

GENICELLI MAFRA RIBEIRO

CARACTERIZAÇÃO DE PÓS DE ROCHAS SILICÁTICAS, AVALIAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM ÁCIDOS ORGÂNICOS E POTENCIAL DE LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES COMO REMINERALIZADORES DE SOLOS AGRÍCOLAS

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Antonio de Almeida

**LAGES
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Ribeiro, Genicelli Mafra
Caracterização de pós de rochas silicáticas,
avaliação da solubilidade em ácidos orgânicos e
potencial de liberação de nutrientes como
remineralizadores de solos agrícolas / Genicelli
Mafra Ribeiro. -- 2018.
107 p.

Orientador: Jaime Antonio de Almeida
Tese (Doutorado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação -- Selecione --, 2018.

1. Caracterização física, química e mineralógica das
rochas . 2. Dissolução de rochas silicáticas. 3.
Solubilidade dos minerais potássicos. I. Almeida,
Jaime Antonio de . II. Universidade do Estado de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação. III.
Título.

GENICELLI MAFRA RIBEIRO

CARACTERIZAÇÃO DE PÓS DE ROCHAS SILICÁTICAS, AVALIAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM ÁCIDOS ORGÂNICOS E POTENCIAL DE LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES COMO REMINERALIZADORES DE SOLOS AGRÍCOLAS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC como requisito parcial para obtenção do título de doutor.

Banca Examinadora:

Orientador: _____

Dr. Jaime Antonio de Almeida
UDESC/Lages – SC

Membros:

Membro

Dr^a Luciane Costa de Oliveira
IFSC/Lages – SC

Membro

Dr. Alvaro Luiz Mafra
UDESC/Lages – SC

Membro

Dr^a Catilene Schimitt
EPAGRI/B.J.Serra.– SC

Membro

Dr^a Raquel Valério de Sousa
UDESC/Lages – SC

Lages, SC 27/09/2018

“...na brevidade e bravura que é a vida, que possamos celebrar cada conquista...”
(Lolita Mafra Alves Neta)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus/Allah por ter me guiado em todos os momentos da minha vida e me permitir a realização de mais um sonho.

Ao meu orientador e amigo, professor Jaime, pelos ensinamentos, pela paciência e pelo ser humano maravilhoso que és.

À minha família por todo apoio de sempre, em especial à minha mãe Lolita por tudo que sempre representou e representa na minha vida. Também agradeço com todo meu amor às minhas filhas Lolita Neta e Amanda pela motivação diária e pela oportunidade de ensinar e aprender com vocês. Obrigada ao meu irmão Evandro (tio Evandro), ao meu padrasto Jacir (*in memorian*), a minha dinda Mara, meu avô João Francisco (*in memorian*), minha avó Camila, tias Ita, Nilva, Dulce, Marisa, Vera e Elirce; aos tios Idio, Nei, Aroldo, Vitalino e Dulcimar (*in memorian*); aos primos Neimar e Naudimar (*in memorian*), Alessandra, Miguel, Felipe, Camila, Leila, Lizi, Lidi, Adriano, Fernando e Gabriel. À minha família paterna: Ildo, João e Helena (*in memorian*), Ci, Laura, Paulo, Cine, Celli e Dudu; Gean, Lizandra, Geandra e Geane.

Obrigada às mineradoras Britaplan e Castelar pela parceria, bem como ao Levi pela ajuda nos experimentos, pelos conhecimentos repassados e pela amizade.

Aos amigos de longa data pela motivação incansável: Sandra, Agostinho, Ana Polese, Ana Carneiro, Janda, Sueli, Maria Tereza, Mari Lúcia, Luciane, Edna, Lizi, Renata, Claudinha, Germano, Martinez, Regina, Amilton, Marcelo, Claudia, Benta, Josué, Pedro, Rodolfo, Irca, Marisete, Neiva, Cida, Carmem, Cris, Elisete, Marli, Oyara, Kelly, Débora e Leandro.

Aos novos amigos e colaboradores: Virgílio, Luis Dalmolin, Anne, Tkolho, Vero, Mareli, Cavalcante, Renata, Erlane, Tchello, Iris, Lais, Neiva, Bruna, Cris, Fran, Estella, Janes, Alexandra, tia Rô, Lelê, Sônia, Jaque, Pâmela, Dionilce, Paulo, Ademir, Edinho, Mateus, Melissa, Ederson, Edinho Bortoluzzi, Luana, Jackson, Fabi, Bira, Julia, Gabi, Dirceu, Têre, Dani C., Mariana, Neide, Vivi, Joelma, Camila, Roseli, Cleusa, Leila e dona Palmira e tantos outros que me apoiaram nesta etapa da minha vida.

Aos professores e amigos: Alvaro Mafra, Júlio, Bertol, Letícia, Paulo Ernani, Cassol, Rogério, David, Clovis, Cileide, Thaler e em especial ao Cassandro e Jackson porque me avisaram deste edital, enfim a todos os professores do CAV.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Gênese e Mineralogia dos Solos: Pablo, Jaime Junior, Daniel, Gabriel, Catiline, Samara, Tamara, Elaine, Fagner, Diou, Cleiton, Leandro, Bryan, Bruna, Agatha e Mateus.

Aos amigos e colegas das salinhas: Luana, Diego B., Luiz, Ana C., Diego R., Tetê, Bel, Miltinho, Zé (Wagner), Thais, Orsoletta, Walquiria, Paty, Jaque, Sulian, Djalma, Marizane, Flavia, Luiza, Dani, Gilson, Jessica, Iochins, Semprebon, Douglas, Pri, Gilmar e Camila.

Amigos e colegas da PPGCS: Gustavo Pereira, Gustavo O., Neuro, Barbara, Mayara , Josiê, Andrei, Marcão, Ivan, Sbruzzi, Tercio, Romeu, Dudu, Gregory, Giu, Rosalha, Jadiel, Juli, Kath, Segala, Gil, Carol, Camila, Cleizi, Day, Douglas, Pamela, Laura, Silmar, Marcio, entre outros.

À toda sociedade brasileira, à CAPES pela concessão da bolsa. Aos pesquisadores Peter van Straaten, Eder de Souza Martins, Suzi H. Theodoro pela atenção dispensada.

Aos participantes desta banca.

“Special greetings to my Askim Arif! Tesekkürler for everything! Allah always bless you!”

RESUMO

RIBEIRO, Genicelli Mafra. **Caracterização de pós de rochas silicáticas, avaliação da solubilidade em ácidos orgânicos e potencial de liberação de nutrientes como remineralizadores de solos agrícolas.** 2018. 106 pg. Tese (Doutorado em Ciência do Solo – Área: Química e Mineralogia do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, SC, 2018.

A maioria dos solos brasileiros são intemperizados, ácidos e com baixa reserva mineral, necessitando-se utilizar corretivos da acidez e fertilizantes para produtividades satisfatórias, porém, a dependência externa de matéria-prima, os altos custos e a busca por alternativas mais sustentáveis têm incentivado pesquisas com agrominerais. A partir da Lei brasileira 12.890 de 10/12/2013 alguns destes produtos podem ser considerados remineralizadores (RM) e passam a ser reconhecidos como uma categoria de insumo destinado à agricultura. Entretanto, não há definição de critérios de qualidade destes materiais quanto ao seu potencial de liberação de nutrientes às plantas. O objetivo desta pesquisa foi a caracterização física, química e mineralógica de pós de rochas silicáticas, avaliar diferentes extractores químicos que possam estimar o potencial de dissolução de nutrientes de diferentes rochas moídas como forma de melhor classificá-los quanto à sua qualidade e avaliar a capacidade de liberação de potássio para as plantas de cinco pós de rochas silicáticas em um experimento com a sucessão feijão/aveia em casa de vegetação, sendo os basaltos e o fonolito coletados em Lages, a olivina melilitito e o sienito em Palmeira e o granito em Ibirama. As rochas foram coletadas em blocos irregulares, britadas, moídas em moinho de grelhas e peneiradas em malha 1,0; 0,5; 0,25; 0,125; 0,053 e <0,053 mm para caracterização granulométrica, análises petrográficas, análise de fluorescência de raios X (FRX), análises químicas elementares e análises mineralógicas, para avaliar seu enquadramento como remineralizadores de solos. Num experimento de avaliação da solubilidade dos minerais das rochas foi utilizada a fração <0,25 mm sendo usados os extractores água destilada, ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹ e ácido acético 0,02 mol L⁻¹. A solubilidade dos materiais foi testada em 5 (cinco) tempos de contato dos pós com os extractores: 0,5; 2; 8; 32 e 128 horas. Noutro experimento testou-se o potencial de liberação de potássio de cada uma das rochas, para uma mesma dose de potássio aplicada, equivalente a 1000 kg ha⁻¹ de K₂O. As análises indicaram que a olivina melilitito apresentou os maiores conteúdos totais de Ca e Mg, conteúdos expressivos de K e P além de minerais essenciais e acessórios facilmente intemperizáveis, sendo identificada como o melhor remineralizador multinutriente dentre as rochas estudadas. Quanto ao potássio, as rochas com maior conteúdo total do elemento, em ordem de importância foram o fonolito, o granito, o sienito, a olivina melilitito e os basaltos. Entretanto, o pó das rochas olivina melilitito e sienito foram os mais eficientes na liberação do potássio e demais nutrientes para as plantas, resultando em maior conteúdo dos mesmos na parte aérea, maior produção de matéria seca e acúmulo dos nutrientes no tecido do feijão e da aveia. O pó da rocha fonolito, apesar de conter o maior conteúdo total de potássio, somente liberou quantidades apreciáveis do elemento no segundo cultivo. Dentre os extractores avaliados, o ácido cítrico apresentou maior eficiência de extração do que o ácido acético e água deionizada para a maioria dos elementos testados, enquanto que, dentre as rochas estudadas, a olivina melilitito foi a rocha com maior capacidade de liberação de cálcio e magnésio em ácido cítrico seguida do sienito e dos basaltos.

Palavras-chave: Nutrição de plantas. Produção orgânica. Fertilizante alternativo. Agroecologia. Rochagem. Sustentabilidade.

ABSTRACT

RIBEIRO, Genicelli Mafra. **Characterization of silicate rock powders, evaluation of solubility in organic acids and nutrient release potential as remineralizers in agricultural soils.** 2018. 106 pg. Thesis (Doctorate in Soil Science) – Area: Soil Chemistry and Mineralogy) – State University of Santa Catarina. Postgraduate Program in Soil Science, Lages-SC, 2018.

Most Brazilian soils are weathered, acidic and with low mineral reserves, thus requiring the use of acidity correctives and fertilizers for satisfactory yields. However, external dependence on raw materials, high costs and the search for more sustainable alternatives have encouraged research in a stonemeal area as a fertilizer or soil remineralization. According to Brazilian Law 12890 of 10/12/2013 some of these products can be considered remineralizers (RM) and are now recognized as an input category for agriculture. However, there is no definition of the quality criteria of these materials for their potential of releasing nutrients to plants. The objective of this research was the physical, chemical and mineralogical characterization of silicate rock powders, to evaluate different chemical extractors that can estimate the potential dissolution of nutrients of different ground rocks as a way to better classify them as to their quality and to evaluate the capacity of potassium release to the plants of five silica powders in an experiment with the bean / oat succession in a greenhouse, basalts and phonolite were collected in Lages, olivine melilitite and syenite in Palmeira and granite in Ibirama. The rocks were collected in irregular blocks, crushed, grinded in grids and sieved in 1.0 mesh; 0.5; 0.25; 0.125; 0.053 and <0.053mm for granulometric characterization, petrographic analyzes, X-ray fluorescence analysis (FRX), elemental chemical analyzes and mineralogical analysis were conducted to evaluate their framing as soil remineralizers. In an experiment to evaluate the solubility of rocks minerals, the fraction <0,25 mm was used for the solubilization experiment and the extractors distilled water, citric acid 0.02 mol L⁻¹ and acetic acid 0.02 mol L⁻¹ were used. The solubility of the materials was tested in 5 (five) contact times of the powders with extractors: 0.5; 2; 8; 32 and 128 hours. In another experiment the potassium release potential of each of the rocks was tested for the same dose of potassium applied, equivalent to 1000 kg ha⁻¹ of K₂O. The analyzes indicated that olivine melilitite presented the highest total contents of Ca and Mg, expressive contents of K and P, moreover essential minerals and easily weatherable accessories, being identified as the best multinutrient remineralizer among the studied rocks. As for the potassium, the rocks with the highest total content of the element, in order of importance were phonolite, granite, syenite, olivine melilitite and basalts. However, olivine melilitite and syenite powder were the most efficient in the release of potassium and other nutrients to the plants, resulting in higher nutrient content in aerial part, content, higher dry matter yield and nutrient accumulation in the bean tissue and oats. The phonolite rock powder, although containing the highest total potassium content, only released appreciable amounts of the element in the second crop. Among the evaluated extracts, citric acid presented higher extraction efficiency than acetic acid and deionized water for most of the tested elements, while among the rocks studied, olivine melilitite was the rock with the highest calcium release capacity and magnesium in citric acid followed by syenite and basalts.

Key words: Plant nutrition. Organic production. Alternative fertilizer. Agroecology. Stonemeal. Sustainability. Citric acid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Difratograma de raios X do pó da rocha Olivina Melilitito.....	42
Figura 2 -	Difratograma de raios X do pó da rocha Sienito.....	43
Figura 3 -	Difratograma de raios X do pó da rocha Fonolito.....	44
Figura 4 -	Difratograma de raios X do pó da rocha Granito.....	45
Figura 5 -	Difratograma de raios X do pó da rocha Basalto Britaplan.....	46
Figura 6 -	Teores de Si e Ca solubilizados pela água deionizada, ácidos cítrico 0,02 mol L ⁻¹ e acético 0,02 mol L ⁻¹ para o pó das rochas Basalto Britaplan (BP), Basalto Castelar (CT), Fonolito (FL), Granito (GT), Olivina Melilitito (OM) e Sienito (SN) após agitação até 128 horas.....	64
Figura 7 -	Solubilização de Ca, Mg, P, K, Si e Al com ácido cítrico 0,02 mol L ⁻¹ até 128h de agitação.....	66
Figura 8 -	Teores de potássio na parte aérea de feijoeiro submetidas a aplicação de fontes de potássio.....	86
Figura 9 -	Média da matéria seca da parte aérea de feijoeiro submetidas a aplicação de fontes de potássio.....	88
Figura 10 -	Percentual de potássio na parte aérea de aveia.....	90
Figura 11 -	Matéria seca da parte aérea da aveia.....	91
Figura 12 -	Matéria seca total de aveia após aplicação de diferentes fontes de potássio.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Procedimentos analíticos utilizados para a determinação dos elementos nas rochas estudadas.....	36
Tabela 2 - Percentual médio das granulometrias das rochas.....	38
Tabela 3 - Composição química elementar das rochas - ALS (Peru).....	39
Tabela 4 - Valores dos elementos tóxicos e limite permitido nos remineralizadores pela legislação brasileira – ALS.....	40
Tabela 5 - Composição elementar das rochas por Fluorescência de Raios X (FRX) – Laboratório CAV/UDESC.....	41
Tabela 6 - Composição mineral das rochas segundo análises Petrográficas.....	47
Tabela 7 - Valores médios do pH e de Condutividade Elétrica (CE) dos extratos após o contato com os pós de rocha utilizados.....	61
Tabela 8 - Percentual de elementos solubilizados das rochas.....	68
Tabela 9 - Teores dos nutrientes na parte aérea e acumulado nas plantas de aveia e feijão.....	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	21
1.1	OBJETIVOS.....	24
1.1.1	Objetivo Geral.....	24
1.1.2	Objetivos Específicos.....	24
1.2	HIPÓTESES.....	25
1.3	REFERÊNCIAS.....	26
2	CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA DE PÓS DE ROCHAS SILICÁTICAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA.....	31
2.1	RESUMO.....	31
2.2	ABSTRACT.....	32
2.3	INTRODUÇÃO.....	33
2.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
2.4.1	Caracterização dos materiais estudados.....	34
2.4.1.1	Coleta e processamento das amostras.....	34
2.4.1.2	Análises Granulométricas das Rochas.....	35
2.4.1.3	Análises Petrográficas.....	35
2.4.1.4	Análises de Fluorescência de Raio-X (FRX) das Rochas.....	35
2.4.1.5	Análises Químicas Elementares das Rochas.....	36
2.4.1.6	Análises Mineralógicas das Rochas.....	36
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
2.5.1	Análises Granulométricas das Rochas.....	37
2.5.2	Análises Químicas Elementares das Rochas.....	38
2.5.3	Análises por Fluorescência de Raios-X (FRX) das Rochas.....	40
2.5.4	Análises Mineralógicas das Rochas por DRX.....	41
2.5.4.1	Olivina Melilitito.....	41
2.5.4.2	Sienito.....	42
2.5.4.3	Fonolito.....	43
2.5.4.4	Granito.....	44
2.5.4.5	Basalto BP.....	45
2.5.5	Análises Petrográficas das Rochas.....	46
2.5.5.1	Basalto Britaplan – BP.....	46
2.5.5.2	Fonolito.....	47
2.5.5.3	Granito.....	48
2.5.5.4	Olivina Melilitito.....	48
2.5.5.5	Sienito.....	49
2.6	CONCLUSÕES.....	49
2.7	REFERÊNCIAS.....	51

3	CAPÍTULO 2 – DISSOLUÇÃO DE ROCHAS SILICÁTICAS EM ÁGUA E ORGÂNICOS.....	55
3.1	RESUMO.....	55
3.2	ABSTRACT.....	56
3.3	INTRODUÇÃO.....	57
3.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	60
3.4.1	Material utilizado nos testes.....	60
3.4.2	Metodologia utilizada nos testes de solubilidade.....	60
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
3.5.1	Solubilização dos pós-de-rochas em água e em ácidos orgânicos.....	61
3.5.2	Elementos solubilizados pela água e ácidos orgânicos.....	62
3.5.3	Solubilização dos elementos em ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹.....	65
3.6	CONCLUSÕES.....	72
3.7	REFERÊNCIAS.....	74
4	CAPÍTULO 3 - SOLUBILIDADE DOS MINERAIS POTÁSSICOS DE DIFERENTES PÓS DE ROCHAS DE SANTA CATARINA E ABSORÇÃO DE POTÁSSIO PELAS CULTURAS DO FEIJÃO E AVEIA.....	77
4.1	RESUMO.....	77
4.2	ABSTRACT.....	78
4.3	INTRODUÇÃO.....	79
4.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	81
4.4.1	Solo utilizado.....	81
4.4.2	Processamento das amostras de solo.....	81
4.4.3	Delineamentos Experimentais.....	82
4.4.3.1	Delineamento Experimental para produção de feijão.....	82
4.4.3.2	Delineamento Experimental para produção da aveia.....	82
4.4.3.3	Incubações dos solos.....	82
4.4.4	Implantação das Culturas em Sucessão.....	83
4.4.4.1	Cultivo do Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>).....	83
4.4.4.2	Tratamento dos Solos e Implantação do Experimento de feijão em Casa de Vegetação.....	85
4.4.4.3	Implantação da cultura de sucessão Aveia (<i>Avena sativa</i>).....	83
4.4.5	Coleta dos experimentos e análise química dos tecidos vegetais.....	84
4.4.6	Análise Estatística.....	84
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
4.5.1	Potássio no Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>).....	85
4.5.1.1	Teores de potássio na parte aérea da planta.....	85

4.5.1.2	Matéria seca da parte aérea de feijoeiro submetida à aplicação de fontes de potássio.....	87
4.5.2	Potássio na Aveia (<i>Avena sativa</i>).....	90
4.5.2.1	Teores de potássio na parte aérea da aveia submetida a aplicação de fontes de potássio.....	90
4.5.2.2	Matéria seca da parte aérea da aveia submetida a aplicação de fontes de potássio.....	91
4.5.3	Comportamento dos demais macronutrientes do feijão e da aveia.....	93
4.6	CONCLUSÕES	95
5	CONCLUSÕES GERAIS.....	96
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	98
	REFERÊNCIAS.....	99
	ANEXOS.....	103

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil se destaca na produção agrícola em geral porque possui condições climáticas favoráveis, porém, a maioria dos solos brasileiros são fortemente intemperizados, ácidos e com baixa reserva de nutrientes, necessitando-se utilizar corretivos da acidez e fertilizantes para garantir produtividades satisfatórias. De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia, o Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo, sendo superado somente pela China, Índia e Estados Unidos, porém participa com apenas 2% da produção mundial, deixando o Brasil extremamente dependente dos preços estabelecidos pelos países exportadores de fertilizantes e/ou de matéria prima (THEODORO;ALMEIDA, 2013). Segundo Rodrigues (2010), o Brasil importa 75% do N, 48% do P e 92% do K utilizados como fertilizantes.

Somente em 2017, o consumo brasileiro de fertilizantes foi de 35 milhões de toneladas, sendo que 26 milhões foram importados, ou seja, preocupantemente, 76 % da demanda brasileira foi atendida por importações (ANDA, 2018).

Os fertilizantes fazem parte dos insumos com maior custo na produção agrícola e o aproveitamento destes pelas plantas é baixo em muitos solos. Estima-se que a eficiência dos nutrientes aplicados tem sido cerca de 50% ou menos para N, menos que 10% para o P e cerca de 40% para K (BALIGAR, 2001). Esta menor eficiência é devido às perdas significativas de nutrientes por lixiviação, escoamento, emissão na forma de gases e adsorção pelos colóides do solo em formas pouco disponíveis às plantas. Estas perdas podem potencialmente contribuir para a degradação do solo, qualidade da água e, eventualmente, levar à degradação ambiental.

Para melhorar este cenário, esforços têm sido realizados visando reduzir o esgotamento das fontes de recursos não renováveis como, por exemplo, o uso de fertilizantes minerais solúveis, cujas reservas mundiais são limitadas. Desde a década de 1990/80 o governo brasileiro vem estimulando pesquisas para o possível aproveitamento de rochas silicáticas para produção e/ou aplicação como fertilizante, numa tentativa de reduzir a carência de fertilizantes e a dependência externa brasileira.

Além disso, as formas de produção agrícola alternativas, como no cultivo de produtos orgânicos, possuem restrições ao uso dos fertilizantes solúveis, mas permitem a utilização de pó de rochas como fontes de nutrientes, incluindo as rochas silicáticas (BRASIL, 2011). Tais materiais, quando atendem exigências mínimas da legislação brasileira, são denominados remineralizadores (BRASIL, 2013; 2016).

Remineralizadores (RM) são materiais de origem mineral que tenham sofrido apenas redução de tamanho por processos mecânicos e que alterem a fertilidade do solo por meio de adição de nutrientes para as plantas, bem como, promovam a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo. Esta definição consta na Lei Federal 12.890, publicada no Diário Oficial da União de 11 de Dezembro de 2013, que institui os RM como uma nova classe de insumo agrícola.

Apesar de a legislação exigir vários requisitos para classificação e registro dos pós de rochas como remineralizadores (BRASIL, 2013, 2016), existem poucos estudos sobre qual a quantidade mínima de nutrientes que devem ser liberados num determinado tempo e sua correlação com a produção vegetal, para validar o emprego do pó de rochas como um fertilizante apropriado ao uso. Hipoteticamente, esses produtos, após a aplicação ao solo, promoverão a liberação de nutrientes de forma gradual, possibilitando a manutenção da fertilidade e da produtividade por um período mais longo em comparação aos fertilizantes solúveis. Assim, é necessário conhecer sua velocidade de solubilização e, consequentemente, o potencial de liberação de nutrientes para às plantas.

Vários pesquisadores utilizaram ácidos orgânicos de baixo peso molecular em diferentes concentrações para avaliar o potencial de solubilização de minerais das rochas (HUANG; KELLER, 1970; HUANG; KIANG, 1972; GILKES; PRIYONO, 2008; RAMOS et al., 2014 e 2016; AZEVEDO, 2014), na tentativa de simular as reações naturais de intemperismo que ocorrem no solo. No entanto necessita-se um aprofundamento nos estudos sobre os extratores que melhor estimem a liberação de nutrientes ao solo.

O uso de rochas moídas como fonte de nutrientes para o solo e plantas não é algo recente. As rochas calcárias são as mais comumente utilizadas como corretivo da acidez e para o fornecimento de cálcio e magnésio aos solos e as rochas fosfatadas (apatitas) que podem ser aplicadas de forma natural nos solos. Porém o emprego de outras rochas como fonte de nutrientes já foi uma prática usada por agricultores em tempos passados. Os primeiros a descreverem essa atividade foram Missoux e Hensel no século IX (van STRAATEN, 2006) e no início da década de 1970, Leonardos et al. (1987) já sugeriam o uso das rochas para remineralizar os solos agrícolas. No entanto, as pesquisas avaliando o potencial desses materiais têm recebido enfoque maior nas últimas décadas tanto a nível mundial (FYFE et al., 1987, 2000 e 2006; van STRAATEN, 1987, 2002, 2006; MANNING, 2010), como no Brasil, (SOUZA et al., 2014; 2016; GUELFI-SILVA, 2016; REIS et al., 2016; RAMOS, 2013, SILVA et al. 2012; SILVA et al., 2013; MARTINS et al., 2008; RESENDE et al., 2006; THEODORO; ALMEIDA, 2013; SOUZA et al., 2013; AZEVEDO, 2013; KORCHAGIN et al., 2016; LEONARDOS et

al., 1987 e 2000; THEODORO; LEONARDOS, 2006; AMPARO, 2003; BARRETO, 1998, entre outros).

No Brasil, o uso do pó de basalto na liberação de cálcio e magnésio e seu eventual efeito na correção da acidez do solo foi estudado incialmente por Escosteguy & Klamt (1998), sendo esta rocha mais tarde estudada com o mesmo objetivo (SILVA et al., 2012; KORCHAGIN et al., 2016). Estudos com rochas silicáticas como fonte de potássio para as plantas foram conduzidos por vários autores, dentre as quais o granito (HISINGER et al., 1996), flogopítito (LOPES-ASSAD et al., 2010; SILVA et al., 2013), fonolito (TEIXEIRA et al., 2015) e sienito (DUARTE, 2010).

