

LAENE DE FÁTIMA TAVARES

**DISPONIBILIZAÇÃO DE POTÁSSIO E SILÍCIO DE
REMINERALIZADOR PELO PROCESSO DE COMPOSTAGEM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, *campus* Rio Paranaíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

RIO PARANAÍBA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca UFV - Campus de Rio Paranaíba**

T

T231d
2017

Tavares, Laene de Fátima, 1990-
Disponibilização de potássio e sílico de remineralizador
pelo processo de compostagem / Laene de Fátima Tavares . –
Rio Paranaíba, MG, 2017.
ix, 55f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: André Mundstock Xavier de Carvalho.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. P ó de Rocha. 2. Compostagem. 3. Fonolito. I. Uni-
versidade Federal de Viçosa. Instituto de Ciências Agrárias.
Mestrado em Agronomia-Produção Vegetal (Campus Rio
Paranaíba). II. Título.

628.4

LAENE DE FÁTIMA TAVARES

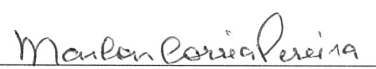
**DISPONIBILIZAÇÃO DE POTÁSSIO E SILÍCIO DE
REMINERALIZADOR PELO PROCESSO DE COMPOSTAGEM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa *Campus* de Rio Paranaíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


APROVADA: 02 de agosto de 2017.



Davi Boehringer



Marlon Correa Pereira
(Coorientador)



André Mundstock Xavier de Carvalho
(Orientador)

A Jesus e Maria

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio financeiro de parte deste trabalho (APQ-03816-16).

À Deus pela sua infinita bondade e misericórdia para comigo.

À Santíssima Virgem, minha mãe e rainha, que intercede por mim em todos os momentos.

Aos meus pais e irmão, pelo apoio, carinho e amor, e por não terem medido esforços para que eu chegasse até aqui.

Ao meu namorado Luis Gustavo Brogliato, por todo amor, carinho e compreensão.

Ao professor André Mundstock Xavier de Carvalho, não apenas pela orientação, mas pela dedicação e entusiasmo em ensinar, pela confiança, exemplo, paciência e amizade.

Aos meus colegas de mestrado, sobretudo minhas amigas e companheiras de trabalho Samarina Pereira, Mariana Melo e Lucélia Alves.

À Universidade Federal de Viçosa, *campus* Rio Paranaíba e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, pela oportunidade de realizar o curso de mestrado.

À empresa BIOMIX, que foi nossa parceira na realização desse trabalho.

Aos professores Marlon Corrêa Pereira e Marcelo Rodrigues dos Reis, pela coorientação e contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Ao pós-doutorando Davi Boehringer pela disponibilidade em participar da banca de defesa.

Ao Grupo de Estudo em Solos e suas Interfaces com a Agroecologia (GESsIA), pelo apoio e incentivo.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar, mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

(Madre Teresa de Calcutá)

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
CAPÍTULO I.....	5
BIOPROCESSOS PARA A OTIMIZAÇÃO DE REMINERALIZADORES E PARA O APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NA AGRICULTURA. 5	
RESUMO	5
2. INTRODUÇÃO	7
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1. Obtenção e caracterização do pó de rocha.....	10
3.2. OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS COMPOSTOS	10
3.3. Matriz experimental.....	11
3.4. Avaliações	12
3.5. Análises estatísticas	13
4. RESULTADOS.....	13
4.1. Enriquecimento de pilhas de compostagem comum e tipo bokashi com pó de fonolito	13
4.2. Crescimento e nutrição das plantas de soja e milho	14
4.3. Disponibilização no solo e biodisponibilização total de nutrientes.....	17
5. DISCUSSÃO.....	20
5.1. Enriquecimento de pilhas de compostagem comum e tipo bokashi com pó de fonolito	20

5.2. Crescimento e nutrição das plantas de soja e milho	21
5.3. Disponibilização no solo e disponibilização total de nutrientes.....	23
6. CONCLUSÕES.....	27
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
CAPÍTULO II.....	35
DISPONIBILIZAÇÃO DE NUTRIENTES DE PÓ DE FONOLITO MEDIADA POR AÇÕES BIOINTEMPÉRICAS	35
RESUMO	35
8. INTRODUÇÃO	36
9. MATERIAL E MÉTODOS	38
9.1. Matriz experimental.....	38
9.2. Obtenção dos compostos	38
9.3. Avaliações	39
9.4. Análises estatísticas	40
10. RESULTADOS	40
10.1. Crescimento e disponibilidade de nutrição às plantas	40
10.2. Disponibilização no solo e biodisponibilização total de nutrientes.....	41
11. DISCUSSÃO	43
11.1. Crescimento e nutrição do capim braquiária	43
11.2. Disponibilização no solo e biodisponibilização total de nutrientes.....	45
12. CONCLUSÃO.....	48
13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
14. CONCLUSÕES GERAIS	55

RESUMO

TAVARES, Laene de Fátima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2017. **Disponibilização de potássio e silício de remineralizador pelo processo de compostagem.** Orientador: André Mundstock Xavier de Carvalho. Coorientadores: Marlon Corrêa Pereira e Marcelo Rodrigues dos Reis.

As incertezas quanto a disponibilidade e preço dos fertilizantes solúveis convencionais, especialmente os potássicos, aliado à crescente necessidade de tornar a agricultura mais sustentável tem estimulado a busca por fontes alternativas de potássio (K). Nesta perspectiva, o uso de pós de rocha silicatadas, ou remineralizadores, como fonte de nutrientes tem ganhado destaque. Para melhor compreender a efetividade do processo de compostagem em melhorar a disponibilidade de K e Si de pós de rocha para o sistema solo-planta e seu impacto sobre a qualidade final dos compostos produzidos, quatro experimentos foram conduzidos. Os dois primeiros experimentos visaram analisar o efeito do enriquecimento de compostos orgânicos com pó de rocha, antecipadamente aos processos de compostagem comum e tipo bokashi sobre os teores de C, N e relação C/N. O terceiro experimento foi conduzido em casa de vegetação com as culturas de soja e milho, cultivadas em sucessão, e fertilizadas com composto comum e tipo bokashi ambos enriquecidos a 0, 5 e 10% ou misturado a 10% com pó de fonolito, buscando avaliar o efeito do processo de compostagem sobre a disponibilização de nutrientes do pó de rocha e sobre a qualidade final dos compostos produzidos. Para analisar a aplicação conjunta de pó de fonolito com composto orgânico, numa perspectiva biointempérica, sobre a produção e nutrição do capim braquiária (*Urochloa decumbens*), um quarto experimento foi conduzido, com aplicação de pó de fonolito in natura e composto comum (puro, enriquecido a 10% ou misturado a 10% com pó de fonolito). Os resultados evidenciaram que o enriquecimento de ambos os compostos não promoveu efeitos significativos na relação C/N quando comparado ao controle. Verificou-se que todas as fontes alternativas de K foram capazes de aumentar o conteúdo de K e Si nas plantas. No entanto, no terceiro experimento, o processo de compostagem comum se mostrou capaz de acelerar o intemperismo da rocha, resultando em maior disponibilização de nutrientes. Esta evidência abre novas perspectivas para o desenvolvimento de organominerais que aproveitem fontes silicatadas alternativas de nutrientes para a agricultura. Além disso, no quarto experimento verificou-se que aplicação conjunta de pó de fonolito com compostos orgânicos, seja como componente

da mistura inicial seja como aditivo aos compostos estabilizados, é uma estratégia que aumenta a disponibilização de nutrientes da fonte mineral.

ABSTRACT

TAVARES, Laene de Fátima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2017. **Potassium and silicon availability from remineralizer by composting process.** Advisor: André Mundstock Xavier de Carvalho. Co-advisors: Marlon Corrêa Pereira and Marcelo Rodrigues dos Reis.

Uncertainties concerning the availability and prices of conventional soluble fertilizers, especially potassium based, associated to the crescent need of making agriculture more sustainable, has stimulated the search for potassium (K) alternative sources. On this perspective, the using of silicate rock powders, or remineralizers, as nutrient source has gained importance. To better understand the composting process effectiveness in improving the K and Si availability of rock powders to the soil-plant system and its impacts over the final quality of produced composts, four experiments were set up. The first two experiments targeted to analyze the enrichment effect of organic composts with rock powders, beforehand to the common and bokashi composting processes over the C, N and C/N ratio contents. The third experiment was set up in a greenhouse with soybean and maize crops, cultivated in succession, and fertilized with common and bokashi compost both enriched at 0, 5 and 10% and mixed at 10% with phonolite powder, seeking to evaluate the composting process effect over the nutrient availability from the rock powder and over the final quality of the produced composts. To analyze the conjunct application of rock powder with organic compost, in a biotemperic perspective, over the production and nutrition of brachiaria grass (*Urochloa decumbens*), a fourth experiment was set up, with application of *in natura* rock powder common compost (pure, enriched at 10% or mixed at 10% with phonolite powder). The results demonstrated that the enrichment of both composts did not promote significant effects on the C/N ratio when compared to the control. It was verified that all alternative K sources were capable of increasing the K and Si content in plants. However, in the third experiment, the common composting process showed itself capable of accelerating the rock's weathering, resulting in a greater nutrient availability. This evidence opens new perspectives to organominerals development which takes advantage of silicate alternative sources of nutrients to agriculture. Besides, in the fourth experiment it was observed that the conjunct application of powder phonolite with organic composts, either as an initial mixture component or additive to stabilized composts, is a strategy that increases the nutrient availability of the mineral source.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A sustentabilidade do setor agrícola tem cada vez mais destaque, assumindo o foco das preocupações da sociedade (Foley et al., 2011). Uma das maneiras de tornar a agricultura mais sustentável é através do desenvolvimento de estratégias que visem melhorar a eficiência de aproveitamento e utilização de recursos não renováveis (Elser & Bennet, 2011; Rusinamhodzi et al., 2016), como os fertilizantes minerais. Neste contexto, a busca por fontes alternativas aos fertilizantes solúveis convencionais, que sejam de fácil aquisição e energeticamente menos dispendiosas, pode ser uma opção para aumentar a sustentabilidade agrícola (Theodoro & Leonardos, 2006; Setiawati & Mutmainnah, 2016).

Segundo Reganold & Wachter (2016), a sustentabilidade deve abranger aspectos econômicos, sociais e ambientais. Portanto, a utilização de fontes alternativas pode viabilizar uma produção agrícola menos dependente de recursos naturais escassos, uma cadeia de produção de insumos menos concentrada em poucas empresas, além de poder contribuir para o aumento da autonomia de pequenos agricultores. Entre estas fontes potenciais estão o aproveitamento de resíduos orgânicos e o uso de pós de rochas silicatadas.

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentos e Agricultura (FAO, 2011), estima-se que a cada ano, um terço de todos os alimentos produzidos para consumo humano no mundo é perdido ou desperdiçado antes de ser consumido, que podem ser devido à problemas na colheita, armazenamento, embalagem, transporte e logística. Estes resíduos, quando não tratados de forma adequada podem causar sérios impactos ambientais (Elser & Bennet, 2011). Nesta perspectiva, o desenvolvimento de novos fertilizantes pode ser viabilizado pelo aproveitamento de resíduos orgânicos do próprio setor agropecuário.

Além disso, existe a possibilidade de transformar em oportunidade para o setor agrícola o excesso de rejeitos, considerado um problema na atividade de exploração mineral (Theodoro et al., 2013; Nunes et al., 2014). A preocupação desse setor com a geração de subprodutos tem aumentado ante o crescimento da produção, do gerenciamento frequentemente inadequado e da falta de áreas para disposição final (Franks et al., 2011).

No Brasil, a utilização de pós de rochas silicatadas, regulamentada recentemente pela lei dos remineralizadores, Lei 12.890 de dezembro de 2013, tem sido apontada

como uma possível fonte alternativa de nutrientes (Ramos et al., 2015). São classificados como remineralizadores, materiais de origem mineral que tenham sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos, e que alterem os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas. Apesar de ser uma técnica antiga, a aplicação desses materiais na agricultura tem ganhado mais espaço nos últimos anos, uma vez que a busca por recursos nacionalmente disponíveis tem sido intensificada devido à preocupação com a alta dependência externa brasileira por insumos agrícolas, sobretudo por fertilizantes potássicos. Além disso, a valorização dos remineralizadores está relacionada à crescente expansão do mercado e da produção de alimentos orgânicos.

No entanto, a baixa velocidade de liberação dos nutrientes contidos nos minerais da rocha *in natura* pode comprometer a eficiência dessa fonte no curto prazo (Santos et al., 2016), o que estimula a realização de estudos que visem avaliar meios para otimizar a utilização desses materiais.

Neste sentido, considerando que a intemperização dos minerais é um processo diretamente dependente da atividade microbiana, a utilização de pós de rochas de forma concomitante com técnicas e práticas culturais que estimulem a microbiota a biointemperizar os minerais dos pós de rochas, como o bioprocessamento de compostagem, podem ampliar a utilização destes subprodutos na agricultura. O bioprocessamento de compostagem é uma técnica amplamente utilizada para se estabilizar resíduos sólidos orgânicos de origem vegetal e animal, sendo mediado por microrganismos, para obtenção de um material rico em matéria orgânica, que pode ser utilizado como fertilizante e/ou condicionador de solo (Lim et al., 2016).

Dessa forma, a utilização do bioprocessamento de compostagem como veículo de transformação tanto de resíduos orgânicos como inorgânicos, pode melhorar o aproveitamento de ambos, resultando em melhorias na qualidade final dos compostos produzidos.

Nessa temática, o presente trabalho está estruturado em dois capítulos. O primeiro apresenta um estudo que tem como objetivo avaliar o efeito de dois diferentes processos de compostagem sobre a disponibilização de nutrientes de pó de rocha e sobre a qualidade final de compostos orgânicos. O segundo tem como objetivo avaliar o potencial da aplicação conjunta de fonolito com compostos orgânicos sobre a disponibilização de nutrientes no solo e sobre a produção e nutrição do capim braquiária (*Urochloa decumbens*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ELSER J, BENNETT E. Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle. *Nature*. 2011. 478: 29-31.

FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentos e Agricultura). *Global food losses and food waste*. Roma, 2011.

FOLEY JA, RAMANKUTTY N, BRAUMAN KA, CASSIDY ES, GERBER JS, JOHNSTON M, MUELLER ND, O'CONNELL C, RAY DK, WEST PC, BALZER C. Solutions for a cultivated planet. *Nature*. 2011. 478:3 37-42.

FRANKS DM, BOGER DV, CÔTE CM, MULLIGAN DR. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*. 2011. 36: 114-122.

LIM SL, LEE LH, WU TY. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2016. 111: 262-278.

NUNES JM, KAUTZMANN RM, OLIVEIRA C. Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil). *Journal of Cleaner Production*. 2014. 84: 649-656.

RAMOS CG, QUEROL X, OLIVEIRA ML, PIRES K, KAUTZMANN RM, OLIVEIRA LF. A preliminary evaluation of volcanic rock powder for application in agriculture as soil a remineralizer. *Science of the Total Environment*. 2015. 512: 371-380.

REGANOLD JP, WACHTER JM. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*. 2016. 2: 15221.

RUSINAMHODZI L, DAHLIN S, CORBEELS M. Living within their means: Reallocation of farm resources can help smallholder farmers improve crop yields and soil fertility. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2016. 216: 125-136.

SANTOS WO, MATTIELLO EM, VERGUTZ L, COSTA RF. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2016. 179: 547-556.

SETIAWATI TC, MUTMAINNAH L. Solubilization of Potassium Containing Mineral by Microorganisms From Sugarcane Rhizosphere. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2016. 9: 108-117.

THEODORO SH, LEONARDOS OH, ROCHA E, MACEDO I, REGO KG. Stonemeal of amazon soils with sediments from reservoirs: a case study of remineralization of the tucuruí degraded land for agroforest reclamation. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2013. 85: 23-34.

