0,13^{ns}$



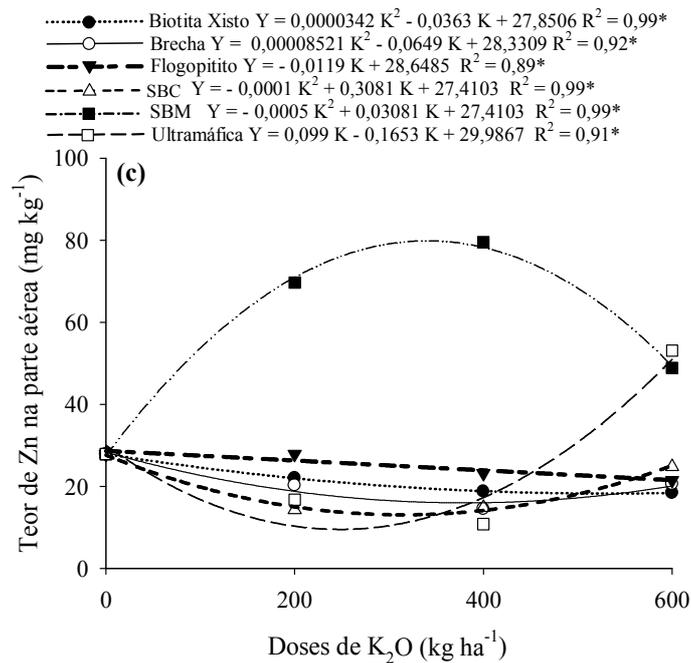


Figura 10. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K₂O no teor de potássio (a), níquel (b) e zinco (c) na parte aérea do arroz.

De maneira geral os teores de potássio na massa seca da parte aérea aumentaram com o incremento nas doses de rochas moídas aplicadas. Da mesma forma que a produção de grãos e a massa seca da parte aérea e raízes, os maiores teores médios desse nutriente ocorreram com a aplicação do subproduto de mineração e da ultramáfica, e o menor quando o arroz foi fertilizado com o flogopitito.

Por outro lado, o teor de níquel teve efeito diferenciado com a aplicação das rochas moídas (Figura 10b). Os teores de Ni na parte aérea do arroz foram mais elevados nas rochas que adicionaram mais níquel ao solo (Tabela 19), ou seja, ultramáfica, flogopitito e biotita xisto. As rochas ultramáficas em geral são as que apresentam maiores teores totais de Ni em sua composição (BRADY, 2002). Entretanto a dissolução dos minerais é variada

o que pode influenciar a disponibilidade do Ni e de todos outros nutrientes presentes na composição das rochas moídas. Nesse ínterim, é relevante o estudo de extratores que quantifiquem o teor do nutriente disponível, pois o total pode não ser liberado durante o período de cultivo.

Para o Ni presente em tecidos de folhas maduras de várias espécies a suficiência ocorre no intervalo entre 0,1-5 mg kg⁻¹, e o excesso (toxidez) com teores entre 10-100 mg kg⁻¹ (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001). Portanto, pode-se dizer que nesse estudo os teores de níquel na parte aérea do arroz se encontram na faixa de suficiência.

Outro micronutriente liberado pelos fertilizantes alternativos é o Zn que foi encontrado na parte aérea do arroz em teores na faixa de 79,5 e 10,8 mg kg⁻¹, na dose de 200 kg de K₂O ha⁻¹ aplicado pelo subproduto de mineração, e 400 kg de K₂O ha⁻¹ aplicado pela ultramáfica, respectivamente. O subproduto de mineração se destacou entre as rochas no aumento do teor de Zn na parte aérea da alface.

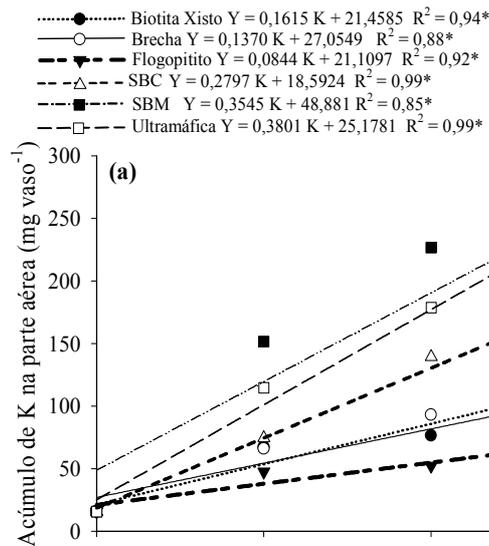
De acordo com estudos realizados por FAGERIA (2000) teores de Zn na massa seca do arroz considerados adequados e tóxicos são 67 e 673 mg kg⁻¹, respectivamente. Dessa forma, dentre os materiais selecionados o subproduto de mineração surge como uma fonte alternativa desse micronutriente para o arroz, aliado ao fato de ainda liberar K, Ni e Cu.

Aliado a isso, deve-se ressaltar a necessidade de aplicação de Zn em grande parte dos solos brasileiros onde ocorre baixa disponibilidade desse micronutriente para as culturas (OLIVEIRA et. al 2005), dentre elas o arroz, afirmação que reforça a possibilidade de utilização de fontes alternativas que levem não só o K mais também micronutrientes, como nesse caso o Zn, e em menores quantidades o Cu e o Ni.