Pesquisas desenvolvidas no Brasil e no exterior mostram que a remineralização dos solos, com adição de macro e micronutrientes, derivados de rochas moídas, podem permitir produções compatíveis e equiparáveis àquelas obtidas com o uso dos fertilizantes solúveis (LEONARDOS et al. 1976; HISINGER; GILKES, 1996; van STRAATEN, 2007; CARVALHO, 2010, 2012; THEODORO; LEONARDOS, 2011; SOUZA et al. 2017). Porém, apesar dos resultados positivos, a legislação é recente e a gama de resultados científicos considerando fatores regionais e de cada cultura ainda são limitados, o que se constitui em restrição importante para seu amplo uso. Além disso, a menor solubilidade desses materiais e a ausência de modelos adequados para estimar a quantidade e a taxa de liberação de elementos destas rochas para as plantas, aliado a falta de linhas de crédito para aquisição destes produtos pelos agricultores, especialmente para a agricultura familiar podem limitar seu emprego.

A utilização de pós de rocha e, ou remineralizadores apresenta algumas vantagens em relação aos fertilizantes prontamente solúveis. Misturas adequadas de rochas moídas têm o potencial de fornecer aos solos vários macronutrientes, micronutrientes e elementos benéficos (LEONARDOS et al., 1987; SOUZA et al., 2017).

Apesar da velocidade de liberação dos elementos ao solo ser menor do que os fertilizantes solúveis, o pó de rocha pode contribuir com o efeito residual por um longo período (HARLEY; GILKES, 2000; SOUZA et al., 2017), conferindo fornecimento gradual de nutrientes com tendência ao aumento do pH (von FRAGSTEIN et al., 1988; SOUZA et al., 2017). Segundo Theodoro; Leonards (2006), o custo de obtenção desses produtos pode ser reduzido em cerca de 60 a 80% em relação às fontes convencionais, pois seu beneficiamento envolve apenas a moagem das rochas, aliado ao fato de serem amplamente distribuídas em várias regiões do país.

Tendo em vista que na legislação atual dos remineralizadores, um dos critérios para avaliar sua qualidade refere-se apenas ao conteúdo mínimo total de $\text{CaO}+\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}$, que deve

ser igual ou superior a 9% (BRASIL, 2013), mas que as rochas possuem minerais com diferentes resistências à alteração, considera-se importante propor metodologias que permitam estimar quais rochas apresentam maior potencial de liberação de nutrientes após aplicação aos solos, para melhor caracterização da qualidade dos remineralizadores. Paralelamente, é necessário avaliar, em experimentos de campo ou em casa de vegetação, se os métodos de estimativa desse potencial de liberação de diferentes nutrientes se correlacionam adequadamente com as respostas das plantas cultivadas nos solos onde esses materiais são aplicados.

Neste sentido, este trabalho teve como objetivo geral avaliar aspectos qualitativos de pós de rochas com potencial para serem usados como remineralizadores na região de Lages, no estado de Santa Catarina, Sul do Brasil, dentre elas o basalto, a olivina melilitito, o sienito, o fonolito e um granito de região próxima a esta. A expectativa é que este estudo permita a proposição de metodologias de que possam aprimorar os critérios de avaliação da qualidade de remineralizadores para a agricultura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar a caracterização física, química e mineralógica do pó das rochas basalto, fonolito, granito, olivina melilitito e sienito, avaliar sua solubilidade por diferentes ácidos orgânicos e testar a eficiência agronômica desses materiais quando aplicados no solo, visando propor metodologia que permita aperfeiçoar os critérios de avaliação de qualidade dos remineralizadores.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar do ponto de vista físico, químico e mineralógico, 6 (seis) pós de rochas como possíveis materiais a serem utilizados como remineralizadores de solos;
- b) testar extratores químicos que possam estimar o potencial de dissolução de nutrientes de diferentes rochas moídas como forma de melhor classificá-los quanto à sua qualidade;

- c) avaliar a capacidade de liberação de potássio para as plantas de cinco pós de rochas em experimento com sucessão feijão/aveia em casa de vegetação.

1.2 HIPÓTESES

- b) Os ácidos orgânicos de baixo peso molecular (cítrico e acético) solubilizam os minerais constituintes das rochas mais rapidamente que a água;
- c) A solubilização de nutrientes de remineralizadores por ácidos orgânicos diluídos permite simular o potencial de liberação dos mesmos após aplicação ao solo;
- d) O basalto e a olivina melilitito têm maior potencial para liberação de Ca, Mg e micronutrientes, enquanto fonolito, granito e sienito têm maior potencial para liberação de K;
- e) Para um mesmo conteúdo de K total aplicado às rochas silicáticas, têm-se diferentes taxas de liberação do elemento em função das diferenças na sua composição mineralógica.

1.3 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. Mercado de fertilizantes 2012/2016. In: **Principais indicadores do setor de fertilizantes: estatísticas**. Disponível em: <<http://anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00&ver=por>> Acesso em 08 de maio 2018.

AMPARO, A. Farinha de rocha e biomassa. **Agroecologia Hoje**, Botucatu, n. 20, p. 10-12, 2003.

AZEVEDO A.C. Avaliação de um remineralizador de diabásio. [Tese de Livre Docência]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

BALIGAR, V. C., FAGERIA, N. K. and He, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 32: 7, 921 - 950, 2001.

BARRETO, S. B. A farinha de rocha MB-4 e o solo. 1998. 66p.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa nº 46 de 06 de outubro de 2011**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 outubro 2011. Disponível em: <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em 23 mar. 2017.

BRASIL. **Lei n. 12.890, 10 dez. 2013**. Altera a Lei nº 6.894 de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 dez 2013. Disponível em: <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em 27 mar. 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa nº 05 de 10 de março de 2016**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 mar.2016. Disponível em: <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em 23 mar. 2017.

CARVALHO, A.M.X. Rochagem e suas interações no ambiente solo: contribuições para aplicação em agroecossistemas sob manejo agroecológico. **Tese (Doctor Scientiae – UFV)**, Minas Gerais, 116p.,2012.

ESCOSTEGUY, P.A.V. & KLAMT, E. Basalto moído como fonte de nutrientes. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 22, 11-20, 1998.

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

FYFE, W.S., The life support system – toward earth sense. In: ERNST, W.G. **Earth systems: processes and issues**. Cambridge University Press, p. 506–515. 2000.

FYFE, W.S. Sustainable food production and agrogeology. In: PRIDE, C. & van STRAATEN, P. Agrogeology and small scale mining. **Small Mining International, Bulletin**, 1987.

GILKES, R.J.; PRIYONO, J., Dissolution Kinetics of Milled-Silicate Rock Fertilizers in Organic Acid. **J. Tanah Trop.**, v. 13, n. 1, 2008: 1-10. ISSN 0852-257X. 2008.

GUELFI-SILVA, D.R.; SPEHAR, C.R.; MARCHI, G.; SOARES, D.A.S.; CANCELLIER, E.L.; MARTINS, E.S. Yield, nutrient uptake and potassium use efficiency in rice fertilized with crushed rocks. **Academic Journals**, v. 9, p. 455-464, 2014.

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

HISINGER, P.; BOLLAND, M.D.A.; GILKES, R.J. Silicate rock powder: effect on selected chemical properties of a range of soils from Western Australia and on plant growth as assessed in a glasshouse experiment. **Fertilizer Research**, v. 45, p. 69-79, 1996.

HUANG, W.H.; KELLER, W.D. Dissolution of rock-forming silicate minerals in organic acids: simulated first-stage weathering of fresh mineral surfaces. **Am. Mineralogist** 55: 2076-2094, 1970.

HUANG, W.H.; KIANG, W.C. Laboratory dissolution of plagioclase feldspars in water and organic acids at room temperature. **Am. Mineralogist** 57: 1849-1859, 1972.

KORCHAGIN, J.; ABREU, C.T.; DALACORTE, L.; TONINI, V.; MULLER, R.; CANER, L.; BORTOLUZZI, E.C. Atributos químicos de solos agrícolas submetidos à aplicação de pó-de-basalto hidrotermalizado e efeitos na produção vegetal In: Gemas, joias e mineração: pesquisas aplicadas no Rio Grande do Sul. 1 ed. Porto Alegre: IGEO;UFRGS, 2016, v.1, p. 98-107.

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

LEONARDOS, O.H.; FYFE, W.S.; KRONBERG, B.I. The use of ground rocks in laterite systems: an improvement to the use of conventional soluble fertilizers? **Chemical Geology**, v. 60, p.361-370, 1987.

LOPES-ASSAD, M.L.; ARANSINI, S.H.; ROSA, M.M.; CARVALHO, J.R.P.; CECCATO-ANTONINI, S.R. The solubilization of potassium-bearing rock powder by *Arpergillus niger* in small-scale batch fermentations. **Can. J. Microbiol.** v. 56, p. 598-605, 2010.

MANNING, D.A.C. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **Springer Verlag/EDP Sciences/INRA**, 2010.

MARTINS, E.S.; OLIVEIRA, C.G.; RESENDE, A.V.; MATOS, M.S.F.M. Agrominerais – Rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. **CETEM**, cap.9, 2^a edição, 2008.

RAMOS, C.G.; MELLO, A.G., KAUTZMANN, R.M. A preliminary study of acid volcanic rocks for stonemeal application. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management** , p.30-35, 2014.

RAMOS, C.G.; MELLO, A.G., KAUTZMANN, R.M., 2014. A preliminary study of acid volcanic rocks for stonemeal application; **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management** , p.30-35.

RAMOS, C.G.; QUEROL, X.; DALMORA, A.C.; PIRES, K.C.J.; SCHNEIDER, I.A.H.; OLIVEIRA, L.F.S.; KAUTZMANN, R.M. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, p.1-7, 2016.

REIS, D. N. dos; van STRAATEN, P.; NETO, E.F., BITTAR, S.M.B.; CURI, N. Extractant efficiency in the solubilization of alternative sources of potassium. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.38, n. 3, p. 397-406, July-Sept., 2016.

RESENDE, A.V.; MARTINS, E.M.; OLIVEIRA, C.G.; SENA, M.C.; MACHADO, C.T.; KINPARA, D.I.; FILHO, E.C.O. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço e Geografia**, v.9, n.1, p. 19-42, 2006.

RODRIGUES, A.F.S.; et. al., Agrominerais: recursos e reservas. In: FERNANDES, F.R.; LUZ, A.B., CASTILHOS, Z. C. (Eds). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 380, 2010.

SILVA, A.; ALMEIDA, J.A.; SCHMITT, C.; COELHO, C.M.M.; Avaliação dos efeitos da aplicação de basalto moído na fertilidade do solo e nutrição de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, Curitiba, v.42, n.1, p.69-76, 2012.

SILVA, A.A.S.; SAMPAIO, J.A.; LUZ, B.L.; FRANÇA, S.C.A.; RONCONI, C.M. Modeling controlled potassium release from phlogopite in solution: exploring the viability of using crushed phlogopite rock as an alternative potassium source in Brazilian soil. **J.Braz.Chem.Soc.**, v.24, n.8, p.1366-1372, 2013.

SOUZA, F. N. S., OLIVEIRA, C.G.; MARTINS, E.S., ALVES, J.M. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas – TO, v.3, n.1, 2017.

SOUZA, M.E.P.; CARVALHO, A.M.X.C.; DELIBERALI,I.J.; BROWN, G.G.; MENDONÇA, E.S.; CARDOSO, I.M. Vermicomposting with rock powder increases plant growth. **Applied Soil Ecology**, v. 69, p. 56-60, 2013.

THEODORO, S.H. & ALMEIDA, E. Agrominerais e a construção da soberania em insumos agrícolas no Brasil. **Agriculturas**, v. 10, n. 1, p. 22-28, 2013.

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

TEIXEIRA, A. M.S.; SAMPAIO, J.A.; GARRIDO, F.M.S.; MEDEIROS, M.E. Avaliação da rocha fonolito como fertilizante alternativo de potássio. **Hilos**, v. 5, p. 21-33.

van STRAATEN, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Brasilia, p. 732-747, 2006.

van STRAATEN, P. Rocks for crops: Agrominerals of Sub-Saharan Africa. **ICRAF**, Nairobi, Kenya, 2002. 338 p.

van STRAATEN, P. Agrogeological resources in eastern and southern Africa. In: WACHIRA, J.K. & NOTHOLT, A.J.G. Agrogeology in Africa. **Common Sci Council**, p. 12-36, 1987.

von FRANGSTEIN, P. Silicate rock dusts as natural fertilizers. University of Kassel,
Department of Agriculture, p. 73-76, 1988.

2 CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA DE PÓS DE ROCHAS SILICÁTICAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA

2.1 RESUMO

A maioria dos solos brasileiros são intemperizados, ácidos e com baixa reserva mineral, necessitando-se utilizar corretivos da acidez e fertilizantes para produtividades satisfatórias, porém, a dependência externa de matéria-prima, os altos custos e a busca por alternativas mais sustentáveis têm incentivado pesquisas na área da rochagem. A partir da Lei brasileira 12.890 de 10/12/2013 alguns destes produtos podem ser considerados remineralizadores (RM) e passam a ser reconhecidos como uma categoria de insumo destinado à agricultura. O objetivo desta pesquisa foi a caracterização física, química e mineralógica de pós de rochas silicáticas do estado de Santa Catarina, sendo dois basaltos e o fonolito coletados em Lages, a olivina melilitito e o sienito em Palmeira e o granito em Ibirama. As rochas foram coletadas em blocos irregulares, britadas, moídas em moinho de grelhas e peneiradas em malha 1,0; 0,5; 0,25; 0,125; 0,053 e <0,053mm para caracterização granulométrica, análises petrográficas, análise de fluorescência de raios-X (FRX); análises químicas elementares e análises mineralógicas das 6 rochas foram conduzidas para avaliar seu enquadramento como remineralizadores de solos. As análises indicaram que a olivina melilitito apresentou os maiores conteúdos totais de Ca e Mg, conteúdos expressivos de K e P e baixos teores de elementos tóxicos, além de minerais essenciais e acessórios facilmente intemperizáveis, sendo identificada como o melhor remineralizador multinutriente dentre as rochas estudadas. Quanto aos teores de potássio, as rochas com maior conteúdo total do elemento, em ordem de importância foram o fonolito, o granito, o sienito, a olivina melilitito e os basaltos.

Palavras-chave: Nutrição de plantas. Produção orgânica. Fertilizante alternativo. Agroecologia. Sustentabilidade.

CHAPTER 1 – PHYSICAL, CHEMICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERIZATION OF SILICATE ROCK POWDERS FROM THE STATE OF SANTA CATARINA

2.2 ABSTRACT

Most Brazilian soils are weathered, acidic and with low mineral reserves, thus requiring the use of acidity correctives and fertilizers for satisfactory yields. However, external dependence on raw materials, high costs and the search for more sustainable alternatives have encouraged research in the stonemeal area. According to Brazilian Law 12890 of 10/12/2013 some of these products can be considered remineralizers (RM) and are now recognized as an input category for agriculture. The objective of this research was the physical, chemical and mineralogical characterization of silicate rock powders from Santa Catarina state, while basalts and phonolite having been collected in Lages, olivine melilitite and sienito in Palmeira and granite in Ibirama. The rocks were collected in irregular blocks, crushed, grinded in grids and sieved in 1.0 mesh; 0.5; 0.25; 0.125; 0.053 and <0.053mm for granulometric characterization; petrographic analyzes, X-ray fluorescence analysis (FRX); elemental chemical analysis and mineralogical analysis of the 6 rocks were conducted to evaluate their classification as soil remineralizers. The analysis indicated that olivine melilitite presented the highest total contents of Ca and Mg, expressive contents of K and P and low levels of toxic elements, as well as essential minerals and accessories easily weatherable, being identified as the best multinutrient remineralizer among the studied rocks. As for the potassium contents, the rocks with the highest total content of the element, in order of importance were phonolite, granite, syenite, olivine melilitite and basalts.

Key words: Plant nutrition. Organic production. Alternative fertilizer. Agroecology. Sustainability.

2.3 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas do mundo, no entanto, a produção nacional de fertilizantes é insuficiente para suprir a demanda interna. Além disso, a maioria dos solos brasileiros são ácidos e fortemente intemperizados, por isso requerem grande quantidade de fertilizantes para garantir bons níveis de produtividade das culturas. A limitada eficiência dos fertilizantes solúveis nos solos tropicais é devido às perdas de nutrientes por lixiviação, pelo escoamento superficial, emissão de gases e fixação pelo solo (BALIGAR, 2001), associado aos altos custos das matérias-primas no mercado internacional (MANNING, 2010). Isto tem incentivado o desenvolvimento de pesquisas de fontes alternativas de fertilizantes, dentre as quais se destacam as rochas silicáticas, apesar de menos solúveis, podem ser tão ou mais eficientes do que aqueles no fornecimento de nutrientes para as plantas, pois podem subsidiariamente disponibilizar micronutrientes que estão associados à composição mineralógica destas rochas (SOUZA et al., 2017), além de exigirem menos energia para sua produção, visto que necessitam apenas de moagem prévia.

Os aluminossilicatos e silicatos ferromagnesianos constituem a maioria dos minerais formadores das rochas silicatadas, que variam em estrutura e composição, e podem ser fontes primárias de vários nutrientes requeridos para o crescimento das plantas. Alguns estudos propõem a recuperação da fertilidade de solos intemperizados a partir da adição de pó de rochas como corretivos da acidez e fornecedores de macro e micronutrientes (SILVA et al., 2012; LOPES-ASSAD et al., 2010; LEONARDOS et al., 2000). Os nutrientes contidos em algumas rochas silicáticas ou minerais silicatados, após solubilização pelas reações naturais de intemperismo, podem ser liberados numa taxa que permita serem utilizados em tempo hábil para produção das culturas (SOUZA et al., 2017; MANNING, 2010; CORONEOS, 1996).

A rochagem, ou a remineralização de solos está conceitualmente fundamentada no que van Straaten (2002 e 1987) refere como agrogeologia, ou estudo dos processos geoquímicos envolvidos na formação dos solos, na manutenção dos agroecossistemas, e na utilização de rocha no manejo da fertilidade dos solos e como fonte de nutrientes para as plantas.

Dentre os vários materiais utilizados e pesquisados destacam-se determinadas rochas silicáticas (MARTINS et al., 2008; van STRAATEN, 2002, 2006, 1987; GILMANN et al., 2001; HARLEY; GILKES, 2000; HISINGER et al., 1996; LEONARDOS et al., 1987), as quais são capazes de disponibilizar expressivas quantidades de nutrientes essenciais às plantas.

Uma das premissas básicas para o emprego desses materiais na agricultura é o conhecimento pormenorizado da sua composição elementar, bem como dos seus minerais

constituítes. Análises da composição elementar das rochas permitem inferir sobre a capacidade potencial de cada rocha de fornecer nutrientes essenciais, tais como o cálcio, magnésio, potássio, fósforo e alguns micronutrientes; já a identificação dos constituintes minerais permite inferir sobre sua maior ou menor resistência à dissolução pelos processos de intemperismo após a adição aos solos.

Na região de Lages, Santa Catarina há expressiva ocorrência de rochas ultrabásicas e alcalinas, descritas por Scheibe (1986), que compõem o “Domo Alcalino de Lages”. São rochas que apresentam características químicas e mineralógicas bastante distintas, com predomínio de feldspatos e feldspatóides nos fonolitos e sienito, e de minerais cárquicos e ferromagnesianos nas ultrabásicas.

As rochas descritas nesta região representam dois grandes grupos: um deles engloba as rochas alcalinas leucocráticas, que constituem os corpos maiores e compreendem fonolito, fonolitos porfiríticos e nefelina-sienito porfirítico e o outro, rochas ultrabásicas que compreendem as olivinas melilitito (ROLDAN, 2007; SCHEIBE, 1986). Destacam-se ainda nessa formação o carbonatito, o kimberlito e diversas brechas de chaminé vulcânica (SCHEIBE, 1986).

O presente capítulo objetivou caracterizar em detalhe 6 (seis) rochas que posteriormente foram utilizadas em ensaios de solubilização com ácidos orgânicos e num ensaio comparativo em casa de vegetação quanto ao seu potencial de liberação de potássio para duas culturas. As rochas foram caracterizadas quanto à granulometria, composição elementar e mineralogia, utilizando-se técnicas de análise química total, fluorescência de raios X, difratometria de raios X e análise petrográfica.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 – Caracterização dos materiais estudados

2.4.1.1 Coleta e processamento das amostras

As rochas foram todas coletadas em Santa Catarina. O basalto Britaplan (BP), o basalto Castelar (CT), o fonolito (FN) em Lages ($27^{\circ} 51' 24,32''S$ $50^{\circ} 22' 51,67''O$; $27^{\circ}38'37''S$ $50^{\circ}9'18''O$, respectivamente), a olivina melilitito (OM) e o sienito (SN) em Palmeira ($27^{\circ}38'57,33''S$ $50^{\circ} 07'51,02''O$ e $27^{\circ} 38'09''S$ $50^{\circ}9'07''O$, respectivamente) e o granito (GR) ($27^{\circ}06'28''S$ $49^{\circ}27'22''O$) em Ibirama.

Foram coletados blocos irregulares das rochas, as quais foram britadas e moídas em moinho de grelhas do CAV/UDESC, sendo realizado o quarteamento das amostras, as quais foram posteriormente peneiradas para caracterização granulométrica.

2.4.1.2 Análises Granulométricas das Rochas

Depois de secas em estufa a 65°C, as amostras foram submetidas ao peneiramento mecânico com peneiras de diferentes malhas: as frações maiores do que 2 mm foram descartadas.

A granulometria da fração inferior a 2 mm de cada rocha foi determinada a partir de 200g de amostras de material seco, com quatro repetições. Foi utilizado um jogo de peneiras de 1,0; 0,5; 0,250; 0,125; 0,053 e <0,053mm em um agitador eletromecânico modelo Solotest por 15 minutos a uma potência nominal de 8 em uma escala de 1 a 15. Foi escolhida essa configuração por meio de testes empíricos de laboratório conforme recomenda o fabricante. A fração com diâmetro inferior a 0,25 mm foi selecionada para os testes de solubilidade, baseado em pesquisas anteriores e na legislação vigente.

2.4.1.3 Análises Petrográficas

As análises petrográficas foram conduzidas no laboratório LAMIR (Laboratório de Análises de Minerais e Rochas) da Universidade Federal do Paraná, setor de Ciências da Terra, Departamento de Geologia. Após confecção das lâminas, a porcentagem de cada mineral foi obtida por estimativa visual, utilizando um Microscópio petrográfico Carl Zeiss, modelo AXIO Imager A2m, com sistema de captura e tratamento de imagem AXIO Vision.

2.4.1.4 Análises de Fluorescência de Raio-X (FRX) das Rochas

As amostras integrais dos pós das rochas depois de submetidas à moagem no moinho de grelhas foram posteriormente moídas em almofariz de ágata, até atingirem granulometria inferior a 0,053 mm, sendo então analisadas por fluorescência de raios X (FRX) como pó não prensado. Foram utilizadas 2g de amostras moídas e acondicionadas em porta amostras padrão com fundo revestido com filme poliéster “mylar” de 3,6 µm.

O equipamento utilizado para análise foi um espectrômetro compacto de energia dispersível de raio-X (EDX), modelo Epsilon 3 da Panalytical, com gerador de potência máxima em alta tensão de 9000 mW, voltagem de 4 a 30 kV e intensidade da corrente de 1 a

1000 µA, com tubos de raios-X de material anodo de ródio (Rh), janela de berílio com 50 µm de espessura e detector diodo Si-PIN com processamento dos dados através de um analisador multi-canal (MCA). O sistema é alimentado com gás hélio pressurizado e refrigeração eletrônica a ar termoelétrica (Peltier).

A quantificação dos elementos foi feita através de um aplicativo denominado OMNIAN, que acompanha o pacote do software Epsilon, que é calibrado a partir de amostras padrões de pastilhas fundidas. Este método foi utilizado na análise de um total de 24 elementos, proporcionando boa precisão, quando comparado aos resultados das análises químicas das rochas.

2.4.1.5 Análises Químicas Elementares das Rochas

As análises dos elementos maiores e menores das rochas foram feitas por métodos químicos no laboratório com certificação internacional ALS Global, com sede na cidade de Vespasiano, Minas Gerais. As análises foram realizadas na sede da empresa localizada no Peru, utilizando vários protocolos com quantificação dos elementos por ICP (Inductived Coupled Plasma), conforme abaixo descritos:

Tabela 1 - Procedimentos analíticos utilizados para a determinação dos elementos nas rochas estudadas.

ANALYTICAL PROCEDURES		
ALS CODE	DESCRIPTION	INSTRUMENT
ME-ICP06	Whole Rock Packpage – ICP-AES	ICP-AES
C-IR07	Total Carbon (Leco)	LECO
S-IR08	Total Sulfur (Leco)	LECO
ME-MS81	Lithium Borate Fusion ICP-MS	ICP-MS
ME-MS81	Up to 34 elementos by ICP-MS	ICP-MS
AO-GRA05	Loss on Ignition at 1000C	WST-SEQ
TOT-ICP06	Total Calculation for ICP06	ICP-AES
ME-4ACD81	Base Metals by 4-acid dig.	ICP-AES

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

2.4.1.6 Análises Mineralógicas das Rochas

As análises mineralógicas das rochas foram realizadas no Laboratório de Gênese e Mineralogia dos Solos do CAV/UDESC, utilizando a técnica de Difratometria de raios-X (DRX), pelo método do pó. Para estas análises utilizou-se um difratômetro de raios-X Philips,

modelo PW 3710, dotado de tubo de Cu, goniômetro vertical, filtro de níquel e monocromador de grafite, ângulo de compensação de $\Theta/20$, com variação angular de 3 a 42° 2 Θ . A velocidade angular foi de 0,02° 2 Θ/s , em modo por passos (step), com tempo de 0,5 segundos de leitura por passo.

Os difratogramas foram confeccionados no programa X Pert Highscore Plus versão 3.0. Os critérios empregados para a interpretação dos difratogramas e para a identificação dos minerais constituintes dos pós das rochas foram baseados no espaçamento interplanar (d) e no comportamento dos reflexos de difração conforme sugeridos por Jackson (1965), Brindley & Brown (1980), Whittig & Allardice (1986) e tabelas completas contendo os picos de vários minerais constantes no endereço ruff.geo.arizona.edu/ref/Minerals_main.html, que disponibiliza publicamente dados de espectroscopia Raman, difratometria de raios-X, infravermelho e dados químicos de cada mineral.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1 Análises Granulométricas das Rochas

As rochas com maior percentual de frações mais grosseiras (Tabela 2), foram o fonolito e o basalto Castelar, com 47,3 e 39,4% respectivamente, retidos na peneira de malha 1 mm. Entretanto, os maiores valores retidos na fração entre 1 e 0,5 mm, foram para o granito (26,9%) seguido do fonolito (25,8%). Quando consideramos a soma das duas maiores frações, novamente o fonolito e o basalto Castelar concentraram os maiores valores, indicando que tais rochas apresentaram maior resistência à quebra dos seus minerais no moinho de grelhas.