THEODORO SH, LEONARDOS OH. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2006. 78: 721-30.

CAPÍTULO I

BIOPROCESSOS PARA A OTIMIZAÇÃO DE REMINERALIZADORES E PARA O APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NA AGRICULTURA

RESUMO

A busca por opções inovadoras para redução do uso dos fertilizantes convencionais, sobretudo potássicos, tem estimulado o aproveitamento de resíduos não apenas do setor agropecuário mas também de subprodutos da mineração – os pós de rocha silicatadas. No entanto, a velocidade de liberação dos nutrientes contidos nos minerais da rocha *in natura* pode comprometer a eficiência dessa fonte no curto prazo. Assim, há a necessidade de estudos que busquem avaliar manejos acessíveis que possam aumentar a solubilidade desses materiais silicatados. Portanto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito de dois diferentes processos de compostagem sobre a disponibilização de nutrientes de pó de rocha e sobre a qualidade final de compostos orgânicos. Para tal, dois experimentos iniciais foram conduzidos um com compostagem comum e outro com compostagem tipo bokashi, ambos com três tratamentos (compostos enriquecidos a 0, 5 e 10% com pó de fonolito). Visando avaliar a qualidade dos compostos obtidos, um terceiro experimento foi conduzido em esquema fatorial $(2 \times 4) + 1$, sendo dois tipos de compostos (bokashi e composto comum), quatro subtipos de cada (enriquecido com pós de fonolito com 0, 5 e 10 % e “misturado” com 10%) e mais um tratamento controle sem adição de compostos, com quatro repetições. O enriquecimento de pilhas de compostagem comum e tipo bokashi não promoveu efeito estatisticamente significativo na relação C/N dos compostos quando comparado com os compostos puros. Todas as fontes alternativas de K influenciaram positivamente o conteúdo de K e Si na parte aérea das plantas de soja e milho. A disponibilização de nutrientes no solo pelo composto comum enriquecido foi significativamente maior que o misturado, diferentemente do composto tipo bokashi. A biodisponibilização total de Si do composto comum também foi consideravelmente maior quando o pó de fonolito foi adicionado antecipadamente à degradação dos resíduos orgânicos. O enriquecimento de pilhas de compostagem comum com pó de fonolito promove melhorias significativas na nutrição e disponibilidade de K e Si no sistema solo-planta, quando comparado à simples mistura, evidenciando que o processo de compostagem comum é capaz de acelerar o intemperismo de pó de rocha.

Palavras – chave: pó de rocha, fonolito, compostagem

2. INTRODUÇÃO

A melhoria da sustentabilidade da produção agrícola é um dos grandes desafios da agricultura mundial (Foley et al., 2011). Este reconhecimento é reflexo de uma sociedade mais consciente e sensível às questões sociais e ambientais ligadas ao setor, destacando-se a utilização mais responsável dos recursos não renováveis, a valorização de arranjos produtivos locais e a exigência de melhores padrões de qualidade dos alimentos e das cadeias produtivas como um todo (Hjelmar, 2011; Makita, 2016).

Considerando as bases sociais, econômicas e ambientais da sustentabilidade, a utilização de fontes alternativas de nutrientes, que sejam de fácil aquisição regional, que promovam a descentralização de mercados, reduzam os riscos de lixiviação de nutrientes e que sejam energeticamente menos dispendiosas que as fontes convencionais, pode ser uma estratégia adicional na busca de uma maior sustentabilidade agrícola (Theodoro & Leonardos, 2006; Nishanth & Biswas, 2008; Moharana & Biswas, 2016). Entre estas fontes potenciais estão o aproveitamento de resíduos orgânicos e o uso de pós de rochas silicatadas. Além disso, a ampliação do uso destas fontes pode melhorar a segurança alimentar, pela redução da dependência externa por fertilizantes, e redução do impacto da importação destes insumos sobre a balança comercial brasileira.

Neste cenário de dependência externa de insumos, o potássio (K) ganha destaque, uma vez que é o elemento mais importado pelo Brasil, sendo o cloreto de potássio (KCl) a principal fonte consumida. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2014), em 2013 a produção nacional de KCl foi de apenas 6,03% de todo o consumo interno aparente, sendo o restante importado, evidenciando que a produção nacional se encontra muito abaixo da demanda.

Além disso, a pesquisa com fontes alternativas de nutrientes visa atender à demanda crescente por insumos e tecnologias aplicáveis aos sistemas orgânicos de produção, apontados como capazes de melhor equilibrar os diferentes requisitos para melhoria da sustentabilidade da produção agrícola em relação aos sistemas convencionais de produção (Reganold & Wachter, 2016). A produção de alimentos orgânicos se encontra em forte ascensão no Brasil e no mundo (Willer et al., 2014), deixando de ser um nicho de mercado e passando a ser um dos segmentos que mais crescem no setor agrícola (Reganold & Wachter, 2016). De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil, entre janeiro de 2014 e janeiro de 2015, a quantidade de agricultores que optaram pela produção orgânica passou de 6.719

para 10.194, um aumento de cerca de 51,7%, atingindo 750 mil hectares de área cultivada.

A busca por opções inovadoras para redução do uso dos fertilizantes convencionais envolve, também, a oportunidade de integrar opções para a solução de dois outros problemas. O primeiro é a gradual perda de qualidade dos solos tropicais associado, principalmente, à quebra da estrutura do solo (Partelli et al., 2016) e a redução da matéria orgânica (Don et al., 2011; Guimarães et al., 2014). O segundo é o problema da destinação adequada de volumes crescentes de resíduos da mineração e do setor agropecuário (Franks et al., 2011; Elser & Bennett, 2011).

Segundo dados do IPEA (2012a) estima-se, por exemplo, uma geração total de 1,7 bilhões de toneladas ano⁻¹ de dejetos animais e 201 milhões de toneladas ano⁻¹ de resíduos vegetais da produção de cana-de-açúcar. Para diversos outros resíduos orgânicos sequer existem dados confiáveis sobre o total produzido no Brasil. Apesar do potencial como fertilizante ou como condicionador de solo da maioria destes resíduos, estes, em muitos casos, não recebem um tratamento adequado e passam a assumir um papel de potencial poluente (Elser & Bennett, 2011). No setor mineral, estima-se que em 2030 cerca de 684 milhões de toneladas de rejeitos, oriundos da mineração, serão gerados, o que representa mais que o dobro do volume total produzido em 2005 (IPEIA, 2012b).

Os pós de rochas silicatadas foram recentemente regulamentados no Brasil pela lei dos remineralizadores. Remineralizadores são uma nova classe de insumos destinados à agricultura definidos pela Lei N° 12.890 de 10/12/2013 como “...materiais de origem mineral que tenham sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que alterem os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas...”. Os remineralizadores são, conceitualmente, fontes multinutrientes de liberação lenta (Carvalho, 2013). A heterogeneidade de elementos presente nestes materiais tem sido levantada como um ponto positivo do uso desses materiais em relação aos fertilizantes simples de alta solubilidade. Plantas e animais podem se valer de uma extensa lista de elementos benéficos, mas não essenciais, muito dos quais negligenciados pela adubação convencional, uma vez que a adição destes nutrientes não resulta em ganhos de produtividade e rentabilidade.

Apesar da potencialidade dos pós de rochas silicatadas como fonte multinutriente, estes apresentam duas limitações principais. A primeira é a baixa

reatividade e solubilidade dos minerais fonte dos nutrientes, uma vez que esta é dependente do intemperismo das estruturas predominantemente cristalinas dos minerais. A segunda são os baixos teores de nutrientes, característica inerente às fontes multinutrientes e que representa restrições no transporte à longas distâncias.

Um subproduto de mineração, que também se enquadra como remineralizador e que apresenta teor considerável de K_2O (~8 %) é o pó de fonolito do complexo alcalino de Poços de Caldas. Apesar do potencial dessa rocha como fonte de potássio (Mancuso et al., 2014; Teixeira et al., 2012; Machado, 2016), estudos que visem avaliar o potencial de bioprocessos acessíveis para aumentar a solubilidade desta fonte, ainda são escassos até o momento. Entre estes bioprocessos estão o uso de biofertilizantes, vermicompostagem e compostagem.

Os bioprocessos de compostagem apresentam grande aplicabilidade na agricultura pela facilidade e rapidez do processo de decomposição e ciclagem de nutrientes de resíduos orgânicos diversos (Lim et al., 2016). Durante o processo de compostagem os resíduos orgânicos são estabilizados e convertidos por meio da ação sucessora de uma gama de microrganismos (Silva et al., 2016). De acordo com Biswas et al., (2009), na decomposição dos materiais orgânicos ocorre a produção de ácidos orgânicos, tais como ácidos glicólico, oxaloacético, succínico, fumárico, málico, tartárico e cítrico, tornando o meio mais ácido em relação ao composto estabilizado. Essa redução do pH, mesmo que temporariamente, e a elevação da temperatura em decorrência da atividade intensa da microbiota na fase termofílica pode vir a favorecer uma dissolução mais rápida dos minerais adicionados à pilha de compostagem.

A atividade microbiana dos diferentes organismos que coexistem e interagem entre si nos solos exerce forte influência na velocidade de intemperismos de minerais. Muitos desses microrganismos são capazes de desestabilizar as estruturas cristalinas de minerais primários presentes no solo, contribuindo para a disponibilização de nutrientes (Setiawati & Mutmainnah, 2016).

Nesse sentido, a utilização de pós de rochas de forma concomitante com técnicas e práticas culturais que estimulem a microbiota a biointemperizar o mineral dos pós de rochas, como a prática da compostagem, pode ampliar a utilização destes subprodutos na agricultura. Isto sugere a possibilidade de adição de resíduos minerais aos bioprocessos de compostagem visando facilitar a disponibilização de nutrientes a partir destas novas fontes minerais.

Portanto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito de dois diferentes processos de compostagem sobre a disponibilização de nutrientes de pó de rocha e sobre a qualidade final de compostos orgânicos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Obtenção e caracterização do pó de rocha

O pó de fonolito foi obtido diretamente com a fabricante, apresentando 8% de K₂O (Tabela 1). Essa rocha apresenta em sua composição mineralógica o predomínio feldspato potássico. Além disso, possui frações significativas de materiais amorfos ou em cristais pequenos e mal formados, o que acelera a solubilização dos elementos contidos em sua estrutura (Teixeira et al., 2012).

Tabela 1. Composição química geral do pó de fonolito utilizado nos experimentos

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	P ₂ O ₅
.....dag kg ⁻¹						
54,66	9,56	8,69	6,74	1,5	0,2	0,05
Zn	Mo	Li	Se	Cu	Co	V
.....mg kg ⁻¹						
125	65	28	< 20	14	< 8	67

3.2. Obtenção e caracterização dos compostos

Dois experimentos foram conduzidos em pátio de compostagem nas dependências da BIOMIX - Indústria e Comércio de Insumos Orgânicos Ltda., em Cotia – SP, para obtenção dos compostos. Nestes experimentos foram conduzidas pilhas de compostagem comum, em escala comercial, e mini pilhas de composto tipo bokashi enriquecidas ou não com duas doses de pó de fonolito na mistura inicial dos ingredientes (Tabela 2).

As pilhas de compostagem comum foram montadas com 20 m³ de materiais orgânicos diversos seguindo a mistura usual da empresa Biomix (aproximadamente 50% de serragem, 30% de esterco diversos e 20% de resíduos de processamento de frutas). As pilhas foram mantidas em pátio aberto sob piso semipermeável por 90 dias até a maturação dos compostos.

Tabela 2. Caracterização química da mistura inicial para produção de composto comum e composto tipo bokashi

	C	N	C/N	K	Mn	Cu	Na	Cinzas	pH	CTC
	..... dag kg ⁻¹								CaCl ₂	mmol kg ⁻¹
Composto tipo bokashi										
Enriquecido										
0%	17,30	2,52	6,86	1,28	734,00	80,00	0,54	48,00	6,80	190,00
5%	13,50	2,59	5,00	1,22	775,00	70,00	1,10	60,90	6,80	200,00
10%	10,40	2,52	4,12	1,17	745,00	65,00	1,40	67,05	6,90	160,00
Composto Comum										
Enriquecido										
0%	19,00	1,85	10,27	0,88	245,00	53,00	0,43	29,30	8,00	260,00
5%	18,40	2,40	7,66	0,89	293,00	46,00	0,80	36,95	8,00	270,00
10%	18,10	1,56	11,60	0,89	345,00	48,00	1,10	47,70	8,00	260,00

As minipilhas de compostagem tipo “bokashi” foram montadas com 20 kg dos materiais orgânicos farelo de mamona, farelo de arroz, composto orgânico, farinha de osso, cinzas e termofosfato, de acordo com a proposta adaptada de Kiehl (2010). Deve-se ressaltar que o processo de degradação dos resíduos orgânicos no composto tipo bokashi foi predominantemente anaeróbico.

3.3. Matriz experimental

Dois experimentos iniciais foram conduzidos em delineamento inteiramente ao acaso, sendo um experimento com compostagem comum com três tratamentos e quatro repetições, e outro com minipilhas de compostagem tipo “bokashi”, também com três tratamentos e quatro repetições, totalizando 12 pilhas de compostagem comum e 12 minipilhas de compostagem tipo “bokashi”. Os tratamentos do experimento foram assim denominados: T1 – composto + fonolito (5% (m/v)); T2 – composto + fonolito (10% (m/v)); T3 – apenas composto. Já os tratamentos do experimento dois foram: T1– bokashi + fonolito (5% (m/v)); T2 – bokashi + fonolito (10% (m/v)); T3– apenas bokashi.

Visando avaliar a qualidade dos compostos obtidos, um terceiro experimento, em casa de vegetação, foi conduzido em um delineamento inteiramente ao acaso com nove tratamentos estruturados num esquema fatorial (2x4)+1, sendo dois tipos de compostos (bokashi e composto comum), quatro subtipos de cada (enriquecido com pós de fonolito com 0, 5 e 10 % e “misturado” com 10%) e mais um tratamento controle sem adição de compostos, com quatro repetições, totalizando 36 unidades

experimentais. Entende-se por “composto misturado” a mistura do pó de fonolito com o composto pronto e seco, sem a participação da microbiota do composto no intemperismo da rocha. Para aplicação dos compostos enriquecidos e obtenção dos compostos misturados, levou-se em consideração a densidade dos materiais, de modo a minimizar o efeito da diluição da fração orgânica pela adição da rocha.

Foram realizados dois cultivos sucessivos utilizando como plantas testes a soja, cultivar Anta82 RR, e o milho, híbrido P3646YH (Pioneer), cultivadas em vasos com 12 dm³ de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Embrapa, 2013), deixando-se três plantas por vaso. Os compostos foram aplicados na dose equivalente a 28,4 m³ ha⁻¹, de acordo com a recomendação de Ribeiro et al. (1999), com 21 dias de antecedência a semeadura para permitir uma melhor mineralização dos compostos. Na instalação do experimento foi realizada uma adubação corretiva nas seguintes doses em mg dm⁻³: N (1), P (26), B (0,5), Cu (1,5), Zn (5) e S (1). A dose de composto orgânico, enriquecidos ou misturado, corresponde à adição de até 4 t ha⁻¹ de pó de fonolito. Antes da semeadura da soja. As plantas de soja foram conduzidas até o estágio de florescimento (R2), quando foram cortadas rente ao solo. Após a colheita da soja, os vasos receberam uma nova adubação corretiva com N (70 mg dm⁻³) e iniciou-se o segundo cultivo, com a cultura do milho. A parte aérea das plantas de milho foram coletadas no estágio V8.

3.4. Avaliações

Nos dois primeiros experimentos, após a maturação das pilhas de compostagem e minipilhas de bokashi amostras dos compostos obtidos foram coletadas, secas em estufa de circulação forçada a 65 °C, moídas em moinho de bolas e submetidas às análises C orgânico, N orgânico, e relação C/N segundo metodologia descrita em Silva (2009) e Mendonça & Matos (2005).