O resultado do teor de nutriente na parte aérea é importante no que se refere a nutrição de plantas, porém, precisa ser relacionado com a produção devido ao efeito da

diluição do nutriente na planta. Duas plantas com a mesma concentração de determinado nutriente na parte aérea podem ter valores de produção diferentes o que reflete em valores absorvidos e acumulados diferentes nas diversas partes dessas plantas. Para que ocorra essa diferenciação, é muito importante o cálculo do acúmulo de nutrientes que é o resultado do produto entre o teor do nutriente e a produção de massa seca e ou grãos pela planta.

Neste contexto, pode-se dizer que da mesma forma que o teor de K o acúmulo foi mais elevado quando o arroz foi fertilizado com o subproduto de mineração e a ultramáfica. O acúmulo de potássio aumentou com o incremento nas doses desse macronutriente aplicado na forma de rochas moídas (Figura 11a).



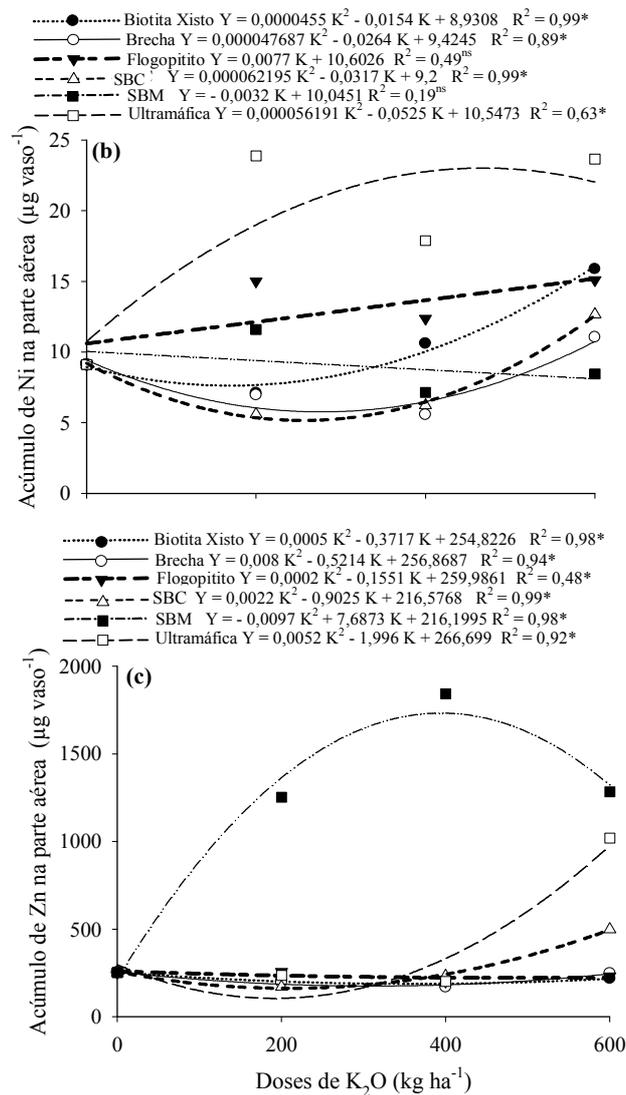


Figura 11. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no acúmulo de potássio (a), níquel (b), cobre (c) e zinco (d) na parte aérea do arroz.

Para cada 100 kg de K_2O ha^{-1} aplicados na forma de subproduto de mineração e ultramáfica houve uma resposta em acúmulo na parte aérea de 35,45 e 38,01 mg de K vaso⁻¹, respectivamente.

As rochas que promoveram maiores valores de acúmulo médio de K na parte aérea do arroz, em ordem decrescente foram: subproduto de mineração = ultramáfica > subproduto de chapada > biotita xisto = brecha > flogopitito. Essas diferenças no teor e acúmulo de K na parte aérea do arroz, fertilizado com as diversas rochas moídas, demonstra o diferente potencial de liberação do K da rocha para o solo entre esses fertilizantes alternativos, refletindo na nutrição potássica da cultura do arroz.

Da maneira semelhante ao que ocorreu para o teor de Ni, as rochas ultramáfica, flogopitito e a biotita xisto, se diferenciaram entre si e das demais no que se refere a acúmulo de Ni na parte aérea do arroz (Figura 11b). Já para o Zn, foi o subproduto de mineração que promoveu maiores valores de acúmulo na parte aérea das plantas de arroz se diferenciando dos demais materiais (Figura 11c).

Essa diferença entre as rochas moídas pode ser explicada devido o subproduto de mineração ter maiores teores totais de Zn em sua composição (Tabela 19) e adicionar maiores quantidades de Zn disponível em comparação as demais rochas moídas. Ressalta-se ainda, que as rochas moídas foram aplicadas com base nos teores de potássio e levaram ao solo quantidades variadas de micronutrientes que se refletiram em diferentes teores e acúmulo na massa seca da parte aérea do arroz.

As doses de potássio aplicadas pelas rochas moídas influenciaram significativamente ($p < 0,05$) o teor e o acúmulo de Cu na parte aérea do arroz (Figura 12a e 12b). Por outro lado, os tipos de rochas moídas tiveram significância apenas para o acúmulo de Cu na parte aérea (Figura 12c).