Por outro lado, no somatório das frações com diâmetro inferior a 0,5 mm as rochas olivina melilitito, basalto Britaplan e sienito destacaram-se por concentrar maior percentual de frações finas. Com base nesses resultados, optou-se pela utilização de amostras com granulometria $<0,250\text{mm}$ nos testes de solubilização tendo essa escolha ainda sido baseada em outras pesquisas já realizadas (RAMOS et al., 2014 e 2016; HARLEY; GILKES, 2000; HISINGER et al., 1996).

Tabela 2- Percentual médio das granulometrias das rochas.

Diâmetro da malha das peneiras (mm)					
1	0,5	0,25	0,125	0,053	<0,053

	%					
Sienito	34,8	19,8	14,9	11,9	15,3	3,3
Fonolito	47,3	25,8	15,4	7,3	3,2	1,0
Basalto CT	39,4	18,8	13,3	12,4	13,9	2,2
Basalto BP	32,5	19,3	13,6	20,1	13,0	1,5
Granito	25,9	26,9	23,2	15,4	6,8	1,8
Olivina Melilitito	33,2	16,5	11,9	13,1	19,9	5,4

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

2.5.2 Análises Químicas Elementares das Rochas

Nas análises químicas elementares das rochas, onde há a fusão total das amostras, os elementos maiores foram determinados e expressos na forma de óxidos, e os elementos menores na forma elementar. Apenas os conteúdos elementares mais importantes são apresentados nas tabelas 3 e 5. Devido às diferenças na composição elementar das rochas por FRX (Tabela 5), optou-se por analisar somente o basalto com maior conteúdo de óxidos (basalto BP).

Levando em conta os teores totais de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO e K_2O (Tabela 2), observa-se que os valores obtidos são compatíveis com os geralmente obtidos para as rochas basalto (teores de SiO_2 entre 45 e 52%, conteúdos de óxidos de Ca e Mg entre 12 e 14% e de óxidos de K inferiores a 1,5%); fonolito (rocha alcalina, intermediária, com muito baixos conteúdos de óxidos de Ca e Mg e altos de óxidos de K e Na); olivina melilitito (rocha vulcânica ultrabásica com teores muito altos de óxidos de Ca e Mg, muito baixos de óxidos de Si, destacando-se especialmente pelos expressivos conteúdos de K e P) e granito (rocha magmática intrusiva com conteúdo muito alto de óxido de Si, baixos de óxidos de Ca e Mg e altos de óxidos de K e Na). Para a rocha coletada e referida como sienito, entretanto, os resultados das análises químicas não foram compatíveis, apesar da sua grande semelhança morfológica com o sienito. Sienitos são rochas alcalinas classificadas no grupo das intermediárias (LEINZ & AMARAL, 1978), geralmente com teores de SiO_2 acima de 54%, com baixos conteúdos de óxidos de Ca e de Mg e altos de óxidos de K e Na. Embora o conteúdo destes últimos seja compatível com o sienito, os teores de óxidos de Si (Tabela 3) situaram a rocha no campo das básicas (45-52%). Considerando o teor de sílica e o somatório dos teores de óxidos de K e Na, e com base no diagrama de Le Bass (1986), a rocha foi classificada como um tefrito. Entretanto, tendo por referência os dados da petrografia, adiante descritos, a classificação da rocha como sienito foi mantida no texto.

Tabela 3 - Composição química elementar das rochas - ALS (Peru).

Rochas	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Cu	Zn
-----%-----								----ppm----	
Basalto BP	50,40	14,20	8,79	4,60	1,21	2,48	0,21	108	118
Fonolito	53,60	22,00	0,88	0,11	5,71	9,63	0,02	15	146
Granito	72,00	13,25	1,25	0,16	4,26	4,47	0,03	7	33
Olivina Melilitito	38,20	8,84	13,55	15,05	2,84	2,98	1,11	101	107
Sienito	47,30	15,85	7,12	6,56	4,96	4,73	0,67	42	128

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

De acordo com os resultados, verifica-se que as rochas possíveis de serem utilizadas como fonte de cálcio e de magnésio são o basalto, a olivina melilitito e o sienito, cujos valores, somados, foram de 13,39, 13,68 e 28,60%, respectivamente.

Quanto aos teores de potássio, as rochas com maior conteúdo total do elemento, em ordem decrescente, foram o fonolito, o granito, o sienito e a olivina melilitito, com valores de 5,71; 4,96; 4,26 e 2,84 % de K₂O respectivamente. Já em relação a uma possível fonte de fósforo, verificou-se especial destaque a rocha olivina melilitito, por apresentar 1,11% de P₂O₅. A rocha olivina melilitito destaca-se pelo elevado conteúdo de cálcio e magnésio em relação às demais rochas, contendo ainda expressivos teores de fósforo e potássio. Já o sienito aparenta melhor potencial de liberação de nutrientes do que o basalto, uma vez que além de possuir teores similares de cálcio e magnésio, destaca-se daquele por possuir maiores quantidades de fósforo e potássio. Portanto, a olivina melilitito e o sienito apresentam potencial maior para uso como remineralizadores multinutrientes.

Algumas rochas se destacaram ainda quanto ao conteúdo de dois micronutrientes importantes para as plantas, o cobre e o zinco (KERBAUY, 2004). As rochas fonolito, sienito, basalto BP e olivina melilitito seriam potenciais fontes de zinco com 146, 128, 118 e 107 ppm de Zn respectivamente, superando o granito. Já como fonte de cobre as rochas basalto BP e olivina melilitito têm especial destaque com valores de 108 e 101 ppm de Cu respectivamente.

Quanto aos elementos potencialmente tóxicos a saúde humana, os valores encontrados para todas as rochas situaram-se abaixo dos limites máximos preconizados pela legislação brasileira (BRASIL, 2013, 2016) (Tabela 4), com exceção do elemento mercúrio no sienito, que foi ligeiramente mais alto, mas que está dentro do desvio padrão da análise.

Tabela 4 - Valores dos elementos tóxicos e limite permitido nos remineralizadores pela legislação brasileira – ALS.

Rochas	Arsênio (As)		Cádmio (Cd)		Mercúrio (Hg)		Chumbo (Pb)	
	Real	Limite tóxico	Real	Limite tóxico	Real	Limite tóxico	Real	Limite tóxico
-----ppm-----								
Basalto BP	0,4	15	<0,5	10	0,035	0,1	8	200
Fonolito	4,7	15	<0,5	10	0,034	0,1	37	200
Granito	0,5	15	<0,5	10	0,026	0,1	10	200
Olivina Melilitito	2,8	15	<0,5	10	0,038	0,1	16	200
Sienito	2,4	15	<0,5	10	0,135	0,1	24	200

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

2.5.3 Análises por Fluorescência de Raios-X (FRX) das Rochas

As análises elementares por fluorescência de Raio X (Tabela 5), corroboram os resultados das análises químicas elementares das rochas por fusão total descritas anteriormente. Os mesmos elementos maiores foram determinados e expressos em óxidos de Si, Al, P, K, Ca e Mg. Entre os elementos menores quantificados estão o Cu e o Zn.

Tabela 5 - Composição elementar das rochas por Fluorescência de Raios X (FRX) – Laboratório CAV/UDESC

Rochas	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	CuO	ZnO
-----%-----								

Basalto BP	48,83	14,88	9,40	3,53	2,10	0,99	0,025	0,16
Basalto CT	51,19	16,61	10,12	3,10	1,46	0,54	0,017	0,13
Fonolito	58,14	23,62	1,37	0,09	6,58	0,37	0,001	0,19
Granito	74,92	14,60	1,90	0,16	5,28	0,37	0,007	0,04
Olivina	37,75	10,37	15,27	14,91	3,58	1,54	0,014	0,12
Melilitito								
Sienito	46,98	18,32	8,74	6,31	5,73	1,21	0,008	0,12

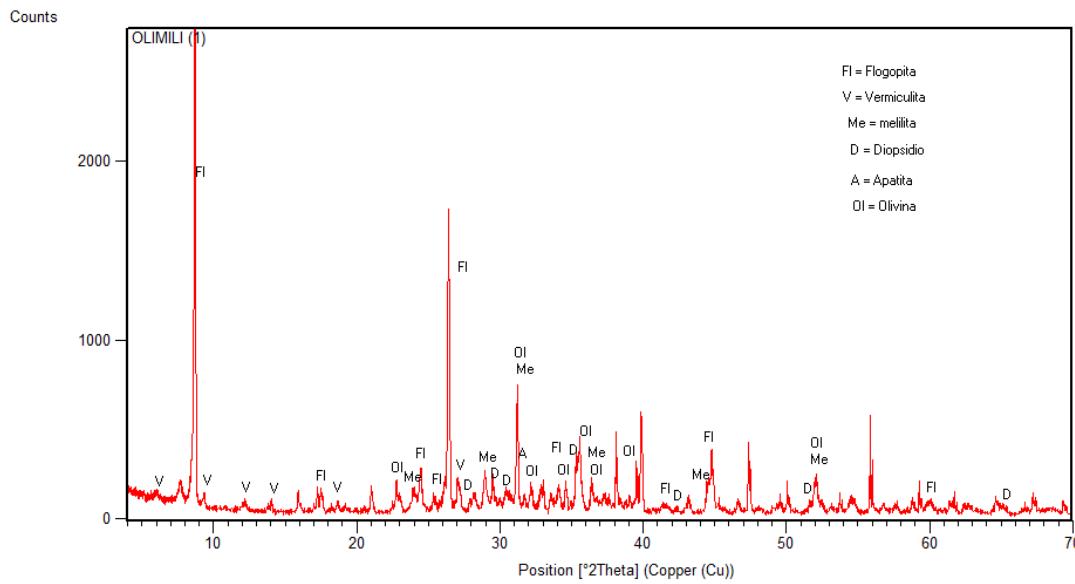
Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

2.5.4 Análises Mineralógicas das Rochas por DRX

2.5.4.1 Olivina Melilitito

Os minerais identificados por difratometria de raios-X (DRX) nesta rocha (Figura1) foram a flogopita ($KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$), a vermiculita $Mg_{0.7}(Mg, Fe, Al)_6(Si, Al)_8O_{20}(OH)4.8H_2O$, a olivina (fayalita – $(Fe^{2+}_2(SiO_4)/$ forsterita ($Mg_2(SiO_4)$)), o diopsidio ($CaMgSi_2O_6$), a melilita (akermanite - $Ca_2MgSi_2O_7$)/gehlenita – $Ca_2Al(SiAl)O_7$) e a apatita (hidroxiapatita – $Ca_5(PO_4)_3.OH$).

Figura 1 - Difratograma de raios X do pó da rocha Olivina Melilitito.



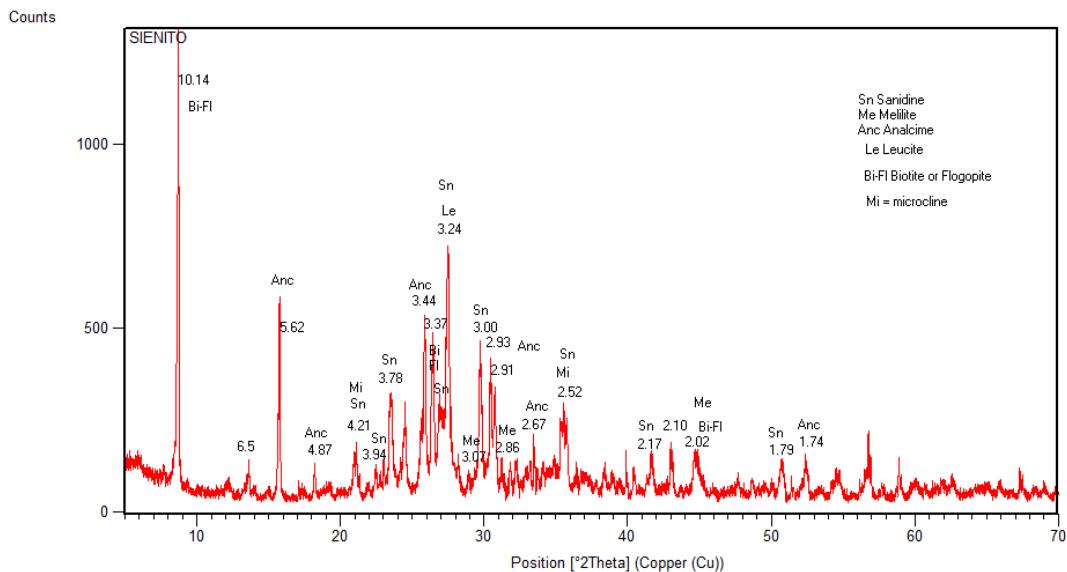
Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

A olivina é característica de rochas ígneas maficas e ultramáficas, comumente contendo menor substituição de vários elementos metálicos.

2.5.4.2 Sienito

Os minerais identificados por difratometria de raios X (DRX) nesta rocha (Figura 2) foram a sanidina ($K(AlSi_3O_8)$), a melilita (akermanite - $Ca_2MgSi_2O_7$)/gehelenita – $Ca_2Al(SiAl)O_7$), a analcima ($Na(AlSi_2O_6) \cdot H_2O$), a leucita $K(AlSi_2O_6)$, a biotita/flogopita $K(MgFe^{II})_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ e o microclínio $K(AlSi_3O_8)$. O mineral analcima é do grupo das zeólitas. Já a microclina e a sanidina são do grupo dos feldspatos.

Figura 2- Difratograma de raios X do pó da rocha Sienito.

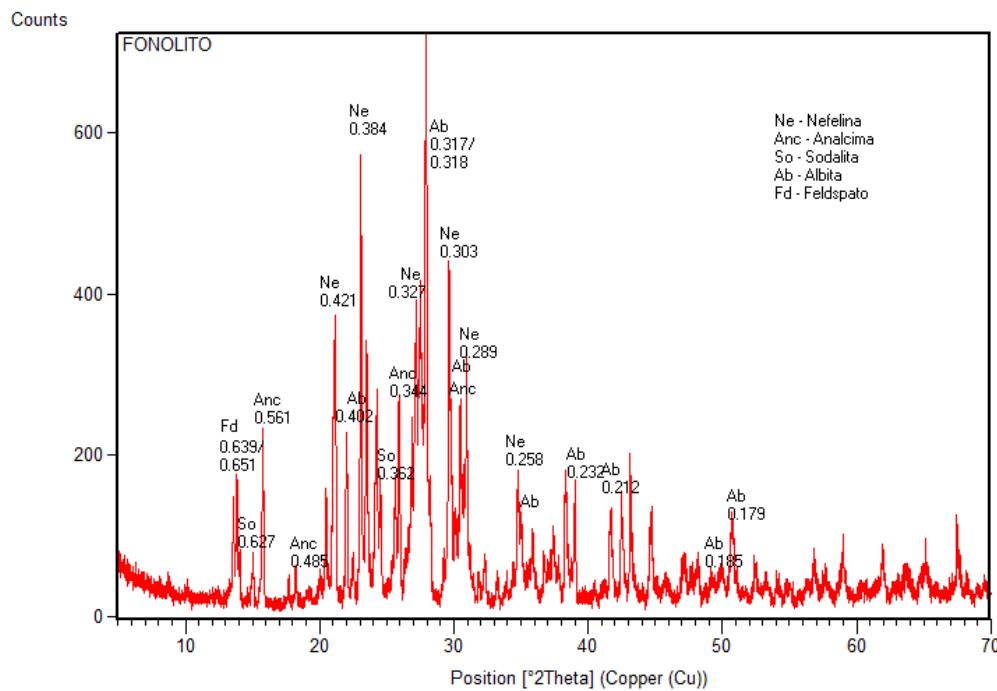


Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

2.5.4.3 Fonolito

Os minerais identificados por difratometria de raios X (DRX) nesta rocha (Figura 3) foram a nefelina $\text{Na}_3\text{K}(\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16})$, a analcima $(\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)\cdot\text{H}_2\text{O})$, a sodalita $(\text{Na}_4(\text{Si}_3\text{Al}_3)\text{O}_{12}\text{Cl})$ e a albíta $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$.

Figura 3 - Difratograma de raios X do pó da rocha Fonolito

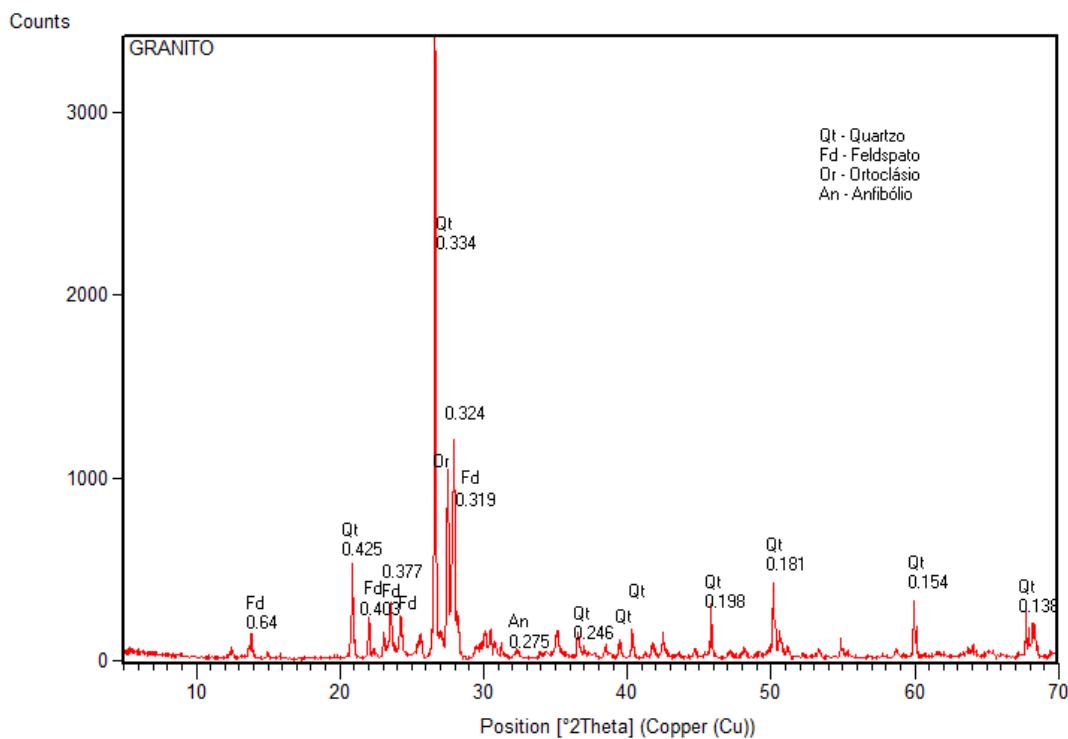


Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

2.5.4.4 Granito

Os minerais identificados por difratometria de raios X (DRX) nesta rocha (Figura 4) foram o quartzo (SiO_2), o feldspato (ortoclasio – $(\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2)$; albíta $(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2)$) e anortita ($\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) e o anfibólio (hornblenda – $(\text{Ca}, \text{Na})_{2,3}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$).

Figura 4- Difratograma de raios X do pó da rocha Granito.

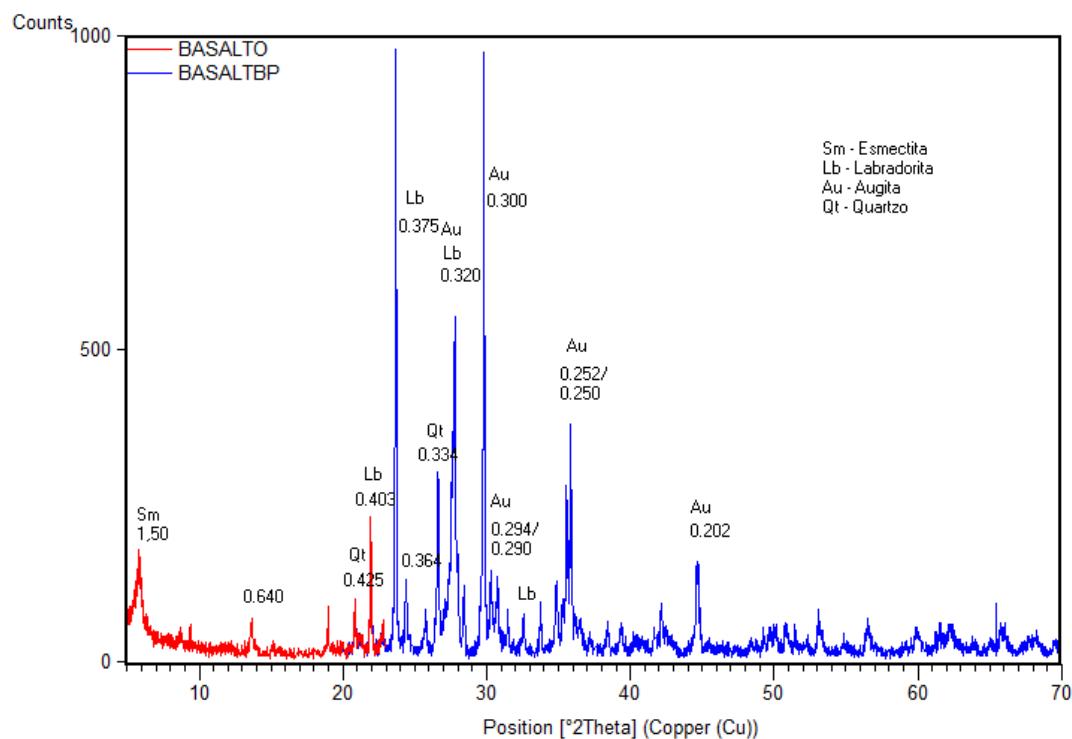


Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

2.5.4.5 Basalto BP

Os minerais identificados por difratometria de raios X (DRX) nesta rocha (Figura 5) foram a esmectita ($(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), a labradorita ($\text{Ca}_y\text{Na}_x\text{AlSi}_z\text{O}_8$), a augita ($(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$) e o quartzo (SiO_2).

Figura 5- Difratograma de raios X do pó da rocha Basalto Britaplan



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

2.5.5 Análises Petrográficas das Rochas

Os laudos completos das análises petrográficas constam do Anexo 1. Uma síntese dos resultados, para as diferentes rochas estão sumarizados na Tabela 6.

2.5.5.1 Basalto Britaplan - BP

Ao exame mesoscópico, trata-se de uma rocha ígnea, sã, de cor cinza escura, com granulação muito fina a fina, possuindo granulometria matriz menor que 1,0 mm e fenocristais com até 5,0 mm, estrutura maciça e textura porfirítica muito fina a fina.

Ao exame microscópico apresenta textura porfirítica muito fina a fina, subofítica e intergranular, intersertal, com estrutura maciça e alteração incipientemente alterada.

A petrografia revelou o predomínio de plagioclásios do tipo labradorita, totalizando 50% dos minerais presentes, clinopiroxênios identificados como diopsídio, com 45% e 5% de minerais opacos. A mineralogia descrita é compatível com a da maioria dos basaltos já

identificados no Sul do Brasil (SARTORI & GOMES, 1980) e estão de acordo com a composição indicada pelas análises feitas por DRX.

Tabela 6 - Composição mineral das rochas segundo análises Petrográficas.

Composição mineral	Basalto	Fonolito	Granito	Olivina Melilitito	Sienito
	----- % -----				
Anfibólio	5				
Aegerina		15			
Clinopiroxênio	Diopsídio	40		15	
	Fenocristal – egerina			5	
	Matriz – egerina			5	
Feldspato	Alcalino - fenocristal (sanidina)			15	
	Alcalino matriz – sanidina	45			30
	Alcalino – microclínio		40		
Feldspatóide	Matriz – nefelina	35			
	Matriz – sodalita			20	
	Microfenocristais (Nefelina)		5		
Flogopita				30	
Melilita				40	20
Minerais opacos	5		traços	5	5
Olivina				10	
Plagioclásio	matriz labradorita	45			
	fenocristais –labradorita	5			
	Anortita		25		
Quartzo			30		
Titanita					Traços
Vidro vulcânico devitrificado (argilominerais e óxidos de Ferro)		5			

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

2.5.5.2 Fonolito

Ao exame mesoscópico, trata-se de uma rocha ígnea, não alterada, de cor cinza escura, com granulação muito fina a fina, possuindo granulometria da matriz menor que 0,1 mm e microfenocristais com até 0,1 mm, estrutura de fluxo e textura microporfirítica muito fina a fina.

Ao exame microscópico apresenta textura microporfírica muito fina a fina, estrutura de fluxo e alteração incipiente.

A petrografia revelou presença de feldspatos alcalinos do tipo Sanidina, totalizando 45% dos minerais presentes, seguida de 40% de nefelina, e 15% de clinopiroxênios do tipo aegirina. A mineralogia difere dos resultados da análise por DRX, a qual indicou sanidina, leucita (em contraposição a nefelina) e melilitas (em contraposição a aegerina). A DRX também indicou picos bem expressivos dos minerais flogopita (ou biotita) e de analcima, minerais que não foram indicados na petrografia.

2.5.5.3 Granito

Ao exame mesoscópico, trata-se de uma rocha ígnea, moderadamente alterada, de cor vermelho castanho-acinzentada, com granulação muito fina a média, possuindo granulometria menor que 0,1mm a 10,0 mm, estrutura maciça e textura fanerítica inequigranular muito fina a média. Ao exame microscópico apresenta textura fanerítica inequigranular muito fina a média, com estrutura maciça e intensamente alterada.

A petrografia indicou 30% de quartzo, 40% de feldspatos do tipo microclinio, 25% de plagioclásios do tipo anortita e 5% de anfibólitos. A mineralogia foi similar à identificada pelas análises por DRX, com exceção da presença de anortita, que não foi constatada pelo DRX. Ao invés dessa, foram identificadas maiores quantidades de anfibólitos.

2.5.5.4 Olivina Melilitito

Ao exame mesoscópico, trata-se de uma rocha ígnea, não alterada, de cor cinza escura, com granulação muito fina a média, possuindo granulometria menor que 1,0 mm a 5,0 mm, estrutura maciça e textura fanerítica inequigranular muito fina a média. Ao exame microscópico apresenta textura fanerítica inequigranular muito fina a média, com estrutura maciça e alteração moderadamente alterada.

A petrografia indicou para essa rocha o predomínio de melilitas (40%), seguida de flogopitas (30%), clinopiroxênios (15%), 10% olivinas e 5% de minerais opacos. De acordo com Essington (2015), grande parte dos minerais do grupo dos sorossilicatos, tais como akermanita e gehlenita, do grupo das melilitas, são pouco comuns em solos, uma vez que apresentam baixa resistência ao intemperismo. Mas são minerais frequentes em olivina melilititos. As análises de DRX indicaram os mesmos minerais presentes, com acréscimo representado pela detecção da presença de augita e apatitas.