As plantas de soja e milho coletadas ao final do período de avaliação do terceiro experimento foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 oC e determinou-se a matéria seca da parte aérea (MSPA). Em seguida subamostras foram moídas em moinho Willey equipado com peneira de 1,0 mm de abertura e submetidas à digestão nitro-perclórica segundo Silva (2009) e à digestão peroxídica em NaOH segundo Elliott & Snyder (1991). Os teores de Si, K e Na foram determinados por espectrofotometria de absorção molecular e espectrofotometria de emissão de chama (Silva, 2009; Elliott & Snyder, 1991). O conteúdo de nutrientes na biomassa das plantas foi calculado pelo produto entre os teores e a matéria seca das plantas.

Após a retirada das plantas, uma amostra do solo de cada vaso foi coletada, seca ao ar e tamisada em peneira de 2 mm de abertura. O Si disponível no solo foi extraído pelo extrator ácido acético 0,5 mol L⁻¹ e determinado por espectrometria de absorção molecular pelo método azul (Leite, 1997). Os elementos Na e K, extraídos em solução Mehlich 1 na relação solo:extrator de 1:10, foram determinados por espectrometria de chama e espectrometria de absorção molecular, respectivamente, conforme Donagema et al. (2011). A biodisponibilização total foi determinada através da soma dos conteúdos de K presentes na matéria seca da soja e do milho e o total ainda biodisponível no solo ao final do experimento.

3.5. Análises estatísticas

Os dados dos três experimentos foram submetidos aos testes de Hartley, Jarque-Bera (Jarque & Bera, 1980) e ESD Generalizado (Rosner, 1983) para avaliação das condições de homogeneidade das variâncias, normalidade dos resíduos e presença de outliers, respectivamente. Em seguida, foram submetidos à análise de variância (ANOVA). As médias do experimento em casa de vegetação foram comparadas por contrastes ortogonais, definidos a priori e testados pelo teste t a 5 % de probabilidade. As médias dos dados dos experimentos de formulação dos compostos foram comparadas pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS

4.1. Enriquecimento de pilhas de compostagem comum e tipo bokashi com pó de fonolito

O processo de compostagem comum aumentou o teor de K dos compostos enriquecidos a 5 e 10% quando comparados com o enriquecimento a 0% e à simples mistura (Tabela 3). Além disso, a presença do pó de fonolito nos compostos comuns elevou consideravelmente a CTC dos mesmos. Entretanto, para os compostos tipo bokashi, o enriquecimento não melhorou, de modo geral, as características químicas dos compostos produzidos em relação ao não enriquecido (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização química dos compostos tipo bokashi e compostos comuns enriquecidos a 0, 5 e 10% ou misturados a 10% com pó de fonolito, após o processo de compostagem

	K	Mn	Cu	Zn	Na	Cinzas	pH	CTC
	.....dag kg ⁻¹					CaCl ₂		mmol kg ⁻¹
Composto tipo bokashi								
Enriquecido 0%	1,29	705,00	90,00	490,00	0,50	57,43	7,70	300,00
Enriquecido 5%	1,28	860,00	80,00	500,00	1,15	69,26	7,80	280,00
Enriquecido 10%	1,27	746,00	75,00	462,00	1,30	67,72	7,80	110,00
Misturado 10%	1,24	748,00	76,00	456,00	1,38	68,20	7,70	120,00
Composto comum								
Enriquecido 0%	0,78	365,00	75,00	500,00	0,36	53,55	7,90	300,00
Enriquecido 5%	0,87	410,00	65,00	310,00	1,10	58,25	7,90	320,00
Enriquecido 10%	0,87	405,00	64,00	290,00	1,28	59,32	7,90	320,00
Misturado 10%	0,68	435,00	68,00	480,00	1,00	64,00	7,90	350,00

O enriquecimento com pó de fonolito antecipadamente a ambos os processos de compostagem não promoveu efeito estatisticamente significativo na relação C/N quando comparado ao controle (Tabela 4). No entanto, o teor de N dos compostos tipo bokashi foi consideravelmente reduzido com a adição de pó de fonolito, tanto a 5 como 10%. Contrariamente, no composto comum, a redução do teor de N em função da adição de pó de rocha, em relação ao controle, não foi estatisticamente significativa (Tabela 4).

Tabela 4. Teores de C, N e relação C/N dos compostos maturados comum e tipo bokashi, ambos enriquecidos com pó de fonolito

	Bokashi			Composto comum		
	C	N	C/N	C	N	C/N
	.....dag kg ⁻¹					
Enriquecido a 5%	11,63 *	0,75 *	16,02	12,05	1,00	12,72
Enriquecido a 10%	11,40 *	0,75 *	14,60	8,59 *	1,01	11,8
Enriquecido a 0%	18,18	1,10	16,55	17,22	1,27	14,07
C.V. (%)	17,20	9,70	26,00	21,50	18,60	35,80

Médias seguidas por “*” diferem do respectivo tratamento controle, sem adição de pó de fonolito, pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

4.2. Crescimento e nutrição das plantas de soja e milho

A matéria seca da parte aérea das plantas de soja não diferiu entre os tratamentos e o controle (Figura 1a, contraste \hat{C}_1). Além disso, também não houve diferença significativa entre composto enriquecido e misturado a 10% com fonolito para ambos os tipos de compostos, como indicado pelos contrastes \hat{C}_2 e \hat{C}_3 (Figura 1a).

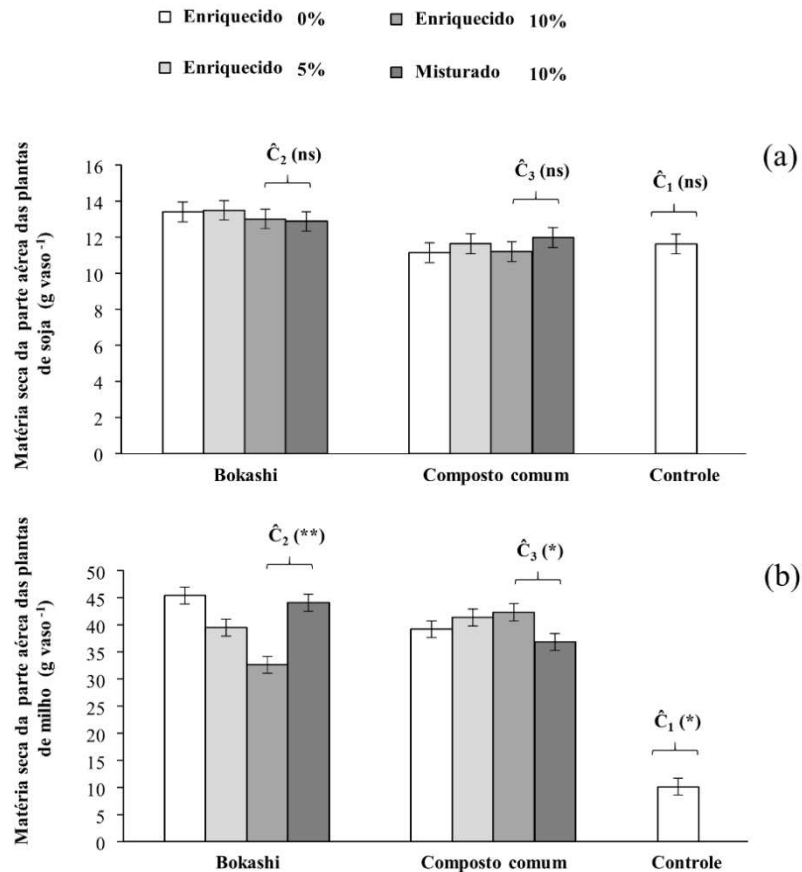


Figura 1. Matéria seca da parte aérea de plantas de soja (a) e milho (b), cultivadas em sucessão, fertilizadas com composto tipo bokashi e composto comum, ambos enriquecidos a 0, 5 e 10 % ou misturado a 10 % com pó de fonolito. Estimativas dos contrastes seguidas por “ns”, “*” ou “**” não diferem de zero ou são significativas ao nível de 5 e 1 % de probabilidade. \hat{C}_1 : todos os tratamentos vs controle; \hat{C}_2 e \hat{C}_3 : compostos enriquecidos a 10% - compostos misturados a 10%. Barras correspondem ao erro padrão.

A MSPA das plantas de milho, segunda cultura avaliada, foi significativamente incrementada pelos tratamentos quando comparados com o controle (Figura 1b, contraste \hat{C}_1). A capacidade do composto comum enriquecido a 10% com pó de fonolito em promover o crescimento da cultura foi significativamente superior ao misturado (Figura 1b, contraste \hat{C}_3). Este efeito resultou em um incremento de 15% a mais da biomassa em relação à simples mistura. No entanto, no composto tipo bokashi o efeito foi oposto ao composto comum, sendo a mistura com pó de rocha mais capaz de promover o crescimento das plantas que o bokashi enriquecido desde o início do processo de compostagem (Figura 1b, contraste \hat{C}_2).

O conteúdo de K na parte aérea das plantas de soja e milho foi expressivamente aumentado pela adição dos compostos, como demonstrado pelo contraste \hat{C}_1 (Figura 2a e 2b), promovendo um aumento de 2,58 e 20,69 vezes a mais que o controle absoluto,

respectivamente. Além disso, possibilitaram que o teor desse nutriente se mantivessem aproximadamente dentro da faixa de suficiência para as culturas, variando entre 16 a 20 g kg⁻¹ para soja e 12 a 24 g kg⁻¹ para o milho (dados não mostrados) (Ribeiro et al., 1999).

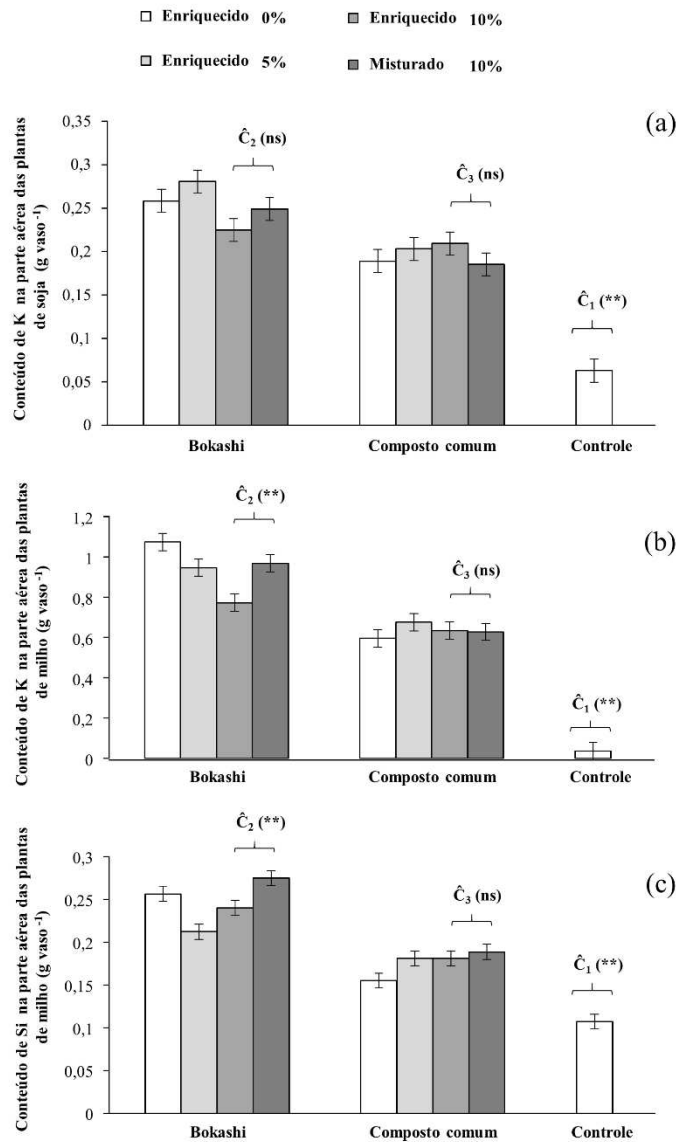


Figura 2. Conteúdo de potássio na parte aérea das plantas de soja (a) e milho (c) e de Si na parte aérea das plantas de milho (c), fertilizadas com composto tipo bokashi e composto comum, ambos enriquecidos a 0, 5 e 10 % ou misturado a 10 % com pó de fonolito. Estimativas dos contrastes seguidas por “ns”, “*” ou “**” não diferem de zero ou são significativos ao nível de 5 e 1 % de probabilidade. \hat{C}_1 : todos os tratamentos vs controle; \hat{C}_2 e \hat{C}_3 : compostos enriquecidos a 10% - compostos misturados a 10%. Barras correspondem ao erro padrão.

A fertilização das plantas de soja e milho, cultivadas em sucessão, com os compostos avaliados não resultou em incremento, estatisticamente significativo, no conteúdo de Na na parte aérea de ambas as culturas em relação ao controle (dados não amostrados). Além disso, o conteúdo de Si foi significativamente aumentado, quando comparado ao controle, apenas na parte aérea das plantas de milho (Figura 2c, Contraste \hat{C}_1). Similarmente, apenas na cultura do milho, e para composto tipo bokashi, houve diferenças significativas no conteúdo de K e Si entre composto enriquecido a 10% e misturado (Figura 2b e 2c).

4.3. Disponibilização no solo e biodisponibilização total de nutrientes

A disponibilização de K, Si e Na no solo foi claramente aumentada pelos tratamentos (Figuras 3a, 3b e 3c, respectivamente). A aplicação dos tratamentos resultou em incrementos de aproximadamente 15, 3 e 2 vezes a mais na disponibilidade de K, Si e Na, respectivamente em relação ao controle.

A capacidade do composto comum enriquecido a 10% em disponibilizar K e Si para o solo foi significativamente superior ao misturado (Figura 3a e 3b, contraste \hat{C}_3), promovendo um acréscimo, tanto de K quanto de Si, de aproximadamente 20% a mais em relação ao composto comum misturado. Entretanto, o incremento verificado na disponibilidade de Na no solo não foi acompanhada de diferença significativa entre compostos enriquecido e misturado a 10 %, para ambos os tipos de composto (Figura 3 c).