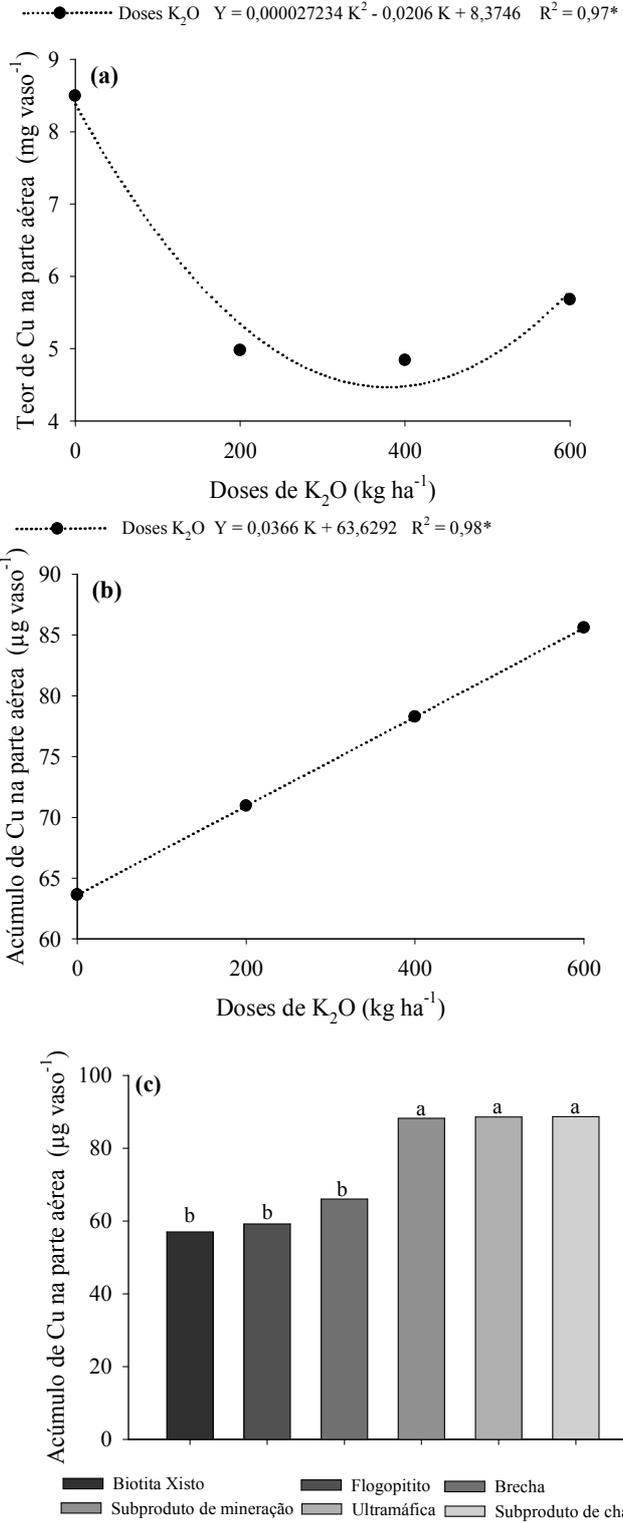


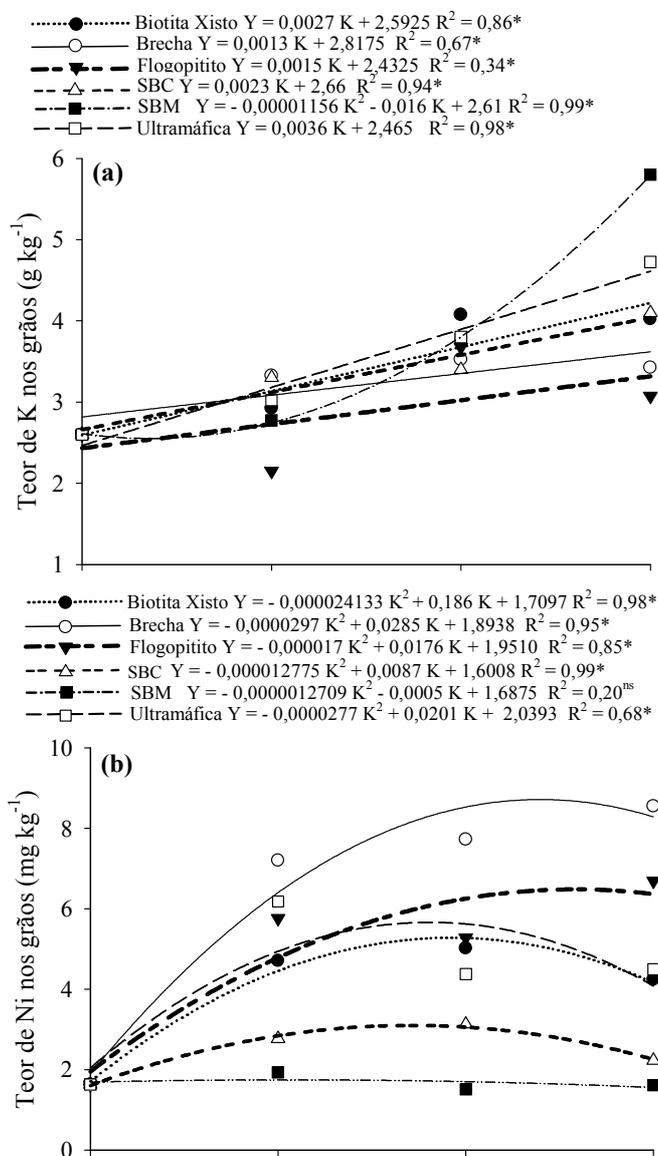
Figura 12. Efeito de doses potássio (K₂O) aplicadas por rochas moídas multinutrientes no teor (a) e acúmulo de cobre (b), (c) na parte aérea do arroz.