2.5.5.5 Sienito

Ao exame mesoscópico, trata-se de uma rocha ígnea, moderadamente alterada, de cor cinza claro esbranquiçada, com granulação muito fina a média, possuindo granulometria menor que 0,1 mm a 10,0 mm, estrutura maciça e textura porfirítica muito fina a média. Ao exame microscópico apresenta textura porfirítica em matriz muito fina a média, com estrutura maciça e moderadamente alterada.

A petrografia indicou o predomínio do feldspatóide sanidina (45%), seguida de iguais proporções de sodalita e melilitas (20% cada), 10% do mineral aegerina e 5% de opacos.

A composição foi compatível com os resultados da DRX, exceto pelo fato de que nesta, o mineral analcima foi identificado em lugar da sodalita. Além disso o DRX revelou a presença expressiva de flogopitas, não indicadas pela petrografia.

2.6 CONCLUSÕES

As análises químicas elementares totais, assim como as análises elementares por fluorescência de raios X indicaram que, do conjunto de rochas estudadas, a olivina melilitito apresentou os maiores conteúdos totais de cálcio e de magnésio, conteúdos expressivos de potássio e fósforo e baixos teores de elementos tóxicos, revelando que apresenta um potencial promissor para ser utilizada como matéria-prima para a produção de um remineralizador multinutrientes;

Com base nos mesmos resultados e nos mesmos atributos químicos, concluiu-se que, em ordem decrescente de importância, as rochas sienito e os basaltos também podem ser utilizadas com o mesmo objetivo;

Quanto aos teores de potássio, as rochas com maior conteúdo total do elemento, em ordem decrescente, foram o fonolito, o granito, o sienito e a olivina melilitito, embora os basaltos também tenham apresentado teores ligeiramente acima do conteúdo mínimo exigido para enquadramento como remineralizadores;

Considerando os resultados mineralógicos da petrografia e da difratometria de raios X em conjunto, a rocha olivina melilitito apresentou uma assembleia de minerais essenciais e acessórios facilmente intemperizáveis, o que a qualifica como de maior potencial de liberação de vários nutrientes do que as demais rochas quando aplicada aos solos na forma de pó de rocha ou remineralizador de solos;

Com base na composição mineralógica, as rochas com potencial mais promissor para solubilização de potássio, em ordem de importância, foram o fonolito, pelo maior conteúdo de sanidina e nefelina, seguida do sienito, com mineralogia similar, e por último o granito, que apesar do alto conteúdo do elemento, apresentou microclina dominante, mineral considerado de maior resistência ao intemperismo do que os anteriores.

2.7 REFERÊNCIAS

BALIGAR, V. C., FAGERIA, N. K. and He, Z. L. Nutrient use efficiency in plants, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32: 7, 921 - 950, 2001.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa nº 46 de 06 de outubro de 2011**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 outubro 2011. Disponível em:<http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em 23 mar. 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa nº 05 de 10 de março de 2016**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 mar.2016. Disponível em: <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em 23 mar. 2016.

BRASIL. **Lei n. 12.890, 10 dez de 2013**. Altera a Lei nº 6.894 de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 dez 2013. Disponível em: <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em 27 mar. 2017.

BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. Cristal structures of clay minerals and their X-ray identification. London: **Mineralogic Society**, p. 495, 1980.

CORONEOS, C.; HISINGER, P.; GILKES, R.J. Granite powder as a source of potassium for plants: a glasshouse biassay comparing two pasture species. *Fert.Res.* v.45, p. 143-152, 1996.

ESSINGTON, M.E. Soil and water chemistry. An integrative approach. **CRC Press**. New York, 2nd ed. 656p., 2015.

GILMANN, G.P.; BURKETT,D.C.; COVENTRY, R.J. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effect on soil cátion chemistry. *Aust. J. Soil Res.*, v. 39, p. 799-811., 2001.

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

HISINGER, P.; BOLLAND, M.D.A.; GILKES, R.J. Silicate rock powder: effect on selected chemical properties of a range of soils from Western Australia and on plant growth as assessed in a glasshouse experiment. *Fertilizer Research*, v. 45, p. 69-79, 1996.

KERBAUY, G.B. *Fisiologia Vegetal*. São Paulo, 470p.,2004.

LE BAS, M.J.; LE MAITRE, R.W.; STRECKEISEN, A.; ZANETTIN, B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total álcali-silica diagram. *Journal of Petrology*, v. 27, p.745-750, 1986.

LEINZ, V. & AMARAL, S.E. Geologia Geral. São Paulo, 7 ed., **Editora Nacional**, p. 397., 1978.

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

LEONARDOS, O.H.; FYFE, W.S.; KRONBERG, B.I. The use of ground rocks in laterite systems: an improvement to the use of conventional soluble fertilizers? **Chemical Geology**, v.60, p.361-370, 1987.

LOPES-ASSAD, M.L.; ARANSINI, S.H.; ROSA, M.M.; CARVALHO, J.R.P.; CECCATO-ANTONINI, S.R. The solubilization of potassium-bearing rock powder by *Arpergillus niger* in small-scale batch fermentations. **Can. J. Microbiol.** v. 56, p. 598-605, 2010.

MANNING, D.A.C. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. Agronomy for Sustainable Development, **Springer Verlag/EDP Sciences/INRA**, 2010.

MARTINS, E.S.; OLIVEIRA, C.G.; RESENDE, A.V.; MATOS, M.S.F.M. Agrominerais – Rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. **CETEM**, cap.9, 2^a edição, 2008.

RAMOS, C.G.; MELLO, A.G., KAUTZMANN, R.M. A preliminary study of acid volcanic rocks for stonemeal application. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management** , p.30-35, 2014.

RAMOS, C.G.; QUEROL, X.; DALMORA, A.C.; PIRES, K.C.J.; SCHNEIDER, I.A.H.; OLIVEIRA, L.F.S.; KAUTZMANN, R.M. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, p.1-7, 2016.

ROLDAN, L.F. **Tectônica rúptil meso-cenozóica na região do Domo de Lages, SC.** Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica), USP, São Paulo, 131p., 2007.

SARTORI, P.L. & GOMES, C.B. Composição química-mineralógica das últimas manifestações vulcânicas na região de Santa Maria, RS. **Anais Academia Bras. Cienc.**, 1980.

SCHEIBE, L.F.; **Geologia e Petrologia do Distrito Alcalino de Lages, SC.** Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 253p., 1986.

SILVA, A.; ALMEIDA, J.A.; SCHMITT, C.; COELHO, C.M.M.; Avaliação dos efeitos da aplicação de basalto moído na fertilidade do solo e nutrição de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, Curitiba, v.42, n.1, p.69-76, 2012.

SILVA, A.A.S.; SAMPAIO, J.A.; LUZ, B.L.; FRANÇA, S.C.A.; RONCONI, C.M. Modeling controlled potassium release from phlogopite in solution: exploring the viability of using crushed phlogopite rock as an alternative potassium source in Brazilian soil. **J.Braz.Chem.Soc.**, v.24, n.8, p.1366-1372, 2013.

SOUZA, F. N. S., OLIVEIRA, C.G.; MARTINS, E.S., ALVES, J.M. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas – TO, v.3, n.1, 2017.

SOUZA, M.E.P.; CARVALHO, A.M.X.C.; DELIBERALI,I.J.; BROWN, G.G.; MENDONÇA, E.S.; CARDOSO, I.M. Vermicomposting with rock powder increases plant growth. **Applied Soil Ecology**, v. 69, p. 56-60, 2013.

SOUZA, F. N. S., OLIVEIRA, C.G.; MARTINS, E.S., ALVES, J.M. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas – TO, v.3, n.1, 2017.

TEIXEIRA, A.M.S.; GARRIDO, F.M.S.; MEDEIROS, M.E.; SAMPAIO, J.A. Estudo do Comportamento térmico da rocha fonolito com fins à produção de fertilizantes. **Holos**: ano 31, v.5: 52-64, 2015.

van STRAATEN, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Brasilia, p. 732-747, 2006.

van STRAATEN, P. Rocks for crops: Agrominerals of Sub-Saharan Africa. **ICRAF**, Nairobi, Kenya, 338 p., 2002.

van STRAATEN, P. Agrogeological resources in eastern and southern Africa. In: WACHIRA, J.K. & NOTHOLT, A.J.G. Agrogeology in Africa. **Common Sci Council**, p. 12-36, 1987.

WHITTIG, L.D.; ALLARDICE, W.R. X-ray diffraction techniques. In: KLUTE, A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2 ed. Madison: **Soil Science Society of America**, p.331, 1986.

3 CAPÍTULO 2 – DISSOLUÇÃO DE ROCHAS SILICÁTICAS EM ÁGUA E EM ÁCIDOS ORGÂNICOS

3.1 RESUMO

A partir da Lei 12.890, de 10 de dezembro de 2013, os remineralizadores (RM), mais conhecidos como “pós de rochas”, passam a ser reconhecidos como uma categoria de insumo destinado à agricultura, assim como os demais fertilizantes. Entretanto, não há definição de critérios de qualidade destes materiais quanto ao seu potencial de liberação de nutrientes às plantas. O objetivo desta pesquisa foi avaliar diferentes extratores químicos que possam estimar o potencial de dissolução de nutrientes de diferentes rochas moídas como forma de melhor classificá-los quanto à sua qualidade. Todas as rochas foram coletadas no Estado de Santa Catarina, sendo os basaltos e o fonolito coletados em Lages; a olivina melilitito e o sienito em Palmeira; e o granito em Ibirama. As rochas foram coletadas em blocos irregulares, britadas, moídas em moinho de grelhas e peneiradas com malhas 1,0; 0,5; 0,25; 0,125; 0,053 e <0,053 mm para a caracterização granulométrica; para o experimento de solubilização foi utilizada a fração <0,25 mm sendo usados os extratores água destilada, ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹ e ácido acético 0,02 mol L⁻¹ resultando em alíquotas para as análises químicas. A solubilidade dos materiais foi testada em 5 (cinco) tempos de contato dos pós com os extratores: 0,5; 2; 8; 32 e 128 horas. Dentre os extratores avaliados, ácido cítrico apresentou maior eficiência de extração para a maioria dos elementos testados, enquanto que, dentre as rochas estudadas, a olivina melilitito foi a rocha com maior potencial de liberação de cálcio e magnésio para as plantas seguida do sienito e dos basaltos. Quanto a liberação de potássio, destacaram-se as rochas fonolito e sienito, seguida da olivina melilitito.

Palavras-chave: Rochagem. Sustentabilidade. Fertilidade do solo. Fertilizante alternativo. Solubilização.

CHAPTER 2 – DISSOLUTION OF SILICATE ROCKS IN WATER AND ORGANIC ACIDS

3.2 ABSTRACT

According to Law 12.890, dated December 10, 2013, remineralizers (RM), better known as "rock powders", are now recognized as an input category for agriculture, as well as other fertilizers. However, there is no definition of the quality criteria of these materials for their potential of releasing nutrients to plants. The objective of this research was to evaluate different chemical extractors that can estimate the nutrient dissolution potential of different ground rocks as a way to better classify them as to their quality. All the rocks were collected in the State of Santa Catarina, while basalts and phonolite having been collected in Lages; the olivine melilitite and the syenite in Palmeira; and granite in Ibirama. The rocks were collected in irregular blocks, crushed, grinded and screened with 1.0 mesh; 0.5; 0.25; 0.125; 0.053 and <0.053 mm for the granulometric characterization; the fraction <0.25 mm was used for the solubilization experiment and the extractors were distilled water, citric acid 0.02 mol L⁻¹ and acetic acid 0.02 mol L⁻¹, resulting in aliquots for the chemical analyzes. The solubility of the materials was tested in 5 (five) contact times of the powders with extractors: 0.5; 2; 8; 32 and 128 hours. Among the evaluated extracts, citric acid presented higher extraction efficiency for most of the elements tested, whereas olivine melilitite, among the rocks studied was the rock with the highest calcium and magnesium release potential for the plants followed by syenite and basalts. As for the release of potassium, the phonolite and syenite rocks were highlighted, followed by olivine melilitite.

Key-words: Stonemeal. Sustainability. Soil fertility. Alternative fertilizer. Solubilization.

3.3 INTRODUÇÃO

Algumas rochas apresentam potencial de fornecer uma grande variedade de nutrientes para sistemas de produção agrícola (GUELFİ-SILVA et al., 2014; RESENDE et al., 2006), o que pode representar vantagem quando esses materiais são comparados aos fertilizantes solúveis, pois estes normalmente só fornecem os macronutrientes principais N, P, K. Muitas rochas são compostas por uma variedade de minerais, tais como micas (biotita, flogopita), feldspatóides (leucita, nefelina), feldspatos potássicos, piroxênios, plagioclásios, apatitas, dentre outros minerais, que podem fornecer quantidades consideráveis de Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, dentre outros elementos benéficos (NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2004; MARTINS et al., 2008; RIBEIRO et al., 2010; GUELFİ-SILVA et al., 2014).

A partir da Lei nº 12890 (BRASIL, 2013), os materiais produzidos a partir da moagem de rochas, quando apresentam características adequadas, podem ser enquadrados numa nova categoria de insumo, sendo denominados *remineralizadores* de solos, desde que demonstrem efeitos no fornecimento de nutrientes para as plantas e na melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas do solo. Dependendo dos materiais utilizados (rochas e, ou minerais, puros ou em misturas) e dos fatores do ambiente, do solo e da planta, a remineralização dos solos pode desempenhar as seguintes funções: correção da acidez do solo; fonte de nutrientes para as plantas e condicionamento do solo (LUZ et al., 2010). Todavia, conforme relatos da literatura (NASCIMENTO e LAPIDO-LOUREIRO, 2004; van STRAATEN, 2006; LUZ et al., 2010), o principal interesse das pesquisas com pós de rocha volta-se à obtenção de fontes alternativas de nutrientes.

De modo geral, os resultados das pesquisas indicam que a eficiência agronômica dos pós oriundos da moagem de rochas silicáticas dependem da origem, da composição química e mineralógica das rochas, bem como de fatores associados as características do solo, ao tempo de incubação no solo, do tratamento prévio aplicado, e também, das espécies cultivadas (NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2004; RESENDE et al., 2006; GUELFİ-SILVA et al., 2014).

Leonardos et al. (2000), apontam que o aspecto mais criticado do uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes está relacionado à baixa solubilidade da maior parte dos minerais constituintes dessas rochas. Entretanto, salienta que isto pode ser uma vantagem em relação aos fertilizantes solúveis nos ambientes tropicais, uma vez que interação de fatores do solo (baixa capacidade de troca de cátions) e do clima (alta pluviosidade) tornam os nutrientes provenientes desses materiais mais susceptíveis à lixiviação. Martins et al. (2010) acrescentam

que além de proporcionar efeitos residuais em cultivos sucessivos, os pós de rochas também podem promover a elevação da CTC, resultante da formação de minerais secundários, reduzindo, assim, as perdas por lixiviação.

Nos solos, a dissolução mineral é aumentada pelo desequilíbrio entre solução do solo e a superfície do mineral, através da remoção de íons pelos processos de lixiviação e absorção de nutrientes. Processos na rizosfera e a atividade biológica, no entanto, podem aumentar a dissolução do mineral através da liberação de íons H⁺ e de compostos orgânicos complexantes, que contribuem para acelerar as reações nas superfícies dos minerais.

Diferentes taxas de intemperismo para os minerais constituintes das rochas têm sido identificadas em laboratório e a campo, as quais são dependentes de fatores físicos, mineralógicos e biogeoquímicos. A taxa limitante pode ser aquela que envolve reações entre a solução do solo e a superfície dos minerais (HARLEY & GILKES, 2000). Segundo os autores, a dissolução primeiramente ocorre nos defeitos das superfícies dos minerais e um entendimento das reações nestas superfícies pode levar a necessidade de utilizarem-se processos preparativos para aumentar a liberação de nutrientes da superfície mineral, como por exemplo, determinar a granulometria adequada para que este pó de rocha seja uma fonte mais eficiente de solubilização de nutrientes. Além disso, normalizar a taxa de liberação de nutrientes para um valor básico mínimo pode auxiliar na seleção de rochas com maior potencial de liberação, descartando aquelas que apresentem liberação abaixo do mínimo.

As vias e taxas que limitam as reações que controlam o fluxo de nutrientes das rochas para as raízes são pobemente entendidos pela maioria dos cientistas de solo e agrônomos, mas o controle mineralógico e geoquímico tem sido bastante pesquisado. Os nutrientes têm diversas associações com minerais e são liberados por uma variedade de reações de intemperismo, destacando-se a hidrólise como um dos principais processos naturais.

Devido à grande variação nos fatores que podem influenciar a taxa de liberação dos nutrientes pelos pós de rocha, encontra-se dificuldade na determinação das relações solo/planta e a definição das doses a serem aplicadas, o que pode contribuir para explicar os resultados pouco expressivos de alguns experimentos: material quimicamente pobre; granulometria inadequada, curto período das experiências e custos elevados (ESCOSTEGUY; KLAMT, 1998).

Existe, contudo, uma preocupação sobre a real eficiência destes materiais, relacionada à baixa solubilidade da maioria dos pós de rochas silicatadas, sendo esse geralmente o principal fator limitante. A solubilização dos pós de rocha é dependente dos processos de hidrólise, ou ácido-complexólise nos ambientes naturais (FONTES, 2012; BRANTLEY; STILLINGS,

1996), e tendo em vista a resistência diferenciada dos minerais ao intemperismo, dependendo da composição mineralógica da rocha, isto pode afetar a taxa de liberação de nutrientes. Em outras palavras, rochas com alto conteúdo de determinado (s) nutrientes (s) podem não solubilizar nutrientes numa taxa necessária para suprir adequadamente às plantas, pelo fato de possuírem minerais com alta resistência ao intemperismo. Por outro lado, rochas com menor conteúdo total daquele nutriente, podem solubilizar quantidades maiores do mesmo, caso apresentem minerais com menor resistência.

A legislação brasileira que disciplina as regras para registro de pós de rochas como remineralizadores de solo na categoria de fertilizantes alternativos, exige que o produto contenha pelo menos uma soma dos óxidos totais de cálcio, magnésio e potássio (soma de bases) superior a 9%, que possua teores de sílica livre inferior a 25% e teores máximos de arsênio, cadmio, mercúrio e chumbo dentro de limites estabelecidos. O limite de 9% para a soma de bases, além de ser arbitrário, não informa sobre o conteúdo mínimo de cada um dos três óxidos, a não ser o caso do potássio. No entanto, a liberação dos nutrientes depende das propriedades físico-químicas e biológicas do solo e principalmente da composição dos minerais presentes na rocha, cuja resistência ao intemperismo pode ser bastante variável entre minerais fornecedores de um mesmo elemento ou nutriente.

Desse modo, apenas o conteúdo total dos óxidos não parece ser parâmetro seguro para se avaliar a qualidade de um pó de rocha para enquadramento como remineralizador.

Considerando que ácidos orgânicos simples, assim como ácidos com ação complexante, tais como cítrico e oxálico, são comuns nas camadas mais superficiais dos solos, produtos da decomposição do material orgânico, sintetizados pelos microrganismos e excretados pelas raízes (SILVEIRA; FREITAS, 2007), pressupõe-se que a solubilidade dos minerais em contato com ácidos orgânicos fracos possa ser uma alternativa de simulação mais realística do potencial de liberação de nutrientes pelos minerais contidos em pós de rocha.

A avaliação da solubilidade dos fosfatos naturais em ácido cítrico a 2% já é utilizada no Brasil há longo tempo (CATANI, 1970) como um parâmetro para avaliar a qualidade dos fosfatos quanto ao potencial para a liberação de fósforo. Outros ácidos já foram testados com a mesma finalidade (ALCARDE et al., 1975).

Assim, a hipótese do trabalho é de que a solubilidade dos pós de rocha em ácidos orgânicos possa representar de modo mais realístico o potencial de liberação de nutrientes das mesmas do que apenas ao conteúdo total, o que não significa que os conteúdos totais também não sejam importantes. Vários trabalhos neste sentido já vêm sendo realizados no Brasil para simular a liberação de potássio (SILVA et al., 2013), bem como para multielementos

(DALMORA et al., 2015). A solução de ácido cítrico foi considerada por Gabos et al. (2016) como o melhor extrator para avaliar o K disponível para as plantas após a aplicação de agrominerais silicatados ao solo.

Com base no exposto, o objetivo deste capítulo foi avaliar a eficácia de 3 (três) extractores (água, ácido acético e ácido cítrico) para estimar o potencial de dissolução de nutrientes de diferentes rochas moídas, como forma de melhor classificá-las quanto à sua qualidade.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Material utilizado nos testes

A descrição da coleta das rochas até as análises mineralógicas estão detalhadamente descritas no capítulo 1.

Os testes de solubilidade dos minerais contidos em cada uma das rochas foram conduzidos no pó das frações com dimensão inferior a 0,25 mm, utilizando dois ácidos orgânicos e água deionizada e diferentes tempos de agitação, todos com quatro repetições.

Os ácidos orgânicos utilizados foram o ácido cítrico e o ácido acético, ambos produtos P.A. e na concentração 0,02 mol L⁻¹. Para os testes de solubilidade em água, foi utilizada água deionizada, ultrapura, com reação ligeiramente ácida (pH em torno de 5,5).

3.4.2 Metodologia utilizada nos testes de solubilidade

Para os testes foram pesadas 0,500 g de amostras de cada um dos pós da rocha, colocados em tubos Falcon de plástico de 50 mL e adicionados 50 mL de cada uma das soluções, resultando uma relação massa/volume de 1:100 (Aceman, 1989).

Os tubos Falcon foram agitados deitados em agitador horizontal por períodos pré-determinados de 0,5; 2,0 e 8,0; 32 e 128 horas com 80 oscilações por minuto e temperatura ambiente de 25° C. Para cada um dos tempos de agitação, foram pesadas novas amostras de cada um dos pós das rochas. Para os testes de 32 h e 128 horas, foram seguidas sequências de 8 horas agitando e 16 horas em repouso até completar o tempo necessário para cada teste. Após a agitação, os tubos foram centrifugados por 30 minutos a 3000 rpm e os extractos foram armazenados em refrigerador, em temperatura de 2 °C, para posterior quantificação dos elementos.

Foram realizadas as determinações de cálcio, magnésio, alumínio, silício, fósforo, potássio, zinco e cobre por espectrômetro óptico de emissão por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Solubilização dos pós de rochas em água e em ácidos orgânicos

Ácidos orgânicos tais como o oxálico, cítrico, tartárico e acético são comumente encontrados nos solos e muitos destes também são utilizados como solventes para estudos de dissolução de minerais silicatados e rochas em condições laboratoriais (ERNANI, 2016; HUANG; KELLER, 1970; GILKES; PRIYONO, 2008). Com a diminuição no pH das soluções ácidas, espera-se aumento na taxa de dissolução dos minerais das rochas silicatadas, quando comparados com água desionizada, já que esta apresenta pH próximo da neutralidade. Como consequência da maior efetividade dos ácidos orgânicos na dissolução dos minerais, espera-se que haja incremento na concentração dos elementos liberados, refletindo-se em aumento na concentração salina, e, portanto, na condutividade elétrica (CE) das soluções.

Na tabela 7 estão indicados os valores médios do pH das soluções finais e da condutividade elétrica das soluções nos vários tempos de incubação, após o contato destas com os pós de rocha utilizados.

Tabela 7 - Valores médios do pH e de Condutividade Elétrica (CE) dos extratos após o contato com os pós de rocha utilizados.

Rocha	Extrator	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{m}$)
Basalto BP	Água	7,2	45
	Ácido Cítrico	2,7	1035
	Ácido Acético	3,8	292
Basalto CT	Água	7,3	39
	Ácido Cítrico	2,7	1037
	Ácido Acético	3,8	288
Fonolito	Água	7,1	36
	Ácido Cítrico	3	1064
	Ácido Acético	3,9	357
Granito	Água	7,2	32
	Ácido Cítrico	2,7	1081
	Ácido Acético	3,8	280
Olivina Melilitito	Água	7,4	90
	Ácido Cítrico	3,6	1224
	Ácido Acético	4,7	791
Sienito	Água	7,1	67
	Ácido Cítrico	3,3	1127
	Ácido Acético	4,3	584

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Observa-se que os valores do pH da água deionizada, após o contato com os pós-de-rochas, situaram-se acima do pH original ($\text{pH}=5,5$), com valores variando de 7,1 a 7,4. Isto pode ser decorrente dos diferentes pHs de abrasão das rochas utilizadas. Já para os ácidos orgânicos, tal como esperado, os valores do pH após o contato com os pós-de-rochas, mantiveram-se em valores mais baixos, variando de 3,6 a 4,3 para o ácido acético, e de 2,7 a 3,6 para o ácido cítrico. Os menores valores do pH em ácido cítrico são indicativos do seu maior potencial de dissolução mineral em relação ao acético, liberando mais elementos (ou íons) na forma de sais, incrementam a Condutividade Elétrica, o que indica maior atividade destes íons na solução (Tabela 7).

Para a CE, observam-se menores valores para a água ($32\text{-}90 \mu\text{S}/\text{m}$) e os maiores para o ácido cítrico ($1035\text{-}1224 \mu\text{S}/\text{m}$), com valores intermediários para o ácido acético. Esses resultados são coerentes com o esperado, uma vez que a menor dissolução dos minerais em água e em ácido acético resulta em menor concentração de sais e, portanto, menor condutividade elétrica das soluções. Os maiores valores do pH e da condutividade elétrica na solução de ácido cítrico foram obtidos no pó da rocha olivina melilitito, o que é decorrente do seu maior potencial de liberação de elementos, ou nutrientes, conforme será demostrado adiante.