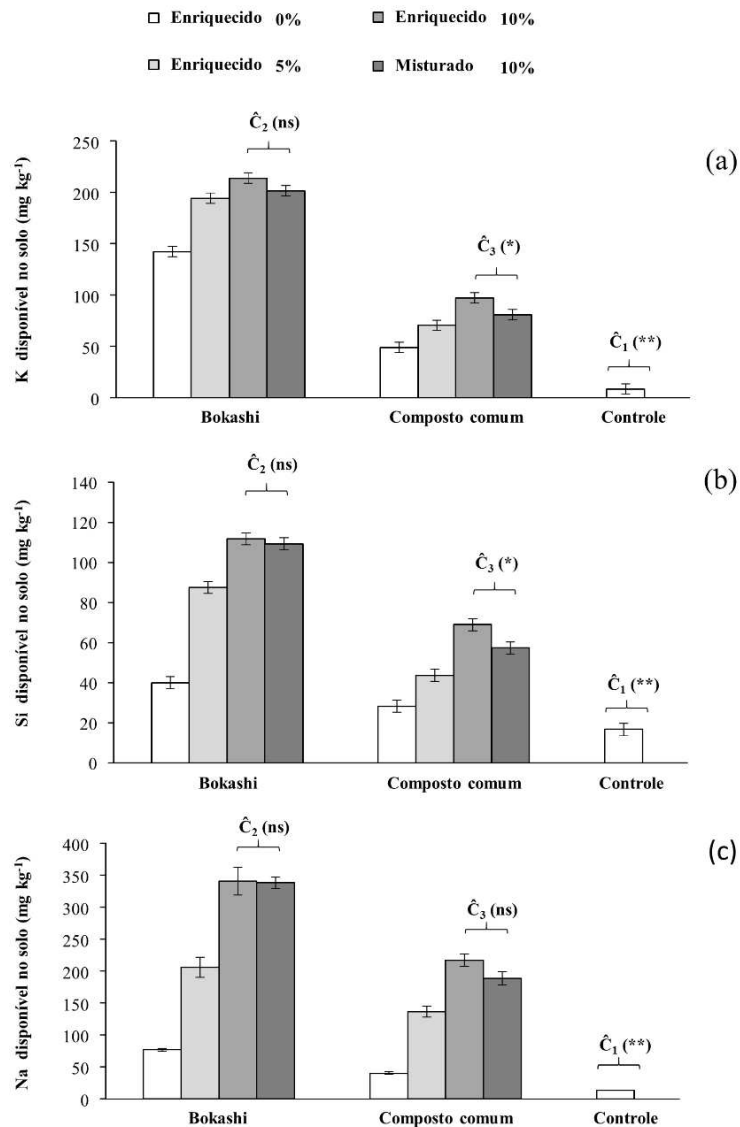


Figura 3. Disponibilidade de potássio (a), silício (b) e sódio (c) no solo fertilizado com composto tipo bokashi e composto comum, ambos enriquecidos a 0, 5 e 10 % ou misturado a 10 % com pó de fonolito. Estimativas dos contrastes seguidas por “ns”, “*” ou “**” não diferem de zero ou são significativos ao nível de 5 e 1 % de probabilidade. \hat{C}_1 : todos os tratamentos vs controle; \hat{C}_2 e \hat{C}_3 : compostos enriquecidos a 10% - compostos misturados a 10%. Barras correspondem ao erro padrão.

Os tratamentos influenciaram positivamente a biodisponibilização total de K, proporcionando um aumento de aproximadamente 12 vezes a mais que o controle (Figura 4a, contraste \hat{C}_1). Entretanto não houve diferença significativa na disponibilidade de K entre enriquecido e misturado a 10% para ambos os compostos, como indicado pela estimativa dos contrastes \hat{C}_2 e \hat{C}_3 (Figura 4a).

A biodisponibilização total de Si e Na foi aumentada pelos compostos, sobretudo pelos que continham fonolito (Figuras 4b e 4c, contraste \hat{C}_1). Mas, a

capacidade do processo de compostagem em otimizar o intemperismo da rocha somente foi evidenciada para o composto comum, onde a disponibilização de Si pelo composto enriquecido a 10% foi estatisticamente superior ao misturado (Figura 4b, contraste \hat{C}_3).

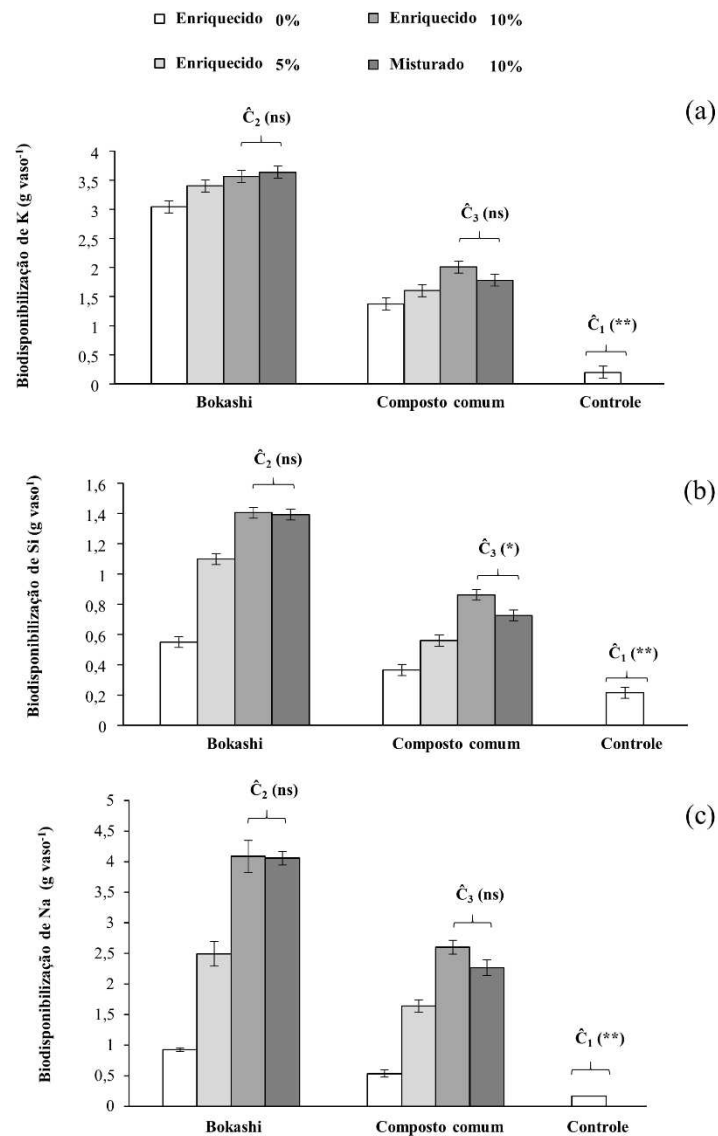


Figura 4. Biodisponibilização total de potássio (a), silício (b) e sódio (c) a partir de composto tipo bokashi e composto comum, ambos enriquecidos a 0, 5 e 10 % ou misturado a 10 % com pó de fonolito. Estimativas dos contrastes seguidas por “ns”, “*” ou “**” não diferem de zero ou são significativas ao nível de 5 e 1 % de probabilidade. \hat{C}_1 : todos os tratamentos vs controle; \hat{C}_2 e \hat{C}_3 : compostos enriquecidos a 10% - compostos misturados a 10%. Barras correspondem ao erro padrão.

5. DISCUSSÃO

5.1. Enriquecimento de pilhas de compostagem comum e tipo bokashi com pó de fonolito

A capacidade de processos de compostagem em melhorar a solubilização de nutrientes presentes em minerais silicatados somente foi evidenciada para a compostagem comum (Tabela 3), uma vez que o enriquecimento tanto a 5 como a 10% foi capaz de aumentar a solubilização de K e a CTC dos compostos. Resultados semelhantes foram reportados por Nishanth & Biswas (2008) ao estudarem o enriquecimento de pilhas de compostagem comum com rocha fosfática e resíduos de mica.

Embora não há um parâmetro que isoladamente possa avaliar a qualidade de compostos orgânicos, a maturidade, definida principalmente pela relação C/N após o processo de compostagem, é o critério mais difundido e utilizado (Bernal et al., 2009; Guo et al., 2012). Relações C/N entre 8/1 e 12/1 ou 13/1 e 18/1, de compostos biodegradados, são consideradas ótima ou boa, respectivamente (Kiehl, 2010). O presente estudo demonstrou que o enriquecimento de pilhas de compostagem comum e tipo bokashi promoveu faixas de relação C/N mais próximas ao nível tido como ótima, quando comparado com os compostos puros, como também reportado por Moharana & Biswas (2016). Esse efeito foi possível porque a redução de C orgânico, em virtude da adição do pó de rocha, não foi acompanhada de uma redução proporcional do teor de N, principalmente para o composto comum, no qual a redução de N tanto para o composto enriquecido a 5% como a 10% foi sutil (Tabela 4).

De acordo com a legislação brasileira de fertilizantes orgânicos o teor mínimo de nitrogênio é de 1%. Desta maneira, a adição de pó de rocha aos compostos comuns não depreciou o teor de N, o qual se manteve dentro do exigido por lei. É importante destacar que a perda de nitrogênio em pilhas de compostagem é inerente ao próprio processo. Dessa maneira, o fato de a adição da rocha antecipadamente ao processo de compostagem comum não ter reduzido significativamente o teor de N em relação ao composto puro, mesmo diante de uma clara diluição da fração orgânica e da estreita faixa de relação C/N da mistura inicial (Tabela 2), evidencia o potencial do pó de fonolito em reter nitrogênio em pilhas de composto comum.

Diferentemente do observado para os compostos comuns, o enriquecimento de compostos tipo bokashi com pó de fonolito resultou em redução de nitrogênio em maior magnitude (Tabela 4). Este resultado se deve, possivelmente, ao fato de os ingredientes

que compunham a mistura inicial desses compostos apresentarem relação C/N muito baixa, o que intensifica a perda de nitrogênio via volatilização de amônia (Li et al., 2013). Este fato, aliado a diluição da fração orgânica, em função do enriquecimento com o material inorgânico, explica a redução significativa de N dos compostos tipo bokashi enriquecidos em relação ao controle.

5.2. Crescimento e nutrição das plantas de soja e milho

O efeito não pronunciado dos tratamentos sobre a MSPA das plantas de soja, em relação ao controle (Figura 1a, contraste \hat{C}_1), evidencia que possivelmente, nutrientes em menor abundância na rocha estariam limitando o desenvolvimento da parte aérea da cultura. Tal hipótese se torna mais clara perante ao incremento significativo proporcionado pelos tratamentos sobre o conteúdo de K na parte aéreas das plantas (Figura 2a, contraste \hat{C}_1).

A significativa capacidade de fornecimento de potássio, às plantas de soja, das fontes orgânicas avaliadas, realça a importância do aproveitamento de resíduos orgânicos como fonte de nutrientes para agricultura, independentemente da adição de materiais inorgânicos antes ou após o processo de compostagem (contraste \hat{C}_1 , Figura 2a). Apesar disso, dos compostos comuns o enriquecido a 10% foi a fonte que melhor possibilitou que esse nutriente estivesse dentro da faixa considerada suficiente para o bom desenvolvimento da cultura (Kurihara et al., 2013), sobretudo em relação ao composto comum misturado, que foi a única fonte avaliada que não elevou o teor de K a níveis considerados suficiente (dados não mostrados).

A capacidade de extração de nutrientes disponíveis no solo é variável entre as plantas (Carvalho et al., 2007). Segundo Lacerda et al. (2015) a cultura do milho é mais responsiva à fertilização do que a cultura da soja, respondendo significativamente à adubação, mesmo em condições de solos com alta fertilidade. Assim, os nutrientes disponibilizados pela rocha durante o processo de compostagem do composto comum foram melhor acessados e aproveitados pela cultura do milho do que pela soja, o que possibilitou a detecção de incremento significativo na MSPA das plantas de milho quando adubadas com composto comum enriquecido em detrimento ao composto misturado (Figura 1 b). Este incremento, portanto, evidencia de forma clara que o processo de compostagem é capaz de promover o intemperismo do pó da rocha.

Embora o processo de compostagem tenha proporcionado maior incremento da MSPA das plantas de milho, como evidenciado pelo contraste \hat{C}_3 (Figura 1b), este efeito

não foi acompanhado pelo acréscimo significativo dos conteúdos de K, Si e Na nas plantas de milho (Figura 2a, 2b e dados não mostrados, respectivamente). Esse fato sugere que a promoção do crescimento esteja também associado a outros elementos liberados pelo fonolito, uma vez que as rochas silicatadas apresentam composição multielementar (Ramos et al., 2015). Essa possibilidade coloca em evidência a dificuldade de predição exata de quais elementos serão mais rapidamente disponibilizados por esse tipo de fonte e em que taxa tal processo poderá ocorrer.

Os diferentes processos de compostagem visam, exclusivamente, fornecer condições adequadas aos microrganismos decompositores para que esses degradem a matéria orgânica e disponibilizem nutrientes para as plantas através de um produto de elevada qualidade (Lim et al., 2016). Assim, o efeito menos pronunciado dos compostos tipo bokashi enriquecidos sobre o crescimento e a nutrição das culturas, quando comparado ao composto puro, demonstra que o enriquecimento pode ter influenciado negativamente as condições ideais para o desenvolvimento da microbiota e, conseqüentemente, a mineralização dos resíduos orgânicos. Esta hipótese justificaria o efeito significativamente superior da simples mistura de fonolito com bokahi pronto sobre o crescimento e o conteúdo de K e Si na parte aérea das plantas de milho, quando comparado ao bokashi enriquecido a 10% (Figuras 1b, 2b e 2c, respectivamente).

Segundo Nishanth & Biswas (2008), o enriquecimento de compostos com materiais inorgânicos não deprecia a qualidade dos compostos produzidos, sendo uma tecnologia viável para a gestão de resíduos minerais. O desempenho agrônômico do composto comum enriquecido a 10% em promover o crescimento da cultura do milho corroboram com os resultados reportados por esses autores. No entanto, a avaliação dos compostos tipo bokashi enriquecidos demonstram a dificuldade de se obter recomendações generalizadas quanto a eficácia de diferentes processos de compostagem em promover o intemperismo de materiais silicatados, tais como o pó de fonolito.

De acordo com Lim et al. (2016), a decomposição de resíduos orgânicos, mediada por microrganismos, que culmina em um material bioestabilizado, envolve transformações de natureza bioquímica extremamente complexas, cujo entendimento integral não é completamente descrito. Por isso, ao considerar os diversos tipos de processos de compostagem adotados na agricultura, a compreensão dos aspectos da degradabilidade dos resíduos que compõe a matéria prima a ser compostada, sobretudo quando enriquecido com fontes minerais de baixo teor e solubilidade, torna-se ainda

mais complexa, em virtude da peculiaridade de cada técnica, como evidenciado no presente estudo.

5.3. Disponibilização no solo e disponibilização total de nutrientes

Os compostos avaliados no presente estudo, além de fornecerem nutrientes as culturas, promoveram ainda um considerável efeito residual de K no solo (Contraste \hat{C}_1 , figura 3a). De acordo com Sousa & Lobato (2004), a faixa de disponibilidade de K, em solos de cerrado, considerada adequada para produção de diversas culturas anuais é de 51 a 80 mg dm⁻³. Sendo assim, o efeito residual gerado pelos compostos enriquecidos ou misturados, em ambos os tipos de compostos, possibilitaria um terceiro cultivo subsequente, uma vez que os teores desse elemento se encontram acima da faixa adequada.

Além da elevação da disponibilidade de K promovida pelos tratamentos, estes também influenciaram na liberação de Si no solo (Contraste \hat{C}_1 , Figura 3b). No entanto, o efeito verificado na disponibilidade de Si no solo promovido pelos compostos incrementados com pó de fonolito não foi acompanhada pelo conteúdo desse elemento na parte aérea das culturas, sobretudo entre composto comum enriquecido e misturado para plantas de milho (Contraste \hat{C}_3 , Figura 2c). Tal fato se justifica em virtude da expressiva diferença que existe entre espécies de plantas na capacidade de acumulação desse elemento (Mitani et al., 2009). Tamai & Ma (2008) verificaram um considerável aumento no conteúdo de Si em plantas de arroz (*Oryza sativa* L. cv Oochikara), quando fertilizadas com fontes silicatadas. Entretanto, Lana et al. (2003) ao estudarem o efeito da adubação com Si em plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) demonstraram que, apesar do aumento da disponibilidade de Si no solo e da resistência a pragas e doenças, não houve diferenças no conteúdo de Si na parte aéreas de plantas adubadas com a fonte silicática e o controle.

Diversos pesquisadores têm constatado o efeito positivo da utilização de silício na agricultura, sobretudo no controle de pragas e doenças, aumento da tolerância à estresse hídrico, aumento na disponibilidade de P, entre outros (Zhu & Gong, 2014; Ma & Yamaji, 2006). Apesar dos reconhecidos benefícios do Si para agricultura, a intensificação do uso da terra sem práticas adequadas de manejo de nutrientes tem resultado em seu esgotamento no solo (Guntzer et al., 2012). Isso ocorre em função da não reposição desse elemento, via fertilizantes, pelos produtores, por acreditarem que o próprio solo pode sustentar sua oferta (Meena et al., 2014). De acordo com FAO (Food

and Agriculture Organization of the United Nations, 1998), a remoção mundial de Si em solos agrícolas pode ser estimada em 210-224 milhões de toneladas anuais.