O teor de Cu na parte aérea do arroz foi maior onde não houve a aplicação das rochas moídas. Isso aconteceu devido ao efeito diluição do nutriente, que no tratamento testemunha (sem aplicação de rochas moídas) estava em maior concentração na parte aérea porque a produção de biomassa foi menor. Quando se observa os resultados do acúmulo de Cu na parte aérea (Figura 4b) pode-se ver que o acúmulo de Cu (produto entre o teor e produção de massa seca) aumentou com a quantidade de K_2O aplicada na forma de rocha moída. Para cada 100 kg de K_2O ha^{-1} aplicados na forma de rocha moída houve uma resposta em acúmulo de Cu na parte aérea do arroz de $3,66$ mg vaso $^{-1}$.

Em relação ao efeito das rochas, isoladamente das doses de K_2O , no acúmulo de Cu pelo arroz, nota-se, que as rochas moídas foram separadas em dois grupos (Figura 12c). No primeiro grupo, que promoveu os maiores valores de acúmulo de Cu na parte aérea ficaram: o subproduto de mineração, ultramáfica e subproduto de chapada e, no segundo grupo, ficaram a biotita xisto, flogopitito e brecha com os menores valores de acúmulo de Cu. Essa resposta das plantas está de acordo com a quantidade aplicada de Cu nos tratamentos que foram definidos com base no teor de K_2O (Tabela 19).

O teor e o acúmulo de nutrientes nos grãos dependem diretamente da capacidade de translocação dos mesmos nas plantas. Dessa forma, a translocação pode ser definida como o movimento ou a transferência do íon, do local de absorção na raiz para outro ponto qualquer, dentro ou fora da raiz (MALAVOLTA et al., 1997). Neste sentido, alguns nutrientes podem ser translocados para a parte comestível, que no caso do arroz são grãos, e promover riscos à saúde humana (MARTINS et al., 2003; RANGEL et al., 2006). De acordo com Chaney (1980), o Ni, Cu e o Zn estão no grupo dos elementos químicos nos quais as plantas não conseguem restringir a translocação e, conseqüentemente, sua entrada na cadeia alimentar.

O teor e o acúmulo de K, Ni, Cu e Zn nos grãos do arroz aumentaram com o incremento nas doses de K₂O aplicadas na forma de rochas moídas (Figuras 13 e 14). Na grande parte das situações o teor e o acúmulo de determinado elemento químico, nutriente de plantas ou não, nas diferentes partes das plantas ocorre em função da sua disponibilidade no solo e os teores na planta aumentam com a elevação da sua concentração na solução do solo (GUSSARSSON et al., 1995).



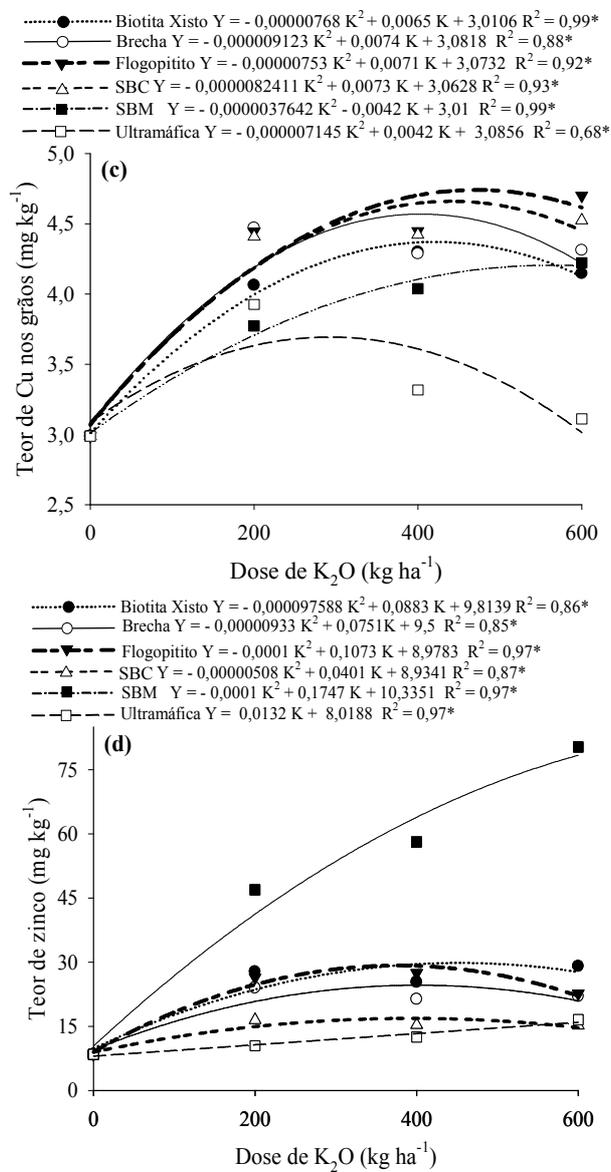
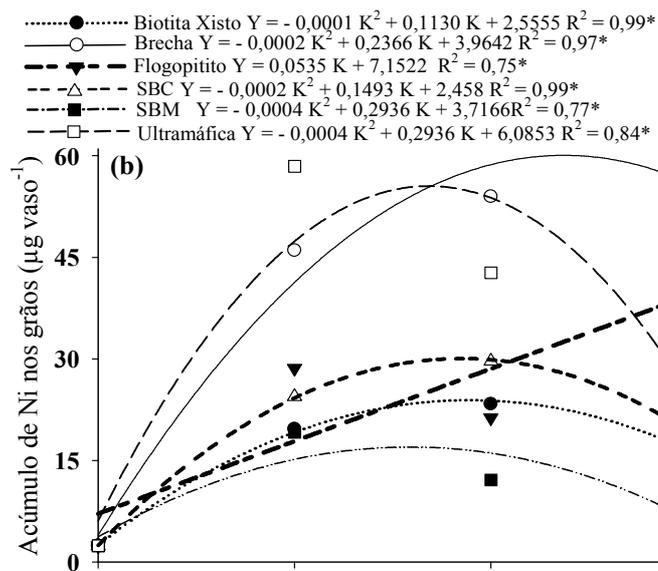
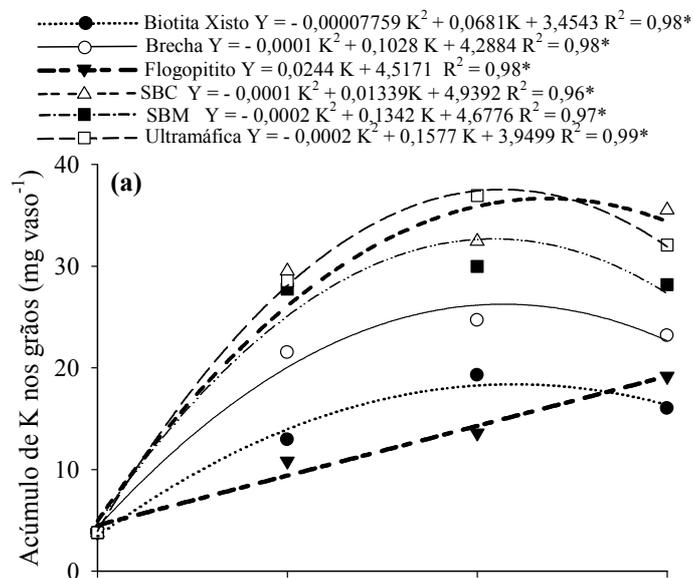