3.5.2 Elementos solubilizados pela água e ácidos orgânicos

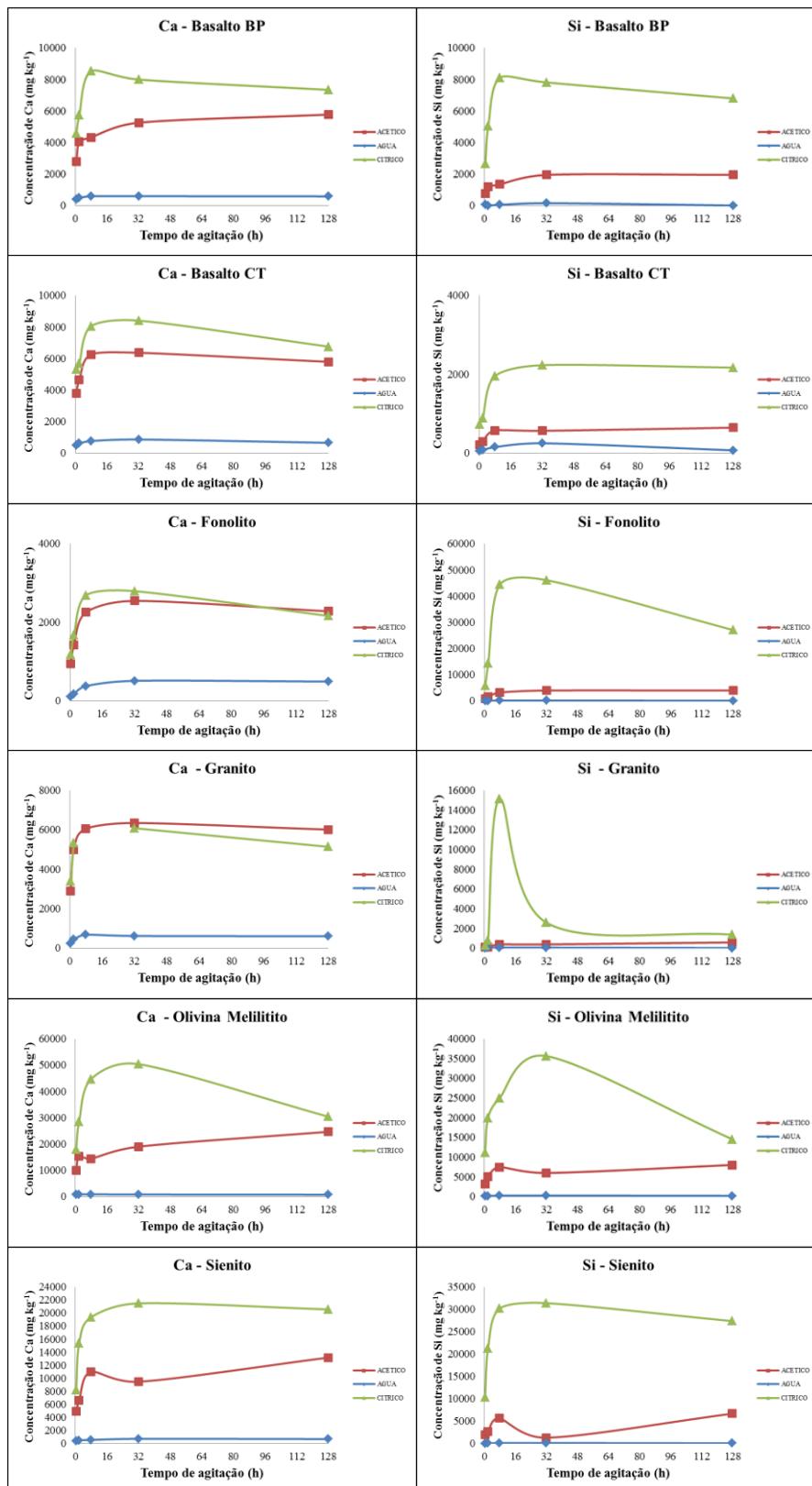
Na figura 6, são apresentados os teores dos elementos Ca e Si solubilizados em água e nos ácidos orgânicos, após agitação de 0,5 até 128h para as 6 rochas pesquisadas.

O extrator que solubilizou maior quantidade dos dois elementos foi o ácido cítrico, seguido do ácido acético e por último da água deionizada, com exceção para o cálcio no granito e no fonolito, no qual os resultados foram similares para os dois ácidos orgânicos (Figura 6). Comportamento similar foi obtido para os elementos maiores Al, Mg, K, Na, P e para os elementos menores Cu e Zn (dados não apresentados). Estudo realizado por Huang & Kiang (1972) avaliou o efeito dos ácidos acético e cítrico ($0,01\text{M}$) na dissolução de elementos metálicos de minerais silicáticos e concluiu que o cítrico foi o mais eficiente do que o acético na extração de Ca e Al. Gilkes; Priyono (2008), obtiveram resultados semelhantes para os mesmos ácidos na dissolução de minerais silicáticos para vários elementos metálicos. A dissolução dos minerais é geralmente maior em ácidos orgânicos do que para ácidos inorgânicos

(HUANG; KELLER, 1970).

Com o aumento do tempo de contato do pó-das-rochas com as soluções, ocorreu um incremento nos teores extraídos até tempos de contato entre 8 e 32 horas de agitação. A partir daí, os valores tenderam a decrescer ou manter-se numa taxa constante (Figura 6). Essa redução geralmente ocorre porque, como vários elementos químicos são simultaneamente solubilizados, alguns deles podem recombinar-se em solução para formar novos produtos, principalmente aluminossilicatos amorfos, ou de baixa cristalinidade, os quais podem interagir com os demais íons, reduzindo sua quantidade na solução. Elementos estruturais como Ca, K, Na, Mg, Fe e Si podem ser removidos do local de reação, no ambiente natural, pela lixiviação, ou serem incorporados nos produtos da reação (BANFIELD; EGGLETON, 1990). Os produtos da reação podem sofrer precipitação para formar compostos amorfos, argilominerais e sesquióxidos (BERNER; SCHOTT, 1982), embora estes processos ainda sejam pobremente entendidos.

Figura 6 - Teores de Si e Ca solubilizados pela água deionizada, ácidos cítrico 0,02 mol L⁻¹ e acético 0,02 mol L⁻¹ para o pó das rochas Basalto Britaplan (BP), Basalto Castelar (CT), Fonolito (FL), Granito (GT), Olivina Melilitito (OM) e Sienito (SN) após agitação até 128 horas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Os teores mais altos encontrados foram na extração pelo ácido cítrico porque este apresenta além do efeito acídico mais acentuado (Tabela 7), uma capacidade de complexar metais (ROCHA; MUCCILLO, 2001; SOLOMONS; FRYHLE, 2001), favorecendo, portanto, a continuidade das reações químicas. As propriedades dos ácidos orgânicos complexantes permitem o enfraquecimento das ligações metal-oxigênio na superfície do mineral e reduzem a concentração de íons na solução (ERNANI, 2016). Por outro lado, o ácido acético, por apresentar apenas efeito acídico, mantém os elementos em solução, retardando a continuidade das reações de dissolução.

A utilização do ácido cítrico para testar a solubilidade dos minerais presentes nas rochas não é recente, uma vez que há longo tempo vem sendo utilizado para testar a solubilidade de fosfatos naturais (GOEDERT; LOBATO, 1980; CATANI, 1970).

Ácidos orgânicos tais como o oxálico, cítrico, tartárico e acético são comumente encontrados nos solos e muitos destes também são utilizados como solventes para estudos de dissolução de minerais silicatados e rochas em condições laboratoriais (SONG; HUANG, 1988; GILKES; PRIYONO, 2008).

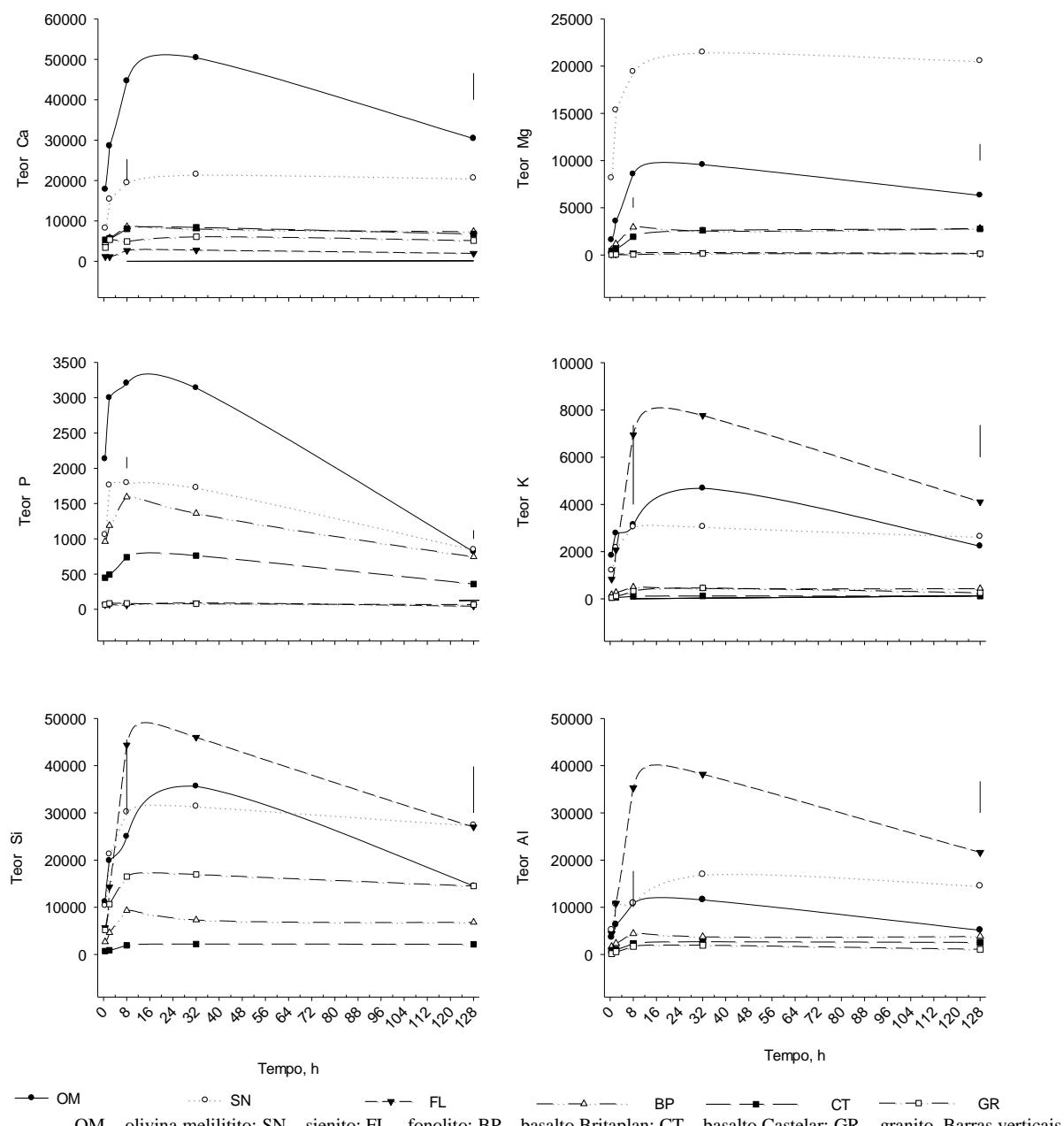
A diminuição do pH do solo devido a processos químicos e biológicos naturais, como os que ocorrem na rizosfera, pode também ser importante para incrementar a taxa de dissolução durante o cultivo de plantas. Estes processos são interessantes quando consideramos que algumas plantas podem reduzir rapidamente o pH da solução da rizosfera em 2 ou mais unidades (MARSCHENER, 1998). Por outro lado, como a dissolução dos minerais é mínima em valores de pH próximos ao neutro, a aplicação de rochas silicáticas como fertilizantes será mais adequada quando para solos ácidos.

3.5.3 Solubilização dos elementos em ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹

Vários trabalhos recentes conduzidos para avaliação da qualidade de pós-de-rocha e, ou de remineralizadores de solo, tem indicado que soluções pouco concentradas de ácido cítrico constituem boa alternativa (RAMOS et al., 2014 e 2016; AZEVEDO, 2014), uma vez que podem simular com razoável aproximação as condições prevalecentes da solução do solo nos ambientes naturais. Ácidos orgânicos são comumente encontrados na solução de solos ácidos, sendo sua concentração geralmente maior na rizosfera (SONG; HUANG, 1988). Tais ácidos possuem grande habilidade para interagir com metais na solução do solo, o que pode incrementar a dissolução dos minerais pelo efeito ácido.

Na figura 7 são apresentadas as curvas de dissolução para vários elementos químicos nas diferentes rochas testadas, em cinco tempos de agitação das amostras com solução de ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹, utilizando-se uma relação solo:volume de 1:100.

Figura 7- Solubilização de Ca, Mg, P, K, Si e Al com ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹ até 128h de agitação.



OM – olivina melilitito; SN – sienito; FL – fonolito; BP – basalto Britaplan; CT – basalto Castelar; GR – granito. Barras verticais representam a diferença mínima significativa no tempo de 8 e 32h.

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Para o cálcio, observa-se que a rocha olivina melilitito destacou-se das demais, tendo liberado as maiores quantidades do elemento, com teores em torno de 50.000 mg kg⁻¹ no tempo

de oito horas de agitação (Figura 7). Isto equivale a 48% do total de Ca da rocha (Tabela 8), indicando um potencial muito promissor de alta e rápida liberação deste elemento para as plantas após aplicação aos solos. Isto não significa, no entanto, que no ambiente de cultivo das plantas, todo esse cálcio estará sendo disponibilizado. Apenas simula o potencial maior desta rocha em comparação com as demais. Ensaio agronômico realizado com doses crescentes desta rocha em casa de vegetação, com dois solos catarinenses, entretanto, evidenciaram claramente o alto potencial de liberação de Ca desta rocha, tendo havido, em pouco mais de seis meses da aplicação do pó, aumentos muito expressivos nos teores de Ca e Mg, aumentos no pH de até 0,9 unidades e redução substancial nos teores de Al trocáveis, com reflexos no aumento da produtividade do sorgo e da soja (ALMEIDA et al., 2018).

A segunda rocha mais eficiente na liberação do cálcio neste tempo de agitação foi o sienito (SN), com teores em torno de $20.000 \text{ mg kg}^{-1}$, seguida pelos dois basaltos, que apresentaram valores similares (em torno de 9000 mg kg^{-1}), pelo granito e finalmente pelo fonolito.

Para a OM, os mais altos valores são consistentes com o maior conteúdo total de cálcio desta rocha, $\text{CaO}=13,55\%$ (Tabela 5), e com a composição mineralógica desta rocha, composta por 40% de melilita, conforme indicado pela análise petrográfica (Tabela 6). As melilitas são consideradas minerais primários facilmente intemperizáveis (ESSINGTON, 2015). Os resultados são igualmente consistentes para as rochas com menor conteúdo de Ca solubilizado, correspondentes ao granito e ao fonolito, as quais apresentaram os mais baixos conteúdos totais de cálcio, correspondentes a 1,25 e 0,88% de CaO, respectivamente (Tabela 3). Apesar disso, foi surpreendente o fato do conteúdo de cálcio dissolvido pelo ácido no granito ter representado cerca de 46% do total de cálcio presente nesta rocha. Isto provavelmente decorre da dissolução dos plagioclásios e anfibólios, cujos conteúdos, somados, representaram 30% dos minerais presentes no granito (Tabela 8).

No entanto, apesar do sienito ter solubilizado mais Ca do que os basaltos, os conteúdos totais de cálcio destes situaram-se em valores ligeiramente maiores ($\text{BP}=9,4$ e $\text{CT}=10,1\%$) do que no sienito ($\text{CaO}=7,12\%$). Observa-se que quantidades de Ca dissolvidas pelo sienito foram cerca de duas vezes maiores do que nos basaltos (em torno de 20.000 para $10.000 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ca, respectivamente). Os basaltos apresentaram, segundo a análise petrográfica, expressivas quantidades de plagioclásios, identificados como labradorita e piroxênios do tipo diopsídio, minerais portadores de Ca e Mg. Apesar disso liberaram menor quantidade de cálcio do que o sienito.

Tabela 8 – Percentual de elementos solubilizados das rochas.

Rocha	Óxido	FCElemento.....	Dissolvido Ác. Cítrico – 8 h	
Silício					
	%		%	mg kg ⁻¹	%
BP	48,83	0,4675	22,8	228280	10864
CT	51,19	0,4675	23,9	239313	2141
FL	58,14	0,4675	27,2	271804	50632
GR	74,92	0,4675	35,0	350251	16957
OM	37,75	0,4675	17,6	176481	42037
SN	46,98	0,4675	22,0	219631	32197
Alumínio					
BP	14,88	0,5292	7,9	78745	5079
CT	16,61	0,5292	8,8	87900	2531
FL	23,62	0,5292	12,5	124997	40345
GR	14,6	0,5292	7,7	77263	1838
OM	10,37	0,5292	5,5	54878	12927
SN	18,32	0,5292	9,7	96949	16957
Cálcio					
BP	9,4	0,7147	6,7	67182	9304
CT	10,12	0,7147	7,2	72328	8736
FL	1,37	0,7147	1,0	9791	2830
GR	1,9	0,7147	1,4	13579	6313
OM	15,27	0,7147	10,9	109135	52559
SN	8,74	0,7147	6,2	62465	19567
Magnésio					
BP	3,53	0,6031	2,1	21289	3510
CT	3,1	0,6031	1,9	18696	2309
FL	0,09	0,6031	0,1	543	251
GR	0,16	0,6031	0,1	965	95
OM	14,91	0,6031	9,0	89922	10065
SN	6,31	0,6031	3,8	38056	3453
Potássio					
BP	2,1	0,8301	1,7	17432	537
CT	1,46	0,8301	1,2	12119	134
FL	6,58	0,8301	5,5	54621	8032
GR	5,28	0,8301	4,4	43829	331
OM	3,58	0,8301	3,0	29718	4969
SN	5,73	0,8301	4,8	47565	3112
Fósforo					
BP	0,99	0,436	0,4	4316	1708
CT	0,54	0,436	0,2	2354	890
FL	0,37	0,436	0,2	1613	71
GR	0,37	0,436	0,2	1613	110
OM	1,54	0,436	0,7	6714	3236
SN	1,21	0,436	0,5	5276	1829
Cobre					
BP			108	123	100
CT			108	33	30
FL			15	Nd	0
GR			7	Nd	0
OM			101	Nd	0
SN			42	Nd	0
Zinco					
BP			160	123	77
CT			130	32,6	25
FL			190	Nd	0
GR			40	Nd	0
OM			120	Nd	0
SN			120	Nd	0

BP=basalto Britaplan; FL=fonolito; GR=granito; OM=olivina melilitito; SN=sienito FC=fator de correção

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Esta grande diferença sugere que os minerais portadores de Ca do sienito tenham menor resistência ao intemperismo do que os presentes nos basaltos. Entretanto, esses resultados conflitam com a composição mineralógica desta rocha indicada pela petrografia, uma vez que os minerais portadores de cálcio foram identificados em quantidades muito menores do que no basalto (Tabela 6).

Em relação ao magnésio, a rocha sienito superou as demais nos testes de dissolução com o ácido cítrico, tendo liberado quantidades substancialmente maiores do elemento do que a olivina melilitito, cujos teores totais de MgO foram mais altos, seguida dos basaltos, do fonolito e do granito, os quais liberaram muito pouco magnésio (Figura 7).

Uma possível explicação para os resultados conflitantes em relação aos teores de Ca e Mg é de que possa ter havido uma identificação equivocada das análises petrográficas do sienito, uma vez que as análises qualitativas desta rocha por difratometria de raios X, indicaram que na mesma, os picos mais intensos foram do mineral flogopita (ou biotita), tendo também indicado a presença de melilita (Figura 2), minerais não indicados como presentes na análise petrográfica. Flogopitas são minerais portadores de magnésio e de potássio, enquanto que melilitas contém principalmente cálcio e magnésio, o que poderia explicar os altos teores desses dois elementos dissolvidos pelo ácido.

Além disso, essa rocha, identificada originalmente como uma nefelina sienito, apresentou teores de SiO₂, pelas análises químicas, inferiores a 50%, juntamente com teores de óxidos de Ca e de Mg, os quais, somados, superam os 13%, características incompatíveis, portanto, com sua classificação como sienitos. Os altos conteúdos totais de Ca e de Mg desta rocha indicados pela análise química e pela FRX, constituem, desse modo, uma das causas plausíveis para explicar os altos teores de Ca e Mg solubilizados em ácido cítrico.

Quanto aos teores de Si e de Al, o fonolito foi a rocha que solubilizou maior quantidade dos dois elementos na solução de ácido cítrico (Figura 7), respectivamente com valores em torno de 50.000 e 40.000 mg kg⁻¹, nos testes com 8 horas de agitação. Isto representa, respectivamente cerca de 18 e 32% do total dos dois elementos presentes nesta rocha (Tabela 8). Seguem, em ordem decrescente de liberação de Si, as rochas sienito, olivina melilitito, granito e os basaltos. Constatase que não há uma correspondência direta entre o conteúdo total de Si das rochas com a quantidade do elemento liberada, uma vez que o granito foi a rocha com maior conteúdo total de SiO₂ (74,92%), mas liberou quantidades de Si bem menores (4,8% do total) do que o sienito (14,7% do total) e do que a olivina melilitito (23,8% do total), cujos conteúdos totais de SiO₂ foram os mais baixos dentre as rochas testadas (37,75%). A falta de uma relação positiva direta entre o conteúdo total de Si da rocha com a quantidade solubilizada

não é contraditória, uma vez que a solubilidade do elemento depende da composição mineral de cada rocha. Granitos, por exemplo, são rochas onde predominam minerais mais resistentes aos intemperismo, tais como o quartzo e o microclinio (SZABÓ, 2008). Já o fonolito apresenta maior quantidade de aluminossilicatos do grupo dos feldspatóides, minerais considerados mais facilmente intemperizáveis do que os do granito.

Nos processos de produção orgânica, assim como na produção convencional, tem sido destacada a importância do silício na nutrição das plantas (GOMES, et al., 2009; MARCHEZAN et al., 2004). Embora não seja considerado um mineral essencial, sua absorção pelas plantas está relacionada ao aumento da resistência da parede celular (KERBAUY, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2004), aumentando a resistência da planta ao acamamento, ao ataque de patógenos e pragas (KERBAUY, 2004).

Em relação ao fósforo, observa-se uma correspondência positiva direta entre a quantidade do elemento dissolvida pelo ácido cítrico (Figura 7) e a quantidade total presente nas rochas testadas (Tabela 3 e 5.): valores superiores a 3000 mg kg⁻¹ de fósforo foram disponibilizados em solução na rocha olivina melilitito ($P_2O_5=1,11\%$) no tempo de 8 horas, seguida pelo sienito, com valores em torno de 1800 mg kg⁻¹ ($P_2O_5=0,67\%$), basalto BP ($P_2O_5=0,21\%$), basalto CT ($P_2O_5FRX=0,54\%$), granito e fonolito, ambas com os mais baixos teores totais de fósforo ($P_2O_5=0,03\%$). Deve ser salientada a expressiva quantidade de fósforo dissolvido em ácido cítrico pela OM e pelo SN, assim como alto conteúdo total de P_2O_5 presente nestas duas rochas, muito acima dos valores geralmente encontrados em outras rochas silicatadas. Na rocha OM, a presença de apatitas foi confirmada nas análises por difratometria de raios X (Figura 1). Os resultados destacam o potencial destas duas rochas como remineralizadores multinutrientes, pois, além dos altos teores de Ca e de Mg, tem bom potencial de liberação de P, K e micronutrientes.

Atualmente, fontes de fósforo são consideradas raras, ou seja, sugerir uma rocha com capacidade de liberação de fósforo para uso na agricultura, principalmente como fonte alternativa para pequenos agricultores, agricultura familiar ou a produção orgânica é de grande valia dentro de um sistema produtivo. Outra situação vantajosa na aplicação de fontes de solubilidade baixa, seria a redução da contaminação e eutrofização das águas pelos adubos solúveis ou dejetos líquidos de suínos (CERETTA et al., 2005), visto que a liberação do P contido na rocha seria gradual, evitando assim as perdas por lixiviação e fixação pelos óxidos do solo.

Quanto ao potássio, conforme esperado, a rocha fonolito destacou-se das demais na capacidade de liberação do elemento pelo ácido cítrico, disponibilizando teores em torno de

7000 mg kg⁻¹ de K no teste com 8 horas de agitação (Figura 7). De fato, esta foi a rocha com maior conteúdo de K₂O dentre as testadas, e tanto na análise petrográfica como na difratometria de raios X, foram identificados vários minerais potássicos, tais como felspatos e feldspatóides, sendo os últimos considerados menos resistentes ao intemperismo do que os primeiros (NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2004). O potencial da rocha fonolito como fonte alternativa de potássio já foi demonstrado em outros trabalhos (TEIXEIRA et al., 2015).

A segunda rocha com boa capacidade de liberar potássio foi o sienito, com quantidades do elemento similares ao da rocha olivina melilitito no teste com 8 horas de agitação (Figura 7). Esses resultados são interessantes, na medida em que o conteúdo total de K₂O do SN é bem maior do que o da OM, indicando duas possibilidades: a primeira é de que os minerais da OM são mais facilmente intemperizáveis do que os presentes no SN; a segunda é de que a maior porcentagem de finos da rocha OM tenha favorecido a maior dissolução dos minerais presentes. Outro aspecto a considerar é de que as quantidades de flogopitas na OM foram altas, conforme indicado na petrografia e na DRX. Os dados de DRX também revelaram a presença de vermiculitas, o que pode ser uma explicação para a alta disponibilização de K nesta rocha.

A flogopita é uma mica, e as micas são de interesse especial como fornecedoras de nutrientes para as plantas, pois além do K, podem também disponibilizar Mg, Zn e Mn (HARLEY; GILKES et al., 2000; HUANG; KIANG, 1972). Segundo a pesquisa de Silva et al. (2013), a flogopita mostrou-se eficiente para aumentar o nível de K nos solos brasileiros.

Apesar da quantidade bem maior de potássio total no granito, e da baixa quantidade do elemento presente no basalto BP, ambas as rochas disponibilizaram baixas e similares quantidades de potássio, indicando que os minerais potássicos do granito (principalmente o feldspato microclínio) são mais dificilmente intemperizáveis do que os da maioria das demais rochas. Os feldspatos são aluminossilicatos alcalinos e são os minerais mais abundantes formadores das rochas, e em termos de nutrição de plantas, são importantes fontes não só de K como também de Ca e Na (HARLEY; GILKES, 2000). Com relação a maior disponibilização de K do SN em relação ao GR (ambas com conteúdo similar de K₂O), isto pode estar relacionado à presença das nefelinas no sienito. Determinações experimentais das taxas de dissolução dos minerais indicam que a nefelina dissolve 100 vezes mais rapidamente que o feldspato potássico (MANNING, 2010), o que significa que rochas contendo nefelina são mais efetivas como fontes de K para o crescimento de plantas do que as rochas graníticas. Apesar de não ter sido identificada nas análises por DRX, a nefelina foi indicada como perfazendo 20% dos minerais do sienito.