Segundo Meena et al. (2014), materiais inorgânicos presentes nos solos, tais como as micas e feldspatos, embora ricos em Si, não são considerados fontes eficientes em silício, devido à baixa solubilidade. Nesta perspectiva, a perturbação do ciclo biogeoquímico do Si torna-se uma questão fundamental, uma vez que a depleção desse elemento em solos agrícolas pode ter impacto significativo no rendimento de algumas culturas (Guntzer et al., 2012; Meena et al., 2014). Assim, em face dessa problemática, o enriquecimento de pilhas de compostagem de resíduos orgânicos comuns com materiais silicatados, como pó de fonolito, além de otimizar a disponibilidade de nutrientes considerados essenciais às plantas, pode contribuir significativamente com a solubilização de Si desses materiais, incrementando o conteúdo desse elemento no solo, como demonstrado no presente estudo (Contrastes \hat{C}_1 e \hat{C}_2 , Figura 3b).

A liberação de sódio para o solo por pó de rochas silicáticas deve ser vista com cuidado, em razão dos efeitos indesejáveis desse elemento, quando em excesso, para o sistema solo-planta (Ribeiro et al., 2010). Apesar da influência significativa do processo de compostagem sobre a liberação de nutrientes para o solo (Contraste \hat{C}_3 , Figura 3a e b), esse efeito não foi evidenciado para os teores de sódio no solo, como demonstrado pela estimativa do contraste \hat{C}_3 (Figura 3c). Este resultado pode estar ligado à lixiviação de Na das pilhas de compostagem uma vez que este processo foi realizado a céu aberto.

Além disso, verificou-se que os tratamentos não elevaram, significativamente, o conteúdo de sódio na parte aérea das culturas, quando comparado com o controle (dados não mostrados). De acordo com Tahir et al. (2006), a concentração de Si no solo, sobretudo na região rizosférica, correlaciona-se negativamente com conteúdo de sódio na parte aérea da planta. Ainda segundo os mesmos autores, a redução da absorção de Na pode ser um dos possíveis mecanismos de tolerância à salinidade em função da disponibilidade de Si. Sendo assim, a maior disponibilidade de Si no solo, promovida pelos tratamentos, pode ser uma hipótese plausível para a não observância de incremento significativo de sódio entre os tratamentos e o controle, na parte aérea das plantas de soja e milho, mesmo diante da clara influência dos tratamentos sobre a disponibilidade desse elemento no solo (Contraste \hat{C}_1 , Figura 3c).

É importante destacar que o extrator Mehlich-1, por ser uma solução ácida, pode superestimar a disponibilidade de nutrientes em solos fertilizados por fontes minerais de baixa solubilidade (Novais et al., 2007). Apesar de o extrator poder exercer esse efeito,

a não equivalência das médias entre composto comum enriquecido a 10% e composto misturado, como evidenciado pela estimativa do contraste \hat{C}_3 (Figura 3a e 3b), demonstra claramente que o maior incremento observado nos teores de K e Si no solo, em função do enriquecimento, se deu pela ação microbiana envolvida no processo tradicional de compostagem.

Deve-se ressaltar que a proposta central do presente trabalho é buscar evidências de que o processo de compostagem atua efetivamente na liberação de nutrientes de pós de rochas silicatadas, tais como o fonolito. Assim, a biodisponibilização total é a variável resposta que melhor reflete a síntese dos resultados anteriores, pois considera a magnitude dos incrementos gerados no conteúdo das plantas e do ainda disponível no solo ao final do experimento.

A biodisponibilização total de elementos evidenciou que o processo de compostagem comum atuou positivamente sobre a solubilização do pó de rocha, melhorando, dessa maneira, a qualidade final dos compostos produzidos (Contraste \hat{C}_3 , Figura 4b). Esse efeito deve estar associado, entre outros fatores, a redução do pH que ocorre durante a decomposição dos materiais orgânicos biodegradáveis. A acidificação do meio deve-se à presença de ácidos orgânicos de baixa massa molecular, proveniente do metabolismo de microrganismos decompositores (Yu & Huang 2009; Ji et al., 2010).

Segundo Yu & Huang (2009), ácidos orgânicos, tais como láctico, acético, propionico e butírico são produzidos rapidamente durante a fase inicial da compostagem, denominada de fase termofílica, pela intensa atividade microbiana. An et al. (2012), constataram queda acentuada do pH, nos primeiros seis dias de compostagem, que atingiu valores próximos a 4. Dessa maneira, considerando que a solubilização dos minerais fontes de nutrientes está intimamente relacionada à presença de acidez, a queda do pH durante a fase termofílica, mesmo que por um curto período de tempo, já pode ser suficiente para melhorar a liberação de elementos do pó de fonolito, como evidenciado pela biodisponibilização total de Si, aprimorando a qualidade final dos compostos obtidos.

Apesar de haver a queda abrupta de pH durante os primeiros dias de compostagem, até o final do processo o pH tende a subir novamente, gerando a falsa impressão de que a compostagem ocorre em níveis de pH próximos da neutralidade. Tal fato pode ser um dos fatores que tem levado alguns autores a considerarem a hipótese de que o enriquecimento de pilhas de compostagem, com pós de rocha silicatadas, seja incapaz de melhorar a solubilização desses materiais (van Straaten, 2006). Além disso,

outros fatores como a intensa imobilização microbiana dos produtos das reações do intemperismo dos minerais e a complexação dos cátions liberados com ânions orgânicos, auxiliam no deslocamento dos equilíbrios da hidrólise mineral (Harley & Gilkes, 2000; Uroz et al., 2007).

As características químicas dos diferentes resíduos sólidos usados na compostagem são bastante variáveis e esta variabilidade pode interferir na eficiência do processo em favorecer a dissolução de silicatos. An et al. (2012) constataram que adição de cinzas de carvão elevou o pH, sobretudo nos primeiros dias do processo de compostagem, que passou de 4,1 para 8,0. Assim sendo, uma hipótese para a ausência de diferenças na biodisponibilização de K e Si (Contraste \hat{C}_2 . Figuras 4a e 4b), entre bokashi enriquecido e misturado a 10% com pó de fonolito, é o fato do material compostado ser rico em cinzas, impedindo a acidificação acentuada na fase de intensa produção de ácidos orgânicos.

A dissolução dos minerais pelos ácidos orgânicos pode não estar somente associada a capacidade dessas substâncias em reduzir o pH do meio, mas também em sua habilidade em formar complexos com os minerais, mesmo em condições de pH próximos a neutralidade, através do enfraquecimento das ligações entre oxigênio-metal, presentes na superfície do mineral (Rogers & Bennett, 2004). Logo, a ineficiência do processo de compostagem do composto tipo bokashi em otimizar a solubilização dos minerais, pode também estar sendo influenciada pela menor produção de ácidos orgânicos, seja pela característica inerente ao próprio processo anaeróbico de degradação de resíduos, ou pela interferência negativa do pó de rocha sobre o desenvolvimento e ação das cepas bacterianas, responsáveis pela fermentação e, conseqüente, liberação de ácidos orgânicos.

A temperatura integra o conjunto de fatores que influenciam a forma e a intensidade de ocorrência das ações intempéricas, podendo favorecer a solubilização mais rápida de minerais no processo de compostagem (Harley & Gilkes, 2000). White et al. (1999), ao estudarem o efeito da temperatura sobre a taxa de intemperismo de rochas graníticas, verificaram que o aumento da temperatura de 5 a 35°C, intensificou a disponibilização de elementos. Entretanto, segundo os mesmos autores, a liberação de K é menos sensível à temperatura em relação ao Si, devido aos valores de energia de ativação inerente aos elementos e aos tipos de ligações químicas presentes na rocha. Neste sentido, o aumento de temperatura durante o processo de compostagem para o composto comum, sobretudo na fase termofílica, pode também ter favorecido, em maior

magnitude, a diminuição da energia de ativação necessária para liberação do Si em relação ao K (Figura 4a e 4b, contraste \hat{C}_3).

De acordo com Belyaeva & Haynes (2009), a presença de materiais alcalinizantes pode reduzir, além da própria temperatura, a duração da fase termofílica de transformação dos resíduos. Assim, uma outra possível hipótese que explique a ineficiência do processo de compostagem tipo bokashi sobre a solubilização de silício e outros nutrientes, é que a presença de cinzas pode ter reduzido a fase termofílica do processo, resultando em menor exposição dos minerais a maiores temperaturas (Figura 4a, 4b e 4c. Contraste \hat{C}_2).

Uma problemática do uso de materiais silicatados de baixos teores de nutrientes na agricultura deve-se ao desconhecimento detalhado das cinéticas de liberação dos elementos envolvidos, especialmente nutrientes presentes em menor concentração nessas rochas. Apesar da rocha silicatada utilizada apresentar teor de K considerável, cerca de 8% de K_2O , uma hipótese plausível para a não observância de diferença estatística, para esse nutriente, entre composto enriquecido a 10% e misturado (Figura 4a, contraste \hat{C}_3), é a proporção em massa de pó de fonolito utilizado no processo de compostagem e a quantidade de K_2O representativa a esta massa, diferentemente do observado para Si, que é o elemento mais abundante desta rocha (Figura 4b, contraste \hat{C}_3). Além disso, essa hipótese torna-se ainda mais coesa ao considerarmos que houve uma tendência crescente no teor total de K com o aumento da porcentagem de rocha incorporada antecipadamente ao processo, como evidenciado pelo aumento significativo de K do composto comum enriquecido a 10% quando comparado ao composto comum puro e enriquecido a 5%.

6. CONCLUSÕES

O enriquecimento de pilhas de compostagem comum com pó de fonolito promove melhorias significativas na disponibilidade de K e Si no sistema solo-planta, quando comparado à simples mistura.

O processo de compostagem comum é capaz de acelerar o intemperismo de pó de rocha e promover uma maior liberação de K e Si. Esta evidência abre novas perspectivas para o desenvolvimento de organominerais que aproveitem fontes silicatadas alternativas de nutrientes para a agricultura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AN CJ, HUANG GH, YAO Y, SUN W, AN K. Performance of in-vessel composting of food waste in the presence of coal ash and uric acid. *Journal of Hazardous Materials*. 2012. 203: 38-45.

BELYAEVA ON, HAYNES RJ. Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash. *Bioresource Technology*. 2009. 100: 5203-5209.

BERNAL MP, ALBURQUERQUE JA, MORAL R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*. 2009. 100: 5444-5453.

BISWAS DR, NARAYANASAMY G, DATTA SC, SINGH G, BEGUM M, MAITI D, MISHRA A, BASAK BB. Changes in nutrient status during preparation of enriched organomineral fertilizers using rice straw, low-grade rock phosphate, waste mica, and phosphate solubilizing microorganism. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2009. 40:2285-307.

CARVALHO AMX. Rochagem: um novo desafio para o manejo sustentável da fertilidade do solo. In: SILVA, J. C.; SILVA, A. A. S.; ASSIS, R. T. (Eds.). *Sustentabilidade e Inovações no Campo*. Uberlândia: Composer. 2013.117-132.

CARVALHO LB, BIANCO S, PITELLI RA, BIANCO MS. Dry matter and macronutrient accumulation by maize and *Brachiaria plantaginea*. *Planta Daninha*. 2007. 25: 293-301.

DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). *Sumário Mineral 2014*. Brasília: v. 34, 2014.

DON A, SCHUMACHER J, FREIBAUER A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks a meta-analysis. *Global Change Biology*. 2011. 17: 1658-1670.

DONAGEMA GK, CAMPOS DVB, CALDERANO SB, TEXEIRA WG, VIANA JHM. *Manual de Métodos de Análise de Solos*. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2011.

ELLIOTT CL, SNYDER GH. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1991. 39: 1118-9.

ELSER J, BENNETT E. Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle. *Nature*. 2011. 478: 29-31.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). *Sistema Brasileiro de Classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro. 2013.

FAO (1998). World Agricultural Center, FAOSTAT agricultural statistic data – base gateway.

FOLEY JA, RAMANKUTTY N, BRAUMAN KA, CASSIDY ES, GERBER JS, JOHNSTON M, MUELLER ND, O'CONNELL C, RAY DK, WEST PC, BALZER C. Solutions for a cultivated planet. *Nature*. 2011. 478: 337-342.

FRANKS DM, BOGER DV, CÔTE CM, MULLIGAN DR. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*. 2011. 36: 114-22.

GUIMARÃES DV, GONZAGA MI, MELO NETO JD. Management of soil organic matter and carbon storage in tropical fruit crops. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2014. 18: 301-306.

GUNTZER F, KELLER C, MEUNIER JD. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2012. 32: 201-213.

GUO R, LI G, JIANG T, SCHUCHARDT F, CHEN T, ZHAO Y, SHEN Y. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology*. 2012 .112: 171-178.

HARLEY AD, GILKES RJ. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2000. 56: 11-36.

HJELMAR U. Consumers' purchase of organic food products. A matter of convenience and reflexive practices. *Appetite*. 2011. 56: 336-344.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). Plano Nacional de Resíduos: diagnósticos dos resíduos urbanos, agrosilvopastoris e a questão dos catadores. Circular n.145, p.9-13, 2012a.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Relatório de Pesquisa. p.16-20, 2012b.

JARQUE CM, BERA AK. Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals. *Economics Letters*. 1980. 6: 255-259.

JI Z, CHEN G, CHEN Y. Effects of waste activated sludge and surfactant addition on primary sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation. *Bioresource Technology*. 2010.101: 3457-3462.

KIEHL EJ. *Novo Fertilizantes Orgânicos*. Piracicaba: edição do autor, 2010.

KURIHARA CH, VENEGAS VHA, NEVES JCL, NOVAIS RF, STAUT LA. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. *Revista Ceres*. 2013.60: 412-419.

LACERDA JJJ, RESENDE AV, NETO AEF, HICKMANN C, CONCEIÇÃO OP. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2015. 50: 769-78.

LANA RM, KORNDORFER GH, JUNIOR LA, SILVA AF, LANA AM. Efeito do silicato de cálcio sobre a produtividade e acumulação de silício no tomateiro. *Bioscience Journal*. 2006.19: 15-20.

LEITE PC. Interação silício-fósforo em latossolo roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação. 1997. 87p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

LI Y, LI W, WU C, WANG K. New insights into the interactions between carbon dioxide and ammonia emissions during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*. 2013. 136: 385-93.

LIM SL, LEE LH, WU TY. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2016. 111: 262-78.

MA JF, YAMAJI N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*. 2006. 11: 392-397.

MAKITA R. "A Role of Fair Trade Certification for Environmental Sustainability." *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*. 2016. 29: 185-201.

MANCUSO MA, SORATTO RP, CRUSCIOL CA, CASTRO GS. Effect of potassium sources and rates on arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2014. 38: 1448-56.

MEENA VD, DOTANIYA ML, COUMAR V, RAJENDIRAN S, KUNDU S, RAO AS. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *Proceedings*

of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences. 2014. 84: 505-518.

MENDONÇA ES, MATOS ES. *Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises*. Viçosa: UFV. 2005.

MITANI N, CHIBA Y, YAMAJI N, MA JF. Identification and characterization of maize and barley Lsi2-like silicon efflux transporters reveals a distinct silicon uptake system from that in rice. *The Plant Cell*. 2009. 21: 2133-2142.

MOHARANA PC, BISWAS DR. Assessment of maturity indices of rock phosphate enriched composts using variable crop residues. *Bioresource Technology*. 2016. 222: 1-3.

NISHANTH D, BISWAS DR. Kinetics of phosphorus and potassium release from rock phosphate and waste mica enriched compost and their effect on yield and nutrient uptake by wheat (*Triticum aestivum*). *Bioresource Technology*. 2008. 99: 3342-3353.

NOVAIS RD, ALVAREZ V. VH, BARROS NF, FONTES RLF, CANTARUTTI RB, NEVES JCL. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007.

PARTELLI FL, VALICHESKI RR, VIEIRA HD, GONTIJO I, DE BRITO FERREIRA EP. Physical soil attributes of Conilon coffee (*Coffea canephora*) under organic and conventional management systems. *Australian Journal of Crop Science*. 2016. 10:646-653.

RAMOS CG, QUEROL X, OLIVEIRA ML, PIRES K, KAUTZMANN RM, OLIVEIRA LF. A preliminary evaluation of volcanic rock powder for application in agriculture as soil a remineralizer. *Science of the Total Environment*. 2015. 512:371-80.

REGANOLD JP, WACHTER JM. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*. 2016. 2:15221.

RIBEIRO AC, GUIMARÃES PT, ALVAREZ VH. Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação. Viçosa. 1999.

RIBEIRO LD, SANTOS AR, SOUZA JS. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2010. 34: 891- 897.

ROGERS JR, BENNETT PC. Mineral stimulation of subsurface microorganisms: release of limiting nutrients from silicates. Chemical Geology. 2004. 203: 91-108.

ROSNER B. Percentage points for a generalized ESD many-outlier procedure. Technometrics. 1983. 25: 165-72.

SETIAWATI TC, MUTMAINNAH L. Solubilization of Potassium Containing Mineral by Microorganisms From Sugarcane Rhizosphere. Agriculture and Agricultural Science Procedia. 2016. 9: 108- 117.

SILVA FC. Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SILVA ME, LOPES AR, CUNHA-QUEDA AC, NUNES OC. Comparison of the bacterial composition of two commercial composts with different physicochemical, stability and maturity properties. Waste Management. 2016. 50: 20-30.

SOUSA DD, LOBATO E. Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa Cerrados. 2004.

TAHIR MA, RAHMATULLAH T, AZIZ M, ASHRAF S, KANWAL MM, MAQSOOD MA. Beneficial effects of silicon in wheat (*Triticum aestivum L.*) under salinity stress. Pakistan Journal of Botany. 2006. 38: 1715-1722.

TAMAI K, MA JF. Reexamination of silicon effects on rice growth and production under field conditions using a low silicon mutant. Plant and Soil. 2008. 307: 21-27.

TEIXEIRA AMS, SAMPAIO JA, GARRIDO FMS, MEDEIROS ME. Avaliação da rocha fonolito como fertilizante alternativo de potássio. *Holos*. 2012. 28: 21-34.

THEODORO SH, LEONARDOS OH. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2006. 78: 721-30.

UROZ S, CALVARUSO C, TURPAULT MP, PIERRAT JC, MUSTIN C, FREY-KLETT P. Effect of the mycorrhizosphere on the genotypic and metabolic diversity of the bacterial communities involved in mineral weathering in a forest soil. *Applied and Environmental Microbiology*. 2007. 73: 3019-3027.

van STRAATEN, PV. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2006. 78: 731-747.

WHITE AF, BLUM AE, BULLEN TD, VIVIT DV, SCHULZ M, FITZPATRICK J. The effect of temperature on experimental and natural chemical weathering rates of granitoid rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999. 63: 3277-32791.

WILLER H, LERNOUD J, SCHLATTER B. Current statistics on organic agriculture worldwide: Organic area, producers and market. *The World of organic agriculture. Statistics and emerging trends*. 2014. 36-124.

YU H, HUANG GH. Effects of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste. *Bioresource Technology*. 2009. 100: 2005-2011.

ZHU Y, GONG H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*. 2014. 34: 455-472.

CAPÍTULO II

DISPONIBILIZAÇÃO DE NUTRIENTES DE PÓ DE FONOLITO MEDIADA POR AÇÕES BIOINTEMPÉRICAS

RESUMO

Os pós de rochas silicatadas tem sido apontados como possíveis fontes alternativas de nutrientes que podem melhorar a sustentabilidade do setor agrícola. No entanto, a aplicação desses materiais diretamente ao solo apresenta como principais limitações os baixos teores e solubilidade dos minerais fonte dos nutrientes. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar, numa perspectiva biointempérica, o potencial da aplicação conjunta de fonolito com compostos orgânicos sobre a disponibilização de nutrientes no solo e a produção e nutrição do capim braquiária (*Urochloa decumbens*). Adicionalmente, buscou-se avaliar a efetividade do processo de compostagem em aumentar a disponibilização de nutrientes dessa rocha. Para tal, um experimento foi conduzido com cinco tratamentos (controle; composto enriquecido com pó de fonolito a 10%; composto misturado com pó de fonolito a 10%; apenas pó de fonolito; apenas composto) e quatro repetições. As fontes alternativas influenciaram positivamente a produtividade e o conteúdo de K e Si na parte aérea do capim braquiária e a liberação desses elementos ao solo. No entanto, a aplicação conjunta de pó de fonolito com compostos orgânicos foram as fontes que melhor promoveram a biodisponibilização total de nutrientes. Apesar disso, não houve evidência de que o processo de compostagem promova o biointemperismo do fonolito. Contudo, a aplicação conjunta de pó de fonolito com compostos orgânicos, seja como componente da mistura inicial seja como aditivo aos compostos estabilizados, é uma estratégia que aumenta a disponibilização de nutrientes da fonte mineral.

Palavras-chave: pó de rocha, compostagem, fontes alternativas de potássio

8. INTRODUÇÃO

As pastagens representam a principal fonte alimentar para a criação de bovinos no Brasil. De acordo com o Censo Agropecuário Brasileiro de 2006 (IBGE, 2007), estima-se que aproximadamente 172 milhões de hectares são explorados como pasto. A utilização de grandes áreas para pastagens é uma realidade mundial, uma vez que cerca de 26% de toda a área do planeta é empregada para a criação de gado em pastoreio (FAO, 2006).

Apesar da importância das pastagens para a pecuária brasileira, o país possui cerca de 30 milhões de hectares de pastagens em algum estágio de degradação (MAPA, 2016). Entre os fatores relacionados à degradação das pastagens estão o uso de solos com alta susceptibilidade à erosão, o pastejo excessivo e o manejo inadequado da fertilidade do solo (Peron & Evangelista, 2004; Li et al., 2013; Sattari et al., 2016). Em áreas de pastagem, o manejo da fertilidade frequentemente é realizado com baixo aporte de nutrientes e em sistemas com apenas uma espécie forrageira, ou não consorciados com plantas de maior porte para a otimização da ciclagem de nutrientes (Alves Filho et al., 2003; Calil et al., 2016).

O baixo aporte de nutrientes nestes sistemas está diretamente ligado às dificuldades de reaproveitamento dos dejetos animais em nível de propriedade (Cordell et al., 2009; Elser & Bennet, 2011) e ao crescente preço dos fertilizantes solúveis convencionais, que representam frequentemente o principal componente dos custos de produção. Esse cenário de elevação dos custos dos fertilizantes e, conseqüentemente, de aumento do risco da atividade, está associado, entre outros fatores, à alta dependência externa brasileira por esses insumos. Segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2014), o Brasil é o quarto maior importador de fertilizantes do mundo, sendo que, por exemplo, mais de 90 % de todo o cloreto de potássio consumido é importado e, portanto, susceptível às oscilações de preço e oferta do mercado internacional.

Além disso, a crescente demanda por insumos aceitável aos sistemas orgânicos de produção tem estimulado à busca por fontes alternativas de nutrientes para fertilização do solo. Apesar da forte ascensão da produção de alimentos em sistemas agroecológicos no mundo, os produtos de origem animal ainda representam uma pequena parcela do mercado orgânico (Willer et al., 2014). O Brasil é um dos poucos países em desenvolvimento que está aumentando a produção e exportação de carne

bovina orgânica (Chander et al., 2011). No entanto, essa participação encontra-se muito abaixo da crescente demanda por produtos orgânicos desse setor.

Dessa forma, é evidente a necessidade de buscar alternativas ao manejo da fertilidade do solo visando melhorar a sustentabilidade do setor agrícola. Segundo Srivastava et al. (2016) para ser mais sustentável a agricultura deve ser altamente resiliente, potencialmente eficiente, economicamente viável, ambientalmente correta e socialmente justa. Assim, entre as opções para aumentar a sustentabilidade agrícola estão a otimização da ciclagem de nutrientes através do uso de resíduos orgânicos (Elser & Bennet, 2011) e o uso de fontes menos dispendiosas energeticamente e localmente disponíveis.

Neste sentido, o processo de compostagem possui grande potencial de aplicabilidade na agricultura por ser de baixo custo e apresentar alta eficiência e rapidez no processo de ciclagem de nutrientes de resíduos orgânicos diversos (Lim et al., 2016). Estima-se que a cada ano, um terço de todos os alimentos produzidos para consumo humano no mundo é perdido ou desperdiçado antes de ser consumido (FAO, 2011). Além disso, o setor agropecuário produz grandes quantidades de dejetos animais, frequentemente não reaproveitados. De acordo com Cordell et al. (2009), na década de 2000 mais de 7 milhões de toneladas de fósforo foram liberadas anualmente no meio ambiente através de excretas animais, passíveis de causar sérios problemas ambientais.

Segundo Guelfi-Silva et al. (2013) existe ainda a possibilidade de aproveitamento de rejeitos de outros setores produtivos, como é o caso dos pós de rochas silicatadas oriundos de subprodutos da mineração. Embora não há uma estimativa global da quantidade de subprodutos gerados pela indústria de mineração, em 2014 apenas a união europeia produziu 2503 milhões de toneladas de resíduos de minério (EuroStat, 2017). No Brasil, estima-se que em 2030 cerca de 684 milhões de toneladas de resíduos, oriundos do setor mineral, serão gerados (IPEIA, 2012).

Apesar dos benefícios da aplicação de pós de rochas silicatadas diretamente ao solo, estes apresentam como principal limitação a baixa solubilidade e reatividade dos minerais fonte dos nutrientes. Dessa forma, a utilização da compostagem como um meio de biointemperismo pode otimizar o aproveitamento tanto de resíduos orgânicos como inorgânicos, resultando em melhorias na qualidade final dos compostos produzidos.

O fonolito é um tipo de rocha silicatada que apresenta em sua composição mineralógica o predomínio de feldspatos potássicos e feldspatóides. Apesar de sua

utilização como fertilizante ser apontada como promissora, não há avaliações desta rocha em uma perspectiva biointempérica no Brasil até o momento. Portanto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o potencial da aplicação conjunta de fonolito com compostos orgânicos sobre a disponibilização de nutrientes no solo e sobre a produção e nutrição do capim braquiária (*Urochloa decumbens*). Adicionalmente, buscou-se avaliar a efetividade do processo de compostagem em aumentar a disponibilização de nutrientes dessa rocha.

9. MATERIAL E MÉTODOS

Um experimento foi conduzido em condições de campo na estação experimental da Universidade Federal de Viçosa, *campus* de Rio Paranaíba, Minas Gerais, localizada nas coordenadas 19°12'35" S e 46°7'57" O a 1,125 m de altitude. O solo da área experimental foi classificado como um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (EMBRAPA, 2013).

9.1. Matriz experimental

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados com cinco tratamentos (controle; composto enriquecido com pó de fonolito a 10%; composto misturado com pó de fonolito a 10%; apenas pó de fonolito; apenas composto) com quatro repetições. A cultura teste foi o capim braquiária (*Urochloa decumbens*), estabelecido na área à aproximadamente dez anos e manejado sob sequeiro sem histórico de adubação, calagem ou uso de agrotóxicos após a implantação. As unidades experimentais foram constituídas por parcelas de 9 m² (3m x 3 m). Os compostos e o pó de fonolito foram aplicados na dose equivalente a 23,4 m³ ha⁻¹ e 5,4 t ha⁻¹ respectivamente.

9.2. Obtenção dos compostos

Os compostos foram preparados em parceria com a BIOMIX - Indústria e Comércio de Insumos Orgânicos Ltda., em Cotia – SP, através da mistura dos materiais orgânicos serragem de diversas origens, esterco de gado e resíduos de polpa de fruta, conforme procedimento de rotina da empresa. O enriquecimento das pilhas de compostagem ocorreu no momento inicial da mistura de ingredientes, possibilitando que o pó da rocha passasse por todo o processo. A adição de pó de fonolito ao material orgânico seguiu uma proporção de 10 % (m/v). As pilhas de compostagem possuíam 20 m³ cada e foram mantidas em pátio aberto sob piso semipermeável por 90 dias até a

maturação dos compostos. Para os compostos misturados, o mesmo procedimento foi feito, mas a adição de pó de fonolito ocorreu após a estabilização do processo de compostagem, ou seja, com os compostos já maturados. Após a obtenção dos compostos estes foram levados até a estação experimental da UFV, secos, tamisados em peneira de malha 0,5 mm e caracterizados quimicamente conforme Silva (2009) (Tabela 1). O pó de fonolito, obtido diretamente com a fabricante, é proveniente do complexo alcalino de Poços de Caldas, MG e possui uma composição química diversificada com aproximadamente 8% de K₂O, 54 % de SiO₂ e 6% de Na₂O.

Tabela 1. Caracterização química dos compostos

	C	N	C/N	K ₂ O	Mn	Cu	Na	Cinzas	pH	CTC
Compostos	..... dag kg ⁻¹								(CaCl ₂)	mmol kg ⁻¹
Puro	15,60	1,52	10,26	0,95	365,00	75,00	0,36	53,55	7,90	300,00
Enriquecido 10%	12,90	1,52	8,48	1,05	405,00	64,00	1,28	59,32	7,90	320,00
Misturado 10%	12,30	1,40	8,78	0,82	435,00	68,00	1,00	64,00	7,90	350,00

9.3. Avaliações

A produção de forrageira foi avaliada pelo corte da parte aérea em quatro ciclos sucessivos de crescimento, de aproximadamente 21 dias entre cortes. Para amostragem de biomassa da parte aérea um gabarito de 0,25 m² foi lançado quatro vezes em cada parcela útil, com altura de corte de aproximadamente 10 cm. Após os cortes de cada ciclo, as parcelas foram roçadas e rasteladas com intuito de simular a exportação de forragem por pastejo.

A parte aérea coletada foi seca em estufa de circulação forçada de ar à 65 °C e subamostras foram moídas em moinho Willey equipado com peneira de 1,0 mm de abertura. Em seguida as amostras foram submetidas à digestão nitro-perclórica segundo Silva (2009) e à digestão peroxídica em NaOH segundo Elliott & Snyder (1991). Os teores de Si e K foram determinados por espectrofotometria de absorção molecular e espectrofotometria de emissão de chama (Silva, 2009; Elliott & Snyder 1991). O conteúdo de nutrientes na biomassa das plantas foi calculado pelo produto entre os teores e a matéria seca das mesmas. Ao final do experimento, amostras compostas de solo foram coletadas com auxílio de um trado tipo sonda de PVC 50 mm, na camada de 0-20 cm, secas ao ar e tamisadas em peneira de 2 mm de abertura. O Si disponível no solo foi extraído pelo extrator ácido acético 0,5 mol L⁻¹ e determinado por espectrometria de absorção molecular pelo método azul (Leite, 1997). Os elementos Na

e K, extraídos em solução Mehlich 1 na relação solo:extrator de 1:10, foram determinados por espectrometria de chama e espectrometria de absorção molecular conforme Donagema et al. (2011). A biodisponibilização total foi determinada através da soma dos conteúdos de K e Si presentes na matéria seca da forrageira e o total ainda biodisponível no solo ao final do experimento. A variável biodisponibilização total de elementos, por considerar simultaneamente as variáveis anteriores, acúmulo dos nutrientes nas plantas e o efeito residual no solo, é de grande interesse e sensibilidade pois, como um índice, incorpora princípios da estatística multivariada.

9.4. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos aos testes de Hartley, Jarque-Bera (Jarque & Bera, 1980) e ESD Generalizado (Rosner, 1983) para avaliação das condições de homogeneidade das variâncias, normalidade dos resíduos e presença de outliers, respectivamente. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas entre si pelo teste Student-Newman-Keuls (SNK) a 5 % de probabilidade.

10. RESULTADOS

10.1. Crescimento e disponibilidade de nutrição às plantas

A adição dos compostos influenciou positivamente a matéria seca da forragem do capim braquiária, promovendo um incremento médio de 27% quando comparado ao controle (Figura 1). Entretanto, esse aumento expressivo na produtividade de forragem promovido pelos compostos enriquecido, misturado e puro, não diferiram estatisticamente entre si. Ademais, a adubação com pó de fonolito in natura não resultou em aumento estatisticamente significativo da produção de matéria seca total da forrageira, quando comparado ao controle.

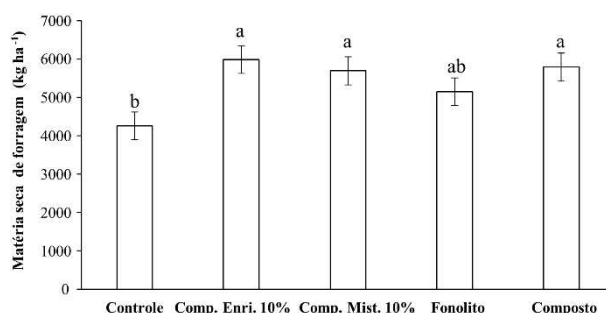


Figura 1. Produção de matéria seca total de forragem, em quatro ciclos de cortes, de capim *braquiaria* fertilizado com composto enriquecido ou misturado a 10% com pó de

fonolito, pó de fonolito in natura e composto puro. Médias seguidas por uma mesma letra não diferem entre si pelo teste SNK, ao nível de 5% de probabilidade. Barras de dispersão correspondem ao erro padrão.

O conteúdo de potássio na forragem do capim braquiária foi significativamente aumentado pelos compostos, quando comparados ao fonolito e o tratamento controle (Figura 2 A). No entanto, todas as fontes alternativas avaliadas promoveram incremento no conteúdo de Si de maneira similar, correspondente à aproximadamente 64 % em relação ao controle (Figura 2 B).

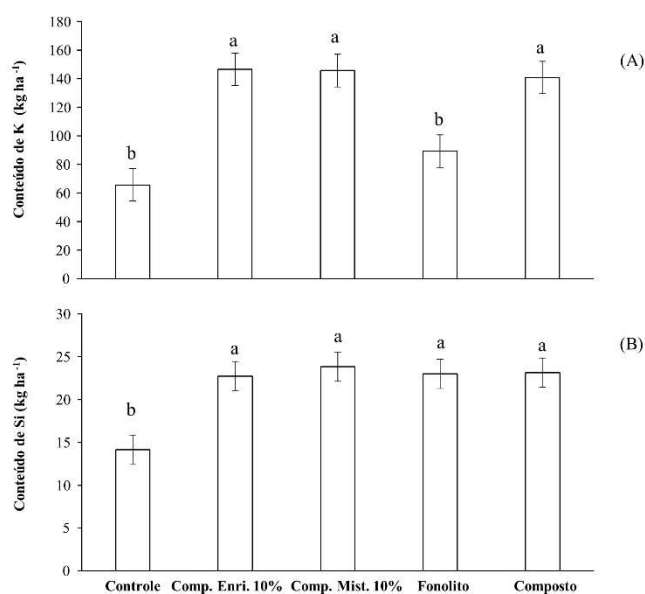


Figura 2. Conteúdo de potássio (A) e silício (B) na forragem de capim braquiária fertilizado com composto enriquecido ou misturado a 10% com pó de fonolito, pó de fonolito in natura e composto puro (média de quadro cortes). Médias seguidas por uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste SNK, ao nível de 5% de probabilidade. Barras de dispersão correspondem ao erro padrão.

10.2. Disponibilização no solo e biodisponibilização total de nutrientes

A disponibilização de K e Si no solo foi claramente aumentada pelos tratamentos (Figuras 3A e 3B). No entanto, a diferença entre composto enriquecido e misturado a 10 % com pó de fonolito, para ambos os elementos, foi não-significativa. Apesar disso, a utilização de pó de fonolito de forma conjunta com composto orgânico, seja por meio do enriquecimento antes do processo de compostagem, ou pela mistura após a bioestabilização dos resíduos orgânico, potencializou a liberação de K e Si dessa rocha silicatada, propiciando um aumento significativo desses elementos de aproximadamente 68% e 486%, respectivamente, quando comparados ao composto puro.

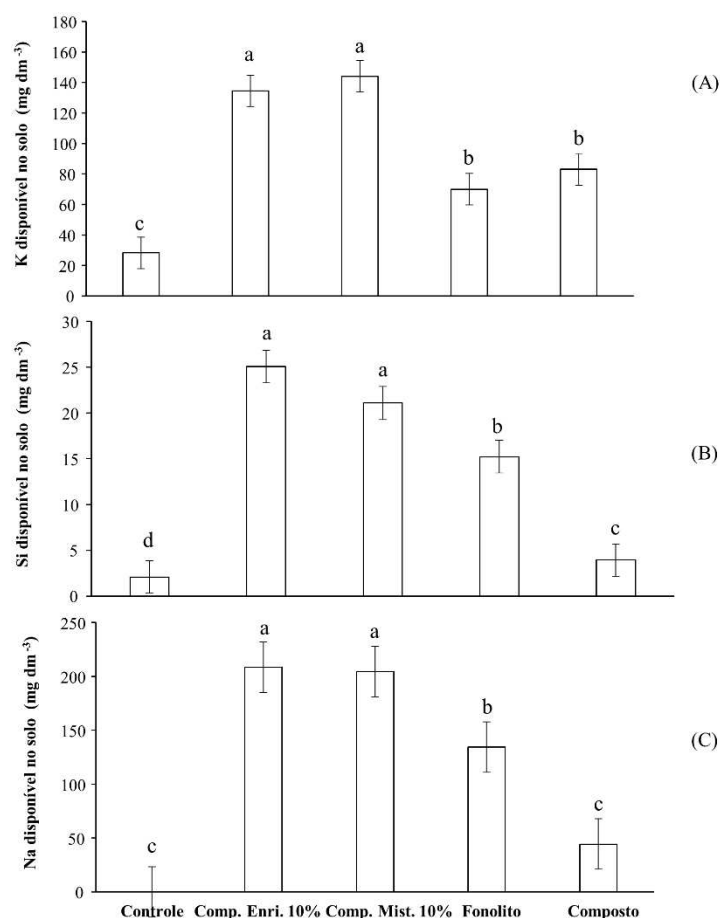


Figura 3. Disponibilidade de potássio (A), silício (B) e sódio (C) no solo fertilizado com composto enriquecido ou misturado a 10% com pó de fonolito, apenas pó de fonolito e composto puro. Médias seguidas por uma mesma letra não diferem entre si pelo teste SNK, ao nível de 5% de probabilidade. Barras de dispersão correspondem ao erro padrão.

A adubação com pó fonolito *in natura* elevou consideravelmente a disponibilização de K e Si no solo, promovendo incrementos expressivos em relação ao controle e ao composto puro, respectivamente (Figuras 3A e 3B). Além disso, o fonolito influenciou também a disponibilidade de Na no solo, que foi ainda mais expressiva quando aplicada de forma conjunta com os compostos orgânicos (Figura 3 C).

A biodisponibilização total de K e Si foi claramente influenciada pelos tratamentos. A adubação com composto orgânico conjuntamente com pó de fonolito potencializou a capacidade desses fertilizantes em liberar nutrientes e promover o crescimento do capim braquiária (Figuras 4A e 4B). Os compostos acrescidos com pó de fonolito elevaram a disponibilização total de K em 38 e 169% quando comparados ao composto puro e ao pó de fonolito, respectivamente. Além disso, estas fontes também

elevaram substancialmente a disponibilização de Si quando comparado ao efeito promovido pela aplicação dos fertilizantes em separado. No entanto, não houve diferença estatística entre os tratamentos composto enriquecido e misturado.

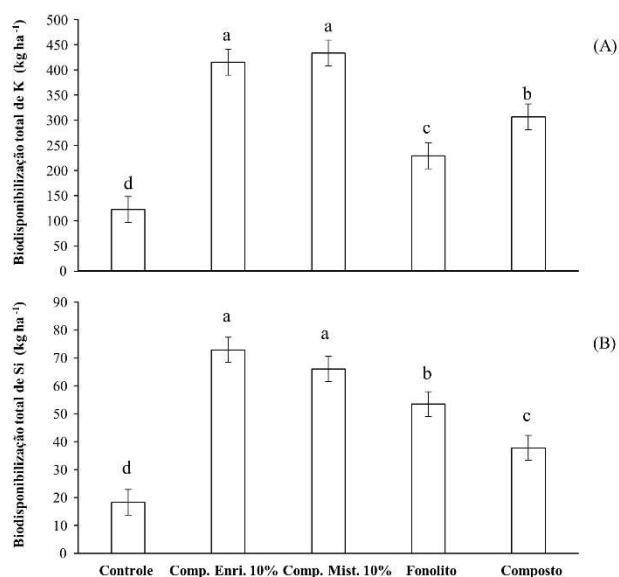


Figura 4. Biodisponibilização de potássio (A) e silício (B) a partir de composto enriquecido ou misturado a 10% com pó de fonolito, pó de fonolito in natura e composto puro. Médias seguidas por uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste SNK, ao nível de 5% de probabilidade. Barras de dispersão correspondem ao erro padrão.

11. DISCUSSÃO

11.1. Crescimento e nutrição do capim braquiária

A aplicação dos compostos influenciou substancialmente a produtividade do capim braquiária, quando comparado ao controle (Figura 1). Este resultado demonstra que o aproveitamento de resíduos orgânicos, de forma conjunta ou não com fontes silicatadas, é uma opção interessante para adubação de pastagens. Assim, a utilização desses materiais orgânicos pode contribuir tanto para redução da dependência de fertilizantes solúveis caros, responsáveis em grande parte pela resistência dos pecuaristas em realizarem adubação em áreas de pasto (Boddey et al., 2004), como também para atender a demanda crescente por fertilizantes do setor orgânico de produção.

Os incrementos da matéria seca de forragem da braquiária, resultante da aplicação dos compostos fontes de K, foram não-significativos se comparados à aplicação do pó de fonolito *in natura* (Figura 1). Este fato sugere que outro fator de crescimento contribuiu para a limitação da produção de forragem, uma vez que todos os

compostos incrementaram expressivamente o conteúdo de K na parte aérea do capim, quando comparado ao pó da rocha (Figura 2A).

A elevação no conteúdo de K na parte aérea da braquiária promovida pelos compostos (Figura 2A) está, muito provavelmente, relacionada com a pronta disponibilidade dos nutrientes proveniente dos resíduos orgânicos estabilizados. Dessa forma, a presença de composto orgânico promoveu, como esperado, maiores incrementos que o pó de fonolito in natura, de menor solubilidade. No entanto, pelo aumento observado no tratamento com apenas pó de rocha, mesmo no curto período de avaliação, há uma expectativa de que no médio e longo prazo, melhores resultados possam ser observados. Essa hipótese é corroborada pelos dados de Santos et al. (2016), que obteve respostas à aplicação de pó de verdete somente em médio prazo.

Os compostos acrescidos com pó de fonolito incrementaram o conteúdo de K em relação ao tratamento controle. No entanto, a magnitude desse incremento não resultou em diferenças estatisticamente significativas quando comparados ao composto puro (Figuras 2A e 2B). Este efeito pode estar ligado, possivelmente, a capacidade de acumulação de potássio pela cultura, uma vez que a disponibilização desse nutriente no solo foi significativamente aumentada quando os compostos foram aplicados conjuntamente com o fonolito (Figura 3A). Esse efeito também foi verificado por Orioli Júnior et al. (2009), os quais verificaram que diferentes fontes elevaram a disponibilidade de K no solo de forma distinta, mas não diferiram quanto ao conteúdo de K na parte aérea do capim Marandu.

Ademais, todos os compostos e pó de fonolito foram capazes de promover a elevação do teor de K (dados não mostrados) a valores acima da faixa de suficiência, reportada por Carvalho et al. (1991). Este resultado realça a importância do aproveitamento de resíduos no gerenciamento de nutrientes, contribuindo com o desafio de integrar e melhorar a sustentabilidade dos setores agrícola e de mineração. Além disso, no tocante da dependência de fontes solúveis de potássio, os efeitos promovidos pelas fontes avaliadas no teor desse elemento, refletem também em maior autonomia de pequenos agricultores, considerados a espinha dorsal da segurança alimentar global (Horlings & Marsden, 2011).

O acúmulo de silício em tecidos e células é uma característica proeminente de plantas da família Poaceae (Melo et al., 2010). Apesar desse elemento não ser considerado essencial ao desenvolvimento das plantas, diversos são os benefícios de sua aplicação em culturas dessa família, como as do gênero *Urochloa*. Sarto et al. (2016)

constatarem que a adução de braquiária com Si influenciou positivamente a eficiência do uso da água e a taxa de assimilação de CO₂ da cultura, ressaltando a relevância da fertilização do solo com esse elemento.

No presente estudo, todas as fontes de K avaliadas se mostraram eficientes em elevar o conteúdo de Si na forragem do capim braquiária, quando comparadas ao controle (Figura 2 B). No entanto, os fertilizantes avaliados não diferiram entre si quanto ao acúmulo de Si no tecido vegetal. Além disso, observou-se que a magnitude do incremento de Si na forragem foi pequena para uma planta considerada acumuladora de silício. Segundo Gunes et al. (2007) o acúmulo de Si na parte aérea é mais expressivo quando as plantas estão sujeitas a algum tipo de estresse. Este fato pode explicar a não diferença entre as fontes mais e menos ricas em Si testadas, uma vez que as condições foram favoráveis ao desenvolvimento da cultura durante todo o período experimental.

11.2. Disponibilização no solo e biodisponibilização total de nutrientes

As fontes alternativas de K estudadas, além de promoverem o crescimento do capim braquiária, melhoraram a disponibilização de K no solo após os 4 cortes da pastagem (Figura 3 A). No entanto, apenas as fontes orgânicas aplicadas de forma conjunta com pó de fonolito elevaram o nível desse nutriente a valores acima de 100 mg dm⁻³, o que atinge a classe de disponibilidade considerada “bom” segundo Ribeiro et al. (1999).

Apesar da aplicação do composto puro e do pó de fonolito resultarem em incrementos significativos de K no solo, que passaram de 28 para 83 e 70 mg dm⁻³, respectivamente, o incremento observado é menor que o nível crítico de K no solo para algumas espécies do gênero *Urochloa* (Orioli Júnior et al., 2009). Tal fato demonstra que a fertilização do solo com pó de fonolito concomitantemente com composto orgânico, seja por meio do enriquecimento antes do processo de compostagem ou pela simples mistura após a estabilização dos resíduos orgânicos, é capaz de potencializar a liberação de nutrientes, promovendo um considerável efeito residual de K no solo (Figura 3 A).

O significativo efeito residual de K promovido, sobretudo pela ação biointérmica da aplicação conjunta de pó de fonolito com composto orgânico demonstra que a menor reatividade das fontes silicatadas pode colaborar para redução das perdas de cátions, tal como potássio, pelo processo de lixiviação (Duarte et al.,

2013). Além da disponibilização de K ocorrer de forma gradual, o íon acompanhante de fontes minerais de baixo teor e solubilidade são ânions silicatos, conhecidamente susceptíveis à adsorção específica pelos minerais oxídicos do solo, o que contribuiu para menor mobilidade vertical do K para profundidades além daquelas ocupadas pelas raízes. Além disso, este efeito também reflete a capacidade que os pós de rocha silicatados possuem em aumentar a CTC do solo, minimizando as perdas de K e de outros cátions via lixiviação (Duarte et al., 2013).

A adubação com fontes de Si tem sido mais amplamente difundida em virtude dos benefícios que esse elemento promove no desenvolvimento de diversas culturas (Ma & Yamaji, 2006). De acordo com Korndörfer et al. (2002) solos que apresentem concentração de Si abaixo de 20 mg dm^{-3} necessitam ser fertilizados com esse elemento. No presente estudo, as fontes orgânicas enriquecida ou misturada com pó de fonolito elevaram consideravelmente a disponibilidade de Si quando comparadas aos demais tratamentos. No entanto, o composto enriquecido foi a única fonte capaz de aumentar a disponibilidade de Si acima de 20 mg dm^{-3} após os quatro cortes da pastagem.

A aplicação de pó de fonolito *in natura* também resultou em incremento significativo de Si no solo, que passou de 2 para 15 mg dm^{-3} , embora bastante inferior quando aplicado de forma conjunta com composto orgânico. Desta maneira, observa-se que a disponibilização de Si no solo, promovida pelo fonolito em pó, seguiu uma tendência distinta da observada para o conteúdo de Si na parte aérea da forrageira. Resultado semelhante foi reportado por Orioli Júnior et al. (2009), sugerindo que o acúmulo de Si nesta forrageira não seja tão expressivo ou seja controlado não apenas pela disponibilidade no solo.

A ação biointempérica estimulada pela aplicação conjunta de pó de fonolito com composto orgânico também favoreceu a liberação de sódio em relação aos demais tratamentos (Figura 3 C). Este resultado evidencia claramente que a maior presença de matéria orgânica influencia positivamente no intemperismo da rocha, ainda que os elementos tenham taxas de liberação diferenciada. Deve-se ressaltar, no entanto, que quantidades excessivas de sais solúveis na região rizosférica pode reduzir a absorção de K, induzir estresse osmótico e provocar toxicidade à planta (Wakeel, 2013).

Dessa maneira, o aumento de sódio verificado no presente estudo sugere que aplicações contínuas de altas doses de fonolito, principalmente sob essa perspectiva biointempérica, pode resultar em acúmulos indesejáveis de sódio no solo. Embora essa preocupação seja importante, Machado (2016) demonstrou que o acúmulo de sódio no

solo fertilizado com altas doses de fonolito pode ser facilmente controlado com a aplicação conjunta de gesso agrícola.

Os dados de biodisponibilização total são os que melhor refletem a síntese dos resultados anteriores, pois consideram a magnitude dos incrementos gerados no conteúdo das plantas e do ainda disponível no solo ao final do período experimental. Todas as fontes alternativas avaliadas foram eficientes em disponibilizar nutrientes em relação ao controle. Entretanto, o incremento de K promovido pelos compostos orgânicos combinados com pó de fonolito, enriquecido e misturado, foi substancialmente maior que os gerados pelo composto puro ou o pó de fonolito (Figuras 4A e 4B). Este resultado corrobora com os dados apresentados por Menna et al. (2014a), os quais verificaram melhorias na capacidade de fornecimento de fósforo quando fontes orgânicas foram aplicadas de forma concomitante com pó de rocha fosfática.

Assim, verifica-se que o manejo de fontes alternativas de K de baixo teor e solubilidade, como os pós de rochas silicatadas, pode ser significativamente melhorado por meio da aplicação conjunta com resíduos orgânicos. Além do melhor aproveitamento de nutrientes retidos na estrutura cristalina dos minerais, a aplicação conjunta de pó de fonolito com resíduos orgânicos diversos promove benefícios no sistema solo-planta.

A melhoria da qualidade final dos compostos produzidos com pó de rocha se deve, possivelmente, a presença abundante de microrganismos nos resíduos orgânicos, que podem auxiliar na solubilização de nutrientes presentes nos minerais (Basak & Biwas, 2009). Menna & Biwas (2014), ao estudarem o efeito do enriquecimento de composto orgânico com rocha fosfática, sugeriram que o aumento significativo de P disponível no solo está ligado à produção de ácidos orgânicos pela atividade microbiana, tais como, ácido cítrico, oxálico e tartárico.

Além da gama de microrganismos presentes no próprio composto orgânico, a fertilização do solo com fontes ricas em matéria orgânica estimula o desenvolvimento e a atividade de microrganismos. *Bacillus mucilaginosus*, por exemplo, é uma bactéria comum no solo que apresenta alta capacidade em biointemperizar K preso nas complexas estruturas cristalinas dos minerais, tais como micas, feldspatos e montmorilonita (Basak & Biwas, 2009; Yang et al. 2016).

Neste sentido, o expressivo aumento da biodisponibilização de K e Si dos compostos com pó de fonolito pode ser explicado pela maior solubilização dos minerais

fontes de nutriente, através de alterações do pH, promovido tanto pela atividade microbiana presente na fração orgânica dos compostos como também pelo estímulo ocasionado pela aplicação desses compostos à microbiota do solo. De acordo com Menna et al. (2014b), a fertilização de compostos enriquecidos com pó de rocha fosfática e resíduos de mica melhoraram as propriedades biológicas do solo, como respiração microbiana, atividade desidrogenase, fosfatase ácida e alcalina.

Solos com baixa capacidade de troca catiônica apresentam elevado potencial de perda de K, reduzindo, por esse motivo, a eficiência agrônômica do fertilizante utilizado (Hettiarachchi et al., 2017). Um dos benefícios da aplicação de pós de rocha silicatadas em solos tropicais é o potencial de aumento da CTC do solo (Anda et al., 2009). Desta maneira, além dos mecanismos ativos de exsudação de ácidos orgânicos ligados à intensa atividade microbiana, a maior disponibilização total de K, propiciada pelos compostos com pó de fonolito, pode ser reflexo do aumento da capacidade de troca catiônica dessas fontes quando comparadas ao composto puro. Tal possibilidade é corroborada por Nishanth & Biswas (2008) e Lima et al. (2009) que observaram aumento expressivos da CTC de compostos orgânicos que receberam resíduos de mica.

Deve-se destacar que apesar de haver alguns trabalhos que objetivaram avaliar o efeito do processo de compostagem sobre a intemperização de fontes minerais de baixo teor e solubilidade, estes não compararam o efeito do enriquecimento antecipadamente à degradação dos resíduos orgânicos com a simples mistura após os compostos maturados. No presente estudo, a não detecção de diferenças significativas entre composto enriquecido e misturado com pó de fonolito, sugere que a melhor capacidade de fornecer nutrientes dessas fontes deve-se à um efeito sinérgico da interação desses materiais e não do processo de compostagem em si.

12. CONCLUSÃO

Não houve evidencia de que o processo de compostagem promove o biointemperismo do fonolito. No entanto, a aplicação conjunta de pó de fonolito com compostos orgânicos, seja como componente da mistura inicial seja como aditivo aos compostos estabilizados, é uma estratégia que aumenta a disponibilização de nutrientes da fonte mineral. Dessa forma, a aplicação conjunta destes subprodutos é uma alternativa ao manejo da fertilidade do solo com vistas à melhoria da sustentabilidade do setor agrícola.

13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES FILHO DC, NEUMANN M, RESTLE J, SOUZA ANM, PEIXOTO LAO. Características agronômicas produtivas, qualidade e custo de produção de forragem em pastagem de azevém (*Lolium multiflorum Lam*) fertilizada com dois tipos de adubo. *Ciência Rural*. 2003.33: 143-149.

ANDA (Associação Nacional para Difusão de Adubos). Anuário estatístico do setor de fertilizantes. São Paulo, 2014. Disponível em:<http://www.anda.org.br/home.aspx> acesso em 10 de outubro 2016.

ANDA M, SHAMSHUDDIN J, FAUZIAH CI, OMAR SR. Dissolution of ground basalt and its effect on oxisol chemical properties and cocoa growth. *Soil Science*. 2009. 174: 264-271.

BASAK BB, BISWAS DR. Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare Pers.*) grown under two Alfisols. *Plant and Soil*. 2009. 317: 235-255.

CALIL FN, LIMA NL, SILVA RT, MORAES MD, BARBOSA PV, LIMA PA, BRANDAO DC, SILVA-NETO CD, SOUSA CARVALHO HC, REIS NA. Biomass and nutrition stock of grassland and accumulated litter in a silvopastoral system with Cerrado species. *African Journal of Agricultural Research*. 2016. 11: 3701-3709.

CARVALHO MM, MARTINS CE, VERNEQUE RD, SIQUEIRA C. Resposta de uma espécie de braquiária à fertilização com nitrogênio e potássio em um solo ácido. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 1991. 15: 195-200.

CHANDER M, BODAPATI S, MUKHERJEE R, KUMAR S. Organic livestock production: an emerging opportunity with new challenges for producers in tropical countries. *Revue Scientifique et Sechnique (International Office of Epizootics)*. 2011. 30: 569-583.

CORDELL D, DRANGERT JO, WHITE S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global environmental change*. 2009. 19: 292-305.

DONAGEMA GK, CAMPOS DVB, CALDERANO SB, TEXEIRA WG, VIANA JHM. *Manual de Métodos de Análise de Solos*. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2011. p.230.

DUARTE IN, SERON PEREIRA H, KORNDÖRFER GH. Lixiviação de potássio proveniente do termopotássio. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2013. 43: 195-200.

ELLIOTT CL, SNYDER GH. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1991. 39: 1118-1119.

ELSER J, BENNETT E. Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle. *Nature*. 2011. 478: 29-31.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). *Sistema Brasileiro de Classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro. 2013.

EUROSTAT (Escritório de estatística da União Européia). Banco de dados de estatísticas de resíduos disponível em: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics. Acesso em: 08 jun. 2017.

FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentos e Agricultura). *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*. Roma, 2006.

FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentos e Agricultura). *Global food losses and food waste*. Roma, 2011.

GUELFY-SILVA DR, MARCHI G, SPEHAR CR, GUILHERME LR, FAQUIN V. Agronomic efficiency of potassium fertilization in lettuce fertilized with alternative nutrient sources. *Revista Ciência Agronômica*. 2013. 44: 267-277.

GUNES A, INAL A, BAGCI EG, COBAN S. Silicon-mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. *Journal of Plant Physiology*. 2007. 164: 807-811.

HETTIARACHCHI RP, DHARMAKEERTHI RS, SENEVIRATNE G, JAYAKODY AN, DE SILVA E, GUNATHILAKE T, THEWARAPPERUMA A, MAHEEPALA CK. Availability and leaching of nutrients after biofilm biofertilizer applications into a Red Yellow Podsollic soil. *Journal of the Rubber Research Institute of Sri Lanka*. 2017. 94: 43-53.

HORLINGS LG, MARSDEN TK. Towards the real green revolution? Exploring the conceptual dimensions of a new ecological modernisation of agriculture that could 'feed the world'. *Global Environmental Change*. 2011. 21: 441-452.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Censo agropecuário 1920/2006. Dados extraídos de: *Estatística do Século XX*. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Relatório de Pesquisa. p.16-20, 2012.

JARQUE CM, BERA AK. Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals. *Economics Letters*. 1980. 6: 255-259.

KORNDÖRFER GH. Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura. GPSi-ICIAG-UFU. 2002.

LEITE PC. Interação silício-fósforo em latossolo roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação. 1997. 87p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

LI XL, GAO J, BRIERLEY G, QIAO YM, ZHANG J, YANG YW. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibet plateau: Implications for rehabilitation. *Land Degradation & Development*. 2013. 24: 72-80.

LIM SL, LEE LH, WU TY. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2016. 111: 262-278.

LIMA CC, MENDONÇA ES, SILVA IR, SILVA LH, ROIG A. Caracterização química de resíduos da produção de biodiesel compostados com adição mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2009. 13: 334-340.

MA JF, YAMAJI N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*. 2006. 11: 392-397.

MACHADO LG. Características químicas do solo, produtividade e nutrição de café e capim braquiária fertilizados com pó de fonolito e termopotássio. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, campus de Rio Paranaíba (MG). 2016.

MAPA. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Recuperação de Áreas Degradadas. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/recuperacao-areas-degradadas>. Acesso em: 31 de agosto de 2016.

MEENA MD, BISWAS DR. Phosphorus and potassium transformations in soil amended with enriched compost and chemical fertilizers in a wheat- soybean cropping system. *Communications in soil science and plant analysis*. 2014. 45:624-652 a.

MEENA MD, BISWAS DR. Changes in biological properties in soil amended with rock phosphate and waste mica enriched compost using biological amendments and chemical fertilizers under wheat-soybean rotation. *Journal of Plant Nutrition*. 2014. 37: 2050-2073 b.

MELO SP, MONTEIRO FA, DE BONA FD. Silicon distribution and accumulation in shoot tissue of the tropical forage grass *Brachiaria brizantha*. Plant and Soil. 2010. 336: 241-249.

NISHANTH D, BISWAS DR. Kinetics of phosphorus and potassium release from rock phosphate and waste mica enriched compost and their effect on yield and nutrient uptake by wheat (*Triticum aestivum*). Bioresource Technology. 2008. 99: 3342-3353.

ORIOLO JÚNIOR V, COUTINHO EL. Effectiveness of fused magnesium potassium phosphate for marandu grass. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2009. 33:1855-62.

PERON AJ, EVANGELISTA AR. Degradação de pastagens em regiões de cerrado. Ciência e Agrotecnologia. 2004. 28: 655-661.

RIBEIRO AC, GUIMARÃES PT, ALVAREZ VH. Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação. Viçosa. 1999.

ROSNER B. Percentage points for a generalized ESD many-outlier procedure. Technometrics. 1983. 25: 165-172.

SANTOS WO, MATTIELLO EM, VERGUTZ L, COSTA RF. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2016. 179: 547-556.

SARTO MV, DO CARMO LANA M, RAMPIM L, ROSSET JS, INAGAKI AM, BASSEGIO D. Effects of silicon (Si) fertilization on gas exchange and production in *Brachiaria*. Australian Journal of Crop Science. 2016.10: 307-313.

SATTARI SZ, BOUWMAN AF, RODRÍGUEZ RM, BEUSEN AH, VAN ITTERSUM MK. Negative global phosphorus budgets challenge sustainable intensification of grasslands. Nature Communications. 2016. 7: 1-12.

SILVA FC. Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

SRIVASTAVA P, SINGH R, TRIPATHI S, RAGHUBANSHI AS. An urgent need for sustainable thinking in agriculture – an Indian scenario. *Ecological Indicators*. 2016. 67: 611-622.

WAKEEL A. Potassium–sodium interactions in soil and plant under saline-sodic conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2013. 176: 344-354.

WILLER H, LERNOUD J, SCHLATTER B. Current statistics on organic agriculture worldwide: Organic area, producers and market. *The World of organic agriculture. Statistics and emerging trends*. 2014. 36-124.

YANG X, LI Y, LU A, WANG H, ZHU Y, DING H, WANG X. Effect of *Bacillus mucilaginosus* D4B1 on the structure and soil-conservation-related properties of montmorillonite. *Applied Clay Science*. 2016. 119: 141-145.

14. CONCLUSÕES GERAIS

O processo de compostagem comum é capaz de acelerar o intemperismo de pó de rocha e promover uma maior liberação de K e Si. Esta evidência abre novas perspectivas para o desenvolvimento de organominerais que aproveitem fontes silicatadas alternativas de nutrientes para a agricultura.

A aplicação conjunta de pó de fonolito com compostos orgânicos, seja como componente da mistura inicial seja como aditivo aos compostos estabilizados, é uma estratégia que aumenta a disponibilização de nutrientes da fonte mineral. Dessa forma, a aplicação conjunta destes subprodutos é uma alternativa ao manejo da fertilidade do solo com vistas à melhoria da sustentabilidade do setor agrícola.