Figura 13. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no teor de potássio (a), níquel (b), cobre (c) e zinco (d) nos grãos do arroz.



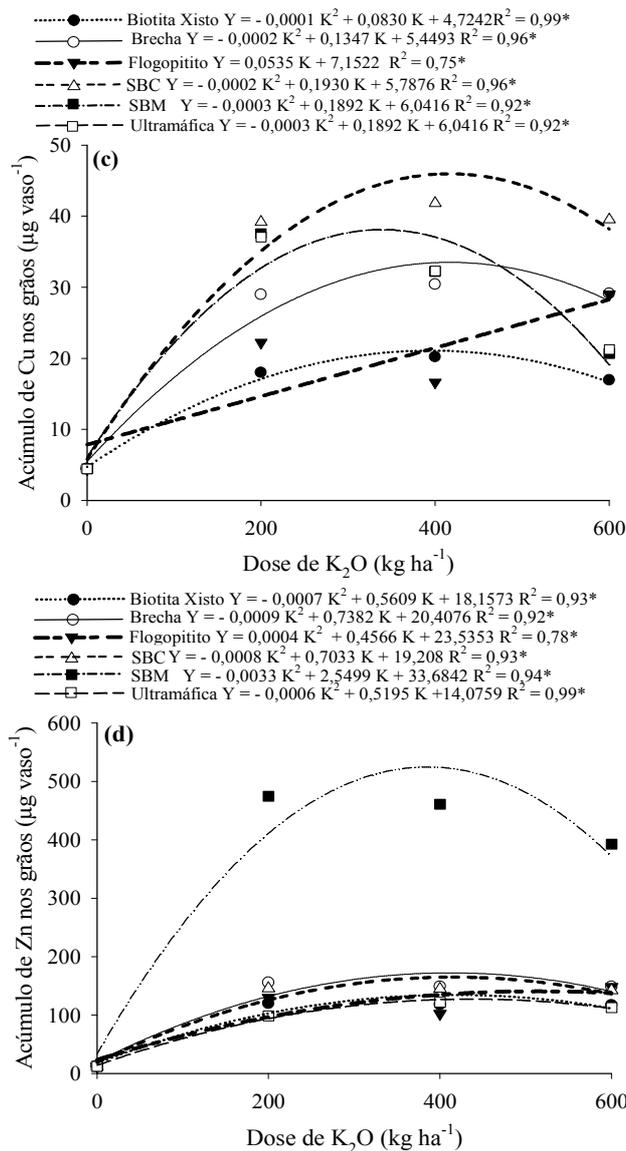


Figura 14. Efeito da aplicação de rochas moídas em diferentes doses de K_2O no acúmulo de potássio (a), níquel (b), cobre (c) e zinco (d) nos grãos do arroz.

As rochas que proporcionaram maior teor e acúmulo de K nos grãos foram o subproduto de mineração, ultramáfica e subproduto de chapada (Figura 13a e 14a). FAGERIA et al. (1982) relatam que grande parte do potássio absorvido é acumulado na parte aérea da planta e que pequena parte é translocada para os grãos do arroz.

Cerca de 76 a 86% do K absorvido é encontrado na parte aérea e 11 a 21% translocado para os grãos, dependendo da cultivar (FAGERIA, 1991). Segundo REUTER & ROBINSON (1997) uma concentração de potássio nos grãos de arroz abaixo de 4 g kg^{-1} é considerada deficiente.