Quanto ao cobre e o zinco, somente os dois basaltos se destacaram como potenciais fornecedores desses micronutrientes pelos testes com ácido cítrico. Nas demais rochas as quantidades solubilizadas situaram-se abaixo do nível de detecção das técnicas utilizadas, apesar dos conteúdos totais de Cu dos basaltos terem sido muito similares aos da olivina melilitito. Quanto ao Zn, apesar do conteúdo total ter sido mais alto no fonolito, isto não se refletiu em teores detectáveis após reação com o ácido cítrico.

3.6 CONCLUSÕES

Nas frações mais finas dos cinco pós de rochas estudados, a solução de ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹ foi mais eficaz do que a solução de ácido acético e do que a água na dissolução dos minerais, solubilizando, na quase totalidade dos casos, quantidades mais altas de elementos químicos;

O aumento do tempo de contato dos pós com as soluções resultou em incrementos na quantidade de elementos liberada até tempos de contato entre 8 e 32 horas, decrescendo para o ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹, a partir desses valores;

A solubilidade dos minerais dos pós das rochas em ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹ foi diferenciada entre as rochas, sendo o pó da rocha olivina melilitito o que liberou as maiores quantidades de fósforo, cálcio e magnésio, seguida do sienito e dos basaltos, resultados compatíveis com o maior conteúdo desses elementos e com a mineralogia das referidas rochas;

O pó da rocha fonolito destacou-se do pó das demais rochas na capacidade de fornecimento de potássio, tendo solubilizado maiores quantidades do elemento em ácido cítrico, seguida do sienito e da olivina melilitito; apesar dos altos teores de potássio no granito, a solubilidade dos seus minerais potássicos foi a mais baixa dentre as rochas testadas;

A utilização da solução de ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹ para estimar o potencial de dissolução dos minerais presentes em pós de rochas mostrou-se promissora para uma melhor discriminação da qualidade dos pós de rochas como remineralizadores de solos.

3.7 REFERÊNCIAS

ACEMAN, S. Simulated organic acid weathering of granodiorite and basalt. MSc. Thesis. The University of British Columbia, 222p.;1989.

ALCARDE, J.C.; CATANI, R.A.; ALCARDE, A.S. Solubilidade de fosfatos naturais em solução de ácido fórmico a 2%. **Anais da E.S.A. “Luiz de Queiroz”**, v. XXII, p. 705-715, 1975.

ALMEIDA, J. et al. Relatório de Pesquisa: Ensaio de eficiência agronômica da rocha olivina melilitito como remineralizador de solos para uso na agricultura. **Fiepe**: UDESC, Lages, 2018.

AZEVEDO, A.C. Avaliação de um remineralizador de diabásio. Piracicaba. 93p.(Tese de Livre Docência); 2014.

BANFIELD, J.F. & EGGLETON R.A. Analytical transmission electron microscope studies of plagioclase, muscovite and K-feldspar weathering. **Clays Clay Min.**, 38:77-89, 1990.

BERNER, R.A. & SCHOTT, J. Mechanism of pyroxene and amphibole weathering II. Observations of soil grains. **Am. J. Sci.**, 282: 1214-1231, 1982.

BRASIL. **Lei n. 12.890, 10 dez de 2013**. Altera a Lei nº 6.894 de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 dez 2013. Disponível em: <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em 27 mar. 2017.

BRANTLEY, S.L. & STILLINGS, L. Feldspars dissolution at 25°C and low pH. **Am. J.Sci.**, v. 296, p. 101-127, 1996.

CATANI, R.A. A solubilidade de fosfatos naturais em solução de ácido cítrico a 2% na proporção de 1:200. São Paulo: **Anais da E.S.A. “Luiz de Queiroz”**, v. 27, p.1-14, 1970.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; VIEIRA, F.C.B.; HERBES, M.G.; MOREIRA, I.C.L.; BERWANGER, A.L. Dejeto líquido de suínos: I – perdas de nitrogênio e fósforo na solução escoada na superfície do solo, sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n.6, p.1296-1304, 2005.

DALMORA, A. C., RAMOS, C. G., SILVA, L. F. O, KAUTZMANN, R. M.“CLEANER PRODUCTION TOWARDS A SUSTAINABLE TRANSITION”. São Paulo – Brazil – May 20th to 22nd – 2015.

DUARTE, W.M.; MAFRA, A.L.; FORESTI, M.M.; PICCOLLA, C.D.; ALMEIDA, J.A. Potencial de olivina melilitito, granito e sienito na disponibilização de K em solos. **Rev. Ciênc. Agroveterinárias**, Lages, v.12, n. 1, p. 66-77, 2013.

ERNANI, P.R. Química do solo e disponibilidade de nutrientes. 2^aed., Lages: **O autor**, p. 256, 2016.

ESCOSTEGUY, P.A.V. & KLAMT, E. Basalto moído como fonte de nutrientes. **R. Bras. Ci. Solo.** v. 22, 11-20, 1998.

ESSINGTON, M.E. Soil and water chemistry. An integrative approach. **CRC Press**. New York. 2015. 2nd ed. 656p.

FONTES, M.P.F. I. Intemperismo de Rochas e Minerais. In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, R.G.R.; TORRADO, P.V.; orgs. Pedologia Fundamentos. Minas Gerais, **Soc. Bras. Ci. Solo**, p. 171-206, 2012.

GABOS, M.B., MARTINS, E.S.; MENDES, D.R.; SANTOS, L.F.; OLIVEIRA, M.I.L.; LEITE, A.A.S.L. Evaluation of extractants for characterization of K silicate agrominerals. 16th World Fertilizer Congress of CIEC, p. 211-213, 2014.

GILKES, R.J.; PRIYONO, J., Dissolution Kinetics of Milled-Silicate Rock Fertilizers in Organic Acid. **J. Tanah Trop.**, v. 13, n. 1, 2008: 1-10. ISSN 0852-257X. 2008.

GUELFI-SILVA, D.R.; SPEHAR, C.R.; MARCHI, G.; SOARES, D.A.S.; CANCELLIER, E.L.; MARTINS, E.S. Yield, nutriente uptake and potassium use efficiency in rice fertilized with crushed rocks. **Academic Journals**, v. 9, p. 455-464, 2014.

GOEDERT, W.J. & LOBATO, E. Eficiência Agronômica de fosfatos em Solos de Cerrado. **Pesq.agropec.bras.**, Brasília, 15(3), p. 311-318, 1980.

GOMES, F.B.; MORAES, J.C.; NERI, D.K.P. Adubação com silício como fator de resistência a insetos-praga e promotor de produtividade em cultura de batata inglesa em sistema orgânico. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v.33, n.1, p. 18-23, 2009.

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

HUANG, W.H.; KIANG, W.C. **Laboratory dissolution of plagioclase feldspars in water and organic acids at room temperature**. Am. Mineralogist 57: 1849-1859, 1972.

KERBAUY, G.B. Fisiologia Vegetal. São Paulo, 470p.,2004.

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

LUZ, A.B.; LAPIDO-LOUREIRO, F.; SAMPAIO, J.A.; CASTILHOS, Z.C.; BEZERRA, M.S. Rochas, minerais e produção de fertilizantes alternativos. In: FERNANDES, F.R.C.; LUZ, A.B.; CASTILHOS, Z.C. Agrominerais para o Brasil. **CETEM**: 380p., 2010.

MANNING, D.A.C. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. Agronomy for Sustainable Development, **Springer Verlag/EDP Sciences/INRA**, 2010.

MARCHEZAN, E.; VILLA, S.C.C.; MARZARI, V.; KORNDÖRFER, G.H.; SANTOS, F.M. Aplicação de silício em arroz irrigado: efeito nos componentes da produção. **Biosci. J.**, v.20, n.3, p.125-131, 2004.

MARTINS, E.S.; OLIVEIRA, C.G.; RESENDE, A.V.; MATOS, M.S.F.M. Agrominerais – Rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. **CETEM**, cap.9, 2^a edição, 2008.

MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. San Diego: **Academic Press**, 889 p., 1995.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v.27, p.31-36, 1962.

NASCIMENTO, M. & LAPIDO-LOUREIRO, F.E. Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas. Rio de Janeiro: **CETEM/MCT**, 66p., 2004.

RAMOS, C.G.; MELLO, A.G., KAUTZMANN, R.M. A preliminary study of acid volcanic rocks for stonemeal application. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, p.30-35, 2014.

RAMOS, C.G.; QUEROL, X.; DALMORA, A.C.; PIRES, K.C.J.; SCHNEIDER, I.A.H.; OLIVEIRA, L.F.S.; KAUTZMANN, R.M. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, p.1-7, 2016.

RESENDE, A.V.; MARTINS, E.M.; OLIVEIRA, C.G.; SENA, M.C.; MACHADO, C.T.; KINPARA, D.I.; FILHO, E.C.O. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço e Geografia**, v.9, n.1, p. 19-42, 2006.

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

ROCHA, R.A. & MUCCILLO, E.N.S. Efeito da temperatura de calcinação. **Cerâmica**, 47 (304), p. 219-224, 2001.

SILVA, A.A.S.; SAMPAIO, J.A.; LUZ, B.L.; FRANÇA, S.C.A.; RONCONI, C.M. Modeling controlled potassium release from phlogopite in solution: exploring the viability of using crushed phlogopite rock as an alternative potassium source in Brazilian soil. **J.Braz.Chem.Soc.**, v.24, n.8, p.1366-1372, 2013.

SILVEIRA, A.P.D. & FREITAS, S.S. Microbiota do Solo e Qualidade Ambiental, **IAC**, P. 312, 2007.

SOLOMONS, T.W.G.; FRYHLE, C.B. Química Orgânica 1, 7^a ed., **LTC editor**, 645p., 2001.

SZABÓ, G.A.J.; BABINSKY, M. & TEIXEIRA, W. Rochas ígneas. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R. & TAIOLI, F., org. Decifrando a Terra. São Paulo, Oficina de Textos, 2008. p.327-345.

SONG, S.K., HUANG, P.M. Dynamics of potassium release from potassium bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 52, 38, 1988.

TEIXEIRA, A. et al., 2012. Avaliação da rocha fonolito como fertilizante alternativo de potássio. **Holos**, v. 5, p. 21-33.

TAIZ, L. & ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3ed. Porto Alegre: Artmed ed., 2004. 19 p.

van STRAATEN, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Brasilia, p. 732-747, 2006.

4 CAPÍTULO 3 - SOLUBILIDADE DOS MINERAIS POTÁSSICOS DE DIFERENTES PÓS DE ROCHAS DE SANTA CATARINA E ABSORÇÃO DE POTÁSSIO PELAS CULTURAS DO FEIJÃO E AVEIA

4.1 RESUMO

O potássio é um dos nutrientes essenciais para as culturas, porém a maior parte está incorporada na estrutura cristalina dos minerais. Após a Lei 12.830 de 10/12/2013, onde os pós de rochas são considerados como insumos para a agricultura (remineralizadores), pesquisas que direcionem o comportamento destes materiais são necessárias, por isso, o objetivo desse trabalho foi avaliar a capacidade de liberação de potássio para as plantas de cinco pós de rochas silicáticas em um experimento com a sucessão feijão/aveia em casa de vegetação. Todas as rochas foram coletadas no Estado de Santa Catarina, sendo o basalto e o fonolito coletados em Lages; a olivina melilitito e o sienito em Palmeira; e o granito em Ibirama. As rochas foram coletadas em blocos irregulares, britadas, moídas em moinho de grelhas e peneiradas com malha 1,0; 0,5; 0,25; 0,125; 0,053 e <0,053 mm. A fração utilizada foi a < 0,25 mm e a dose aplicada em cada tratamento foi calculada com base no percentual de K₂O na análise química total de cada rocha, fornecendo para todos os tratamentos com rochas a quantidade equivalente a 1000 kg.ha⁻¹ de K₂O. O pó das rochas olivina melilitito e sienito foram os mais eficientes na liberação do potássio e demais nutrientes, resultando em maior conteúdo de nutrientes na parte aérea, maior produção de matéria seca e acúmulo dos nutrientes no tecido das culturas avaliadas. O pó da rocha fonolito, apesar de conter o maior conteúdo total de potássio, somente liberou quantidades apreciáveis deste nutriente no segundo cultivo.

Palavras-chave: Nutrição de plantas. Produção orgânica. Fertilizante alternativo. Agroecologia. Sustentabilidade.

CHAPTER 3 - SOLUBILITY OF POTASSIC MINERALS FROM DIFFERENT ROCK POWDERS FROM SANTA CATARINA AND POTASSIUM UPTAKE BY BEAN AND OAT CROPS

4.2 ABSTRACT

Potassium is one of the essential nutrients for crops, but most is incorporated into the crystalline structure of minerals. After Law 12.830 of December 10, 2013, where rock powders are considered as inputs for agriculture (remineralizers), research that directs the behavior of these materials is necessary. Thus, the objective of this research was to evaluate the release capacity of potassium to plants of five powders of silicate rocks in an experiment with the succession of beans / oats in greenhouse. All the rocks were collected in the State of Santa Catarina, while basalt and phonolite having been collected in Lages; the olivine melilitite and the syenite in Palmeira; and granite in Ibirama. The rocks were collected in irregular blocks, crushed, grinded in grids and sieved with 1.0 mesh; 0.5; 0.25; 0.125; 0.053 and <0.053 mm. The fraction used was <0.25 mm and the dose applied in each treatment was calculated in terms of the percentage of K₂O in the total chemical analysis of each rock, providing for all the treatments with rocks the amount equivalent to 1000 kg.ha⁻¹ of K₂O . The olivine melilitite and syenite powder were the most efficient in the release of potassium and other nutrients, resulting in a higher content of nutrients in the aerial part, greater dry matter production and accumulation of nutrients in the tissue of the evaluated crops. The phonolite rock powder, although containing the highest total potassium content, only released appreciable amounts of this nutrient in the second crop.

Key words: Plant nutrition. Organic production. Alternative fertilizer. Agroecology. Sustainability.

4.3 INTRODUÇÃO

As principais fontes de potássio usadas na agricultura brasileira são os fertilizantes potássicos solúveis, dos quais, mais de 90% são importados. De acordo com os dados do Ministério de Minas e Energia, o Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo, sendo superado somente pela China, Índia e Estados Unidos, porém participa com apenas 2% da produção mundial. Na agricultura convencional são utilizados principalmente fertilizantes minerais solúveis; somente em 2017, o mercado brasileiro recebeu cerca de 35 milhões de toneladas de fertilizantes, sendo que 26 milhões foram importados, ou seja, preocupantemente, 76 % da demanda brasileira foi atendida através de importações (ANDA, 2018), um aumento de 12,3% em relação ao consumo do ano de 2015.

A produção interna de fertilizantes é pequena, contribuindo com aproximadamente 8% da demanda nacional (ANDA, 2018), deixando o Brasil extremamente dependente dos preços estabelecidos pelos países exportadores de fertilizantes e/ou de matéria-prima (THEODORO; ALMEIDA, 2013). Segundo Rodrigues (2010), o Brasil importa 75% do N, 48% do P e, alarmantemente, aproximadamente 92% do K.

O potássio é um dos nutrientes essenciais para a maioria das culturas porque ele promove e regula a ativação enzimática, auxilia a translocação de carboidratos e aumenta a eficiência do uso da água, bem como a resistência à seca (KERBAUY, 2004; TAIZ; ZEYGER, 2004). Depois do nitrogênio, o potássio é o nutriente requerido em maiores quantidades pelas culturas. Porém, diferente do nitrogênio, que pode ser disponibilizado por processos de fixação biológica, não existem fontes renováveis de K, de modo que sua disponibilidade depende exclusivamente da aplicação de fertilizantes e das reservas do solo. Os minerais de potássio mais explorados como fontes de fertilizantes são: silvita (KCl), contendo 63% de K_2O ; carnalita ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$), contendo 17% de K_2O ; cainita ($KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$), contendo 19% de K_2O e langbeinita ($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$), contendo 23% de K_2O ; todos os sais derivados destes depósitos são solúveis em água (NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2004).

A maior parte do potássio do solo está incorporada na estrutura cristalina dos minerais e, assim, não está diretamente disponível para absorção pelas plantas. A disponibilidade de potássio varia conforme o tipo de solo e é afetada por propriedades físico-químicas do mesmo (SILVA et al., 2013; ROSOLEM et al., 1993). O potássio ocorre como elemento estrutural em minerais do grupo dos feldspatos, dos feldspatóides e das micas. Nos dois primeiros grupos, a estrutura mineral é uma rede tridimensional de silicatos tetraédricos, em que a substituição de Si por Al conduz a uma deficiência de carga que é equilibrada pela presença de Na^+ , K^+ ou de

Ca^{+2} (MANNING, 2010; FONTES, 2012). As micas são filossilicatos com diferentes graus de substituição isomórfica de Si por Al nos tetraedros, das quais resultam déficits de cargas positivas que são compensadas pela presença de K estrutural localizado nas entrecamadas. Rochas potássicas, assim como minerais potássicos são utilizadas em vários processos tecnológicos, dentre elas a aplicação ao solo como remineralizadores (BRASIL, 2013).

Em função do alto preço destes produtos no mercado internacional e das limitadas reservas de fontes de determinados nutrientes, inclusive do potássio, o Brasil vem incentivando a pesquisa por fontes alternativas dos mesmos, uma das quais prevê a utilização de rochas moídas para aplicação diretamente ao solo. Além disso, nas formas de produção agrícolas alternativas, como no cultivo de produtos orgânicos, existem restrições ao uso de fontes sintéticas de nutrientes, mas permitem a utilização de pó de rochas silicáticas como fontes de nutrientes. Tais materiais, quando apresentam características mínimas exigidas pela legislação brasileira são denominados remineralizadores. Apesar de a legislação exigir vários requisitos para classificação e registro dos pós de rochas como remineralizadores (BRASIL, 2013; BRASIL, 2016), existem poucos estudos sobre qual a solubilidade dos minerais potássicos de diferentes pós de rocha de Santa Catarina e quais os resultados em relação à absorção de potássio pelas culturas para validar o pó de rochas como um fertilizante apropriado ao uso. Hipoteticamente, esses produtos, após a aplicação ao solo, promoverão a liberação de nutrientes de forma gradual, possibilitando a manutenção da fertilidade e da produtividade por um período mais longo. Uma das principais limitações desta prática alternativa é a lenta solubilização dos minerais e consequentemente dos nutrientes para as plantas. Por estes motivos, pesquisas mundiais e brasileiras sobre fontes alternativas de potássio a partir de rochas silicáticas com potencial de fornecimento deste nutriente vêm sendo estudadas (WANG et al., 2000; SILVA et al., 2013; GUELFI-SILVA et al., 2014; MARTINS et al., 2008; NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2004).

Na região de Lages, Santa Catarina, existe uma ampla variedade de rochas ricas em potássio, como os fonolitos, sienitos, traquitos, tefritos, entre outras, como intrusões de rochas alcalinas e ultrabásicas que constituem o Domo, ou Complexo Alcalino de Lages (SCHEIBE, 1996). Grandes partes destas rochas são ricas em feldspatóides e feldspatos potássicos, sendo que em algumas também ocorrem flogopitas, podendo assim constituir-se em fontes alternativas importantes de potássio para as plantas. Apesar dos basaltos possuírem baixas quantidades totais de potássio, alguns trabalhos têm demonstrado efeitos positivos na absorção de potássio pelas plantas (NICHELE, 2006). Desse modo, a hipótese central deste trabalho é de que, para um mesmo conteúdo total de potássio adicionado ao solo por diferentes rochas, a

absorção de potássio pelas plantas será diferenciada, em decorrência das diferentes resistências dos minerais potássicos à dissolução no ambiente do solo. Com base nestas considerações, avaliou-se, na presente pesquisa, a disponibilização de potássio às plantas de feijão e aveia por diferentes pós de rochas, após a aplicação de uma mesma quantidade total de potássio, utilizando como comparativo um granito proveniente de outra região do estado de Santa Catarina, cujos minerais potássicos são geralmente considerados muito resistentes ao intemperismo, objetivando identificar qual (is) apresenta (m) melhor potencial para serem utilizados como remineralizadores de potássio.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Solo utilizado

A descrição da coleta das rochas até as análises mineralógicas estão detalhadamente descritas no capítulo 1.

Foram utilizadas amostras de um Neossolo Quartzarênico coletado no município de Imbituba, Santa Catarina ($28^{\circ} 10' 58,12''S$ e $48^{\circ} 41' 47,56''O$), numa área marginal à BR 101, sob cultivo de eucaliptos, coletadas entre 20-40 cm de profundidade. Optou-se por utilizar um Neossolo Quartzarênico devido aos baixos teores de nutrientes e matéria orgânica, bem como, não utilizar amostras do horizonte mais superficial, para reduzir eventual efeito de adubação ou calagem anterior, que poderiam confundir a avaliação dos efeitos dos pós de rocha.

Os dados sobre o solo coletado são: profundidade (20-40 cm); pH em água (6,2); Ca⁺Mg, K e Na são 0,6; 0,02 e 0,01 cmol_c.kg⁻¹, respectivamente; fósforo (1 mg.kg⁻¹) e granulometria (areia, silte e argila foram 950, 30 e 20 g.kg⁻¹, respectivamente).

4.4.2 Processamento das amostras de solo

As amostras de solo foram secas ao ar, em casa de vegetação, destorroadas, moídas e peneiradas em malha de 4mm para posterior aplicação dos tratamentos.

Após o processamento das amostras foram determinados o pH em água na relação solo:solução de 1:1. A capacidade de campo (CC) foi determinada após a obtenção do peso úmido dos solos com adição de água destilada e do peso seco após a secagem dos mesmos ao ar, segundo Casaroli e Lier (2008).

4.4.3 Delineamentos Experimentais

4.4.3.1 Delineamento Experimental para produção de feijão

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições por tratamento, sendo equalizada uma dose de potássio equivalente ao fornecimento de 1.000 kg de K₂O para cada rocha, com base no conteúdo total de K₂O indicada pela análise química total das mesmas (Tabela 3). A dose corresponde a cinco vezes a quantidade de potássio recomendada para a cultura do feijoeiro, segundo indicado no Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS, 2016). Para aplicação dos tratamentos, utilizaram-se as frações granulométricas passantes na peneira de 0,250mm. Além dos tratamentos com pó de rocha, também foram utilizados um tratamento testemunha (solo na condição natural) e um tratamento com adubação convencional com fontes solúveis de NPK conforme recomendação para a cultura do feijoeiro (CQFS, 2016).

4.4.3.2 Delineamento Experimental para produção da aveia

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições por tratamento, utilizando-se os mesmos tratamentos da cultura anterior, cultivando-se aveia preta comum (*Avena sativa*), em safra subsequente a do feijão, avaliando-se somente o efeito residual dos fertilizantes utilizados na cultura anterior.

4.4.3.3 Incubação dos Solos

Os tratamentos consistiram da aplicação ao solo do pó das rochas basalto, granito, fonolito, olivina melilitito e sienito na granulometria <0,250mm. Cada tratamento foi realizado com 4 repetições e as amostras foram homogeneizadas em 4,2 kg de solo em base seca de casa vaso correspondente. Em seguida, água destilada foi aplicada para elevar a umidade até 80% CC. Posteriormente as amostras foram acondicionadas com sacos plásticos e incubadas durante 60 dias.

4.4.4 Implantação das Culturas em Sucessão

4.4.4.1 Cultivo do Feijão (*Phaseolus vulgaris*)

A variedade utilizada foi a IPR88 Uirapuru, desenvolvida pelo Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR). Trata-se de uma cultivar de feijão com ampla adaptação, potencial elevado de rendimento, caule ereto que favorece a colheita mecanizada. Floresce e atinge a maturidade dos 43 aos 86 dias após a germinação. É resistente ao vírus do mosaico comum, ferrugem e ódio. Também demonstra moderada tolerância a altas temperaturas e estresse hídrico, o que pode ocorrer durante o estágio reprodutivo.

4.4.4.2 Tratamento dos Solos e Implantação do Experimento de feijão em Casa de Vegetação

Depois da incubação, as amostras de cada tratamento foram homogeneizadas. No tratamento convencional com adubos solúveis (NPK), foram adicionados aos 4,2 kg de solo, 30 mg N.vaso⁻¹, a cada 15 dias ; 13,1 kg P.ha⁻¹ (0,112 g.vaso⁻¹) e 30 kg.ha⁻¹ de K₂O (0,105 g.vaso⁻¹). Os adubos utilizados foram soluções diluídas de uréia, cloreto de potássio P.A. (puro para análise) e fosfato de cálcio P.A nas concentrações recomendadas. As adubações com NPK foram as preconizadas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016) para a cultura do feijão, tendo por base as análises químicas do solo.

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, nos anos de 2016 e 2017, em vasos de 5 litros com 4,2 kg de solo em cada (base seca). Foram semeadas, sem pré-germinação, 8 sementes de feijões por vaso. Os desbastes das plantas de feijão foram realizados em 3 etapas: após 10 dias da emergência (DAE) das plantas, deixando 4 plantas por vasos até o final do ciclo (sempre que possível). Os vasos foram aleatorizados a cada 10 dias para que as plantas tivessem as mesmas condições de temperatura, sombreamento e de incidência solar.

Durante a condução do experimento, os solos foram mantidos com umidade próxima a 80% da capacidade de campo, através de pesagens constantes dos vasos e reposição da umidade com água deionizada.

4.4.4.3 Implantação da cultura de sucessão Aveia (*Avena sativa*)

Após mais 60 dias mantendo os vasos em 80% da capacidade de campo, foi implantada a cultura subsequente (aveia) somente com o residual da adubação deixado pela cultura anterior (feijão). Foram distribuídas 8 sementes por vaso. Os desbastes das plantas foram realizados 20 dias após emergência (DAE) permanecendo 4 plantas por vaso. Os vasos foram aleatorizados a

cada 10 dias para que as plantas tivessem as mesmas condições de temperatura, sombreamento e de incidência solar.

Durante a condução do experimento, o solo foi mantido com umidade próxima a 80%, através de pesagens constantes dos vasos e reposição da umidade com água deionizada.

4.4.5. Coleta dos experimentos e análise química dos tecidos vegetais

As plantas de feijão foram coletadas no estádio fenológico de florescimento pleno, em todos os tratamentos, já as plantas de aveia foram coletadas após 60 dias da emergência. A parte aérea (PA) das plantas foram cortadas rente ao solo e acondicionadas em sacos de papel, secas em estufa de circulação forçada, a 65°C, até peso constante, quando, após pesagem, foi obtida a matéria seca da parte aérea (MSPA). As raízes foram separadas manualmente, lavadas em água corrente e secas da mesma forma que a parte aérea. Após o período de secagem na estufa, as raízes foram pesadas para obtenção da matéria seca da raiz (MSR). Com a soma da MSPA e MSR foi obtido a matéria seca total (MST) produzida pelas plantas.

O tecido vegetal (parte aérea) foi moído e posteriormente foi realizada a digestão das amostras conforme o método descrito em Tedesco et al. (1995). As concentrações de K no tecido das plantas de feijões foram quantificadas em espectrômetro óptico de emissão por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) (Optima ® 8300, Perkin Elmer, USA), enquanto para as plantas de aveia o mesmo elemento foi quantificado no fotômetro de chamas.

A partir da MSPA e dos teores de N, P, K, Ca e Mg foram calculados os teores acumulados dos mesmos no tecido vegetal das plantas avaliadas de acordo com a equação 1 (adaptada de LAVIOLA e DIAS, 2008).

$$N_{\text{Macro}} (\text{mg}) = \text{MSPA} (\text{mg}) \times \text{concentração do nutriente (\%)} / 100 \quad \text{Equação 1}$$

Em que, N_{Macro} : corresponde a quantidade do macronutriente acumulado no tecido vegetal das plantas e a matéria seca da parte aérea (MSPA) produzida pelas plantas testadas.

4.4.6 Análise Estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância com auxílio do programa Sigma Plot, versão 12.5. Dados paramétricos (médias) foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e os dados não paramétricos (mediana) foram comparados usando Kruskal-Wallis (teste de Dunn's a 5% de probabilidade).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Potássio no feijão (*Phaseolus vulgaris*)

4.5.1.1 Teores de potássio na parte aérea da planta

O maior conteúdo de potássio na parte aérea foi obtido no tratamento com o pó da olivina melilitito, semelhante ao tratamento NPK. Apesar das diferenças expressivas no conteúdo de potássio do feijão entre os tratamentos, as diferenças somente foram significativas na comparação entre a olivina melilitito e o granito (Figura 8 e Tabela 9).

No feijoeiro, a faixa crítica para os teores foliares de K propostas por Wilcox & Fageria (1976) varia entre 18 a 50 g kg⁻¹. Considerando a coleta da primeira folha amadurecida a partir da ponta do ramo, Malavolta et al. (1997) indicam teor foliar adequado quando o K está entre 20 a 25 g kg⁻¹. Já Martinez et al. (1999), para o Estado de Minas Gerais recomendam análise de folhas amostradas do terço mediano da planta de feijão, e teores adequados de K quando situados entre 27-35 g kg⁻¹. Considerando que os teores de K nas hastes e ramos são geralmente mais baixos do que os teores na folha, assumiu-se que teores de K na parte aérea podem ser considerados normais quando acima de 15 g kg⁻¹, tendo por base os resultados obtidos por Kikuti et al. (2006).

Com base no exposto, observa-se na figura 8 e na tabela 9 que a aplicação do pó das rochas basalto, fonolito, granito e sienito, todas aplicadas numa quantidade equivalente ao fornecimento total de 1000 kg de K₂O, não liberaram quantidades de K suficientes para garantir um teor adequado do nutriente para o feijão. Os teores na parte aérea de K para essas rochas variaram de 0,9 a 1,5%, todos sendo inclusive inferiores ao tratamento testemunha, cujas quantidades foram ligeiramente superiores a 1,5%. Entretanto, há que ser considerado que o conteúdo de K na testemunha foi obtido em apenas uma planta sobrevivente ao período do ensaio.

Teores na faixa adequada foram alcançados apenas pelo tratamento NPK e pelo pó da rocha olivina melilitito, cujos teores foram superiores a 2%.

Fonolitos são rochas que vêm sendo consideradas com bom potencial como remineralizadores de potássio (TEIXEIRA et al., 2015; von WILPERT; LUKES, 2003), no entanto, os conteúdos foliares foram praticamente os mesmos da testemunha, revelando baixa eficiência do pó desta rocha na liberação do potássio. Isto pode ter ocorrido em função do pouco tempo decorrido entre a incubação com o pó da rocha até a coleta da parte aérea, bem como a

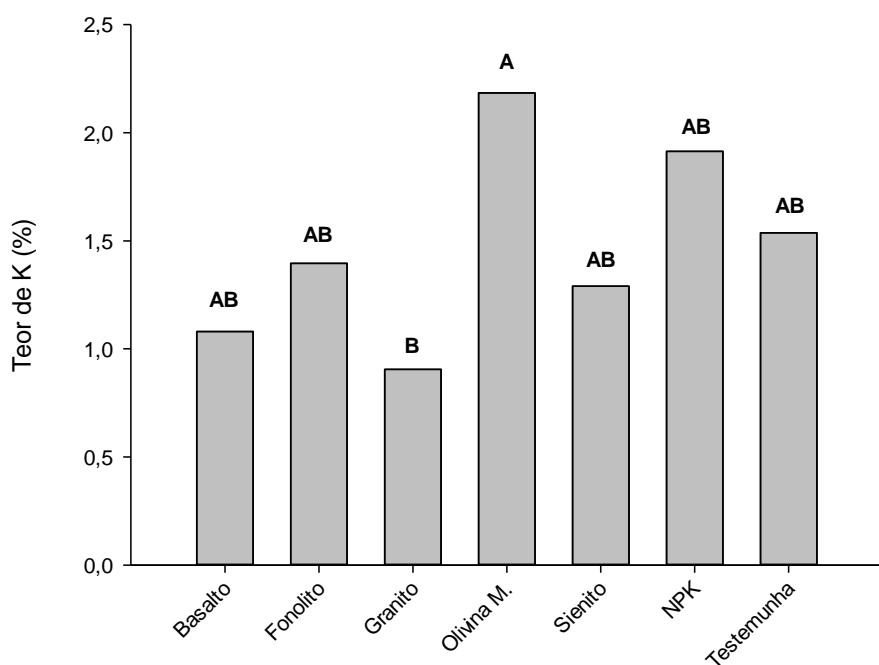
maior resistência dos minerais portadores de potássio dessas rochas quando comparados aos da olivina melilitito, interpretação válida igualmente para os pós do basalto, granito e sienito.

A maior eficiência da rocha olivina melilitito provavelmente se deve ao alto conteúdo de flogopitas e das vermiculitas derivadas da alteração destes minerais, uma vez que ambos são minerais portadores de potássio. Levando em conta que as quantidades dos pós de rocha aplicados continham um mesmo teor total de K_2O , pode ser interpretado, portanto, que os minerais potássicos presentes nesta rocha são mais facilmente intemperizáveis do que os contidos nas demais rochas, o que revela um potencial promissor dessa rocha também como uma fonte de potássio.

É possível, entretanto, que as rochas apresentem potencial de liberação maior ao longo do tempo, comportamento que será avaliado na cultura subsequente (aveia), adiante descrita.

Quanto às três rochas com maior conteúdo total de potássio, o fonolito e o sienito garantiram teores do nutriente similares na parte aérea, sendo ligeiramente inferiores à testemunha. Entretanto, o granito, apesar de possuir o maior conteúdo total de K_2O , foi o que apresentou o menor conteúdo de K na parte aérea. Isto vem demonstrar que apenas o conteúdo total do elemento na rocha pode não ser um critério adequado para a caracterização de remineralizadores de solo, notadamente em relação ao potássio.

Figura 8 - Teores de potássio na parte aérea de feijoeiro submetidas a aplicação de fontes de potássio.



Média +/- desvio padrão da mediana do percentual de potássio na parte aérea da aveia em função dos tratamentos Letras idênticas significam diferenças estatísticas não significantes pelo teste Tukey ($p<0,05$).
Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

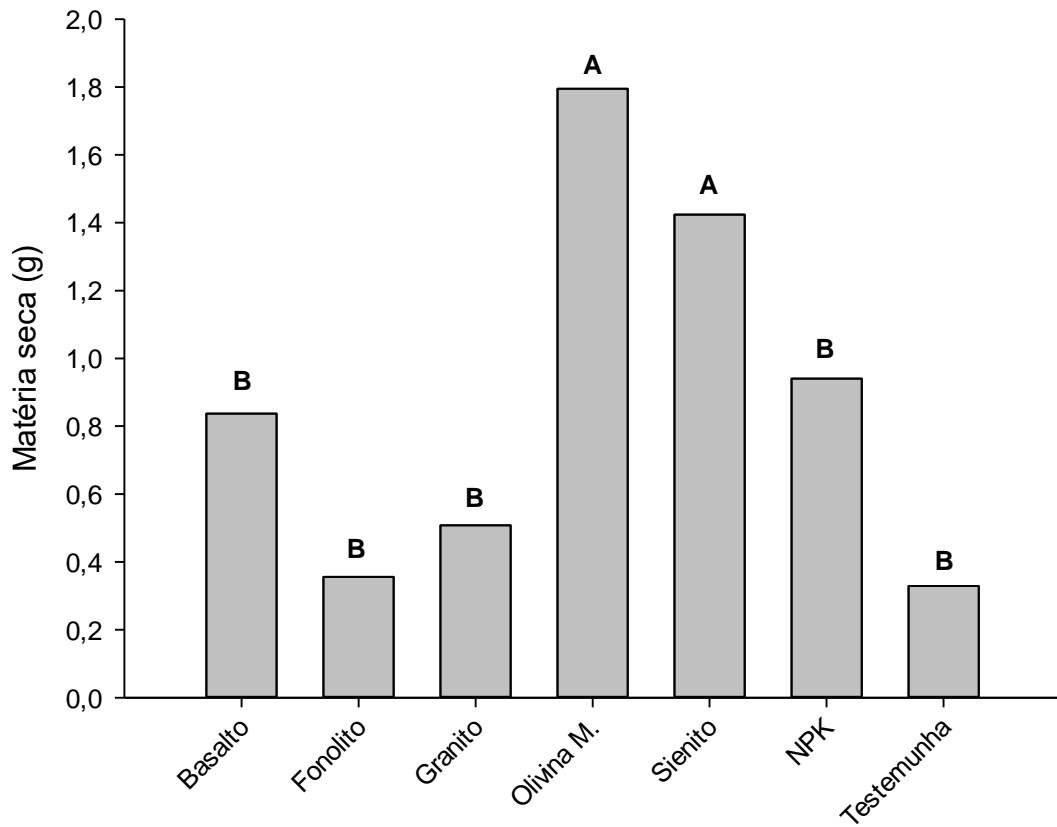
4.5.1.2 Matéria seca da parte aérea de feijoeiro submetida à aplicação de fontes de potássio

Quanto à produção de matéria seca (Figura 9), os efeitos da aplicação dos pós de rocha foram diferenciados. As maiores produções foram, em ordem decrescente, para a olivina melilitito, seguida do sienito, NPK, basalto, granito e fonolito, cuja produção do último equiparou-se à da testemunha.

Esse comportamento era de certa forma esperado, uma vez que a produção de MS depende não só da liberação do potássio, mas das modificações químicas do solo que ocorrem pela liberação de outros elementos e nutrientes contidos nas rochas, ou seja, dos efeitos interativos. Fonolitos e granitos, por exemplo, são rochas mais ricas em potássio, mas com baixos conteúdos de cálcio, magnésio e fósforo; já a olivina melilitito e os basaltos possuem teores bem mais altos destes nutrientes, mas apresentam baixos conteúdos de K (Tabela 3). Portanto, para 1000 kg de K_2O fornecidos por cada rocha, as quantidades de basalto e olivina melilitito aplicadas ao solo, foram muito superiores às do granito e do fonolito, o que acarretou em maior liberação e absorção de Ca e de Mg em relação às duas primeiras rochas, conforme indicado na tabela 9, o que pode ter favorecido a maior produção de MS.

As diferenças na produção de matéria seca, entretanto, somente foram significativas na comparação da olivina melilitito e do sienito em relação às demais rochas. Embora a produção de MS tenha sido maior com a aplicação do pó da rocha olivina melilitito, esta não diferiu do pó da rocha sienito (Figura 9).

Figura 9 - Média da matéria seca da parte aérea de feijoeiro submetidas a aplicação de fontes de potássio.



Média +/- desvio padrão da média do percentual de potássio na parte aérea da aveia em função dos tratamentos.
Letras idênticas significam diferenças estatísticas não significantes pelo teste Tukey ($p<0,05$).

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

4.5.2 Potássio na aveia (*Avena sativa*)

4.5.2.1 Teores de potássio na parte aérea de aveia

Os teores de potássio na parte aérea da aveia foram mais altos no tratamento com o pó da olivina melilito, seguido do tratamento NPK, não havendo diferença significativa entre ambos, mas o conteúdo desse nutriente na parte aérea quando da aplicação da primeira rocha foi significativamente superior ao das demais rochas testadas. Os teores de K foliares dos tratamentos com as rochas basalto, fonolito e sienito não diferiram entre si, mas foram significativamente superiores aos contidos nos tratamentos com o pó do granito e da testemunha (Figura 10 e Tabela 9).

Os conteúdos foliares de K situaram-se dentro da faixa adequada na maioria dos tratamentos, entre 15 a 30 g kg⁻¹ (Nakagawa et al., 2009), com exceção do tratamento com o pó do granito e da testemunha.

Constata-se, portanto, que o pó das rochas basalto, fonolito, olivina melilito e sienito foram capazes de solubilizar quantidades de potássio suficientes para garantir um suprimento adequado deste nutriente às plantas, pois o conteúdo do mesmo foi significativamente superior ao da testemunha. O tratamento NPK foi igualmente eficiente, embora tenha sido ligeiramente inferior ao do tratamento com o pó da olivina melilito, a qual se destacou dos demais na liberação do elemento. O pó do granito, por outro lado, não garantiu uma quantidade de potássio dentro dos níveis adequados, sendo apenas ligeiramente superior ao da testemunha (Figura 10).

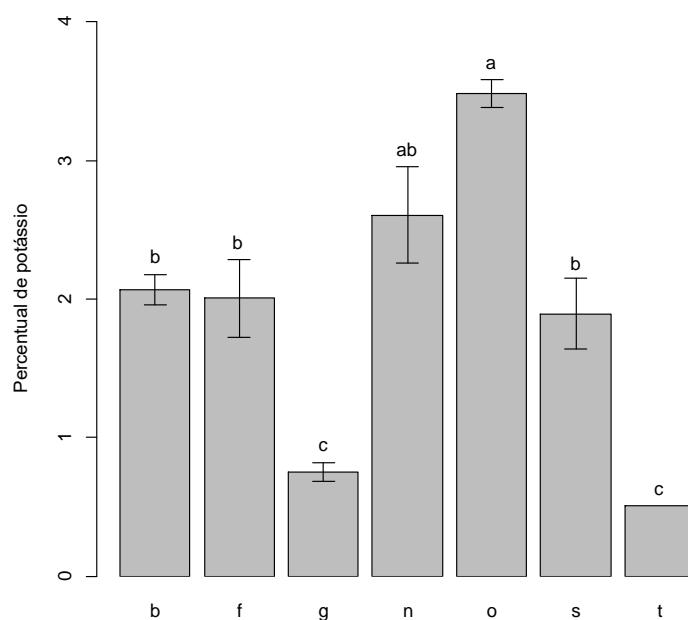
Os resultados obtidos para o segundo cultivo, portanto, revelam diferenças importantes na liberação do potássio em relação ao primeiro cultivo. Enquanto as rochas basalto, fonolito e sienito não foram capazes de liberar potássio em quantidades suficientes para garantir níveis adequados do elemento no primeiro cultivo, provavelmente devido ao curto período de incubação com as rochas e da condução da cultura do feijão (4 meses, aproximadamente), o foram no segundo cultivo, após aproximadamente 10 meses da aplicação do pó. Como a solubilização dos minerais contidos nas rochas é lenta, torna-se importante, portanto, que as aplicações dos pós de rocha sejam feitas com maior antecedência possível, para que o efeito na liberação dos nutrientes possa refletir-se na melhoria das propriedades químicas do solo e no aumento da produtividade já nos primeiros cultivos.

Deve ser destacado, novamente, o alto potencial de liberação do potássio da rocha olivina melilito, cuja aplicação ao solo resultou nos maiores níveis na planta dentre os tratamentos testados. A boa qualidade desta rocha como remineralizador de solos para vários

nutrientes foi recentemente demonstrada em ensaio com as culturas de soja e aveia em experimento conduzido em casa de vegetação (Almeida et al., 2018).

Por outro lado, a aplicação do pó do granito não se revelou adequada como fonte de liberação de potássio no período analisado, o que de certa forma vem dar suporte a um dos critérios da legislação para registro dos remineralizadores, que restringe o uso de rochas com mais de 25% de sílica livre (BRASIL, 2016). O granito utilizado possui 30% de quartzo, e apesar de possuir 40% de microclínio (Tabela 8), um mineral potássico, este não solubilizou quantidades suficientes de potássio para garantir uma adequada nutrição das plantas, no período testado.

Figura 10- Percentual de potássio na parte aérea de aveia.



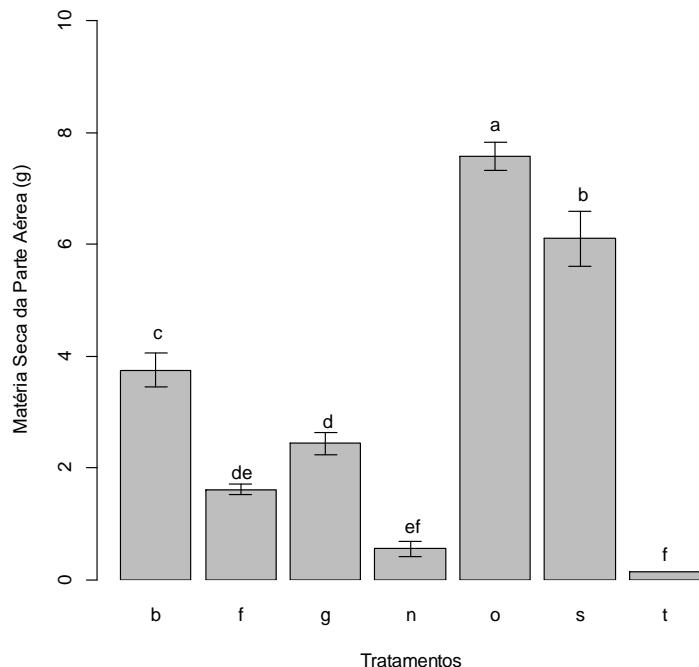
Média +/- desvio padrão da média do percentual de potássio na parte aérea de aveia em função dos tratamentos b representa basalto, f – fonolito, g – granito, n – NPK, o – olivina melilitito, s – sienito e t – testemunha. . Letras idênticas significam diferenças estatísticas não significantes pelo teste Tukey ($p<0,05$).
Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

4.5.2.2 Matéria seca da parte aérea da aveia submetida a aplicação de fontes de potássio

As análises de comparações de médias mostraram que as produções de matéria seca na parte aérea da aveia foram significativamente superiores para o tratamento com o pó de rocha olivina melilitito, seguido do tratamento com o pó de rocha sienito. Ainda o basalto foi

significativamente diferente dos demais tratamentos, porém o tratamento com pó de rocha fonolito, granito e NPK não diferiram estatisticamente.

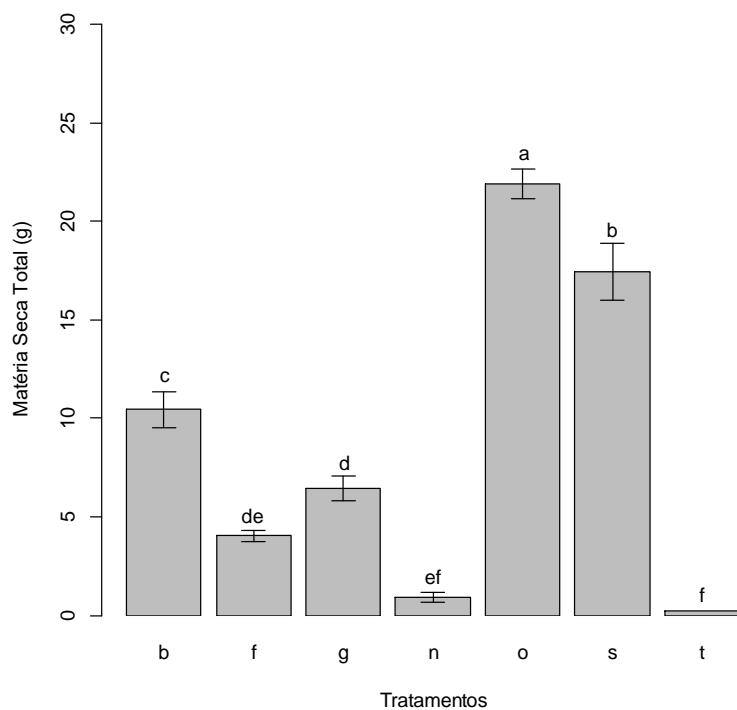
Figura 11 - Matéria seca da parte aérea da Aveia



b representa basalto, f – fonolito, g – granito, n – NPK, o – olivina melilitito, s – sienito e t – testemunha.
Letras idênticas significam diferenças estatísticas não significantes pelo teste de Tukey. Barras verticais – diferença mínima significativa.

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Figura 12 - Matéria seca total de aveia após aplicação de diferentes fontes de potássio.



b representa basalto, f – fonolito, g – granito, n – NPK, o – olivina melilitito, s – sienito e t – testemunha. Letras idênticas significam diferenças estatísticas não significantes pelo teste de Tukey. Barras verticais – diferença mínima significativa.

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

4.5.3 Comportamento dos demais macronutrientes do feijão e da aveia.

Os teores de Ca, Mg, N e P e o acúmulo desses nutrientes na parte aérea (PA) das plantas de feijão, independentemente do pó de rocha utilizado foram superiores aos encontrados nas plantas cultivadas nos tratamentos controle. Por outro lado, na aveia, tomando como referência os tratamentos com NPK, verifica-se que com exceção do P, os teores dos outros nutrientes na PA foram influenciados pelos tratamentos (Tabela 9). No feijão, verifica-se que, em valores absolutos, tanto os teores como o acúmulo de todos os nutrientes na PA dessas plantas foram maiores nos tratamentos submetidos à aplicação do pó da rocha olivina melilitito (Tabela 9). Destaque também deve ser dado ao pó da rocha sienito, uma vez que os teores dos nutrientes estão próximos aos da rocha supracitada, sendo a segunda em termos de acúmulo de nutrientes. Por outro lado, não houve diferença nos teores de Ca nas plantas cultivadas nos tratamentos submetidos aos pós de rocha basalto, granito e sienito, até mesmo da olivina melilitito. Os menores teores desse elemento foram encontrados nos tratamentos com o pó da rocha fonolito e com o NPK.

Para o Mg, os maiores teores desse nutriente foram encontrados nos tratamentos com os pós das rochas basalto, olivina melilitito e sienito; não houve diferença nos tratamentos submetidos aos pós de rocha fonolito, granito e NPK. Para o N, os maiores teores desse nutriente foram encontrados nos tratamentos submetidos à aplicação do pó da rocha fonolito e similares naqueles que receberam basalto, granito, olivina melilitito e NPK e menores nos de sienito. Os teores de P não foram influenciados pelos tratamentos. Para o K, observa-se à similaridade entre os teores na PA desse nutriente nos solos submetidos à aplicação de basalto, fonolito e sienito; menores teores nos tratamentos com granito e maiores naqueles onde foram aplicados a olivina melilitito e o NPK. Vale salientar que nos tratamentos controle os teores desse nutriente foram maiores do que os do basalto, fonolito, granito e do sienito atribuído aos fatores de condução do experimento, ou seja, as plantas foram desenvolvidas em um Neossolo Quartzarênico com baixíssimos valores de nutrientes e matéria orgânica o que proporcionou somente que uma planta chegasse aos 60 dias, na colheita do experimento e sendo assim, a representatividade desta amostra é muito baixa. Cabe salientar que, no geral, foram encontrados maiores teores e acúmulo de N (seguido pelos de K) na PA dessa planta em todos os tratamentos em relação aos outros nutrientes avaliados (Tabela 9).

Na aveia, verifica-se que os teores de Ca, Mg, N na PA, em valores absolutos, foram menores do que os obtidos pelas plantas de feijão. Os baixos teores dos dois primeiros nutrientes encontrados nessas plantas podem ser explicados pela manutenção ou pelo aumento da concentração de K na solução do solo em todos os tratamentos (dados não apresentados), refletindo positivamente nos teores e no acúmulo do mesmo na PA da aveia (Tabela 9). Em resumo, aumentando a concentração de um determinado nutriente, neste caso o K na solução, consequentemente, diminui a absorção, o transporte e posteriormente o acúmulo de outros nutrientes (Ca e Mg), podendo estar relacionada com a competição antagônica que esses nutrientes exercem uns com os outros (WERLE et al., 2008; SALVADOR et al., 2011; JEZEK et al., 2015; CUNHA et al., 2017). Em relação ao N, os baixos teores desse nutriente encontrados na PA da aveia podem ser atribuídos à não aplicação do mesmo antes e durante a condução do experimento e, como consequência, diminuiu os teores do mesmo na PA das plantas. Mesmo assim, os teores e o acúmulo desse nutriente na PA continuaram sendo maiores quando comparados com os demais nutrientes (Tabela 9). Os maiores acúmulos desse nutriente foram encontrados nas plantas submetidas aos tratamentos com os pós das rochas fonolito, granito, olivina melilitito e, notadamente nos de NPK. Para o P, observa-se que não houve influência dos tratamentos nos teores desse elemento na PA das plantas. Porém, o maior acúmulo desse nutriente foi encontrado nos tratamentos com o pó da rocha olivina melilitito, e

não tendo diferença nos tratamentos com o pó das rochas basalto, fonolito, granito sienito e com o NPK.

Tabela 9: Teores dos nutrientes na parte aérea e acumulado nas plantas de aveia e feijão.