Para o Ni as diferentes doses de rochas aplicadas promoveram efeitos variados nos teores e acúmulos de nutriente nos grãos de arroz. As rochas que promoveram maior acúmulo de Ni nos grãos, em ordem decrescente foram as seguintes: brecha > ultramáfica > flogopitito = subproduto de chapada > biotita xisto > subproduto de mineração.

O teor e o acúmulo de Cu nos grãos do arroz, independentemente das doses, foram maiores com a utilização do subproduto de chapada. Isso ocorreu devido a maior concentração de Cu nessa rocha moída (Tabela 19) que proporcionou maior liberação de Cu para o solo e absorção e translocação desse micronutriente para os grãos do arroz.

Segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ALIMENTAÇÃO (ABIA, 1985) o limite máximo de tolerância de Cu nos grãos é de 30 mg kg^{-1} . No presente estudo nenhuma das rochas avaliadas proporcionou teores de Cu nos grãos nem se quer próximo do limite imposto pela ABIA.

Já no caso do Zn, os teor máximo permitido nos grãos é de 50 mg kg^{-1} . Nesse caso o subproduto de mineração quando aplicado em doses mais elevadas promoveu elevação no teor de Zn nos grãos de arroz acima do teor máximo sugerido pela ABIA.

SILVA et al., (2007) avaliaram a absorção e a translocação de Cu e Zn para os grãos das plantas de arroz cultivadas em solos contaminados com esses elementos. Os autores concluíram que a planta de arroz restringiu a transferência de Cu no solo para o grão o que não ocorreu para o Zn proporcionando teores de Zn maiores do que o considerado

adequado pela ABIA. Nesse mesmo estudo, os teores médios de Cu e Zn nos grãos do arroz ficaram na faixa de 9,64 a 22,45 mg kg⁻¹ para o Cu e 30,02 a 171,09 mg kg⁻¹ para o Zn.

Os índices de eficiência de uso de nutrientes pelas culturas são de grande valia para a avaliação do aproveitamento de nutrientes e a resposta em produção pelas plantas (SILVA et al., 2010). Neste contexto, foi observado que a eficiência agrônômica e a recuperação do potássio aplicado diminuíram com o aumento na quantidade de potássio aplicada na forma de rochas moídas (Tabela 22). A eficiência agrônômica separou as rochas em dois grupos: no primeiro grupo a ultramáfica e os subprodutos de mineração e chapada que proporcionaram maior resposta da planta em produção de grãos por kg de K₂O aplicado e, no segundo grupo, ficaram o flogopitito, brecha e a biotita xisto com valores de eficiência agrônômica menores.

FAGERIA et al. (2010) avaliaram a utilização do potássio por diferentes genótipos de arroz e encontrou valores de eficiência agrônômica variando no intervalo de 4,11 a 11,33 mg mg⁻¹ com média de 8,90 mg mg⁻¹. No presente estudos os valores de eficiência agrônômica do potássio fornecido por rochas moídas variaram com o aumento nas doses de K₂O e com os diferentes tipos de rochas moídas fornecedoras de K, na faixa de 2,4 a 22,9 mg mg⁻¹. Essa variação nos valores de eficiência agrônômica ressalta a diferença na capacidade das rochas moídas em liberar o potássio presente na estrutura dos minerais e, conseqüentemente em fornecer K para as plantas adubadas, que tiveram variadas respostas em produção com a aplicação das rochas moídas como fonte de nutrientes (Tabela 17 e 19) e corretivos da acidez (Tabela 20).

A capacidade da planta em absorver nutrientes da solução do solo é estreitamente relacionada com a eficiência agrônômica do potássio que é transportado no solo, principalmente por difusão e outra parte menor por fluxo de massa (ROSOLEM et al.,

2003). Dessa forma, a medida que ocorre um aumento do volume de raízes, o contato do K na solução com as raízes do arroz é facilitado, melhorando o aproveitamento do K com maior resposta em produção no arroz. Pode-se notar que as rochas que proporcionaram maior eficiência agrônômica no uso do K também foram as que tiveram maior crescimento do sistema radicular (Figura 9c).

Tabela 22. Eficiência agrônômica da adubação potássica e recuperação do potássio aplicado no arroz adubado com diferentes doses de rochas moídas.

Rocha moída	Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)			Médias
	200	400	600	
	Eficiência agrônômica (mg massa seca de grãos mg de potássio aplicado ⁻¹) ⁽⁴⁾			
Biotita xisto	8,0 aC	4,4 bC	2,4 bA	4,9
Brecha	13,5 aB	7,5 bB	4,7 bA	8,6
Flogopitito	9,6 aC	3,1 bC	4,2 bA	5,6
SBC ⁽²⁾	20,0 aA	10,8 bA	6,6 cA	12,5
SBM ⁽³⁾	22,9 aA	8,9 bB	3,1 cA	11,6
Ultramáfica	21,5 aA	11,3 bA	4,8 cA	12,5
Médias	15,9	7,7	4,3	
Rocha moída	Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹)			Médias
	200	400	600	
	Recuperação do potássio aplicado (%) ⁽⁵⁾			
Biotita xisto	16,4 aD	10,3 bD	10,5 bB	12,4
Brecha	18,4 aD	13,3 bD	9,2 bB	13,6
Flogopitito	10,5 aE	6,3 aE	6,3 aB	7,7
SBC	22,8 aC	20,6 aC	17,7 aA	20,4
SBM	43,2 aA	32,0 bA	21,2 cA	32,2
Ultramáfica	33,5 aB	26,5 bB	23,5 bA	27,8
Médias	24,1a	18,1b	14,7c	

⁽¹⁾ Letras minúsculas comparam doses dentro de cada fonte. Letras maiúsculas comparam as fontes dentro de cada dose pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. ⁽²⁾ Subproduto de chapada. ⁽³⁾ Subproduto de mineração. ⁽⁴⁾ Eficiência Agrônômica do K Aplicado (EAK) = massa seca da parte aérea com adubação potássica (mg) – massa seca parte aérea sem adubação potássica (mg) / Dose de K₂O (mg); em mg de massa seca de parte aérea/mg K₂O aplicado (FAGERIA, 2010). ⁽⁵⁾ Recuperação do potássio Aplicado (RKA) = Acúmulo de K na parte aérea (mg) com adubação potássica - Acúmulo de K na parte aérea (mg) sem adubação / Dose de K₂O aplicada (mg) x 100; em % (FAGERIA, 2010).

Assim como para a eficiência agronômica, a recuperação do potássio aplicado foi maior com a aplicação do subproduto de mineração o que reforça a viabilidade de utilização desse material como importante fonte de nutrientes. Além do subproduto de mineração a ultramáfica mostrou ser uma alternativa de fonte de nutrientes combinado com seu poder corretivo da acidez do solo.

FAGERIA et al. (2010) encontraram valores de recuperação do potássio aplicado na faixa de 4,87 a 38,55 % para diferentes genótipos de arroz na ausência de K (somente o disponível no solo: 94 mg kg^{-1}) e na dose de 200 mg kg^{-1} aplicado na forma de cloreto de potássio, respectivamente.

CONCLUSÕES

As rochas moídas podem ser utilizadas como fontes de nutrientes por promoverem apreciável e variada liberação de potássio, níquel, cobre e zinco, e consequente aumento igualmente variado nos teores e acúmulo desses nutrientes na parte aérea e nos grãos do arroz, com reflexos positivos em produção. Além disso, as rochas moídas possuem valores diversificados quanto a sua neutralização da acidez representada pelo PRNT.

O subproduto de mineração além de fornecer potássio também é importante fonte de zinco com 2,8% desse micronutriente em sua composição.

A eficiência agronômica e a recuperação do potássio aplicado no arroz diminuem com o aumento na quantidade de rocha moída aplicada, semelhante, ao que ocorre com a aplicação de fertilizantes solúveis, como o cloreto de potássio.

A rocha ultramáfica e o subproduto de mineração se destacaram entre as demais rochas moídas no que diz respeito à nutrição, produção e eficiência da adubação potássica no arroz, podendo ser recomendadas como fontes alternativas dos nutrientes K, Ni, Cu e Zn.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIA (São Paulo, SP). **Compêndio da legislação dos alimentos**. São Paulo, 1985. Não paginado.

AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; COSTA, L.M., OLIVEIRA, C.; VELLOSO, A.C.X. Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.271- 276, 1992.

BAKKEN, A. K.; GAUTNEB, H.; SVEISTRUP. T.; MYHR, K. Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.56, p.53-57, 2000.

BARBOSA FILHO, M.P.B.; FAGERIA, N.K.; SANTOS, D.F.; COUTO, P.A. Aplicação de rochas silicáticas como fontes alternativas de potássio para a cultura do arroz de terras altas. **Espaço & Geografia**, v.9, p.63-84, 2006.

BRADY, N.C.; R.R. WEIL. **The nature and properties of soils**. 13th ed. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ, U.S.A. 2002. 960p.

CARMONA, F.C.; ANGHINONI, I.; MEURER, E.J.; HOLZSCHUH, M.J.; FRAGA, T.I. Estabelecimento do arroz irrigado e absorção de cátions em função do manejo da adubação potássica e do nível de salinidade no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.371–383, 2009.

CHANEY, R.L. Health risks associated with toxic metals in municipal sludge. In: _____.

BITTON, G.; DAMRON, B.L.; EDDS, G.T.; DAVIDSON, J.M. (Ed.). **Sludge health risks of land application**. Ann Arbor: Ann Arbor Science, 1980. p.59-83.

FAGERIA, N. K., M. P. BARBOSA FILHO, AND J. R. P. CARVALHO. Response of upland rice to phosphorus fertilization on an Oxisol of central Brazil. **Agronomy Journal**, v.74, p.51–56, 1982.

FAGERIA, N. K. Response of rice cultivars to phosphorus fertilization on a dark red latosol of central Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.63–67, 1991.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, p.390 -395, 2000.

FAGERIA, N.K.; SANTOS, A.B.; MORAES, M.F. Yield, Potassium Uptake, and Use Efficiency in Upland Rice Genotypes. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v.41, p. 2676-2684, 2010.

FERREIRA DF. 2003. **Sisvar versão 4.2**. DEX/UFLA.

GUSSARSSON, M.; ADALSTEINSSON, P.J.; JENSÉN, P.; ASP, H. Cadmium and copper interactions on the accumulation and distribution of Cd and Cu in birch (*Betula pendula* Roth) seedlings. **Plant Soil**, v.171, p.185-187, 1995.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413 p.

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**. Dissertação de Mestrado. Lavras: Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1985. 146p.

LOPES, A.S. Reservas de minerais de potássio e produção de fertilizantes potássicos no Brasil. In: _____. YAMADA, T. & ROBERTS, T.L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 2005. p. 21-32.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MARTINS, A.L.C.; BATAGLIA, O.C.; CAMARGO, O.A.; CANTARELLA, H. Produção de grãos e absorção de Cu, Fe, Mn e Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto, com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.563-574, 2003.

OLIVEIRA, C.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MARQUES, V. S.; MAZUR, N. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto enriquecido com cádmio e zinco na cultura do arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.109-116, 2005.

RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A.; BETTIOL, W.; DYNIA, J.F. Efeitos de aplicações de lodo de esgoto sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.583-594, 2006.

RESENDE, A.V.; MARTINS, E.S.; SENA, M.C.; MACHADO, C.T.T.; KINPARA, D.I.; OLIVEIRA FILHO, E.C. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço & Geografia**, v.9, p.17-40, 2006.

REUTER, D.J.; ROBINSON, J.B. **Plant analysis in interpretation manual**. 2.ed., Collingwood: CSIRO Publishing, 1997. 570p.

RIBEIRO, L.S.; SANTOS, A.R.; SOUZA, L.F.S.; SOUZA, J.L. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.891-897, 2010.

ROSOLEM, C.A.; MATEUS, G.P.; GODOY, L.J.G.; FELTRAN, J.C.; BRANCALIÃO, S.R. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.875 - 884, 2003.

SILVA, D.R.G.; COSTA, K.A.P.; FAQUIN, V.; OLIVEIRA, I.P.; SOUZA, M.R.F; SOUZA, M.A.S. Eficiência nutricional e aproveitamento do nitrogênio pelo capim-marandu de pastagem em estágio moderado de degradação sob doses e fontes de nitrogênio. **Ciência & Agrotecnologia**, v.35, p.242-249, 2010.

SILVA, M.L.S.; VITTI, G.C.; TREVIZAM, A.R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.527-535, 2007.

VAN STRAATEN, P.V. Farming with rocks and minerals: Challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.78, p.731-747, 2006.

WILPERT, K.; LUKES, M. Ecochemical effects of phonolite rock powder, dolomite and potassium sulfate in a spruce stand on an acidified glacial loam. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.65, p.115-127, 2003.

PERSPECTIVAS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS

Com base na realização desse trabalho, participação em seminários, cursos e em outros projetos de pesquisa relacionados ao potencial de uso de fontes alternativas de nutrientes a seguir são sugeridas perspectivas e prioridades para novas pesquisas sobre fertilizantes alternativos.

Primeiramente deve ser feito um detalhado levantamento geológico dos depósitos minerais onde os materiais já são utilizados como fornecedores de nutrientes e corretivos da acidez do solo, e os com potencial de uso. A realização de análises para caracterização petrográfica, mineralógica e química desses depósitos minerais é primordial para avaliação do potencial dos depósitos minerais, bem como para entendimento e avaliação do fornecimento de nutrientes as plantas.

Inicialmente, os estudos devem priorizar depósitos com rochas que tenham maior concentração de nutrientes e poder relativo de neutralização da acidez do solo. Alguns exemplos desses materiais e que atendem esses critérios: verdete, fonolito, micaxistos, brechas alcalinas, ultrabásicas alcalinas, carbonatitos e kimberlitos.

Também é necessária a regulamentação, normatização, especificação e incentivo pelo governo federal, do uso das rochas e subprodutos para a produção e uso dessas fontes alternativas de nutrientes e corretivos de acidez do solo por meio de legislação específica e complementar.

Devem ser realizados estudos para obtenção de novas rotas tecnológicas com obtenção de novos produtos com liberação mais rápida do que a aplicação dessas fontes sem nenhum processamento (“in natura”). Sugestões são as vias: térmica, química e hidrometalúrgica.

Além desses processos, são necessários levantamentos dos estudos já realizados e novos estudos sobre biossolubilização que aumentem a disponibilidade dos nutrientes contidos nas rochas por meio de processos microbiológicos.

Avaliações agronômicas de diferentes rochas moídas com potencial de uso na agricultura devem ser conduzidas para analisar o efeito na nutrição e produção das mais diversificadas culturas e seus sistemas de produção. Cabe aqui um destaque para a avaliação da utilização de rochas moídas como supridoras de potássio em sistemas orgânicos, pois, atualmente, os agricultores têm poucas opções de fontes supridoras desse nutriente para as plantas.

Aliado a isso, também devem ser realizados amplos estudos sobre a viabilidade econômica e de impacto ambiental.

ANEXOS

Anexo A: Lista de Siglas

Tabela A1. Lista de siglas

Unidade	Representação
Acidez potencial	H + Al
Alumínio	Al
Cálcio	Ca
Cobre	Cu
Capacidade de Troca Catiônica	CTC
Centimol de carga	cmol _c
Decímetro cúbico	dm ⁻³
Fósforo	P
Giga grama por ano	Gg ano ⁻¹
Gramas	g
Graus Celsius	°C
Graus de latitude sul	°S
Hectare	ha
Kilograma	kg
Litro	L
Magnésio	Mg
Matéria Orgânica	M.O.
Metro	m
Miligrama	mg
Mililitro	mL
Nitrogênio	N
Níquel	Ni
Partes por milhão	ppm
Porcentagem	%
Potássio	K
Saturação por bases	V
Subproduto de mineração	SBM
Subproduto de chapada	SBC
Toneladas	t
Zinco	Zn