Neossolo Quartzarênico										
Feijão										
Tratamento	Teor parte aérea.....					Acumulado.....				
	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K
	%.....					mg.....				
Controle	0,15 c	0,16 c	-	0,10 ns	1,52 abc**	0,51 d	0,51 c	0,0 c	0,32 e	5,02 d
Basalto	0,96 ab	0,31 ab	2,30 ab	0,14	1,09 bc	31,80 c	10,17 b	76,18 ab	4,79 bc	36,09 c
Fonolito	0,34 c	0,18 bc	3,76 a	0,11	1,35 bc	4,25 d	2,20 c	44,82 bc	1,39 de	16,36 d
Granito	0,79 b	0,18 bc	2,40 ab	0,13	0,90 c	16,13 cd	3,68 c	49,14 bc	2,77 cd	18,19 d
Olivina Melilitito	1,22 a	0,34 a	1,92 ab	0,12	2,20 a	87,70 a	24,35 a	137,08 a	8,45 a	157,48 a
Sienito	1,13 ab	0,36 a	1,46 b	0,13	1,28 bc	63,92 b	20,58 a	83,11 ab	7,19 ab	71,85 b
NPK	0,38 c	0,24 abc	3,07 ab	0,10	1,79 ab	1,95 d	1,20 c	15,64 bc	0,57 de	9,09 d
CV (%)	49,28	32,82	42,51	18,65	35,10	99,51	94,01	71,24	76,52	106,14
Aveia										
Controle	-	-	-	-	0,32 d	- ns	-	-	-	1,72 d
Basalto	0,06 ab	0,07 a	1,61 c	0,10 a	1,32 b	1,40	1,63 ab	39,49 b	2,49 b	31,99 bc
Fonolito	0,00 b	0,03 b	2,14 ab	0,08 a	1,28 b	0,00	0,69 b	64,47 ab	2,14 b	35,83 bc
Granito	0,12 a	0,03 b	1,67 bc	0,09 a	0,48 cd	4,54	1,09 b	52,99 ab	2,61 ab	14,95 cd
Olivina Melilitito	0,09 ab	0,06 b	1,64 bc	0,11 a	2,22 a	3,45	2,41 a	59,33 ab	4,06 a	79,89 a
Sienito	0,03 ab	0,07 a	1,40 c	0,11 a	1,20 bc	0,56	1,57 ab	34,11 b	2,62 ab	30,16 bc
NPK	0,02 ab	0,06 a	2,58 a	0,08 a	1,66 ab	1,41	1,89 ab	89,79 a	2,70 ab	55,35 ab
CV (%)	112,95	35,72	24,95	22,56	46,47	137,19	48,60	42,42	31,48	59,70

(**): restou somente uma planta como testemunha; ns: não significativo.

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Diante desses resultados, pode-se concluir que, independentemente da cultura utilizada e das características químicas do solo estudado, o pó da rocha olivina melilitito foi mais eficiente na liberação dos nutrientes quando comparado às outras rochas avaliadas neste estudo, tornando-os mais disponíveis na solução do solo e, como consequência, favorecendo a absorção e o acúmulo dos mesmos pelas plantas. Nesse sentido, o pó da referida rocha torna-se uma alternativa interessante para o aumento da fertilidade dos solos, com reflexos positivos na produtividade das plantas. Além disso, sugere-se também considerar o pó da rocha sienito como uma fonte promissora de nutrientes tanto para os solos como para as plantas, uma vez que tanto os teores como o acúmulo dos mesmos ficaram um pouco abaixo da rocha anteriormente mencionada e maiores que os demais pós de rocha estudados. Em relação ao pó das rochas basalto, fonolito e granito, este estudo evidenciou que os mesmos necessitam de um tempo maior para a solubilização e posterior liberação dos nutrientes para a solução do solo e, como consequência, para as plantas. Não obstante, é de suma importância considerar a necessidade de testes a campo, a fim de testar a eficiência agronômica de cada rocha.

4.6 CONCLUSÕES

Independentemente da cultura utilizada e das características químicas do solo estudado, o pó da olivina melilitito foi mais eficiente na liberação de K, Ca, Mg e outros nutrientes quando comparado às outras rochas avaliadas neste estudo, tornando-os mais disponíveis na solução do solo e, como consequência, favorecendo a absorção e o acúmulo dos mesmos pelas plantas.

No feijão, tanto os teores como o acúmulo de todos os nutrientes na parte aérea foram maiores nos tratamentos submetidos à aplicação do pó da rocha olivina melilitito e do sienito.

Considerando que a aveia foi cultivada somente com o residual dos pós de rocha aplicados na cultura do feijão, os maiores conteúdos de potássio na parte aérea da aveia dos tratamentos com os pós das rochas fonolito e basalto demonstram que os minerais dessas rochas continuam sendo solubilizados, e disponibilizando nutrientes para as plantas com o passar do tempo.

Sugere-se também considerar o pó da rocha sienito como uma fonte promissora de K e outros nutrientes, tanto para o solo como para as plantas, uma vez que os resultados foram semelhantes aos da rocha olivina melilitito.

Em relação ao pó das rochas basalto, fonolito e granito, este estudo evidenciou que os mesmos, necessitam de um tempo maior para a solubilização e posterior liberação dos nutrientes para a solução do solo e para as plantas.

O granito, apesar de possuir o maior conteúdo total de K₂O, foi o que apresentou o menor conteúdo de K na parte aérea. Isto vem demonstrar que apenas o conteúdo do elemento na rocha não é um critério adequado para a caracterização de remineralizadores de solo, notadamente em relação ao potássio.

Como a solubilização dos minerais contidos nas rochas é lenta, torna-se importante, portanto, que as aplicações dos pós de rochas sejam feitas com maior antecedência possível, para que o efeito na liberação dos nutrientes possa se refletir na melhoria das propriedades químicas do solo e no aumento da produtividade já nos primeiros cultivos.

4.7 CONCLUSÕES GERAIS

O conjunto das análises químicas e mineralógicas indicou que todas as rochas estudadas apresentam os requisitos exigidos pela legislação brasileira para serem utilizadas como matéria-prima para a produção de remineralizadores multinutrientes, exceto a rocha granito, que possui mais do que 25% de sílica livre (quartzo);

A solução de ácido cítrico 0,02 mol L⁻¹ foi mais eficaz do que a solução de ácido acético 0,02 mol L⁻¹ e do que a água na dissolução dos minerais, solubilizando, na quase totalidade dos casos, quantidades mais altas de elementos químicos, mostrando-se promissora para uma melhor discriminação da qualidade dos pós de rochas como remineralizadores de solo;

O pó da rocha fonolito destacou-se do pó das demais rochas pelo alto conteúdo total de K₂O e por solubilizar maiores quantidades de potássio em solução de ácido cítrico, porém quando o pó desta rocha foi aplicado como fonte de potássio na sucessão feijão/aveia, liberou quantidades menores do elemento para as plantas do que a olivina melilitito e o sienito, indicando que seus minerais constituintes apresentam maior resistência à alteração;

Considerando que a aveia foi cultivada somente com o residual dos pós de rocha aplicados na cultura do feijão, os maiores conteúdos de potássio na parte aérea da aveia dos tratamentos com os pós das rochas fonolito e basalto demonstram que os minerais dessas rochas continuam sendo solubilizados, disponibilizando nutrientes para as plantas com o passar do tempo;

Como a solubilização dos minerais contidos nas rochas é lenta, torna-se importante, portanto, que as aplicações dos pós de rochas sejam feitas com maior antecedência possível, para que o efeito na liberação dos nutrientes possa refletir na melhoria das propriedades químicas do solo e no aumento da produtividade já nos primeiros cultivos.

4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca contínua por alternativas que reduzam a dependência externa de insumos e mantenham a sustentabilidade dos sistemas são extremamente necessárias.

Todas as variações nas metodologias de solubilização, a utilização de diferentes extractores, diferentes tempos de agitação e os valores encontrados, não nos permite até o presente momento sugerir uma metodologia isolada, como teste, que indique a qualidade do remineralizador.

Existe a necessidade de mais pesquisas sobre solubilidade dos remineralizadores, sua interação com matéria orgânica e em nível de rizosfera; pesquisas com diferentes rochas, sua aplicação em diversos solos e culturas, com destaque para a produção de plantas perenes como café, maçã, laranja, uva e outras, visto que a liberação dos nutrientes para esta cultura será ao longo do tempo.

Considera-se fundamental considerar a misturas de rochas (*blend*) com diferentes solubilidades para disponibilizar nutrientes ao longo de diferentes estágios do processo produtivo.

REFERÊNCIAS

BALIGAR, V. C., FAGERIA, N. K. and He, Z. L. Nutrient use efficiency in plants, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 32: 7, 921 - 950, 2001.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa nº 46 de 06 de outubro de 2011**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 outubro 2011. Disponível em:<http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em 23 mar. 2016.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa nº 05 de 10 de março de 2016**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 mar.2016. Disponível em: <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em 23 mar. 2016.

BRASIL. **Lei n. 12.890, 10 dez de 2013**. Altera a Lei nº 6.894 de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 dez 2013. Disponível em: <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acesso em 27 mar. 2017.

BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. Cristal structures of clay minerals and their X-ray identification. London: **Mineralogic Society**, p. 495, 1980.

CASAROLI. D.; LIER, Q. J. van. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.1, p.59-66, 2008.

CORONEOS, C.; HISINGER, P.; GILKES, R.J. Granite powder as a source of potassium for plants: a glasshouse biassay comparing two pasture species. **Fert.Res.** v.45, p. 143-152, 1996. ESSINGTON, M.E. Soil and water chemistry. An integrative approach. **CRC Press**. New York, 2nd ed. 656p., 2015.

CUNHA, G. O.M. Formas de Alumínio em solos com altos teores trocáveis e toxidez na soja e no milho, 2017. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

GILMANN, G.P.; BURKETT,D.C.; COVENTRY, R.J. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effect on soil cátion chemistry. **Aust. J. Soil Res.**, v. 39, p. 799-811., 2001.

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

HISINGER, P.; BOLLAND, M.D.A.; GILKES, R.J. Silicate rock powder: effect on selected chemical properties of a range of soils from Western Australia and on plant growth as assessed in a glasshouse experiment. **Fertilizer Research**, v. 45, p. 69-79, 1996.

JEZEK, M.; GEILFUS, C. M.; BAYER, A.; MÜHLING, K. H. Photosynthetic capacity, nutrient status, and growth of maize (*Zea mays* L.) upon MgSO₄ leaf-application. **Frontiers Plant Science**, v5, 781, 2015.

KERBAUY, G.B. Fisiologia Vegetal. São Paulo, 470p.,2004.

KIKUTI, H.; ANDRADE, M.J.B.; CARVALHO, J.G.; MORAIS, A.R. Teores de macronutrientes na parte aérea do feijoeiro em função de doses de nitrogênio e fósforo. **Bragantia**: Campinas, v.65, n.2, p. 347-354, 2006.

LE BAS, M.J.; LE MAITRE, R.W.; STRECKEISEN, A.; ZANETTIN, B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total álcali-silica diagram. **Journal of Petrology**, v. 27, p.745-750, 1986.

LEINZ, V. & AMARAL, S.E. Geologia Geral. São Paulo, 7 ed., **Editora Nacional**, p. 397., 1978.

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

LEONARDOS, O.H.; FYFE, W.S.; KRONBERG, B.I. The use of ground rocks in laterite systems: an improvement to the use of conventional soluble fertilizers? **Chemical Geology**, v.60, p.361-370, 1987.

LOPES-ASSAD, M.L.; ARANSINI, S.H.; ROSA, M.M.; CARVALHO, J.R.P.; CECCATO-ANTONINI, S.R. The solubilization of potassium-bearing rock powder by *Arpergillus niger* in small-scale batch fermentations. **Can. J. Microbiol.** v. 56, p. 598-605, 2010.

MANNING, D.A.C. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. Agronomy for Sustainable Development, **Springer Verlag/EDP Sciences/INRA**, 2010.

MARTINS, E.S.; OLIVEIRA, C.G.; RESENDE, A.V.; MATOS, M.S.F.M. Agrominerais – Rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. **CETEM**, cap.9, 2^a edição, 2008.

MARSCHENER, H. Role of root growth, arbuscular mycorrhiza, and root exudates for the efficiency in nutrient acquisition, **Field Crops Research**, 56: 203-207, 1998.

RAMOS, C.G.; MELLO, A.G., KAUTZMANN, R.M. A preliminary study of acid volcanic rocks for stonemeal application. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management** , p.30-35, 2014.

RAMOS, C.G.; QUEROL, X.; DALMORA, A.C.; PIRES, K.C.J.; SCHNEIDER, I.A.H.; OLIVEIRA, L.F.S.; KAUTZMANN, R.M. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, p.1-7, 2016.

ROLDAN, L.F. **Tectônica rúptil meso-cenozóica na região do Domo de Lages, SC.** Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica), USP, São Paulo, 131p., 2007.

ROSOLEM, C.A.; BESSA, A.M.; PEREIRA, H.F. Dinâmica do potássio no solo e nutrição potássica da Soja. **Pesq. Agropec. bras.**, Brasília, v.28, n.9:1045-1054, 1993.
SALVADOR, J. T.; CARVALHO, T. C.; LUCCHESI, L. A. C. Relações cálcio e magnésio presentes no solo e teores foliares de macronutrientes. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v.9, n.1, p.27-32, 2011.

SARTORI, P.L. & GOMES, C.B. Composição química-mineralógica das últimas manifestações vulcânicas na região de Santa Maria, RS. **Anais Academia Bras. Cienc.**, 1980.

SCHEIBE, L.F.; **Geologia e Petrologia do Distrito Alcalino de Lages, SC.** Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 253p., 1986.

SILVA, A.; ALMEIDA, J.A.; SCHMITT, C.; COELHO, C.M.M.; Avaliação dos efeitos da aplicação de basalto moído na fertilidade do solo e nutrição de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, Curitiba, v.42, n.1, p.69-76, 2012.

SILVA, A.A.S.; SAMPAIO, J.A.; LUZ, B.L.; FRANÇA, S.C.A.; RONCONI, C.M. Modeling controlled potassium release from phlogopite in solution: exploring the viability of using crushed phlogopite rock as an alternative potassium source in Brazilian soil. **J.Braz.Chem.Soc.**, v.24, n.8, p.1366-1372, 2013.

SOUZA, F. N. S., OLIVEIRA, C.G.; MARTINS, E.S., ALVES, J.M. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas – TO, v.3, n.1, 2017.

SOUZA, M.E.P.; CARVALHO, A.M.X.C.; DELIBERALI,I.J.; BROWN, G.G.; MENDONÇA, E.S.; CARDOSO, I.M. Vermicomposting with rock powder increases plant growth. **Applied Soil Ecology**, v. 69, p. 56-60, 2013.

SOUZA, F. N. S., OLIVEIRA, C.G.; MARTINS, E.S., ALVES, J.M. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas – TO, v.3, n.1, 2017.

van STRAATEN, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Brasilia, p. 732-747, 2006.

van STRAATEN, P. Rocks for crops: Agrominerals of Sub-Saharan Africa. **ICRAF**, Nairobi, Kenya, 338 p., 2002.

van STRAATEN, P. Agrogeological resources in eastern and southern Africa. In: WACHIRA, J.K. & NOTHOLT, A.J.G. Agrogeology in Africa. **Common Sci Council**, p. 12-36, 1987.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROsolem, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.6, p.2297-2305, 2008.

WHITTIG, L.D.; ALLARDICE, W.R. X-ray diffraction techniques. In: KLUTE, A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2 ed. Madison: **Soil Science Society of America**, p.331, 1986.

WILCOX, G.E.; FAGERIA, N.K. Deficiências nutricionais do feijão, sua identificação e correção. **Embrapa**: boletim técnico n.5: 1-22p.,1976.

ANEXOS

ANEXO A – ANÁLISES PETROGRÁFICAS DO BASALTO - BP

 UFPR	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA							
LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS								
Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br								
CERTIFICADO DE ANÁLISE								
Nº. 2018 185 Petro 01								
<p>Análise solicitada: Caracterização petrográfica mesoscópica complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida. Porcentagem mineralógica obtida por estimativa visual.</p> <p>Equipamento: Microscópio petrográfico Carl Zeiss, modelo AXIO Imager.A2m. Sistema de captura e tratamento de imagem <i>AxioVision</i>.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 2px;">Solicitante: Jaime Antonio de Almeida</td> <td style="width: 50%; padding: 2px; text-align: right;">Data de entrada: 18/04/2018</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 2px; text-align: right;">Data de emissão: 30/07/2018</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 2px; text-align: right;">Identificação da amostra pelo solicitante: Basalto – BP Nº LAMIR: 185/18 01</td> </tr> </table>			Solicitante: Jaime Antonio de Almeida	Data de entrada: 18/04/2018	Data de emissão: 30/07/2018		Identificação da amostra pelo solicitante: Basalto – BP Nº LAMIR: 185/18 01	
Solicitante: Jaime Antonio de Almeida	Data de entrada: 18/04/2018							
Data de emissão: 30/07/2018								
Identificação da amostra pelo solicitante: Basalto – BP Nº LAMIR: 185/18 01								
Características mesoscópicas	Tipo:	Rocha ígnea						
	Estado de alteração:	Rocha sã						
	Cor:	Cinza escura						
	Granulação:	Muito fina a fina						
	Granulometria:	Matriz menor que 1,0 mm e fenocristais com até 5,0 mm						
	Estrutura:	Maciça						
	Textura:	Porfíritica muito fina a fina						
Informações adicionais: Ocorrem fenocristais de 0,1 a 5,0 mm em meio a matriz muito fina.								
Características microscópicas	Textura:	Porfíritica muito fina a fina, subofítica a intergranular, intersertal						
	Estrutura:	Maciça						
	Estado de alteração:	Incipientemente alterada.						
	Informações adicionais: Rocha formada por matriz muito fina a fina, composta por plagioclásio, clinopiroxênio, minerais opacos e vidro vulcânico devitrificado (argilizado e oxidado). Observam-se fenocristais de plagioclásio em meio a matriz.							
	Composição Mineral							
	Principal	Mineral	%					
		Plagioclásio - matriz (Labradorita)	45%					
Clinopiroxênio (Diopsídio)		40%						
Vidro vulcânico devitrificado (argilominerais e óxidos de ferro)		5%						
Plagioclásio – fenocristais (Labradorita)		5%						
Minerais Opacos		5%						
	Argilominerais	Traços						
	Sericita	Traços						
	Óxidos/hidróxidos de ferro	Traços						
Nome da rocha: Basalto ¹								
PÁGINA 1 de 4								
<i>OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS ÀS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCLA DO LAMIR E RUBRÍCAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.</i>								
Responsável Técnico:	Coordenador:							
Guilherme Fedalto – Geólogo – CREA PR-161049/D		Profa. Dra. Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos						

ANEXO B - ANÁLISES PETROGRÁFICAS DO FONOLITO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2018 185 Petro 02

Análise solicitada: Caracterização petrográfica mesoscópica complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida. Porcentagem mineralógica obtida por estimativa visual.
--

Equipamento: Microscópio petrográfico Carl Zeiss, modelo AXIO Imager.A2m. Sistema de captura e tratamento de imagem AxioVision.
--

Solicitante: Jaime Antonio de Almeida	Data de entrada: 18/04/2018
	Data de emissão: 31/07/2018

Identificação da amostra pelo solicitante: Fonolito	Nº LAMIR: 185/18 02
--	----------------------------

Características mesoscópicas	Tipo:	Rocha ígnea
	Estado de alteração:	Não alterada
	Cor:	Cinza escura
	Granulação:	Muito fina a fina
	Granulometria:	Matriz menor que 0,1 mm e microfenocristais de até 0,1 mm
	Estrutura:	Estrutura de fluxo
	Textura:	Microporfírica muito fina a fina
Informações adicionais: -		

Características microscópicas	Textura:	Microporfírica muito fina a fina
	Estrutura:	Estrutura de fluxo
	Estado de alteração:	Incipiente
	Informações adicionais:	Rocha constituída por matriz muito fina, formada por sanidina, nefelina e aegerina, e microfenocristais de nefelina. Os cristais de sanidina e aegerina apresentam orientação preferencial por estrutura de fluxo.

Composição Mineral		
	Mineral	%
Principal	Feldspato alcalino (Sanidina)	45%
	Feldspatoide - matriz (Nefelina)	35%
	Clinopiroxênio (Aegerina)	15%
	Feldspatoide –microfenocristais (Nefelina)	5%
Minerais de alteração	Óxidos/hidróxidos de ferro	traços
	Cancrinita	traços
	Sericita	traços

Nome da rocha:	Fonolito ¹ .
-----------------------	-------------------------

¹ Le Maitre, R.W., Streichweber, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sørensen, H., Wooley, A.R. Igneous Rocks: A classification and glossary of terms Cambridge University Press, 2002. p.236.

PÁGINA 1 de 4

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS ÀS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico: Coordenador:

Guilherme Fedalto – Geólogo – CREA PR-161049/D

Profa. Dra. Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos

ANEXO C - ANÁLISES PETROGRÁFICAS DO GRANITO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2018 185 Petro 03

Análise solicitada: Caracterização petrográfica mesoscópica complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida. Porcentagem mineralógica obtida por estimativa visual.	
Equipamento: Microscópio petrográfico Carl Zeiss, modelo AXIO Imager.A2m. Sistema de captura e tratamento de imagem <i>AxioVision</i> .	
Solicitante: Jaime Antonio de Almeida	Data de entrada: 18/04/2018 Data de emissão: 30/07/2018
Identificação da amostra pelo solicitante: Granito	Nº LAMIR: 185/18 03

Características mesoscópicas	Tipo:	Rocha ígnea
	Estado de alteração:	Rocha moderadamente alterada
	Cor:	Vermelha castanho-acinzentada
	Granulação:	Muito fina a média
	Granulometria:	Menor que 0,1 a 10,0 mm
	Estrutura:	Maciça
	Textura:	Fanerítica inequigranular muito fina a média
Informações adicionais:-		
Características microscópicas	Textura:	Fanerítica inequigranular muito fina a média
	Estrutura:	Maciça
	Estado de alteração:	Intensamente alterada.
	Informações adicionais: Rocha formada essencialmente por cristais de microclínio, quartzo, anortita e anfibólito. Os cristais estão intensamente alterados.	

Composição Mineral		
	Mineral	%
Principal	Feldspato alcalino (Microclínio)	40%
	Quartzo	30%
	Plagioclásio (Anortita)	25%
	Anfibólito	5%
	Minerais Opacos	Traços
	Argilominerais	Traços
	Sericita	Traços
	Oxidos/hidróxidos de ferro	Traços
	Clorita	Traços
	Carbonato	Traços
	Epidoto	Traços
Nome da rocha:	Granito ¹	

PÁGINA 1 de 4

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS ÀS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VERSÃO ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Coordenador:

Guilherme Fedalto – Geólogo – CREA PR-161049/D

Profa. Dra. Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos

ANEXO D - ANÁLISES PETROGRÁFICAS DA OLIVINA MELILITITO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2018 185 Petro 04

Análise solicitada: Caracterização petrográfica mesoscópica complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida. Porcentagem mineralógica obtida por estimativa visual.	
Equipamento: Microscópio petrográfico Carl Zeiss, modelo AXIO Imager.A2m. Sistema de captura e tratamento de imagem AxioVision.	
Solicitante: Jaime Antonio de Almeida	Data de entrada: 18/04/2018
	Data de emissão: 31/07/2018
Identificação da amostra pelo solicitante: Olivina Melilitito	Nº LAMIR: 185/18 04

Características mesoscópicas	Tipo:	Rocha ígnea
	Estado de alteração:	Não alterada
	Cor:	Cinza escura
	Granulação:	Muito fina a média
	Granulometria:	Menor que 1,0 mm a 5,0 mm
	Estrutura:	Maciça
	Textura:	Fanerítica inequigranular muito fina a média
	Informações adicionais:	-
Características microscópicas	Textura:	Fanerítica inequigranular muito fina a média
	Estrutura:	Maciça
	Estado de alteração:	Moderadamente alterada
	Informações adicionais:	Rocha com estrutura maciça, formada, essencialmente, por cristais de melilita, flogopita, diopsídio e olivina.

Composição Mineral		
	Mineral	%
Principal	Melilita	40%
	Flogopita	30%
	Clinopiroxênio (Diopsídio)	15%
	Olivina	10%
	Minerais opacos	5%
Minerais de alteração	Óxidos/hidróxidos de ferro	Traços
	Argilominerais	Traços
	Talco	Traços

Nome da rocha: Olivina-piroxênio melilitito¹.

¹ Le Maitre, R.W., Streikisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Wooley, A.R. Igneous Rocks: A classification and glossary of terms Cambridge University Press, 2002. p.236.

PÁGINA 1 de 4

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS ÀS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VERSÃO ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Coordenador:

Guilherme Fedalto – Geólogo – CREA PR-161049/D

Profa. Dra. Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos

ANEXO E - ANÁLISES PETROGRÁFICAS DO SIENITO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2018 185 Petro 05b

Análise solicitada: Caracterização petrográfica mesoscópica complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida. Porcentagem mineralógica obtida por estimativa visual.
--

Equipamento: Microscópio petrográfico Carl Zeiss, modelo AXIO Imager.A2m. Sistema de captura e tratamento de imagem <i>AxioVision</i> .
--

Solicitante: Jaime Antonio de Almeida	Data de entrada: 18/04/2018
	Data de emissão: 15/08/2018
Identificação da amostra pelo solicitante: Sienito	Nº LAMIR: 185/18 05

Características mesoscópicas	Type:	Rocha ígnea
	Estado de alteração:	Rocha moderadamente alterada
	Cor:	Cinza claro esbranquiçada
	Granulação:	Muito fina a média
	Granulometria:	Menor que 0,1 a 10,0 mm
	Estrutura:	Maciça
	Textura:	Porfirítica muito fina a média
Informações adicionais:-		
Características microscópicas	Textura:	Porfirítica em matriz muito fina a média
	Estrutura:	Maciça
	Estado de alteração:	Moderadamente alterada
	Informações adicionais:	Rocha formada por matriz fina a muito fina, moderadamente alterada, composta por feldspato alcalino, feldspatoide e subordinadamente, clinopiroxênio. Ocorrem, disseminados na matriz, fenocristais de feldspato alcalino (sanidina) e melilita, de granulação fina a média.

Composição Mineral		
	Mineral	%
Principal	Feldspato alcalino – matriz (Sanidina)	30%
	Feldspato alcalino – fenocristal (Sanidina)	15%
	Feldspatoide – matriz (Sodalita)	20%
	Melilita – fenocristal	20%
	Clinopiroxênio – matriz (Egirina)	5%
	Clinopiroxênio – fenocristal (Egirina)	5%
	Minerais Opacos	5%
	Titanita	Traços
Minerais de alteração	Sericita	Traços
	Cancrinita	Traços
	Argilominerais	Traços
	Óxidos/hidróxidos de ferro	Traços

PÁGINA 1 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VERSÃO ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCEL DA LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Coordenador:

Guilherme Fedalto – Geólogo – CREA PR-161049/D

Profa. Dra. Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos