



UNILASALLE
CENTRO UNIVERSITÁRIO LA SALLE



MESTRADO EM AVALIAÇÃO DE IMPACTOS
AMBIENTAIS EM MINERAÇÃO

JÉSSICA MARIA GREGORY NUNES

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS E PRODUTOS DA BRITAGEM DE
ROCHAS BASÁLTICAS E AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO NA ROCHAGEM**

CANOAS, 2012.

JÉSSICA MARIA GREGORY NUNES

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS E PRODUTOS DA BRITAGEM DE
ROCHAS BASÁLTICAS E AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO NA ROCHAGEM**

Dissertação apresentada à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação do Curso de Avaliação de Impactos Ambientais em Mineração do Centro Universitário La Salle - Unilasalle, como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Avaliação de Impactos Ambientais.

Orientadora: Prof^a. Dra. Cristiane Oliveira Rodrigues

Co-Orientador: Prof. Dr. Rubens Muller Kautzmann

CANOAS, 2012.

JÉSSICA MARIA GREGORY NUNES

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS E PRODUTOS DA BRITAGEM DE
ROCHAS BASÁLTICAS E AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO NA ROCHAGEM**

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Avaliação de Impactos Ambientais em Mineração pelo Centro Universitário La Salle - Unilasalle,

Aprovado pela banca examinadora em 07 de dezembro de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Ana Cristina Borba da Cunha
Unilasalle

Prof^a. Dra. Simone Schneider Amaral
Unilasalle

Prof^o. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio
UFRGS

Me. Magda Bergmann
Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

N972c Nunes, Jéssica Maria Gregory

Caracterização de resíduos e produtos da britagem de rochas basálticas e avaliação da aplicação na rochagem [manuscrito]. / Jéssica Maria Gregory Nunes. – 2012.

94 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado em Avaliação de impactos ambientais em mineração) – Centro Universitário La Salle, Canoas, 2012.

“Orientação: Prof^a. Dr^a. Cristiane Oliveira Rodrigues.”

“Co-Orientação: Prof. Dr. Rubens Muller Kautzmann.”

1. Geociências. 2. Impactos ambientais. 3. Depósitos minerais 4. Mineralogia. I. Rodrigues, Cristiane Oliveira. II. Kautzmann, Rubens Muller. III. Título.

CDU: 553

Bibliotecária responsável: Melissa Rodrigues Martins - CRB 10/1380

Dedico este trabalho a minha mãe Elci, a meu esposo Rodrigo e a meu filho Pedro, pelo apoio e incentivo em enfrentar esta etapa da vida e pela paciência e compreensão durante todo este tempo em que me empenhei nestes estudos.

AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial a minha mãe, que sempre me apoiou e incentivou para que eu vencesse todos os obstáculos que surgiram ao longo da minha jornada acadêmica.

Ao Rodrigo e ao Pedro Henrique, que estiveram ao meu lado, incentivando-me e dando-me força nos momentos mais difíceis de minha vida acadêmica. Obrigada por toda a paciência!

A todos os colegas que estiveram ao meu lado durante o curso, em especial a Andreia G. Mello, Claudete Gindri Ramos e Daniele Wieliczko. Obrigada pela amizade!

Ao meu Co-orientador professor Rubens Muller Kautzmann, que ao longo do trabalho sempre me dedicou atenção e carinho, não se limitando a atender-me. Sempre compreensivo e companheiro, sem ele esta dissertação não seria possível. Obrigado pela paciência!

A minha orientadora a professora Cristiane Oliveira Rodrigues pela paciência, orientação e apoio técnico que ao longo do trabalho não se limitou a atender-me. Sempre compreensiva, dedicou muitas horas para a realização deste trabalho.

E a todos aqueles que de alguma forma tornaram possível este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho descreve estudos de caracterização física, físico-química, química e mineralógica, de estimativa de disponibilidade de nutrientes em meio aquoso e de aplicação na rochagem de partículas de basaltos provenientes de quatro empresas localizadas no Distrito Mineiro do município de Nova Prata, no Rio Grande do Sul. As amostras foram preparadas e caracterizadas quanto à umidade, massa específica, classificação granulométrica, área superficial, potencial zeta, capacidade de troca catiônica e composição elementar e mineralógica. Técnicas de difração e fluorescência de raios-X também foram utilizadas para identificar as principais fases minerais e óxidos presentes nas amostras. Para avaliar a estimativa de disponibilidade de nutrientes foram simulados diferentes meios aquosos na presença das amostras e, posteriormente, concentrações de Al, Ca, Mg, Mn, P, K, B, S, Cu e Zn foram determinadas na fase líquida por técnicas de espectroscopia molecular e de chama. Adicionalmente, estudos em escala de laboratório foram realizados para estimar a aplicação das partículas de basalto, em diferentes concentrações (2,5 g/kg_{solo}, 12,5 g/kg_{solo} e 50 g/kg_{solo}) na técnica de rochagem para cultivo de milho. Os resultados mostraram que as amostras apresentaram valores baixos de umidade (0,25% para a amostra I, 0,45% para a amostra II, 0,27% para a amostra III e 0,39% para a amostra IV), valores médios de massa específica de 2,67 g/cm³ e de capacidade de troca catiônica de 1,31 meq.g⁻¹. Todas as amostras apresentaram uma densidade de carga negativa em toda a faixa de pH analisada com um ponto isoelétrico próximo de pH 2. Ainda, as amostras foram compostas principalmente por labradorita (73,5% para a amostra I, 51% para a amostra II, 52% para a amostra III e 61% para a amostra IV) e quartzo (9% para a amostra I, 19% para a amostra II, 15% para a amostra III e 13% para a amostra IV). Os principais óxidos constituintes destas partículas foram SiO₂ (65%), Al₂O₃ (13,2%), Fe₂O₃ (7,1%), CaO (3,5%), K₂O (3,5%) e Na₂O (3,1%). Adicionalmente, diversos macro e micronutrientes (Al, Ca, Mg, Mn, P, K, B, S, Cu e Zn) foram disponibilizados para o meio aquoso, indicando o potencial destas amostras para o desenvolvimento e manutenção da vida vegetal. A aplicação das partículas de basalto no cultivo de milho mostraram bons resultados para os parâmetros de desenvolvimento vegetal avaliados no estudo, confirmando a possibilidade da utilização das amostras para rochagem.

Assim, diante de todos estes resultados é possível concluir que as amostras de basalto estudadas demonstraram viabilidade de aplicação na rochagem. Este fato apresenta grande importância para o setor industrial da mineração de basalto que poderá contar com uma nova alternativa de disposição de rejeitos que poderão ser transformados em produtos. Além disso, produtores rurais da região de Nova Prata-RS poderão contar com uma alternativa economicamente viável de um produto fertilizante natural e, portanto, ambientalmente seguro.

Palavras chave: Basalto. Caracterização de partículas. Rochagem.

ABSTRACT

The present work describes studies of physical, physical-chemical, chemical; mineralogical characterization, of nutrient availability estimation in aqueous medium and of application in stonemeal of basalt particles from four companies placed in Mining District of Nova Prata, Rio Grande do Sul. The samples were prepared and moisture, density, particle size classification, surface area, zeta potential, cation exchange capacity and elemental and mineralogical composition were measured. Diffraction and fluorescence X-rays techniques were also applied to identify the main mineral phases and oxides which composed the samples. An estimative of nutrient availability were simulated using different aqueous media in the presence of samples and subsequently concentrations of Al, Ca, Mg, Mn, P, K, B, S, Cu and Zn were measured in liquid phase by molecular and flame spectroscopy techniques. Additionally, studies in laboratory scale were performed to estimate the application of basalt particles in different concentrations (2.5 g/kg_{soil}, 12.5 g/kg_{soil} and 50 g/kg_{soil}) in stonemeal technique for corn growing. The results showed that the samples had low values of moisture (0.25% for sample I, 0.45% for sample II 0.27% for sample III and 0.39% for sample IV) medium values of specific mass of 2.67 g/cm³ and cation exchange capacity of 1.31 meq.g⁻¹. All samples showed a negative charge density in a whole pH range analysed with an isoelectric point near pH 2. In addition, the samples were composed mainly of labradorite (73.5% for sample I, 51% for sample II, 52% for sample III and 61% for sample IV) and quartz (9% for sample I, 19% for sample II, 15% for sample III and 13% for sample IV). The main oxides were SiO₂ (65%), Al₂O₃ (13.2%), Fe₂O₃ (7.1%), CaO (3.5%), K₂O (3.5%) and Na₂O (3.1%). Additionally, several macro and micronutrients (Al, Ca, Mg, Mn, P, K, B, S, Cu and Zn) were transferred to the aqueous medium, indicating the potential of these samples for the development and maintenance of the plant life. The application of the basalt particle in the corn cultivation showed good results for the parameters of plant development investigated in this study, confirming the possibility of the application of the samples in the stonemeal. Thus, with all these results it is possible conclude that the basalt samples studied demonstrated the feasibility of applying stonemeal. This fact shows a great importance to the industrial sector of basalt mining that will may have a new alternative to disposal of tailings, which will can be

transformed in products. Moreover, farmers in the region of Nova Prata-RS will have an economically viable alternative of a natural fertilizer product and therefore environmentally safe.

Keywords: Basalt. Characterization of particles. Stonemeal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Britador de mandíbula	22
Figura 2: Britador giratório	22
Figura 3: Circuito clássico de britagem, normalmente aplicado em pedreiras	23
Figura 4: Variação da disponibilidade em termos percentuais de fósforo, potássio, cálcio e magnésio em rochas basálticas de diferentes regiões da Formação Serra Geral e dos tufos vulcânicos (kamafugitos) da Formação Mata da Corda	28
Figura 5: Nutrientes liberados ao solo pela rochagem	32
Figura 6: Localização das jazidas das empresas Basel Indústria e Comércio de Minerais, Coneresul Britagem, Sindicato da Indústria de Extração de Pedreiras de Nova Prata e Zilli Basalto e Britagem, localizadas no Distrito Mineiro do município de Nova Prata, no estado do Rio Grande do Sul	48
Figura 7: Amostras de basalto: (a) Amostra I; (b) Amostra II; (c) Amostra III; (d) Amostra IV.....	49
Figura 8: Amostragem de basalto em uma pilha.....	51
Figura 9: Fluxograma de preparo das amostras para as caracterizações física, físico-química e química e mineralógica	51
Figura 10: Fluxograma de caracterização física.....	53
Figura 11: Fluxograma de caracterização química e mineralógica	56
Figura 12: Fluxograma de caracterização físico-química	58
Figura 13: Distribuição granulométrica da partículas minerais estudadas: (a): Amostra I; (b): Amostra II; (c): Amostra III; (d): Amostra IV	66
Figura 14: Capacidade de troca catiônica (CTC) das partículas minerais de basalto. Condições experimentais: T: 25 °C; t _{contato} : 24 h, [partículas]: 100 mg.L ⁻¹ V: 50 mL. Erro exp.: ± 0,02 meq NH ₄ ⁺ . g ⁻¹ (0,30 mg NH ₃ -N . g ⁻¹)	72

Figura 15: Potencial zeta das amostras de basalto em função do pH do meio. Condições experimentais: [partículas]: 10^{-3} mol.L ⁻¹ , T: 25 °C. Erro exp.: ± 0,7 mV	74
Figura 16: Mudanças de milho investigadas na estimativa de aplicação das partículas minerais de basalto na rochagem	79
Figura 17: Tamanho da parte aérea vegetal em função do tempo utilizando uma concentração de 2,5 g/kg _{solo} de partículas minerais.....	79
Figura 18: Tamanho da parte aérea vegetal em função do tempo utilizando uma concentração de 12,5 g/kg _{solo} de partículas minerais.....	80
Figura 19: Tamanho da parte aérea vegetal em função do tempo utilizando uma concentração de 50 g/kg _{solo} de partículas minerais.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Desenvolvimentos importantes na área científica para a retomada da utilização da técnica de rochagem	25
Tabela 2: Macro e micronutrientes em alguns tipos de rochas	29
Tabela 3: Locais de procedência das amostras estudadas.....	49
Tabela 4: Soluções extratoras e técnicas de análises aplicadas na determinação de macro e micronutrientes	61
Tabela 5: Massa específica e teor de umidade das amostras estudadas	64
Tabela 6: Análise granulométrica das amostras de partículas de rocha estudadas.....	65
Tabela 7: Área superficial das partículas de basalto. Erro exp.: $\pm 4,2 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$	66
Tabela 8: Principais fases minerais presentes nas amostras, analisadas por difração de raios-X	68
Tabela 9: Principais elementos representados através de seus óxidos	69
Tabela 10: Concentração dos principais macronutrientes que constituem as amostras.....	71
Tabela 11: Concentração dos principais micronutrientes que constituem as amostras.....	71
Tabela 12: Valores teóricos de capacidade de troca catiônica (CTC) das partículas de basalto.....	73
Tabela 13: Concentração de macro e micronutrientes (agronutrientes) disponibilizados pelas amostras para o meio aquoso	75
Tabela 14: Concentração de macronutrientes disponibilizados para o meio aquoso em ácido cítrico	76
Tabela 15: Valores médios de massa seca das raízes. Erro exp.: $\pm 0,02$	81

Tabela 16: Valores médios de massa seca da parte aérea. Erro exp.: $\pm 0,02$... 82

Tabela 17: Valores médios de tamanho das raízes 82

Tabela 18: Valores médios de diâmetro de colo 83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

ANDA - Associação Nacional para a Difusão de Adubos

CTC - Capacidade de troca catiônica

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Erro exp. – Erro experimental

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler

ICP-MS - Espectroscopia de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado

LTM – UFRGS - Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

NBR - Norma Brasileira

NPKs - Fertilizantes químicos compostos por nitrogênio, fósforo e potássio

T - Temperatura

t_{contato} – Tempo de contato entre partículas e meio aquoso

[partículas] – Concentração das partículas

V - Volume

® - Marca registrada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral	20
3.2 Objetivos Específicos	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Produtos e resíduos gerados na mineração de basaltos	21
3.2 Técnicas de Rochagem	24
3.3 Principais mecanismos envolvidos na rochagem	29
3.4 Caracterização de partículas minerais para usos na agricultura	34
3.5 Aplicação de minerais de basalto na rochagem	43
4 EXPERIMENTAL	48
4.1 Materiais e Reagentes	48
4.2 Metodologia	51
<i>4.2.1 Amostragem, homogeneização e quarteamento da amostra</i>	51
<i>4.2.2 Caracterização de minerais para rochagem</i>	52
4.2.2.1 Caracterização física	53
4.2.2.1.1 Umidade e massa específica	53
4.2.2.1.2 Classificação granulométrica	54
4.2.2.1.3 Área superficial	55
4.2.2.2 Caracterização química e mineralógica	55
4.2.2.2.1 Difração de raios-X	56
4.2.2.2.2 Fluorescência de raios-X	56
4.2.2.2.3 Espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS)	57
4.2.2.3 Caracterização físico-química	58
4.2.2.3.1 Capacidade de troca catiônica (CTC)	58
4.2.2.3.2 Potencial zeta	59
<i>4.2.3 Comportamento de partículas minerais de basalto em meio aquoso</i>	60
4.2.3.1 Disponibilidade de nutrientes para rochagem	60
4.2.3.2 Modificação do pH para calagem	62
<i>4.2.4 Estimativa da aplicação de partículas de basalto na agricultura</i>	62

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1 Caracterização de partículas minerais para rochagem	64
5.1.1 <i>Caracterização física</i>	64
5.1.1.1 Umidade e massa específica	64
5.1.1.2 Classificação granulométrica.....	64
5.1.1.3 Área superficial.....	66
5.1.2 <i>Caracterização química e mineralógica</i>	67
5.1.2.1 Difração de raios-X.....	67
5.1.2.2 Fluorescência de raios-X.....	69
5.1.2.3 Espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS)	70
5.1.3 <i>Caracterização físico-química</i>	72
5.1.3.1 Capacidade de troca catiônica (CTC).....	72
5.1.3.2 Potencial zeta	73
5.1.4 <i>Comportamento das partículas minerais de basalto em meio aquoso</i>	75
5.1.4.1 Disponibilidade de nutrientes para rochagem	75
5.1.4.2 Modificação do pH para calagem	77
5.1.5 <i>Estimativa da aplicação das partículas de basalto na agricultura</i>	78
6 CONCLUSÕES	84
7 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS	86
REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

A rochagem pode ser caracterizada como uma técnica de fertilização de solos, que facilita a recomposição de macronutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, enxofre e magnésio, além de micronutrientes como ferro, manganês, cobre, zinco, sódio, entre outros, a partir da adição de partículas de determinados tipos de rochas, também denominados agrominerais. Um exemplo comum desta prática é a calagem, que consiste na aplicação de calcário ao solo para elevar o pH do meio. Deste modo, a adição de rochas cominuídas viabiliza sua remineralização por meio da disponibilização de uma grande quantidade de nutrientes que foram perdidos ao longo de vários processos de desmineralização durante as diferentes culturas desenvolvidas (THEODORO, 2000).

Nos últimos anos, os estudos para redução da utilização dos fertilizantes químicos convencionais, compostos por nitrogênio, fósforo e potássio, os chamados NPKs, tem despertado grande interesse no Brasil. Isto se deve, aos diversos problemas ambientais causados por estes produtos quando frações não absorvidas pelas plantas são carregadas pela superfície do solo ou percoladas neste atingindo águas superficiais e subterrâneas e causando uma poluição, Um exemplo comum deste fato está relacionado à eutrofização das águas, causada pelo excesso de nutrientes ricos em fósforo e nitrogênio, que provocam o desenvolvimento de algas e, conseqüente, diminuição no teor de oxigênio dissolvido nos corpos d'água afetando os organismos do recurso hídrico. (LINHARES e GEWANDSZNAJDER, 2008).

Além destes problemas relacionados ao uso destes fertilizantes convencionais do tipo NPKs, existe uma demanda importante e notória de partículas minerais da mineração que poderiam substituir estes produtos, sendo ao mesmo tempo transformadas de resíduos para produtos. Neste caso, o setor da mineração, principalmente as pedreiras, enfrentam problemas relacionados às partículas minerais que após o beneficiamento encontram-se fora de especificação comercial e acabam tornando-se resíduos que necessitam disposições ambientalmente seguras.

Neste aspecto, as leis para controle ambiental na mineração tem se tornado cada vez mais restritivas, principalmente a partir do início dos anos 90 e,

este fato foi fortalecido com a criação de órgãos de fiscalização ambiental como a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (FEPAM) em 1991, que começou a atuar no controle do descarte de resíduos dos processos produtivos. Com isto, a disposição de resíduos minerais de forma ambientalmente correta tornou-se mais um custo para o setor de mineração. Por isso, a busca de alternativas tecnológicas viáveis para a disposição destes resíduos vem crescendo, sendo a rochagem uma dessas alternativas, pois utiliza os resíduos de operações de mineração, como a britagem, para fins agronômicos.

Dentre estes resíduos, as partículas finas de rocha, também denominadas pó de rocha, são o principal resíduo dos processos de britagem e corte de rochas na exploração mineral em pedreiras. No Brasil, nos últimos 10 anos tem se intensificado o estudo e aproveitamento deste resíduo como fertilizante, corretivo ou remineralizador do solo, como alternativa para reduzir os custos da produção agrícola e, também, uma forma de diminuir a dependência de insumos importados, sem comprometer a produtividade das lavouras (THEODORO, DUBOIS e LEONARDOS, 2002).

Também é importante salientar que no Brasil, cerca da metade das propriedades agrícolas tem menos de 10 ha, 89% menos de 100 ha e mais de 60% dos agricultores não empregam qualquer tipo de fertilizante. Por outro lado, mais de 50% dos fertilizantes consumidos no País (quase 90%, no caso do potássio) são importados implicando em maiores custos para o setor. Por isso, o estudo e desenvolvimento de novos fertilizantes têm crescido nos últimos anos e a rochagem possui grandes vantagens devido, principalmente, aos custos, transformação de resíduos em produtos, bem como ampliação de mercado para novos produtos de pedreiras (LOUREIRO, MELAMED E NETO, 2009).

Este uso de partículas de rocha como recuperador de solo está relacionado às suas características minerais e a sua interação com o meio no qual será aplicado, visando melhorar as condições de fertilidade do mesmo. De acordo com Theodoro (2000), essa forma de correção induz o processo natural de formação e fertilização, já que, a disponibilização dos nutrientes, gerados pela alteração dos minerais se dá de forma lenta e por períodos mais longos, o que garante a manutenção e o equilíbrio dos solos, com um custo de produto significativamente menor que os corretivos industriais. Segundo Theodoro e Rocha (2006), tais características permitem afirmar que a tecnologia da rochagem incorpora vários

princípios da agroecologia, como desenvolver uma agricultura de baixo impacto ambiental; eliminar ou minimizar o uso de poluentes químicos na forma de insumos; utilizar práticas que conservam o solo; a água e a biodiversidade, pois ajuda a diminuir os processos de lixiviação; favorecer o ciclo dos nutrientes no solo e utilizar tecnologias apropriadas às realidades locais específicas, promovendo o controle local dos recursos agrícolas.

Existe uma intensa utilização de rochas vulcânicas na produção de pedra, brita, e recentemente areias, como também blocos para a produção de placas para a construção civil no norte do Rio Grande do Sul, bem como em toda a região coberta pelos derrames da Formação Serra Geral, onde se concentram as amostras da presente pesquisa. O interesse no estudo do aproveitamento de partículas de menor granulometria (resíduos e produtos) geradas na britagem se inclui em uma série de processos e alternativas para qualificar e promover a sustentabilidade econômica e ambiental da extração de basalto, principalmente, para os pequenos mineradores, da região de Nova Prata, Rio Grande do Sul, onde a implantação de centrais de tratamento de rejeitos é uma necessidade nas usinas. Além disto, esta região é caracterizada por atividades de pequenos e médios agricultores que seriam altamente beneficiados com o novo produto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objeto geral do presente trabalho foi caracterizar os produtos e resíduos de rochas de basalto, produzidas em operações de britagem do distrito mineiro do município de Nova Prata-RS, visando uma avaliação para aplicação prática destes minerais em técnicas de rochagem.

2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos estão:

1. Realizar uma caracterização física, química, físico-química e mineralógica das partículas de basalto. Esta etapa inclui a determinação de parâmetros como distribuição granulométrica, umidade, massa específica, área superficial, capacidade de troca catiônica (CTC) e potencial zeta, bem como composição química elementar e mineralógica das partículas.
2. Avaliar a capacidade de disponibilização de nutrientes em meio aquoso. Neste caso, são considerados estudos em meio aquoso com avaliação dos íons transferidos para as soluções e do pH das mesmas.
3. Avaliar o desenvolvimento vegetal na rochagem. Esta etapa foi composta pelo cultivo de milhos na presença dos minerais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produtos e resíduos gerados na mineração de basaltos

Desde o início da colonização brasileira a atividade de mineração vem contribuindo com o desenvolvimento econômico e social do país inicialmente com os ciclos do ouro e pedras preciosas das “Minas Gerais” que se estenderam por todo o território brasileiro. Ao longo do tempo, foram descobertas e exploradas as grandes jazidas de ferro e manganês para exportação e de carvão para siderurgia, que configuraram fortes marcos da mineração no país. Atualmente, o Brasil tem se destacado mundialmente com a produção de minério de ferro, ouro, bauxita, manganês, caulim, gemas, estanho e tântalo e está entre os dez primeiros produtores de rochas basálticas, fosfáticas, cromo, ilmenita, grafita, diamante, níquel, terras raras, fluorita, rochas ornamentais, asbestos, quartzo (BARBOSA e GURMENDI, 2002).

No que diz respeito às rochas basálticas deve-se destacar sua participação como grande fornecedora de materiais de construção, a partir da importante atividade de pedreiras distribuídas em diversas regiões. Neste sentido, ao longo da história do país podemos verificar as grandes construções de pedras de talhe, os calçamentos de paralelepípedos, as pedras e cascalhos das fundações, a areia, a argila, entre diversos outros materiais para este setor (BARBOSA e GURMENDI, 2002).

Nesta área industrial, uma das principais operações para a produção dos minerais utilizados na construção civil é a britagem, que é caracterizada como um processo primário de cominuição e consiste na quebra da rocha, principalmente, pela ação de esforços compressivos ou de impacto. Os principais equipamentos utilizados na britagem em pedreiras são os britadores de mandíbulas e os giratórios. Nos britadores de mandíbulas os blocos de rocha, extraídos na lavra, são introduzidos no espaço entre as duas mandíbulas e, durante o movimento de aproximação são esmagados. Os fragmentos resultantes escoam para baixo, durante o movimento de afastamento das mandíbulas e são novamente esmagados quando a mandíbula móvel se aproxima. No momento em que as

partículas de rocha atingem o tamanho desejado, elas escoam pela parte inferior do britador, conforme ilustra a Figura 1 (CHAVES e PERES, 2003).

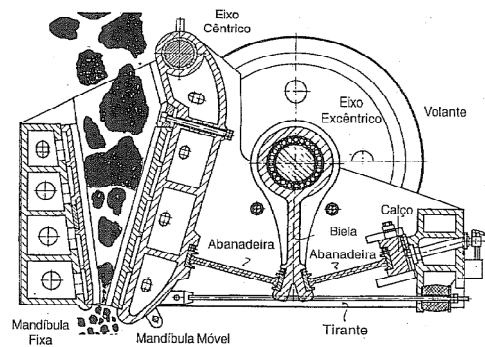


Figura 1: Britador de mandíbula.
Fonte: Chaves e Peres, 2003.

Já nos britadores giratórios os blocos de rocha são alimentados na seção de entrada, localizada na parte superior do equipamento. Estes britadores são compostos por um cone móvel interno e um manto fixo. O cone gira, se aproximando e se afastando das paredes internas do manto, durante o movimento de aproximação as partículas de rocha são esmagadas e, quando o cone se afasta elas caem para partes mais inferiores do equipamento, onde são novamente esmagadas pelo movimento giratório do cone móvel. Este processo é realizado até que as partículas de rocha atinjam a granulometria desejada. Um esquema de um britador giratório é ilustrado na Figura 2.

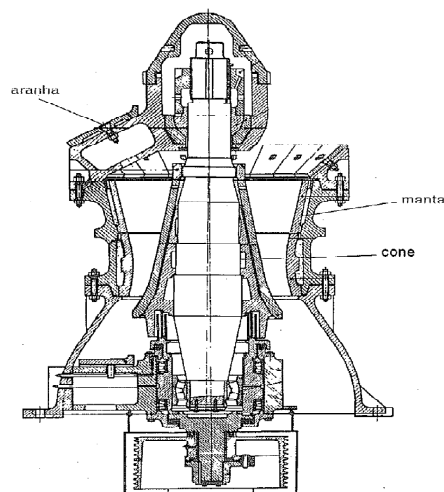


Figura 2: Britador giratório.
Fonte: Chaves e Peres, 2003.

O número de estágios de britagem depende do tamanho da alimentação e da qualidade do produto final, na Figura 3 é demonstrado um circuito clássico de cominuição em uma pedreira.

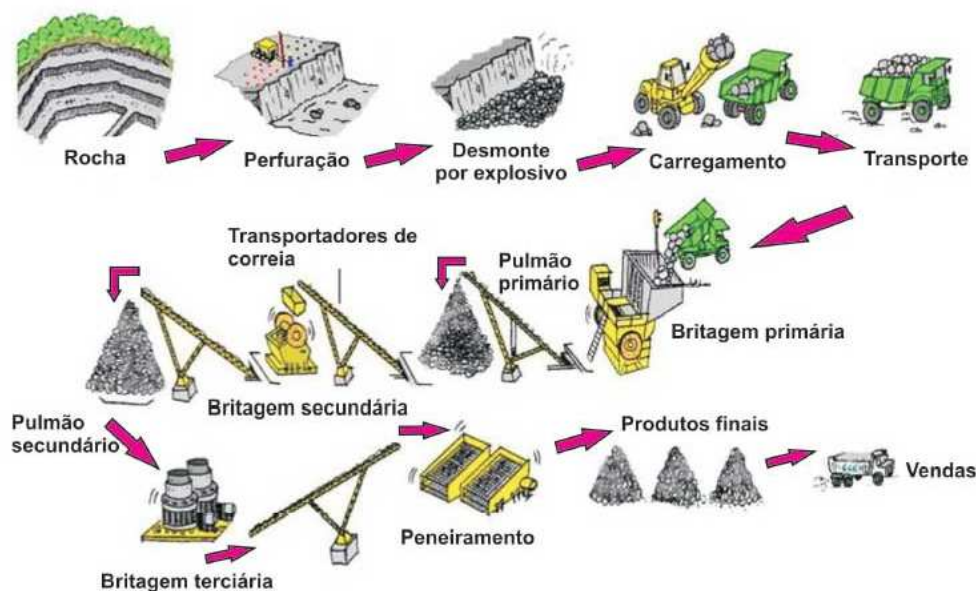


Figura 3: Circuito clássico de britagem, normalmente aplicado em pedreiras.
Fonte: Iramina et al, 2009.

O controle da granulometria e formato da brita passa a ficar mais preciso de acordo com as etapas secundária, terciária e quaternária (fabricação de areia). As aplicações mais comuns para as pedras britadas números 1 (de dimensões entre 4,8 mm e 12,5 mm) e 2 (entre 12,5 mm e 25 mm) são concreto estrutural e não estrutural. Já a classificação número zero (entre 0,05 mm e 4,8 mm) e o pó de pedra (<0,075 mm) são aplicados em blocos de concreto e pré-moldados, pavimentação e massa asfáltica (PEDREIRA SARGON, 2012). No entanto, apenas uma fração das partículas menores que 0,075 mm são utilizadas na construção civil, de modo que em algumas pedreiras esse material se torna resíduo, ocupando espaço e podendo ser fonte de poluição ambiental.

Por isso, apesar da contribuição da mineração no desenvolvimento do país, essa atividade, de maneira geral, parece não possuir, atualmente, uma boa imagem junto à sociedade, mesmo considerando a importância do uso dos bens minerais para a evolução e o avanço do conhecimento científico.

Atualmente com o conceito de desenvolvimento sustentável disseminado por toda a sociedade, é importante que a atividade mantenha o equilíbrio entre o

crescimento econômico, a conservação do meio ambiente e a qualidade de vida. Por isso a pesquisa para utilização dos rejeitos gerados durante a exploração mineral, como por exemplo, aqueles provenientes das operações em pedreiras como pedriscos, pó de rocha, entre outros se torna pertinente na busca de uma sustentabilidade para o setor mineral.

O potencial de uso de rochas basálticas como fertilizantes naturais provém das alterações que este mineral primário de origem magmática pode sofrer, quando aplicado ao solo, à ação de intemperismo químico, resultando em minerais secundários, como aluminossilicatos, óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos, que dão origem ao solo.

3.2 Técnicas de Rochagem

A *rochagem*, *remineralização* e *petrofertilização* são termos utilizados para designar a técnica de fertilização do solo empregando o processo natural de aplicação de partículas minerais (MACHADO et al., 2009). Esta técnica incorpora ao meio frações minerais pulverizadas permitindo recompor os nutrientes minerais em solos empobrecidos pelo intemperismo/lixiviação ou pelo uso inadequado e intensivo pela agricultura.

Neste caso, as partículas de rocha são utilizadas para aumentar as concentrações de nutrientes em solos deficientes destas substâncias, devido às lixiviações ou características naturais do ambiente. Assim, a rochagem é uma técnica fundamentada na busca do equilíbrio da fertilidade, na conservação dos recursos naturais e na produtividade naturalmente sustentável do solo. Sendo assim, esta é uma técnica alternativa ou complementar de fertilização, mais indicada para pequenas propriedades, especialmente na agricultura familiar.

Segundo Khatounain (2001), a utilização de rochas naturais cominuídas na fertilização dos solos é uma das técnicas mais antigas utilizadas na agricultura. Em comparação com os fertilizantes químicos, os NPK (nitrogênio, fósforo e potássio), que são altamente solúveis e concentrados, as partículas minerais liberam de forma gradativa uma variedade de nutrientes em uma concentração dependente da composição mineral da rocha (STRAATEN, 2006).

Mesmo sendo uma técnica antiga, a rochagem ainda não é amplamente utilizada, devido aos longos tempos requeridos para a produtividade quando

comparada à utilização de fertilizantes industrializados. No entanto, nos países em desenvolvimento, o alto custo desses fertilizantes e o baixo poder financeiro do pequeno agricultor, vêm ajudando a aumentar a utilização da rochagem como alternativa para o aumento da fertilidade dos solos.

Dentro deste contexto, podemos afirmar que as três últimas décadas do século XX e os primeiros anos do século XXI, foram marcados por importantes esforços no desenvolvimento científico para aplicação da rochagem por importantes autores da área, sendo alguns destacados na Tabela 1.

Tabela 1: Desenvolvimentos importantes na área científica para a retomada da utilização da técnica de rochagem.

Ano	Fato
1970	Edição do livro <i>The Survival of Civilization</i> , de John Hamaker Don Weaver
1985	Desenvolvimento do primeiro projeto de agroecologia efetuado no Canadá e na Tanzânia, financiado pelo <i>International Development Research Centre</i>
1991	Surgimento da revista <i>Remineralize the Earth</i>
1994	Realização do Fórum <i>Soil Mineralization na Sustainable Agriculture</i> , nos Estados Unidos
1998	Início de um programa de pesquisas sobre aproveitamento de pó de rocha na fertilização de solos agricultados, coordenado pela Universidade de Brasília juntamente com a Embrapa Cerrados e financiado pelo CNPq
2002	Apresentação, por Van Straaten, do relatório <i>Rocks for Crops: Agromineral of sub-Saharan Africa</i>
2004	Realização do <i>1st International Workshop 'Rocks for Crops'</i> , em Brasília e Patos de Minas
2007	Edição, no Canadá, do livro <i>Agroecology: the use of rocks for crops</i> de Peter Van Straaten

Fonte: Loureiro et al, 2009.

Conforme Amparo (2003), a utilização de partículas minerais pode apresentar algumas vantagens em relação aos fertilizantes solúveis, como por exemplo, a economia de mão-de-obra, pois as rochas possuem baixa solubilidade, não necessitando adubação frequente devido ao seu efeito residual prolongado, reduzindo assim a dependência de fertilizantes industrializados e diminuindo

custos. Outras vantagens podem ser a correção do pH, possibilitando seu reequilíbrio; a não salinização do solo evitando que a planta absorva potássio e nitrogênio em excesso, como ocorre com o uso de adubos solúveis e diminuição da fixação do fósforo solúvel pela presença de sílica e óxidos de ferro e alumínio. Também, as partículas minerais contribuem para o crescimento da atividade de microrganismos e de minhocas, aumentando a reserva nutricional do solo e a quantidade e qualidade do húmus e da matéria orgânica, refletindo no melhor desenvolvimento das culturas e proporcionando maior resistência das plantas à ação de pragas, doenças, secas e geadas, devido à melhora do estado nutricional do meio, diminuindo assim, o uso de pesticidas e herbicidas, ajudando a reduzir custos (AMPARO, 2003). Adicionalmente, deve-se salientar a importância de ser uma matéria-prima nacional, fácil de ser explorada e que se encontram distribuídas em todas as regiões do país.

A redescoberta e readaptação da prática de rochagem, com a utilização de rejeitos da mineração é uma técnica alternativa capaz de auxiliar na recuperação e na conservação dos solos, além de reduzir o uso de produtos químicos, especialmente aqueles incorporados em formas altamente solúveis, como é o caso das formulações NPK de adubos agrícolas.

Para se tornar fonte de nutrientes, as partículas de rocha devem sofrer processos de intemperismo. Esses processos são complexos e dependem principalmente da composição química e mineralógica da rocha, granulometria, tempo de reação e fatores do solo, como pH e atividade biológica. Portanto, a associação da rocha com materiais que apresentem grande atividade biológica, tais como os esterco animais, pode influenciar no processo de alteração dos minerais, porém pouco se sabe sobre o efeito desses materiais sobre a dissolução das rochas cominuídas (STRAATEN, 2002).

O uso de rochas trituradas, visando a melhoria da fertilidade do solo, tem sido objetivo de diversos estudos (NOVELINO et al., 1995; ESCOSTEGUY; KLANT, 1998). Quando se trata de resíduos da produção de britas e pó de brita (partículas menores que 0,075 mm), as opções para uso em atividades agropecuárias se tornam ainda maiores. Estes materiais apresentam potencialidades no fornecimento de alguns nutrientes tais como cálcio, magnésio, fósforo e alguns micronutrientes (com destaque para o ferro, manganês e cobre). Esses teores consideráveis de nutrientes são devido a sua origem proveniente de rochas

máficas, também conhecidas como ferro-magnesianas, classificadas como básicas, pelo fato de apresentarem concentrações menores de sílica total. Estudos realizados por Press et al. (2006) revela que as rochas máficas, como o basalto, são geralmente mais ricas em cálcio, magnésio e ferro e deficientes em potássio, sódio e sílica.

Dentre as rochas ígneas de natureza ferromagnesianas, o basalto é a mais abundante (MADUREIRA FILHO et al., 2003) ocorrendo com muita frequência em diversos estados brasileiros da região Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Autores como Theodoro et al. (2010), indicam o basalto para a prática da rochagem devido sua composição apresentar macronutrientes, micronutrientes e elementos benéficos que podem contribuir com o efeito residual por um longo período (HARLEY; GILKES, 2000).

Embora outros autores (BOLLAND; BAKER, 2000), questionam a eficiência das partículas de rocha como fonte de nutrientes devido à baixa solubilidade, uma série de estudos comprovam os efeitos positivos do uso de rochas cominuídas como fonte de nutrientes para o solo. Neste sentido, Knapik (2005) avaliaram o desenvolvimento de *Prunus sellowii* Koehne (pessegueiro bravo) e observaram que o melhor crescimento das mudas foi nos tratamentos com a utilização de fertilizantes a base de NPK, constituídos por sulfato de amônio, superfosfato simples e cloreto de potássio. As mudas produzidas com partículas de basalto não apresentaram crescimento similar àquelas adubadas com fertilizantes convencionais, constituídos por nitrogênio, fósforo e potássio, entretanto, no tratamento com partículas de rocha foi observado maior teor de nitrogênio (15,7 g.Kg⁻¹), fósforo (2,3 g.Kg⁻¹), cálcio (22,9 g.Kg⁻¹), magnésio (5,6 g.Kg⁻¹), boro (52,2 mg.Kg⁻¹), manganês (1001,0 mg.Kg⁻¹), e ferro (477,0 mg.Kg⁻¹), nas folhas, em comparação com os resultados dos mesmos nutrientes analisados nas plantas adubadas com fertilizantes a base de NPK: nitrogênio (13,9 g.Kg⁻¹), fósforo (2,2 g.Kg⁻¹), cálcio (18,4 g.Kg⁻¹), magnésio (4,4 g.Kg⁻¹), boro (45,2 mg.Kg⁻¹), manganês (976,0 mg.Kg⁻¹), e ferro (331,0 mg.Kg⁻¹).

Theodoro e Leonardos (2006) avaliaram o potencial de partículas de basalto em um solo arenoso e verificaram aumento do pH e dos teores de cálcio, magnésio, fósforo e potássio após o primeiro ano, permanecendo com teores maiores do que aqueles que não receberam a rocha, mesmo após cinco anos,

demonstrando assim, que a utilização de partículas de rocha na agricultura pode ser uma alternativa viável para a recuperação da fertilidade do solo.

A Figura 4 apresenta resultados de análises de fertilidade de algumas rochas amplamente disponíveis em diferentes regiões do país, conforme pesquisas realizadas por Theodoro (2011). As rochas que demonstraram os melhores resultados são aquelas de origem vulcânica, especialmente as mais jovens, como é o caso dos basaltos que ocupam grande parte da região sul e ocorrem também no sudeste centro-oeste (Formação Serra Geral). Tais rochas estão entre as mais testadas e com maiores possibilidades de fornecerem os nutrientes para os solos (especialmente fósforo, cálcio e magnésio e pelo baixo conteúdo de sílica). Outros tipos de rochas também são interessantes para o uso como remineralizadores de solos como, por exemplo, as rochas metamórficas que tenham sofrido processos hidrotermais com acúmulo de fósforo e cálcio e alguns tipos de rochas sedimentares, como por exemplo, as rochas fosfáticas.

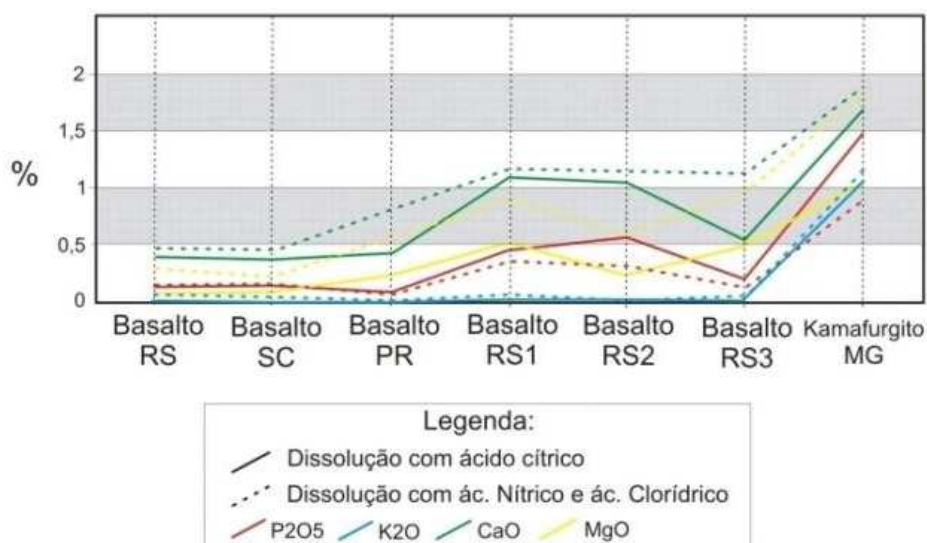


Figura 4: Variação da disponibilidade em termos percentuais de fósforo, potássio, cálcio e magnésio em rochas basálticas de diferentes regiões da Formação Serra Geral e dos tufo vulcânicos (kamafugitos) da Formação Mata da Corda .

Fonte: Bergmann, 2011.

Apesar do grande potencial que certas rochas representam para remineralizar os solos, uma barreira ainda precisa ser vencida – a velocidade de disponibilização dos nutrientes. Alguns mecanismos podem acelerar o processo de dissolução, tais como o uso de bactérias inoculantes e fixadoras de nitrogênio, o uso de material orgânico compostado com a rocha e a adubação verde

incorporada ao solo junto com as partículas de rocha (THEODORO e LEONARDOS, 2006).

3.3 Principais mecanismos envolvidos na rochagem

Uma alternativa notória ao uso de fertilizantes industriais é a utilização de partículas de rocha, por ter uma solubilidade mais lenta que os fertilizantes comerciais, as rochas se constituem em fonte de nutrientes para plantas cultivadas durante longos períodos, promovem o aumento da capacidade de troca catiônica dos solos, devido a formação de novos minerais de argila durante o processo de alteração das mesmas (MELAHMED et al., 2009). O modelo de rochagem constitui uma alternativa viável em termos econômicos e ecológicos devido ao baixo custo de processo de beneficiamento, que envolve apenas moagem das rochas usadas na composição do produto, e devido à liberação gradual de nutrientes que diminui as perdas por lixiviação e favorece uma ação de longo prazo do insumo aplicado.

Várias rochas podem ser utilizadas para a remineralização dos meios. Assim, Van Straaten (2007), citando A. A. Levinson (1974), apresentou os principais tipos de rochas com grande potencial de fornecimento de macro e micronutrientes, como é demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2: Macro e micronutrientes em alguns tipos de rochas.

Tipos de rocha	Nutrientes
Rochas ígneas ultramáficas	Cr, Co, Ni, Fe, Mn
Basaltos	Cu, Zn, Mn, Fe, Co, Ni, V
Granitos	Ba, Li, W, Rb, Mo, Cu, Zn, Cl, Si, K
Carbonatitos	F, Nb, K, P, Mg, Ca
Xisto negro	Cu, Zn, Cd, Se, Ni, Mo, V, Fe, B
Xisto vermelho/arenito	Se, As, Mo, Cu
Rochas ultramáficas	Mg, Ca
Rochas silicáticas alcalinas (sienitos e nefelinasienitos)	K
Gipsita e rejeitos industriais (principalmente fosfogesso)	S, Ca
Calcários (calcíticos e dolomíticos)	Ca, Mg

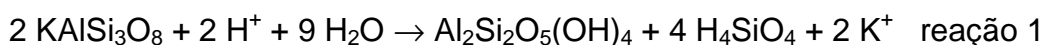
Fonte: Van Straaten apud Levison (2007).

De acordo com Loureiro (2009), os principais minerais utilizados para rochagem visando a calagem e a remineralização do solo são os calcários que liberam cálcio; os carbonatitos que liberam principalmente cálcio, magnésio e potássio; o gesso (natural e industrial) que disponibiliza cálcio e enxofre; as rochas fosfáticas que liberam cálcio e fósforo; os silicatos vulcânicos (basalto, ugandito, fonolitos, traquitos, etc) que possuem magnésio, cálcio, silício, ferro, entre outros possíveis de serem disponibilizados ao solo; os silicatos granulares (granitos, sienitos, nefelina, arenitos, etc), os minerais industriais como feldspatos, argilas, piroxênicos, anfibólios, vermiculita, biotita, zeólitas, etc e os rejeitos de resíduos de minas (de minerais não metálicos e de pedreiras), que podem liberar para o meio diversos tipos de macro e micronutrientes.

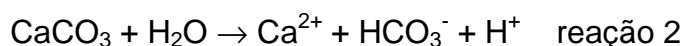
As rochas liberam seus nutrientes através de processos de decomposição, chamados de reações de climatização. A climatização envolve processos mecânicos e também reações químicas, como a expansão da água ao congelar ou inchação de minerais devido à hidratação. Nutrientes como sódio, cálcio e magnésio são liberados mais rapidamente pelas rochas, outros nutrientes, como o potássio e o silício tem uma liberação mais lenta, já o alumínio e ferro possuem uma liberação mais lenta ainda, isto se deve a oxidação destes minerais e formação de óxidos insolúveis, fazendo com que eles permaneçam na rocha, ao invés de serem retirados para a solução (KÄMPF et al., 2009).

A decomposição das rochas e consequente liberação dos nutrientes para o solo se deve a processos de dissolução, hidratação, ataque com ácidos, oxidação e complexação. Estes processos são ocasionados por agentes como o oxigênio livre, que é responsável pela formação de óxidos, particularmente de enxofre e ferro, gás carbônico e água que penetra nos poros, clivagens e fissuras das rochas, que dissolve os constituintes mais solúveis da rocha e os transfere para o meio, originando novas fases minerais com os constituintes menos solúveis que permanecem na rocha (KÄMPF et al., 2009). A água, com o oxigênio dissolvido nela, acelera as reações de oxidação dos minerais, pois dissolve pequenas quantidades dos mesmos. O dióxido de carbono dissolvido na água forma ácido carbônico, outro agente responsável pela decomposição das rochas. Esta leve acidez faz da água um solvente que auxilia na dissolução dos minerais presentes nas rochas. Outros materiais também aumentam a acidez da água como, por exemplo, os ácidos húmicos provenientes da decomposição do húmus do solo e

os ácidos nítrico e nitroso, originados na decomposição de materiais orgânicos e por ações bacterianas em solos. A água, além de proporcionar a dissolução dos minerais solúveis da rocha, pode participar diretamente de reações, como na formação de hidratos. Como pode ser observado, o intemperismo químico é essencialmente controlado pela presença de água, seja como agente, como solvente ou como meio de transporte. No intemperismo químico, há o predomínio de processos na fase aquosa do solo, como hidratação, hidrólise, oxidação e complexação. Desse modo, sem água as reações químicas de decomposição e liberação dos minerais das rochas são pouco intensas, como ocorre em regiões áridas (KÄMPF et al., 2009). Um exemplo de alteração de um mineral primário (feldspato microclínico) em mineral secundário (caulinita) que ocorre através de processos de intemperismo, com liberação de potássio para o meio, é descrito na reação 1.



A hidratação e conseqüente dissolução dos minerais, acontece através da adsorção de moléculas de água a superfície dos minerais e associação de íons OH^- e H_2O na esfera de coordenação dos minerais (KÄMPF et al., 2009). Através desse processo de intemperismo a rocha libera nutrientes para o meio, como é mostrado na reação de dissolução da calcita em água e conseqüente liberação de cálcio (reação 2).

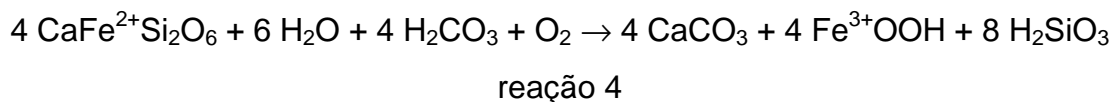


Outro processo importante de decomposição da rocha é a hidrólise, que consiste na reação de íons H^+ e OH^- e as fases minerais, produzindo o rompimento das ligações dos íons metálicos, como alumínio, ferro, cálcio, magnésio, entre outros, e o silício nos silicatos e o carbono nos carbonatos. O resultado é a substituição dos íons das partículas minerais pelos íons H^+ , com conseqüente desintegração da estrutura cristalina do mineral e liberação de nutrientes para o meio (KÄMPF et al., 2009). A reação 3 demonstra o processo simplificado de hidrólise do feldspato monoclínico e liberação de potássio para o meio.



Segundo KÄMPF et al. (2009), a oxidação é outro processo importante de intemperização de minerais, ela ocorre em rochas bem aeradas e em solos onde

há amplo suprimento e baixa demanda biológica de oxigênio. A oxidação acontece principalmente em minerais que possuem teores apreciáveis de ferro, como é o caso dos basaltos. O processo de intemperismo por oxidação é exemplificado pela reação 4 do piroxênio hedenbergita.



A complexação dos minerais da rocha é outro processo de intemperismo bioquímico. Ela ocorre quando há compostos orgânicos, como ácidos húmicos e fúlvico, substâncias orgânicas liberadas na decomposição de vegetais, substâncias sintetizadas por microrganismos e excretadas pelas raízes das plantas, com capacidade de se ligar aos íons metálicos, formando complexos e aumentando a solubilidade desses íons. Os principais íons solubilizados por este processo são os de ferro e alumínio, os de elementos traços, como manganês, cobre e zinco, e de metais tóxicos, como mercúrio, cádmio e chumbo (KÄMPF et al., 2009). Um esquema dos principais nutrientes liberados na rochagem é mostrado na Figura 5.

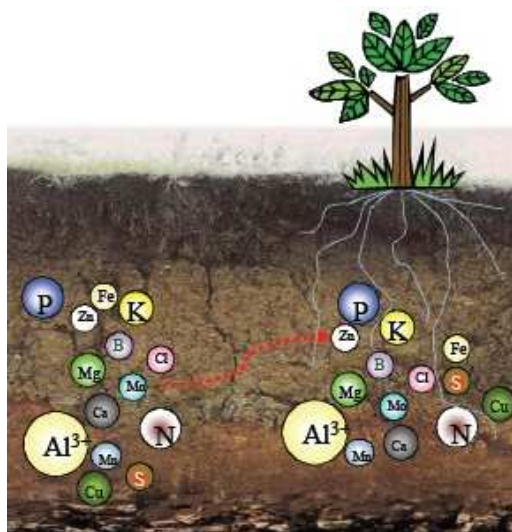


Figura 5: Nutrientes liberados ao solo pela rochagem.

Fonte: Reichert e Gulbiani, 2011.

Segundo Alleoni e Melo (2009), a deterioração das rochas se processa mais rapidamente e é mais acentuada em climas quentes e úmidos do que em climas áridos. Também é preciso salientar que os processos de decomposição não ocorrem somente na superfície, eles podem acontecer em qualquer profundidade, desde que haja a penetração de ar e água.

Os elementos são liberados dos minerais pelos processos de intemperismo, ou seja, as rochas são submetidas a processos que ocasionam a desintegração e decomposição da sua estrutura. Como a composição da rocha é bastante variada em espécies minerais, cada uma libera seus elementos em velocidades diferentes. Para que ocorra a liberação dos elementos que compõem as rochas, elas devem ser submetidas a alterações físicas e químicas. O intemperismo físico corresponde a uma desagregação da estrutura da rocha sem haver mudança na composição química, já a alteração química ocorre quando a estrutura dos minerais é quebrada (LUCHESE et al., 2002).

Os elementos minerais, macro e micronutrientes, ao lado de fatores tais como luz, água e gás carbônico constituem a matéria prima que as plantas utilizam para crescer e se desenvolver. Embora constituam apenas de 4 a 6% da matéria seca total, os elementos minerais além de serem componentes das moléculas essenciais, constituem estruturas como membranas e estão envolvidos com a ativação enzimática, controle osmótico, transporte de elétrons, sistema tampão do protoplasma e controle de permeabilidade. Devido a isto, é importante que os nutrientes sejam absorvidos e transportados para o interior das plantas, para que isso aconteça há a necessidade destes nutrientes estarem na solução do solo e em presença de água, para que os mecanismos de transporte por fluxo de massa e difusão ocorram naturalmente, evitando assim os sintomas de deficiência nutricional.

Os nutrientes minerais podem ser absorvidos pelas plantas de três maneiras distintas, por interceptação radicular, pela qual as raízes crescem, explorando o solo em todas as direções e, assim, entram em contato direto com os nutrientes a serem absorvidos; por fluxo de massa, em que a água absorvida pelas plantas, flui ao longo de um gradiente de potencial hídrico, arrastando para próximo da superfície radicular os nutrientes dissolvidos na solução do solo, os quais ficam disponíveis para a absorção; e por último, por difusão, que é o estabelecimento de um gradiente, ao longo do qual os íons se movem para chegar até a superfície radicular da planta e possibilitar a absorção dos nutrientes pela mesma (BONATO, 1998).

Segundo Bonato (1998), a disponibilidade dos elementos minerais no solo depende de vários fatores como pH, umidade, concentração do elemento no solo, aeração, matéria orgânica, entre outros. Além desses itens citados, deve-se

considerar que as raízes também possuem grande influência sobre a rizosfera, e assim, sobre a disponibilidade dos nutrientes, devido às modificações nas concentrações dos nutrientes e no pH da rizosfera.

3.4 Caracterização de partículas minerais para usos na agricultura

A caracterização das partículas de basalto para seu uso na rochagem é importante para determinar suas características físicas, químicas e mineralógica, definindo características importantes como tamanho das partículas, o potencial de troca de cátions e os minerais presentes no material, identificando assim, os macro e micronutrientes possíveis de ser disponibilizados ao solo.

i. Umidade e massa específica

A estrutura química da água como molécula polar lhe permite agir como solvente universal e adsorver às superfícies minerais e em outras moléculas de água. A partir desta característica surgem as forças de coesão e adesão as quais irão originar uma interface sólido-líquido-gás, cujo fenômeno da capilaridade é responsável pelo poder de penetração/retenção de água em meios porosos (CICHOTA, 2003).

A umidade de partículas minerais pode ser determinada por métodos gravimétricos e se baseiam na pesagem de amostras de alíquotas de rocha úmida e depois de seca (GARDNER, 1986). A diferença entre as duas medidas representa a massa de água presente na amostra. Esta quantidade de água pode causar hidrólise nos minerais da rocha, sendo responsável por sua decomposição e conseqüente liberação de nutrientes para o solo.

A água também pode causar a hidratação da rocha, que consiste na adição da molécula completa de água à estrutura do mineral causando uma expansão das partículas. Esta água de hidratação pode ser retirada do mineral por aquecimento acima do ponto de ebulição da mesma. Alguns minerais podem se hidratar e desidratar dependendo da umidade presente, ou seja, após uma chuva intensa eles podem se dilatar e inchar oprimindo o solo ou as rochas e na seca podem se contrair e fragmentar (ALLEONI e MELO, 2009).

Diante destes fatos, é possível constatar a importância da determinação do teor de umidade das partículas minerais, pois valores elevados de água podem causar o intemperismo, acelerando a degradação de nutrientes importantes para a rochagem.

A massa específica é um importante parâmetro para a determinação do teor de vazios na rocha. Em uma rocha sem poros (portanto sem fluidos), a massa específica total pode ser descrita como a soma das massas específicas de seus minerais constituintes, ponderada pelo volume total de cada fase mineral.

A massa específica é uma característica física dos materiais, que interfere na aeração, capacidade de retenção de umidade e agregação ao substrato (WENDLING; GATTO, 2002).

Segundo Bonnet et al. (1995), a massa específica se relaciona diretamente com o grau de compactação e agregação de partículas e com a textura do material. Considerando a utilização das partículas de basalto na agricultura, quanto menor for a massa específica, menores serão as restrições para o crescimento de raízes e melhor será sua estrutura.

i.i. Classificação granulométrica

Os produtos e resíduos da cominuição em pedreiras possuem partículas de diferentes tamanhos em proporções variadas. A determinação do tamanho destas e suas respectivas porcentagens de ocorrência podem ser obtidas por técnicas de análise granulométrica, sendo as principais por peneiramento e por difração à Laser.

De acordo com Andreoli (1999), a partir das proporções entre as frações granulométricas de areia, silte e argila, obtém-se a textura do material, o qual afeta a movimentação da água no meio. Quanto mais fina for a textura, mais lenta será a dinâmica da água e maior será sua retenção. Sendo assim, quanto mais finas as partículas de basalto utilizadas, maior a dificuldade de infiltração da água.

A granulometria fina das partículas de basalto, também pode provocar um efeito cimentante, o que para Kämpf (2002), implica no fechamento dos poros do solo, causando uma maior compactação, influenciando também na densidade final do solo utilizado no plantio.

Inocêncio et al. (2009), avaliaram a distribuição granulométrica de pós de basaltos utilizados para rochagem em solos do Mato Grosso do Sul e concluíram que, com a aplicação de basalto triturado houve um aumento pouco expressivo nos teores de potássio trocável, e que os maiores incrementos de cálcio e magnésio trocáveis foram nos solos com menores concentrações destes nutrientes.

i.i.i. Área superficial

A área superficial ou área específica de superfície é um importante parâmetro para muitas utilizações de materiais dispersos em meio aquoso, tanto em aplicações científicas quanto industriais. No caso do basalto é importante determinar esta característica, pois quanto maior a área superficial das partículas de rocha, maior será seu potencial de troca iônica, devido a maior superfície exposta ao contato com o meio (solo/água/raízes). Diversos métodos descrevem procedimentos de determinação desta característica, entretanto, diferentes metodologias podem fornecer valores distintos, principalmente, se o material for analisado em meio seco ou em meio aquoso (VAN DEN HUL e LYKLEMA, 1968).

De acordo com Dekker (1997), a área superficial, S_w , é uma propriedade representada pela área superficial total de partículas contidas em uma unidade de massa e pode ser expressa em $m^2.kg^{-1}$. O método da adsorção de azul de metileno é o mais usual para determinação deste parâmetro devido à maior praticidade e menores custos envolvidos. Neste caso, a adsorção é proporcional à área interfacial sólido-líquido, de modo que as quantidades adsorvidas são significativas quando o sólido apresentar uma elevada superfície específica.

i.v. Composição química e mineralógica

O basalto estudado neste trabalho é proveniente do município de Nova Prata, no Rio Grande do Sul, localizado na Formação Serra Geral e faz parte da Província Magmática Paraná-Etendeka, uma estrutura com 1,2 milhões de km^2 , que se desenvolveu a partir do Paleozoico, há aproximadamente 400 milhões de anos (ALMEIDA, 1981; CORDANI et al, 1984; CONCEIÇÃO et al. 1988, ZALÁN et al. 1987,1990).

A caracterização química e mineralógica das partículas de basalto para seu uso na rochagem é importante para determinar e quantificar os minerais presentes no material e principais elementos que poderão atuar como macro e micronutrientes no cultivo de vegetais.

Dentre as várias técnicas de caracterização mineralógica, a difração de raios-X é a mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes em rochas. Isto é possível porque nos cristais, os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-X. (ALBERS et. al., 2002). Assim, ao incidir um feixe de raios-X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração. A difração de raios-X ocorre segundo a Lei de Bragg, a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram (característicos para cada fase cristalina) (ALBERS et. al., 2002).

Dentre as vantagens desta técnica, pode-se destacar a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados obtidos (pois o perfil de difração obtido é característico para cada fase cristalina), a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa destas fases (ALBERS et. al., 2002).

Teixeira (2010) estudou a aplicação da rocha serpentinito como corretivo de acidez do solo. No estudo aplicou a análise de difração de raios-X para caracterizar os minerais presentes nas partículas de rocha, concluindo que o aproveitamento dessa rocha como corretivo de solos ácidos é possível, viabilizando assim, a utilização do estéril de uma mina de cromita, minimizando o impacto ambiental causado pelo acúmulo desse resíduo.

Uma caracterização complementar pode ser obtida por técnicas que permitam identificar e quantificar a composição elementar das partículas. Dentre estas técnicas a fluorescência de raios-X e a espectroscopia de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) são as mais utilizadas (ALBERS et. al., 2002).

A fluorescência de raios-X é uma técnica não-destrutiva que determina quantitativamente os elementos presentes, na forma de óxidos, em uma determinada amostra, através da aplicação de raios-X na superfície da amostra e a posterior análise dos raios-X emitidos.

Toledo (2011), caracterizou através de difração de raios-X e fluorescência de raios-X, os nutrientes presentes em verdetes da região do Cedro de Abaeté em Minas Gerais. A partir dos teores de potássio obtidos nas amostras, concluiu que as partículas da rocha podem se tornar uma fonte alternativa para insumos agrícolas.

A espectroscopia de massa é uma técnica que determina os elementos químicos que compõem a amostra. Na espectrometria atômica de massa, as amostras são atomizadas, e os átomos gasosos são convertidos em íons positivos e separados com base em suas razões massa-carga (SKOOG et al., 2002). As vantagens desta técnica são seus baixos limites de detecção e alto grau de seletividade, razoável precisão e exatidão, rápida detecção das razões isotópicas, utilização de pequeno volume de amostra e também, capacidade multielementar, podendo determinar aproximadamente 90% dos elementos com limites de detecção na faixa de 0,1 a 0,001 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (ppb) em soluções aquosas (VEIGA, 2000).

Assim, estudos na área de rochagem utilizam esta técnica como ferramenta para caracterizar os minerais. Um exemplo desta aplicação são os estudos de Teixeira (2010) que utilizou a espectrometria de massas para analisar a composição química da rocha serpentinito de um estéril de uma mina de cromita localizada na Bahia. Este autor demonstrou a possibilidade de o aproveitamento da mesma como corretivo de solos ácidos (calagem), minimizando assim, o impacto ambiental causado pelo acúmulo desse resíduo.

v. Capacidade de troca catiônica (CTC)

A capacidade de troca catiônica (CTC) é considerada uma propriedade importante para caracterizar agrominerais, pois expressa a habilidade do material em trocar cátions. Esta característica é fundamental para proporcionar a troca de nutrientes entre as partículas minerais e o meio solo/água/raízes.

A CTC pode ser determinada a partir de estudos laboratoriais em batelada em escala de bancada, visando a obtenção de avaliações empíricas desta propriedade. Segundo Metcalf e Eddy (2003), a capacidade de troca catiônica é medida através de modificação (ativação) do material para uma forma conhecida. Esta modificação pode ser realizada através do contato do material adsorvente

com um ácido forte visando obter todos os sítios de troca na forma de H^+ ou com uma solução forte de NaCl para colocá-los na forma de Na^+ , de modo que, posterior à esta transformação, uma solução de concentração conhecida (sal de amônio) pode ser adicionada até que a troca seja estabelecida por completo e o valor da capacidade de troca pode ser determinado, sendo que no caso da determinação ácida, o material é titulado com uma base forte.

Gillman (1980) e Gillman et al. (2001) na Austrália, ilustraram os efeitos positivos da aplicação de altas concentrações de rocha basáltica em solo com baixa fertilidade. No caso de Gillman (1980), após 12 meses de incubação foi observado um aumento significativo no pH e na capacidade de troca de cátions, constatando que o efeito foi mais pronunciado com a diminuição da granulometria e o aumento do tempo de contato entre o material e o solo. Gillman et al. (2001) avaliaram o comportamento de sete solos de Queensland, na Austrália, incubados com diferentes concentrações de partículas de basalto (0, 1, 5, 25 e 50 t.ha⁻¹), tendo observado aumentos expressivos no pH, na CTC e nos teores de cátions alcalinos.

v.i. *Potencial zeta*

O potencial zeta é função da carga superficial das partículas formada a partir da dupla camada elétrica (Hunter, 1981) quando estas são expostas a um meio aquoso. Esta característica é função principalmente do meio, da natureza e da composição das partículas. Esse potencial pode ser determinado experimentalmente e reflete a carga efetiva nas partículas, por isso, ele se correlaciona com a repulsão eletrostática entre elas e com a estabilidade da suspensão.

Ânions como NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , originados na decomposição das rochas, se prendem fracamente às micelas do solo, enquanto $H_2PO_4^-$ e outros são fortemente atraídos e retidos. A proporção dos diferentes íons no meio é determinada por vários fatores tais como: carga dos cátions adsorvidos, sua proporção no complexo de troca iônica e as propriedades dos íons trocados. Estes íons, e a determinação da sua mobilidade no meio são importantes para a os processos de absorção dos nutrientes pelas plantas (BONATO et al, 1998).

Os óxidos metálicos, que compõem a estrutura cristalina das rochas, apresentam superfícies eletricamente carregadas em meio aquoso, isto provoca uma distribuição iônica na região próxima à superfície, que dá origem a formação de uma dupla camada elétrica. Essa dupla camada é formada pela superfície carregada, os contra-íons e os co-íons em uma forma difusa no meio. Devido a isto, surge um potencial elétrico que inicia na superfície carregada e decai exponencialmente até tornar-se constante, este potencial é chamado de potencial zeta, e se localiza entre a superfície carregada e a solução. Variando-se o pH do meio pode-se medir a propensão de uma superfície em tornar-se neutra, positiva ou negativamente carregada (LIMA e QUIRINO, 2003).

A determinação do potencial zeta é importante, pois através dela é possível prever em que valores de pH o processo de adsorção em meio aquoso é mais efetivo, ou seja, é possível prever e controlar prováveis interações físicas entre adsorvente e adsorvato. Neste sentido, Lima e Quirino (2003) determinaram a curva de potencial zeta da hematita e do quartzo, condicionados somente com água destilada e obtiveram valores de potencial zeta mais negativos para o quartzo. Assim, os autores concluíram que a atração de cátions pelo quartzo é bem maior que pela hematita.

v.i.i. Disponibilidade de íons nutrientes e modificadores de pH

As rochas contêm vários elementos químicos, mas nem todos são essenciais ao crescimento das plantas, e alguns podem ser tóxicos. Entretanto, o teor total desses elementos não reflete a disponibilidade para as plantas, pois grande parte dos nutrientes está em formas insolúveis ou de lenta dissolução (compostos de alta estabilidade).

No estudo de estimativa de disponibilidade de nutrientes são utilizados métodos de extração que apresentam alta correlação com a absorção de nutrientes pelas plantas. A intensidade de extração pode variar desde a fração solúvel em água até o teor total. Para os nutrientes minerais fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, zinco e enxofre, em geral, são utilizados agentes extratores de intensidade média como sais diluídos e ácidos fortes diluídos (THEODORO, LEONARDOS e ALMEIDA, 2010).

Estudos recentes desenvolvidos por Theodoro, Leonardos e Almeida (2010), analisaram o potencial para disponibilização de nutrientes minerais de algumas rochas da formação Serra Geral, para utilização das mesmas em rochagem. Nestes estudos, os autores investigaram doze tipos de rochas do tipo basaltos, fonolitos, filitos, piroxenitos e tufos vulcânicos, coletadas em várias partes do país. Dentre as rochas analisadas, oito eram basaltos, coletados nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, sendo todos provenientes da Bacia do Paraná. Destas, quatro amostras foram de basalto pertencentes à formação Serra Geral. Neste caso, as investigações utilizaram amostras com granulometria menor que 0,074 mm (#200), diluídas em ácido cítrico a 2%. A amostra Basalto RS, disponibilizou 0,14% de P_2O_5 , 0,06% de K_2O , 0,48% de CaO e 0,30% de MgO, a amostra classificada como Basalto RS1, liberou 0,36% de P_2O_5 , 0,06% de K_2O , 1,16% de CaO e 0,90% de MgO, já a amostra Basalto RS2 disponibilizou 0,32% de P_2O_5 , 0,03% de K_2O , 1,14% de CaO e 0,58% de MgO e a amostra nomeada como Basalto RS3 liberou 0,13% de P_2O_5 , 0,04% de K_2O , 1,12% de CaO e 0,97% de MgO. Com base nestes resultados os autores concluíram que os basaltos são uma opção interessante para serem utilizados em rochagem, já que disponibilizam ao solo macronutrientes importantes, mas ressaltam que estes nutrientes não são disponibilizados prontamente como no caso dos fertilizantes industriais de alta solubilidade, eles são liberados lentamente no solo ao longo de anos.

Estes estudos realizados por Theodoro, Leonardos e Almeida (2010), concordam com dados de composição química média dos basaltos e riolitos da Bacia do Paraná relatados por Roisemberg e Vieiro (2002), para rochas ácidas e básicas, cujos valores totais de óxidos de nutrientes na rocha foram de 0,33 - 0,58% de P_2O_5 , 3,79 - 0,68% de K_2O , 3,11 - 9,89% de CaO e de 1,26 - 5,44% de MgO. Dentro deste contexto, Michelin (2007) estudou rochas decorrentes de derrames da formação Serra Geral na região central do Rio Grande do Sul, distinguindo em três tipos petrográficos: basaltos, basalto andesito e riolito. Os resultados deste estudo, mostraram que o teor de P_2O_5 não mostra correlação com a acidez da rocha, variando de 0,1 - 0,2%; a concentração de K_2O apresenta valores maiores nos riolitos (5,2%) e menores nos basaltos (1,5%); já o CaO e MgO apresentaram valores maiores nos basaltos (10% e 6%) e menores nos riolitos (1,5% e 0,5%).

Theodoro e Leonardos (2006) avaliaram o potencial de utilização de partículas de rocha vulcânica no município de Mata da Corda, Minas Gerais, em um solo arenoso derivado do sedimento Bambuí. Os autores constataram aumento do pH e nos teores de cálcio, magnésio, fósforo e potássio no solo após o primeiro ano, com tendência para estabilizar-se e gradualmente diminuir após o segundo ano, permanecendo com teores maiores aos das parcelas que não receberam a rocha, mesmo após cinco anos da implantação do experimento.

Em estudo realizado em laboratório com pó de basalto, como subproduto da produção de britas, oriundo de pedreira do município de Dourados, Mato Grosso do Sul, Novelino et al. (1995) constataram que a aplicação do referido material com granulometria menor que 0,297 mm e nas concentrações de 0, 20, 40, 60 e 80 t.ha⁻¹ promoveu, embora de modo pouco expressivo, a redução nos teores de alumínio trocável e aumentos nos teores trocáveis de cálcio e magnésio, bem como na elevação da saturação por bases de dois latossolos vermelhos.

Em experimentos desenvolvidos em casa de vegetação na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com o objetivo de avaliar a disponibilidade de nutrientes no solo, em função da aplicação de 0; 5; 10; 25; 50 e 100 t.ha⁻¹ de basalto cominuído a um latossolo vermelho-amarelo e um latossolo vermelho, incubados durante 30, 150 e 300 dias, Escosteguy e Klant (1998) constataram que, em geral, as doses testadas proporcionaram pequenos acréscimos nos valores de potássio, cálcio, magnésio e pH. Os autores concluíram que a pequena liberação dos nutrientes das rochas indica que tais materiais não podem ser utilizados como a principal fonte de nutriente às plantas.

Estudos de laboratório realizados por Blum et al. (1989) mostram que as taxas de liberação de nutrientes das rochas acontecem de forma muito lenta. Segundo Bolland e Baker (2000), a eficácia das partículas de rocha como fonte de nutrientes para o solo é questionada devido à baixa solubilidade e pela necessidade de aplicar grandes quantidades das mesmas no meio para se obter respostas positivas. De acordo com (OSTERROHT, 2003), este fato é devido a dissolução das partículas de rocha ser um processo muito lento e complexo, dependendo de fatores como a composição química, mineralógica e granulométrica das partículas, o pH e a atividade biológica dos solos e o tempo de exposição.

Von Fragstein et al. (1988) observaram que os basaltos apresentam taxas de liberação de elementos minerais mais rápidas quando comparadas ao granito. A granulometria da rocha tem grande influência, pois quanto maior a área superficial exposta ao ataque dos agentes químicos, físicos e biológicos do intemperismo, mais rápida é a alteração do material (OSTERROHT, 2003).

As partículas de rocha, geralmente, provocam o aumento nos valores de pH que é uma característica importante, pois a elevação do pH do solo, além de estimular a atividade microbológica, pode diminuir as perdas de K por lixiviação, devido à criação de cargas negativas (QUAGGIO, 2000).

As partículas de rochas alcalinas têm como característica importante promover o aumento no pH do solo, como demonstrado por Gillman et al. (2001) pela aplicação de rochas basálticas em solo de baixa fertilidade química de floresta, como citado anteriormente.

3.5 Aplicação de minerais de basalto na rochagem

Os basaltos são rochas vulcânicas abundantes no planeta e formam derrames extensos de lava em muitas regiões. Pertencem à categoria das rochas ígneas, as quais são formadas pelo resfriamento e conseqüente solidificação do magma, que é constituído, principalmente, por óxidos de silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio e potássio. Assim, as rochas de basalto são constituídas por minerais de silício, alumínio e ferro, na forma de piroxênios, como a augita, plagioclásios, como a labradorita e magnetita. A composição química aproximada do basalto é de 43 – 47% de SiO_2 , 11 – 13% de Al_2O_3 , 10 – 12% de CaO e 8 – 10% de MgO, além de outros óxidos que estão presentes em percentagens inferiores a 5%.

No Rio Grande do Sul, a extração do basalto ocorre principalmente na região da serra. Nas pedreiras da região de Nova Prata, a extração iniciou em meados da década de 30, e as primeiras indústrias de beneficiamento surgiram em 1970, com a produção de pedra de talhe, agregados e blocos para produção de chapas. Essa produção, ainda hoje, é basicamente artesanal, empregando marretas, alavancas e talhadeiras. Anualmente são produzidos cerca de 60.000 m³ de produto acabado, como paralelepípedos, lajes, pedras para alicerces, entre outros. Um levantamento realizado pelo sindicato do setor, estima que sejam

gerados anualmente 52.400 m³ de rejeitos na atividade de mineração de basalto no município. Uma parte desse rejeito é coletada e transformada em brita e a outra permanece no local da pedreira, constituindo-se em passivo ambiental (KAUTZMANN, et al., 2007).

No processo de britagem dos rejeitos da fabricação de lajes e paralelepípedos, são gerados resíduos de pó de rocha que estão sendo, cada vez mais, reaproveitado como agregados de areia para a construção civil. Neste caso, as frações mais finas deste pó de basalto ainda não são muito utilizadas e acabam sendo descartadas, de modo que importantes quantidades de energia são perdidas na sua cominuição, além de eventuais impactos ambientais causados pelo seu descarte.

O estudo do aproveitamento da porção fina, não utilizada pelas pedreiras, se inclui em uma série de processos e alternativas para qualificar e promover a sustentabilidade econômica e ambiental da extração de basalto, principalmente, para as empresas mineradoras de pequeno porte, onde a implantação de centrais de tratamento de rejeitos é um dos objetivos almejados. Paralelamente, produtos desta atividade podem também ser estudados visando uma ampliação de mercado para este setor da mineração.

De acordo com um levantamento realizado em 2005, no município de Nova Prata existia 647.000 m³ de rejeitos em depósitos regulares e áreas de passivo ambiental, com aproveitamento de 20% em instalações de britagem (KAUTZMANN, et al., 2007) para a produção de brita, com a geração de pó de rocha.

No cenário da produção e uso de fertilizantes, de acordo com dados divulgados pela Associação Nacional para a Difusão de Adubos (ANDA), o Brasil importou 22,4 milhões de toneladas de matérias primas para a produção de fertilizantes em 2009. Em 2010 foram importados 24,5 milhões de toneladas e em 2011 foram 28,3 milhões de toneladas, sendo um aumento de 15% em relação a 2010. Adicionalmente, o Brasil produz cerca de 1% e consome 2% do nitrogênio produzido no mundo, no caso do fósforo, produz 4% e consome 8%, já o potássio o país produz 1% do total mundial e consome 13%. Assim, o país ocupa o quarto lugar no *ranking* mundial do consumo de fertilizantes, porém não é formador de preços, pois participa com apenas 2% da produção mundial.

Considerando este mercado consumidor, são previstos investimentos de cerca de 12,9 bilhões de dólares para o setor de fertilizantes brasileiros, sendo 5,7 bilhões para o setor de fósforo, 5,4 bilhões para o setor de nitrogênio e 1,8 bilhões para o de potássio, pois dados da ANDA (Associação Nacional para a Difusão de Adubos) mostram que as importações de nitrogênio, fósforo e potássio estão em torno de 75%, 50% e 90%, respectivamente (ANDA, 2012).

Segundo Theodoro (2000), o custo do pó do basalto é quase 20 vezes menor do que a aplicação de insumos convencionais (fertilizantes sintéticos), pois quase todas as regiões brasileiras possuem depósitos de rochas vulcânicas, ricas em nutrientes, como fósforo, cálcio e magnésio. Os efeitos gerados pela adubação utilizando partículas de rocha pode se estender por até quatro ou cinco anos consecutivos devido à disponibilização lenta dos nutrientes. Além disto, o teor de umidade é maior nas áreas onde se aplicam as partículas de rochas, demonstrando que as argilas presentes nas rochas possuem grande capacidade de retenção de água, favorecendo assim, o desenvolvimento das raízes das plantas.

A fertilização do solo com partículas de rocha, que muitas vezes são descartadas em pedreiras, pode ser responsável por um solo rico em nutrientes por mais tempo. No Brasil os experimentos começaram em 1997, no assentamento Fruta D'Anta em Minas Gerais, onde foram desenvolvidos estudos por Theodoro. Neste estudo foram comparadas duas parcelas de solo em vinte lotes do local. Em uma parte foi aplicada a fertilização convencional e em outra a técnica de rochagem. Ao longo de quatro anos, o desenvolvimento das plantas e as modificações do meio foram monitoradas. Os resultados comprovaram que ocorreu maior produtividade nas culturas de ciclo longo, como a cana-de-açúcar e a mandioca. Para culturas de ciclo curto, como o milho e o arroz, o resultado igual ao obtido com os fertilizantes industriais. Com esse estudo foi possível concluir que a utilização da rochagem é viável e traz um ganho econômico significativo, pois ao final de quatro anos houve economia na compra de fertilizantes (THEODORO, LEONARDOS et al, 2006).

Nichele (2006), avaliando o potencial do pó de basalto, proveniente dos municípios de Ponte Alta e de São José do Cerrito, em Santa Catarina, como fonte de liberação de nutrientes para o cultivo de feijoeiro, verificou que após o primeiro ano todos os tratamentos com basalto proporcionaram produtividades

similares as dos tratamentos com calcário e com calcário e adubo convencional, além do aumento nos teores de Ca e Mg do solo. Almeida et al. (2004), em experimentos com o mesmo pó de basalto, isolado e associado ao esterco bovino, em cultivo de feijão, observaram que os maiores rendimentos foram obtidos com 2 t.ha⁻¹ de basalto, seguido do tratamento com 4 t.ha⁻¹ de basalto associado ao esterco bovino.

Misturas de pó de rochas já são comercializadas no Brasil, como a farinha de rocha MB-4 (empresa MIBASA de Arapiraca, Alagoas), farinha de rochas da empresa Ipirá Fértil (Ipirá, Bahia) e Itáfertil de Bom Sucesso (Itararé, São Paulo). Resultados positivos com o emprego destes produtos foram observados em soja e em melão na região de Petrolina, em Pernambuco. Na cultura da cana-de-açúcar foi obtido aumento na produção agrícola de 43%. Com uva Itália relata-se aumento de produção de 33%. Em arroz irrigado foi obtido aumento de produção de 20%. No abacaxi, os frutos apresentaram peso médio maior, e maior percentual de frutos com peso acima de 1.400 gramas (BARRETO, 1998).

Kiehl (2002), afirma que a utilização de partículas de basalto como corretivo do solo trouxe resultados positivos, melhorando a nutrição das plantas, podendo ser uma boa alternativa aos agricultores. Segundo o autor, a maior vantagem é que o pó de basalto pode ser encontrado em várias pedreiras comerciais, onde, muitas vezes, é tratado como rejeito, o que torna o pó de rocha um recurso mais barato em comparação aos fertilizantes industrializados, na adubação de solos com baixos níveis de nutrientes.

Segundo Theodoro (2003), nas culturas pesquisadas pela autora, as raízes das plantas cultivadas com partículas de rocha se desenvolveram em maior quantidade, as folhas ficaram mais exuberantes e ocorreu um aumento na umidade do solo, devido à argila que compõe as rochas utilizadas no estudo. A rochagem também aumentou o pH e elevou os níveis de potássio, cálcio e magnésio no solo. A autora salienta que a utilização de rochas para recuperação do solo trás benefícios econômicos e ambientais, pois fertilizam sem degradar o meio, ao contrário do que ocorre com os fertilizantes industriais.

Diante de todas estas informações, acredita-se que o uso de partículas minerais de basalto produzidas no município de Nova Prata do estado do Rio Grande do Sul, apresenta grande potencial de aplicação nas atividades de agricultura desta região, proporcionando grandes benefícios aos pequenos e

médios agricultores com conseqüente desenvolvimento do setor agroindustrial. Adicionalmente, problemas ambientais enfrentados por pedreiras localizadas nesta região serão resolvidos de modo que resíduos poderão ser transformados em produtos e demais produtos apresentarão maiores possibilidades de mercado ampliando a área econômica desta atividade de mineração. Ambos os fatos mostram o potencial da rochagem a partir da aplicação de basaltos para o alcance de um desenvolvimento sustentável para dois importantes setores da região sul do país.

4 EXPERIMENTAL

4.1 Materiais e Reagentes

O presente trabalho utilizou quatro amostras de rochas de basalto (Figura 7), provenientes das empresas Basel Indústria e Comércio de Minerais, Concretul Britagem, Sindicato da Indústria de Extração de Pedreiras de Nova Prata e Zilli Basalto e Britagem, cujas jazidas, ilustradas na Figura 6, estão localizadas no Distrito Mineiro do município de Nova Prata, no estado do Rio Grande do Sul.

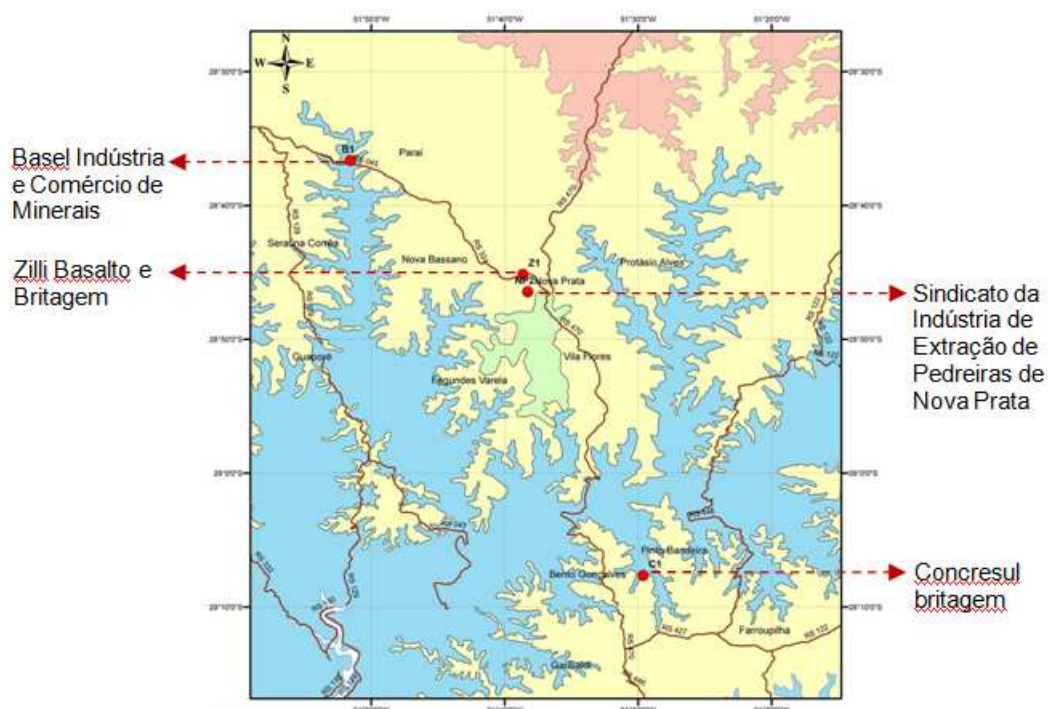


Figura 6: Localização das jazidas das empresas Basel Indústria e Comércio de Minerais, Concretul Britagem, Sindicato da Indústria de Extração de Pedreiras de Nova Prata e Zilli Basalto e Britagem, localizadas no Distrito Mineiro do município de Nova Prata, no estado do Rio Grande do Sul.

Fonte: CPRM, 2004.

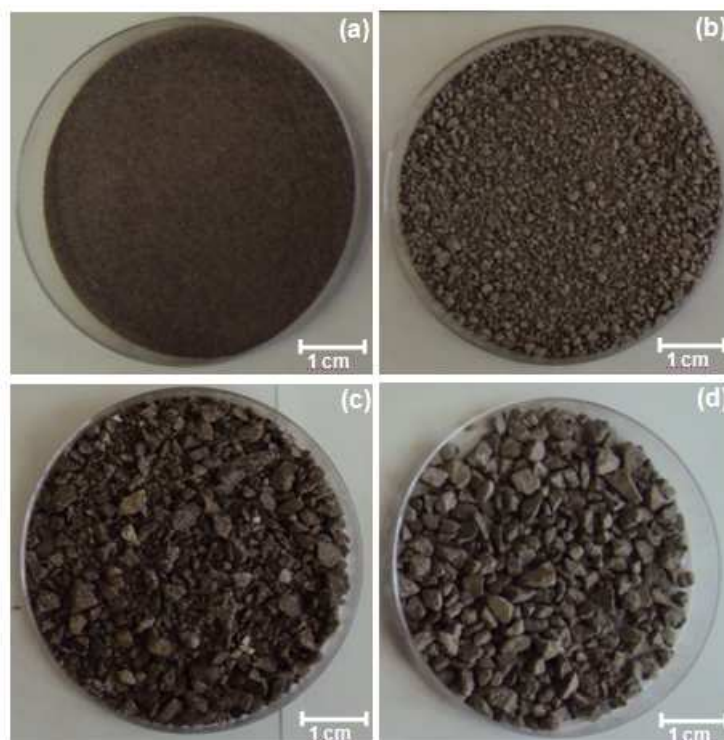


Figura 7: Amostras de basalto: (a) Amostra I; (b) Amostra II; (c) Amostra III; (d) Amostra IV.

As amostras coletadas nestas jazidas foram classificadas em I, II, III e IV, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Locais de procedência das amostras estudadas.

Classificação da amostra	Tipo de amostra	Empresas	Jazida	Classificação na empresa
I	Pó de rocha < 30#	Basel Indústria e Comércio de Minerais	Jazida A	Resíduo
II	Pó da 2ª peneira	Concresul Britagem	Jazida B	Resíduo
III	Pilha de pedrisco	Sindicato da Indústria de Extração de Pedreiras de Nova Prata	Jazida C	Produto para construção civil
IV	Pilha de pedrisco	Zilli Basalto e Britagem	Jazida D	Produto para construção civil

Picnômetro tipo wadon com volume de 50mL foi utilizado para a determinação da massa específica.

Para a determinação do teor de umidade foram utilizados cadinhos de porcelana de 20 mL.

Peneiras ASTM 10 (abertura 2 mm), ASTM 30 (abertura 0,6 mm), ASTM 100 (abertura 0,15 mm) e ASTM 200 (abertura 0,074 mm) foram utilizadas para a determinação da distribuição granulométrica.

No estudo de área superficial em meio aquoso foi utilizado azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$ - Vetec[®]) de pureza analítica. Sulfato de amônio ($(NH_4)_2SO_4$ - Nuclear[®]) de pureza analítica foi utilizados na determinação da capacidade de troca catiônica. Soluções de ácido nítrico (HNO_3) e hidróxido de potássio (KOH) foram utilizadas para ajustes de pH na determinação de potencial zeta.

Para a realização da difração de raios-X foi utilizado tetraborato de lítio ($Li_2B_4O_7$ - Merck[®]) e metaborato de lítio ($LiBO_2$ - Merck[®]) ambos com pureza analítica. Ácido clorídrico (HCl - Merck[®]) e ácido nítrico (HNO_3 - Merck[®]) de pureza analítica e água destilada foram utilizados para a digestão das amostras no ensaio de espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS).

Nos estudos de disponibilidade de nutrientes foram utilizados cloreto de potássio (KCl - Nuclear[®]), ácido etilenodiaminatetraacético, sal dissódico (Na_2EDTA - Nuclear[®]), hidróxido de sódio (NaOH - Vetec[®]), fosfato de cálcio bibásico ($CaHPO_4$ - Nuclear[®]), ácido clorídrico (HCl - Synth[®]) e ácido cítrico ($C_6H_8O_7$ - Vetec[®]), todos com pureza analítica.

Na determinação do pH das amostras foi utilizado pHmetro digital de bancada (Digimed[®], modelo DM 22). Para a calibração do equipamento foram utilizados padrões pH 6,86 e 4,01 (Digimed[®]).

Para a realização da estimativa da aplicação de partículas minerais de basalto na agricultura foram utilizadas sementes de milho próprias para o plantio, compradas em agropecuária e solo coletado em local de vegetação de mata nativa em área dentro do campus do Unilasalle.

Os equipamentos e as concentrações das soluções utilizadas nas análises são citados, de forma detalhada, na descrição dos ensaios.

4.2 Metodologias

4.2.1 Amostragem, homogeneização e quarteamento da amostra

As partículas minerais foram amostradas pelo método manual, diretamente das pilhas de produtos e resíduos (Figura 8), totalizando 5 incrementos de 4 kg que foram dispostos inicialmente em um balde, totalizando 20 kg de amostra. Após, as mesmas foram homogeneizadas, quarteadas e preparadas para as caracterizações físicas, físico-químicas e químicas e mineralógicas.



Figura 8: Amostragem de basalto em uma pilha.

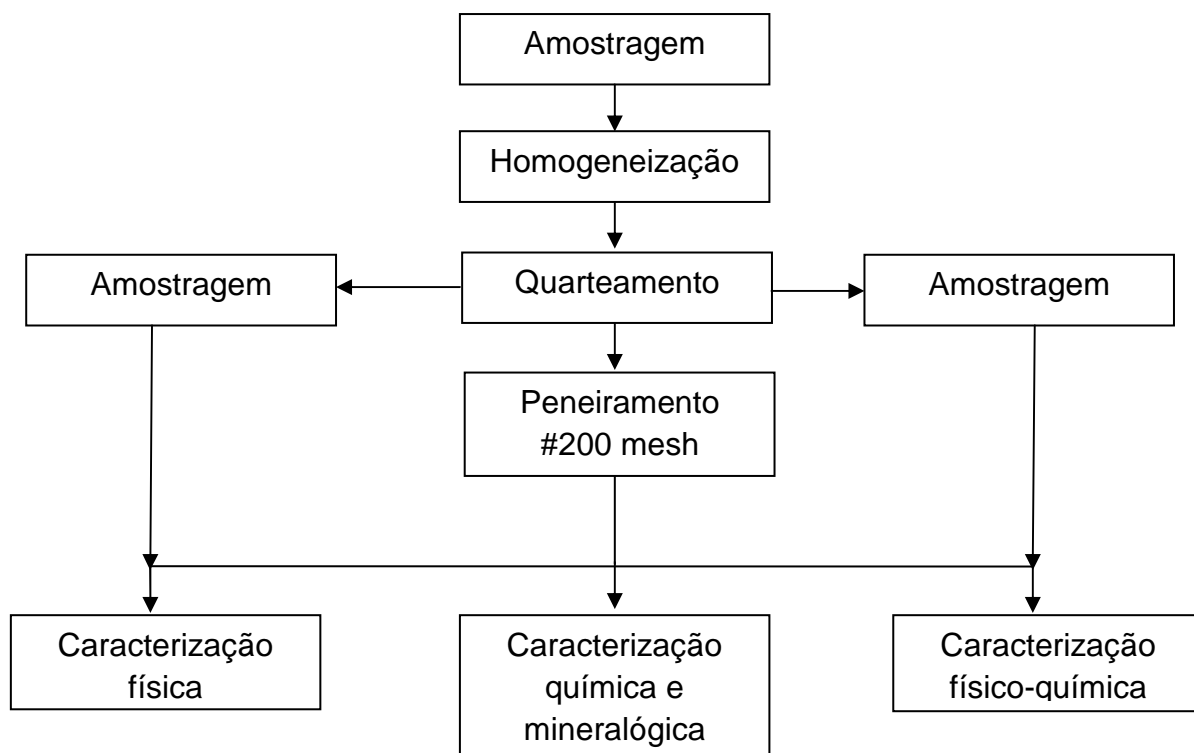


Figura 9: Fluxograma de preparo das amostras para as caracterizações física, físico-química e química e mineralógica.

Para a homogeneização, as amostras foram espalhadas adequadamente sobre uma lona e as pontas da mesma foram unidas, duas a duas, em diagonal, desta maneira a amostra formou uma pilha piramidal que foi novamente espalhada sobre a lona e unida mais uma vez, este procedimento foi repetido dez vezes. Posteriormente, as amostras foram colocadas na parte superior de um equipamento de aço inox tipo Jones para ser realizado o quarteamento, este equipamento as separou em duas frações de 10 kg que deslizaram sobre as calhas e foram recolhidas separadamente, uma das frações foi quarteada até se obter uma amostra de 1 kg. Após, as frações foram guardadas em sacos plásticos, de forma a mantê-las com mínima umidade.

Para a realização dos ensaios de caracterização física, físico-química, química e mineralógica é necessário que as partículas minerais possuam tamanhos pequenos, para que sua área de contato seja maior e as reações de dissolução e lixiviação aconteçam com mais efetividade. Trabalho como o de Escosteguy e Klant (1998), que utilizou diferentes teores de pó de rocha no solo para determinar a viabilidade da disponibilidade de nutrientes, indica que materiais com tamanho de partícula em torno de 0,074 mm respondem melhor aos ensaios. Devido a isto, as amostras foram peneiradas em peneira ASTM 200 (abertura 0,074 mm) antes da realização dos ensaios de caracterização.

Após quarteamento, uma fração de 1 kg de cada amostra foi peneirada, em peneira ASTM 200 (abertura 0,074 mm), para obtenção de 200 g de partículas minerais que foram utilizadas nas etapas de caracterização física, química, físico-química e mineralógica, compostos pelas análises de massa específica, umidade, capacidade de troca catiônica (CTC), potencial zeta e determinação de elementos e fases minerais.

4.2.2 Caracterização de minerais para rochagem

As amostras foram submetidas à análises de parâmetros químicos, físicos, físico-químicos e mineralógicos, visando determinar as principais propriedades das partículas para uso em técnicas de rochagem. A caracterização foi composta pelas análises descritas a seguir, que foram realizadas em duplicata em todas as condições experimentais citadas.

4.2.2.1 Caracterização física

As análises físicas das amostras de basalto estão descritas abaixo e seguiram a sequência descrita no fluxograma da Figura 10.

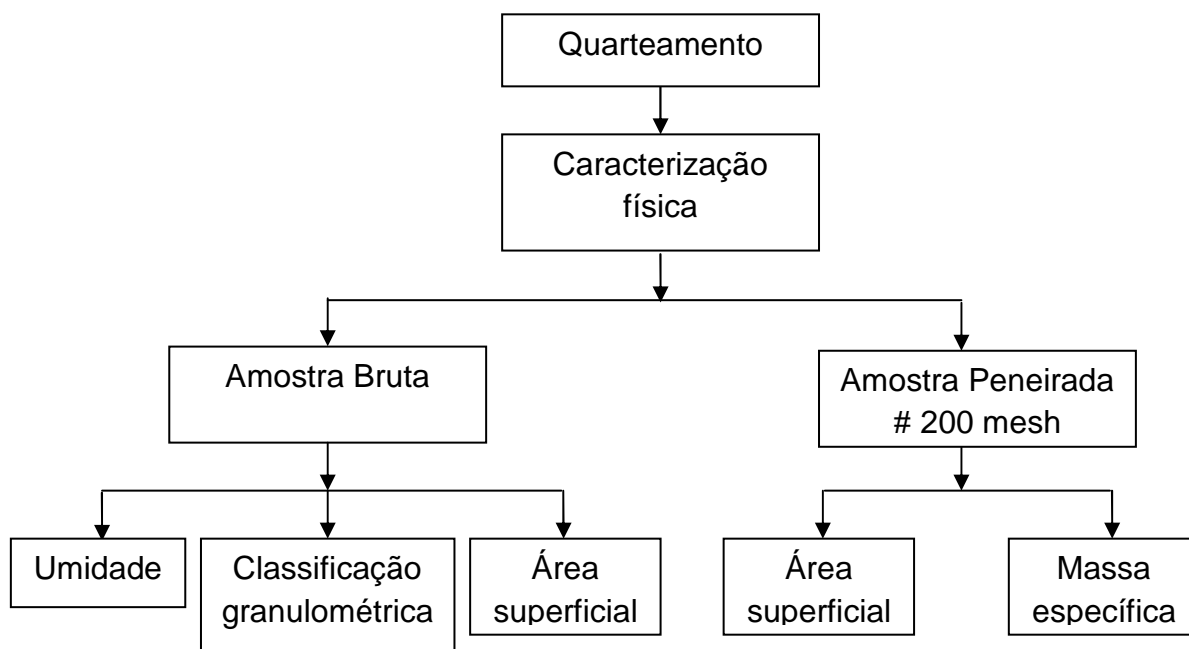


Figura 10: Fluxograma de caracterização física.

4.2.2.1.1 Umidade e massa específica

A umidade foi determinada pelo método descrito na norma NBR – 6457 (ABNT, 1986), no Laboratório de Química do Unilasalle.

Neste caso, uma quantidade (1 g) de amostra foi pesada, seca em estufa (Nova Ética[®]) a 105 °C por 24 h, resfriada em dessecador e pesada novamente. As massas das amostras foram determinadas em balança analítica (Schimadzu[®], AY 220, precisão de $\pm 0,1$ mg), sendo a diferença do peso inicial e final utilizado para o cálculo do percentual de umidade presente nas amostras de basalto.

A massa específica das partículas peneiradas em peneira ASTM 200, foi determinada pelo método do picnômetro (TEDESCO, 1995), no Laboratório de Química do Unilasalle. Neste método, o picnômetro vazio, seco e limpo foi pesado em uma balança analítica (P_1) (Schimadzu[®], AY 220, precisão de $\pm 0,1$ mg), após foi colocada uma massa determinada de amostra (10 g) no picnômetro e pesou-se novamente (P_2). A seguir, foi colocada água destilada no picnômetro até cobrir

a amostra, e este foi aquecido em banho-maria fervente por 15 minutos, para expulsar todo o ar existente entre as partículas de rocha. Após se aguardou o resfriamento do picnômetro em banho de água a temperatura ambiente, durante 15 minutos. Depois do resfriamento, foi colocada a rolha perfurada, de modo que a água aflorou pela parte superior, então o picnômetro limpo e seco foi pesado novamente em balança analítica (P_3).

A seguir, todo o material de dentro do picnômetro foi retirado, o mesmo foi limpo, preenchido completamente com água destilada e colocado banho de água durante 15 minutos até atingir a temperatura ambiente. Após este período, a rolha perfurada foi colocada e a massa do picnômetro contendo água (P_4) foi determinada.

A massa específica das partículas (ρ) foi determinada pela Equação 1 e expressa em g.cm^{-3} .

$$\rho = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1)(P_3 - P_2)}$$

Equação 1

4.2.2.1.2 Classificação granulométrica

A distribuição granulométrica objetivou a determinação dos percentuais das frações granulométricas que formam as amostras. Esta determinação é importante, pois a granulometria das partículas minerais afeta diretamente o transporte da água no solo onde são aplicadas.

Esta classificação granulométrica foi realizada conforme a metodologia descrita na norma NBR-7181 (ABNT, 1984), no Laboratório de Solos do Unilasalle.

Para esta análise foram utilizadas quantidades de 120 g de amostra, previamente secas em estufa por 24 h a 105 °C. Estas amostras foram inseridas em peneiras de diferentes aberturas (ASTM 10 - abertura 2 mm, ASTM 30 - abertura 0,6 mm, ASTM 100 - abertura 0,15 mm e ASTM 200 - abertura 0,074 mm) empilhadas em agitador mecânico (Produtest®), durante 15 minutos. Após este período, as peneiras contendo as porções retidas foram pesadas em balança semi-analítica (Gehaka®, BG 1000, precisão de $\pm 0,01$ g) e, as massas foram determinadas, possibilitando o cálculo do percentual do material passante por cada tamanho de malha.

Adicionalmente, as amostras que passaram na peneira ASTM 200 foram coletadas e analisadas em granulômetro de difração a laser (Cilas[®], modelo 1064), visando determinar as frações percentuais dentro desta faixa (menores que 0,074 mm).

4.2.2.1.3 Área superficial

Esta análise objetivou determinar a área superficial total das partículas em uma unidade de massa, neste caso $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$. O resultado obtido representa a área total que as partículas minerais possuem para adsorção.

A área superficial foi realizada no Laboratório de Química do Unilasalle, pelo método de adsorção de azul de metileno (VAN DEN HUL e LYKLEMA, 1968). Nesta determinação, uma quantidade específica de amostra (0,1 g) foi colocada em contato com 100 mL de soluções aquosas de azul de metileno com concentrações diferentes (25, 50, 100, 150, 200, 300 e 400 mg.L^{-1}). Após, foram agitadas por uma hora à temperatura ambiente e deixadas em repouso por 23 h no escuro. Após este período, as soluções sobrenadantes foram coletadas e as concentrações de azul de metileno destas soluções, bem como das soluções iniciais, foram determinadas em espectrofotômetro (Coleman[®], modelo 495D) utilizando o comprimento de onda de 669 nm. A adsorção seguiu o modelo de Langmuir e considerou a área da seção transversal da molécula de azul de metileno de $1,08 \text{ nm}^2$.

O equacionamento matemático para a obtenção da quantidade de soluto adsorvido (q) foi realizado através da Equação 2, a partir de dados de massa (m) de material adsorvente, de volume (V) de solução contendo o soluto com concentração inicial (C_o) e concentração final de soluto na solução (C_f) após o alcance do equilíbrio de adsorção.

$$q = \frac{V(C_o - C_f)}{m} \quad \text{Equação 2}$$

4.2.2.2 Caracterização química e mineralógica

Os estudos de caracterização química e mineralógica das partículas minerais seguiram a sequência descrita no fluxograma da Figura 11.

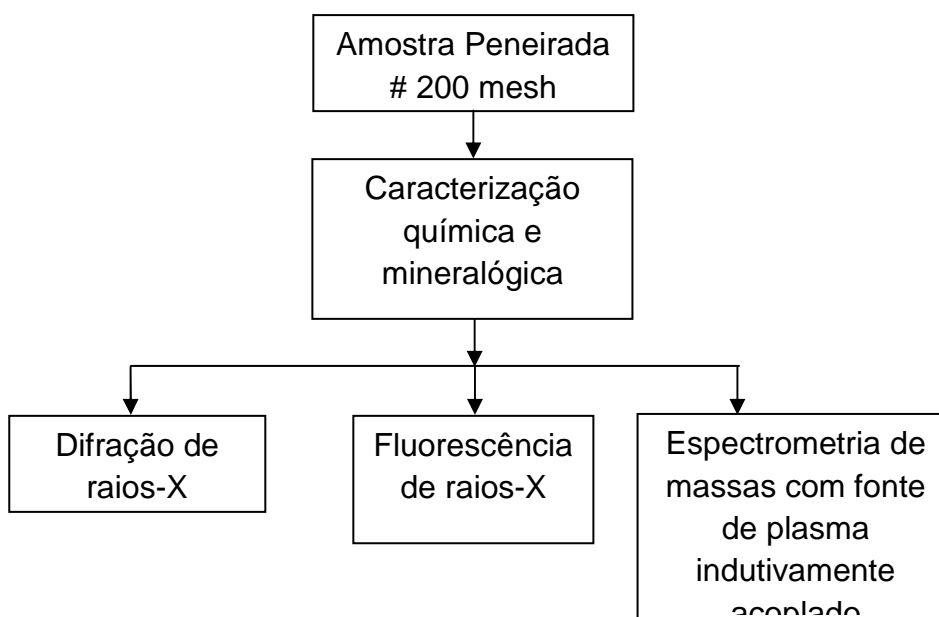


Figura 11: Fluxograma de caracterização química e mineralógica.

4.2.2.2.1 Difração de raios-X

A análise de difração de raios-X foi realizada visando à identificação das principais fases cristalinas que compõem as partículas das amostras. Esta análise foi realizada no Laboratório de Difractometria da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, utilizando um difratômetro Siemens BRUKER-AXS D5000 com o software DiffracPlus[®] Siemens-Bruker-Axs, Versão 11 equipado com um banco de dados de padrões de difração para tratamento dos resultados. Nesta técnica um feixe de raios-X de comprimento de onda conhecido (2,29 Å), incidiu sobre a superfície da amostra de partículas. Quando o feixe de raios-X incidiu sobre os átomos da amostra, estes átomos se comportaram como um centro de espalhamento e vibraram na mesma frequência do feixe incidente, espalhando-o para todas as direções. Estes ângulos foram detectados pelo detector do instrumento e comparados à um banco de dados padrão, sendo as fases cristalinas identificadas (GOMES, 1984).

4.2.2.2.2 Fluorescência de raios-X

No estudo de fluorescência de raios-X foram determinados, quantitativamente, os óxidos presentes na amostra. Esta análise foi realizada no

Laboratório Acme Analytical Laboratories LTD., no Canadá, e foram determinados os seguintes elementos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO_2 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 .

Nesta análise foi utilizada uma quantidade de amostra (0,2 g), misturados em tetraborato de lítio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) e metaborato de lítio (LiBO_2). Posteriormente, foi confeccionada uma pastilha com essa mistura, a qual foi colocada no equipamento Sequencial X-Ray Spectrometer (Siemens, modelo SRS-3000), para determinação dos óxidos presentes. Nesta análise uma amostra, preparada na forma de pastilha, foi submetida à incidência contínua de um feixe de raios-X (0,2 a 18 Å) e, as intensidades dos picos das linhas de emissão destes raios foram detectadas e medidas. A comparação dos resultados obtidos experimentalmente (valores percentuais dos óxidos presentes em quantidades maiores que 1%) com dados de padrões de concentrações conhecidas, for obtidas por análise elementar quantitativa.

4.2.2.2.3 Espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS)

As amostras de basaltos foram encaminhadas para o Laboratório Acme Analytical Laboratories Ltda., no Canadá, para determinação dos macronutrientes (Al, Ca, Fe, P, Mg, Na, K) e dos micronutrientes (B, Co, Cu, S, Mn, Mo, Ni, Zn).

Nesta análise a amostra (0,5 g), foi dissolvida em 3 mL de uma solução de ácido clorídrico (HCl), ácido nítrico (HNO_3) e água destilada (H_2O) aquecida a 95°C, na proporção de 2:2:2. Esta mistura foi aquecida por 1 hora em chapa de aquecimento, o volume total (3 mL) foi diluído em 10 mL de água destilada, gerando uma solução onde foram determinadas as concentrações de macro e micronutrientes citados. Neste caso, as amostras foram atomizadas em uma chama, e os átomos gasosos foram convertidos em íons positivos e separados com base em suas razões massa-carga, sendo assim identificadas e quantificadas pelo detector do equipamento.

4.2.2.3 Caracterização físico-química

A caracterização físico-química foi composta pelas etapas descritas no fluxograma da Figura 12.

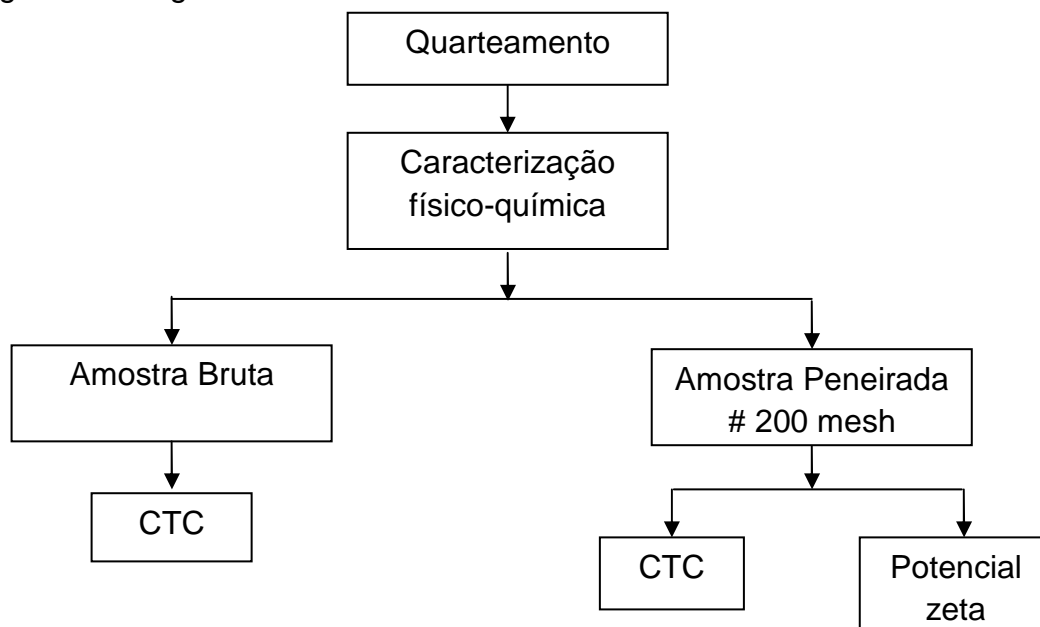


Figura 12: Fluxograma de caracterização físico-química.

4.2.2.3.1 Capacidade de troca catiônica (CTC)

A capacidade de troca catiônica (CTC) foi realizada para determinar a habilidade do material em trocar cátions, pois o resultado desta análise indica a capacidade que as partículas minerais apresentam para trocar cátions com o sistema água-solo e, conseqüentemente, disponibilizar íons de macro e micronutrientes para as plantas.

Esta análise foi realizada utilizando dois procedimentos diferentes, de modo que um foi realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LTM-UFRGS) seguindo o procedimento descrito por Metcalf e Eddy (2003) e o outro foi realizado no Laboratório de Solos da Escola de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com base no procedimento indicado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (1999). No primeiro caso, o procedimento considera a capacidade de troca total de cátions, conforme caracterização normalmente realizada para partículas minerais. No segundo, as partículas foram

consideradas como uma espécie de solo e a capacidade de troca catiônica foi calculada com base nos teores de cálcio, magnésio, potássio, sódio, manganês e de acidez (H+Al).

No primeiro procedimento (METCALF e EDDY, 2003), uma quantidade da amostra (5 g) foi colocada em contato com 50 mL de solução de NaCl 1 mol.L⁻¹ e agitadas por 24 h, para ativação das mesmas. A suspensão resultante foi filtrada a vácuo e a torta foi lavada com aproximadamente 30 mL de água deionizada. O material filtrado foi seco em estufa a 100 °C por 24 h e, após, utilizado em análises de adsorção de nitrogênio amoniacal. Nesta etapa, 0,25 g das partículas ativadas foram contactadas com 100 mL de solução 100 mg.L⁻¹ NH₃-N e mantidas em contato durante 2 h. Posteriormente, as suspensões foram filtradas e as concentrações de nitrogênio amoniacal nestas soluções, bem como na solução inicial foram determinadas pelo método de análise titulométrica de nitrogênio amoniacal.

Os dados obtidos foram calculados de acordo com o número de equivalentes-grama do cátion amônio (18 mg NH₃-N. meq⁻¹ NH₄⁺), conforme descrito na equação do item 4.2.2.2.1.

No segundo procedimento (EMBRAPA, 1999) a capacidade de troca catiônica foi calculada utilizando os teores de cálcio, magnésio e manganês presentes na solução extratora de cloreto de potássio 1 mol.L⁻¹ e determinados por absorção atômica. Os teores de sódio e potássio extraídos por uma mistura de soluções de ácido clorídrico 0,05 mol.L⁻¹ e ácido sulfúrico 0,0125 mol.L⁻¹, através de agitação por 5 minutos e determinados por fotometria de chama. E também o valor de acidez (H+Al) obtido pela medida do pH da suspensão realizada com as partículas minerais. O cálculo para obtenção do valor da CTC é demonstrado na Equação 3.

$$CTC \text{ (cmol.dm}^3\text{)} = Ca + Mg + (H+Al) + K + Na + Mn \quad \text{Equação 3}$$

4.2.2.3.2 Potencial zeta

O estudo do potencial zeta tem como finalidade determinar as cargas superficiais presentes na superfície das amostras. Estas cargas interferem

diretamente na capacidade de troca catiônica e, portanto, na disponibilidade de nutrientes para o sistema água-solo onde as plantas fixam suas raízes.

A determinação deste parâmetro foi realizada com base no método da eletroforese a Laser (Hunter, 1981), de modo que partículas de basalto com tamanho inferior a 37 μm foram suspensas em 0,5 L de solução de nitrato de potássio (KNO_3) $10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$. Esta suspensão foi dividida em alíquotas de 100 mL com valores de pH ajustados pela adição de ácido nítrico (HNO_3) para valores menores que 7,0 e com hidróxido de potássio (KOH) para pH maiores que 7,0. O valor do potencial zeta foi determinado em diferentes valores de pH (2, 4, 6, 8, 10 e 12), utilizando um equipamento de microeletroforese (modelo Zeta Plus[®]) com célula de acrílico quadrada (1 cm de aresta) apresentando eletrodos de platina enegrecidos próximos entre si e distantes das paredes da mesma. As medidas de mobilidade eletroforética foram realizadas e convertidas em valores de potencial eletrocinético zeta (expresso em mV).

4.2.3 Comportamento de partículas minerais de basalto em meio aquoso

4.2.3.1 Disponibilidade de nutrientes para rochagem

Estes estudos visaram à avaliação da disponibilidade de macro e micronutrientes (fósforo, cálcio, potássio, alumínio, enxofre, manganês, sódio, zinco, cobre e boro) para uma fase líquida, utilizando técnicas de extração descritas no Boletim Técnico número 5, do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia (TEDESCO, 1995) que simulam as condições do sistema água-solo. Tais estudos foram realizados no Laboratório de Solos da Escola de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Os procedimentos de extração foram realizados a partir do contato de uma quantidade de partículas de basalto com soluções extratoras por um período de 24 h, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4: Soluções extratoras e técnicas de análises aplicadas na determinação de macro e micronutrientes.

Macro e/ou micronutriente extraído	Solução extratora	Técnica de análise das concentrações
Fósforo (P) e potássio (K)	Ácido clorídrico (HCl) 0,05 mol.L ⁻¹ e ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) 0,05 mol.L ⁻¹ , na proporção de 1:10	Espectrofotometria para P (660 nm) Fotometria de chama para K
Cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), manganês (Mn) e sódio (Na)	Cloreto de potássio (KCl) 1 mol.L ⁻¹	Titulação de complexometria pela solução de NaEDTA 0,01 mol L ⁻¹ para Ca e Mg Titulação com a solução de NaOH 0,025 mol.L ⁻¹ para Al Fotometria de chama para Mn e Na
Enxofre (S)	Fosfato de cálcio bibásico (CaHPO ₄) 500 mg.L ⁻¹ de fósforo	Espectrofotometria (440 nm)
Zinco (Zn), cobre (Cu)	Ácido clorídrico (HCl) 0,1 mol.L ⁻¹	Absorção atômica
Boro (B)	Água quente	Espectrofotometria (540 nm)

Adicionalmente, para avaliar a disponibilidade de íons ferro, alumínio, potássio e sódio, as partículas foram submetidas a ensaios de extração no Laboratório de Química do Unilasalle, empregando-se a metodologia descrita por Theodoro et al. (2010), para simular as condições ácidas dos solos durante a remoção de macro e micronutrientes minerais. A utilização do ácido cítrico, um ácido fraco e diluído, visou simular estas condições porque este ácido é comumente liberado pelas raízes das plantas, permanecendo em alta

concentração na rizosfera (SONG e HUANG, 1988). O ácido cítrico apresenta alta capacidade de interagir com metais, formando complexos orgânico-metálicos na solução do solo e induzindo as liberações dos nutrientes pelos minerais do solo (MARTIN e SPARKS, 1983; MELO et al., 1995).

Neste estudo, uma quantidade específica de amostra (1,0 g) foi colocada em contato com 100 mL de uma solução de ácido cítrico a 2% e mantida sob agitação durante 30 minutos. Após esse período, a solução foi filtrada e analisada em um espectrofotômetro (Coleman, modelo 495D) para determinar as concentrações de ferro e alumínio, e em um fotômetro de chama (Quimis, modelo Q398M2) para quantificar sódio e potássio.

4.2.3.2 Modificação do pH para calagem

A avaliação do pH da fase líquida contendo as partículas minerais em suspensão foi realizada com o objetivo de determinar a acidez das amostras. O procedimento foi realizado conforme o método proposto por Shoemaker et al. (1961).

Neste caso, foi pesada uma massa de 25 g da amostra e misturada a 25 mL de água destilada fervida, sendo misturadas manualmente por 1 minuto. Após, foi aplicado 30 minutos de decantação das partículas e a medição do pH foi realizada em um pHmetro (Digimed[®], modelo DM 22).

4.2.4 Estimativa da aplicação de partículas de basalto na agricultura

Para estimar o efeito da aplicação das amostras de basalto na agricultura, foram realizados experimentos utilizando diferentes proporções solo: partículas minerais no cultivo de sementes de milho. As partículas de basalto usadas nos estudos possuíam granulometria menor que 0,074 mm. Esta escolha foi baseada na pesquisa de Escosteguy e Klamt (1998), que utilizou diferentes doses de pó de basalto com tamanhos inferiores a 0,074 mm para avaliar a disponibilização de nutrientes como K, Ca, Mg e P em dois tipos de solo.

Este experimento foi desenvolvido no Laboratório de Química do Unilasalle a temperatura ambiente (em torno de 20°C).

Neste estudo, inicialmente um solo foi coletado em local com vegetação de mata nativa, similar às condições de solo da região de Nova Prata, a uma profundidade de 0 a 20 cm e, posteriormente, foi seco ao ar livre. Após, foi realizada a homogeneização do solo em uma lona e este foi quarteado em um equipamento de aço inox tipo Jones, para reduzir a massa a pequenas porções representativas da amostra inicial, seguindo o mesmo procedimento utilizado para a homogeneização e quarteamento das amostras de basalto, descrito no item 4.2.1. Após foram preparadas misturas com as seguintes concentrações de partículas minerais no solo: 2,5; 12,5 e 50 $\text{g}_{\text{partículas}}/\text{kg}_{\text{solo}}$, definidas com base nas investigações de Escosteguy e Klamt (1998). As misturas de partículas/solo foram novamente homogeneizadas e pesados em balança analítica (Schimadzu®, AY 220, precisão de $\pm 0,1$ mg) em porções de 170 g que foram colocadas em copos plásticos de 150 mL de capacidade. Após, sementes de milho foram inseridas na mistura e regadas com 10 mL de água de abastecimento em um intervalo de 3 dias. Foram realizadas quintuplicatas para cada condição experimental (5 copos para cada concentração) e o experimento foi acompanhado durante 30 dias, realizando-se a medição da altura das folhas (parte aérea) a cada três dias, considerado a distância entre o solo e a extremidade da folha. Após este período, as mudas foram coletadas e análises comparativas de diâmetro do colo e tamanho de raízes foram determinadas por um paquímetro, de modo que o colo foi medido no ponto onde o solo interceptava a planta. Deste mesmo ponto, foi medida a distância até a extremidade imersa da planta, obtendo o comprimento de raiz. Adicionalmente, a massa seca das partes aérea e imersa no solo foi determinada conforme procedimento descrito no Boletim Técnico número 5, do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia (TEDESCO, 1995). Neste caso, inicialmente as plantas foram lavadas em água de abastecimento e posteriormente secas sobre um papel absorvente, pesadas em balança analítica e secas em estufa (Nova Ética®) a 60 °C por 48 h. O percentual de massa seca (M_s) foi quantificado pela diferença de massa entre o peso inicial (P_i) e final (P_f) das amostras, conforme a Equação 4.

$$M_s = \frac{P_f \times 100}{P_i}$$

Equação 4

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização de partículas minerais para rochagem

5.1.1 Caracterização física

5.1.1.1 Umidade e massa específica

Os valores médios do teor de umidade e de massa específica encontrados para as amostras estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Massa específica e teor de umidade das amostras estudadas.

Amostra	Umidade (%)	Massa específica (g/cm³)
I	0,25 (Erro exp.: ± 0,07)	2,69 (Erro exp.: ± 0,01)
II	0,45 (Erro exp.: ± 0,07)	2,61 (Erro exp.: ± 0,01)
III	0,27 (Erro exp.: ± 0,07)	2,67 (Erro exp.: ± 0,01)
IV	0,39 (Erro exp.: ± 0,07)	2,66 (Erro exp.: ± 0,01)

A Tabela 5 mostra que o teor de umidade das amostras brutas foi baixo, sendo uma característica favorável, pois segundo Alleoni e Melo (2009), a umidade pode causar hidrólise nos minerais da rocha, sendo responsável por sua decomposição e perda dos nutrientes essenciais para a utilização em rochagem.

Os valores de massa específica encontrados para as partículas de basalto (Tabela 5) são condizentes com o trabalho realizado por Fernandes (2008), que analisou a massa específica de amostras de rejeitos de pegmatitos, constituídos essencialmente de feldspato, quartzo e muscovita, e obteve valores de aproximadamente a 2,65 g/cm³ para estes minerais. De acordo com Brady (1999), este valor é considerado padrão para rochas basálticas.

5.1.1.2 Classificação Granulométrica

A análise granulométrica, realizada através de peneiramento, apresentou os resultados descritos na Tabela 6.

Tabela 6: Análise granulométrica das amostras de partículas de rocha estudadas.

Amostras	>2 mm %	2 a 0,60 mm %	0,60 a 0,15 mm %	0,15 a 0,074 mm %	< 0,074 mm %
I	0,00	0,20	55,89	31,71	11,62
II	36,63	49,52	3,50	0,90	0,67
III	54,86	15,83	11,21	3,91	12,83
IV	64,76	4,82	16,75	7,57	2,68

De acordo com a Tabela 6, as amostras III e IV apresentaram mais de 50% de suas partículas com tamanho superior a 2 mm. Já a amostra I apresentou 55,89% de suas partículas na faixa de 0,60 a 0,15 mm e a amostra II possuiu 49,52% entre 2 e 0,60 mm. Deste modo, observando estes resultados podemos classificar as amostras III e IV como pedriscos, a amostra II como um pó grosseiro e a amostra I como um pó de rocha fino.

A distribuição granulométrica das frações das amostras que passaram pela peneira ASTM 200 (< 0,074 mm), obtida através do analisador de tamanho de partículas CILAS[®], é mostrada abaixo na Figura 13.

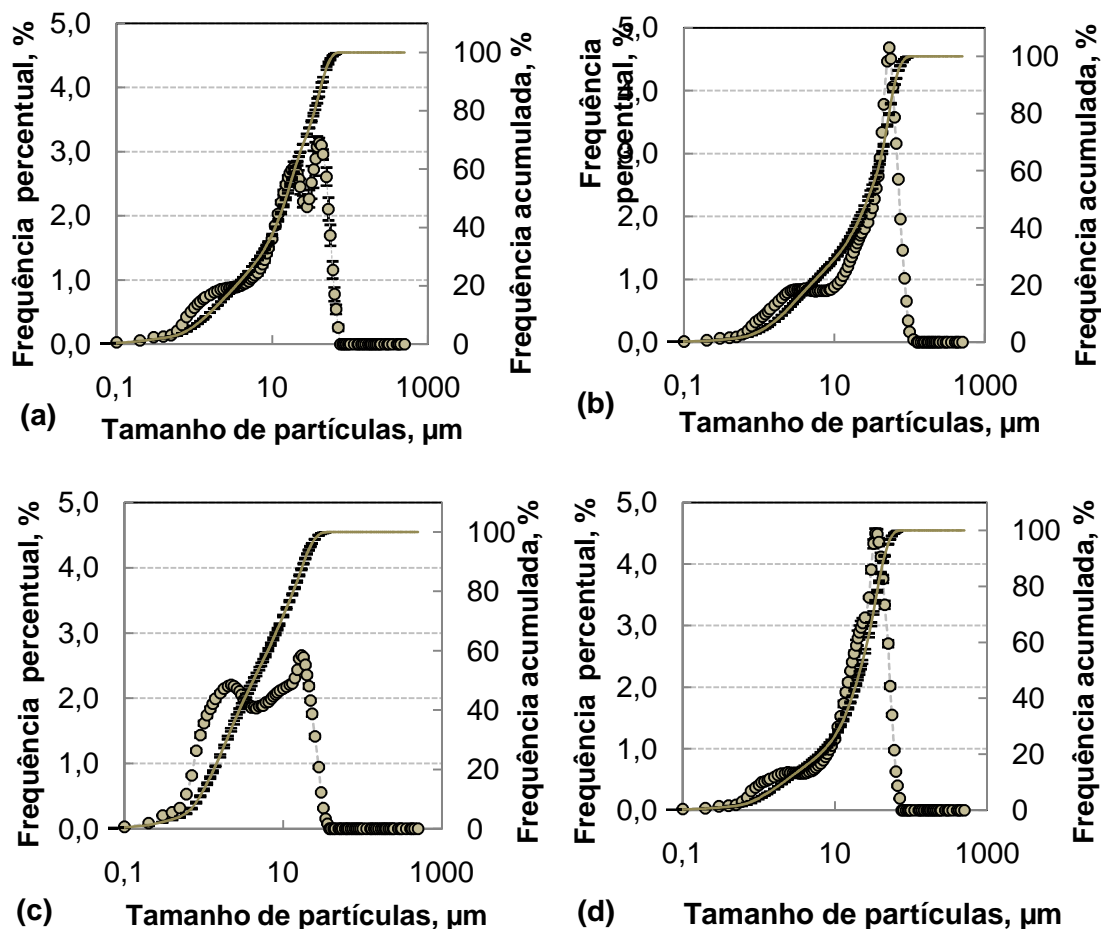


Figura 13: Distribuição granulométrica da partículas minerais estudadas: (a): Amostra I; (b): Amostra II; (c): Amostra III; (d): Amostra IV.

5.1.1.3 Área superficial

Os resultados obtidos na determinação da área superficial das amostras de basalto estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7: Área superficial das partículas de basalto. Erro exp.: $\pm 4,2 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$.

Área superficial				
Amostras	I ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$)	II ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$)	III ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$)	IV ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$)
Bruta	40,65	46,19	56,46	36,95
Peneirada (<200#)	81,62	63,51	59,78	72,59

Conforme os dados apresentados na Tabela 7, as amostras peneiradas, que possuíam tamanho de partícula menor que 0,074 mm, demonstraram maiores valores de área superficial quando comparadas às amostras brutas, comprovando que com a diminuição do tamanho da partícula aumenta a área superficial disponível para adsorção.

Também foi possível observar que a amostra III apresentou a maior área superficial entre as amostras brutas. Este resultado foi condizente com a composição mineral determinada por difração de raios-X, apresentada no item 5.1.6.1, que demonstrou que a amostra III possui o maior percentual de esmectita (10%) entre as amostras analisadas, seguida pela amostra II (7%) e I (3%). Já, na amostra IV não foi detectada a presença de esmectitas. Este tipo de mineral possui características adsorventes (ALLEONI e MELO, 2009) e, portanto, mostram maiores valores de área superficial devido ao método de análise ser por adsorção.

Nas amostras peneiradas, a amostra I apresentou o maior resultado, sendo as demais amostras com áreas menores, porém todas superiores à respectiva amostra bruta demonstrando que, possivelmente, após o peneiramento, alguns minerais com baixas porosidades foram removidos das mesmas.

5.1.2 Caracterização química e mineralógica

5.1.2.1 Difração de raios-X

O espectro de raios-X obtido mostrou que os picos mais significativos foram relacionados às fases minerais citadas na Tabela 8.

Tabela 8: Principais fases minerais presentes nas amostras, analisadas por difração de raios-X.

Minerais	Amostras			
	I (%)	II (%)	III (%)	IV (%)
Labradorita	73,5	51,0	52,0	61,0
Quartzo	9,0	19,0	15,0	13,0
Augita	6,0	0,0	12,0	13,0
Feldspato Alcalino	5,0	15,0	0,0	0,0
Esmectita	3,0	7,0	10,0	0,0
Barita	2,0	3,0	4,0	4,0
Hematita	1,0	1,0	2,0	2,0
Heulandita	0,5	0,0	0,0	0,0
Gesso	0,0	4,0	0,0	0,0
Argilomineral das Caolinitas	0,0	0,0	5,0	7,0

Conforme indica a Tabela 8, todas as amostras são compostas principalmente por labradorita, um aluminossilicato de polimerização tridimensional da classe dos feldspatos plagioclásio. A labradorita também é chamada de calco-sódico pela presença de Ca e Na em proporções variáveis na estrutura cristalina. Sua fórmula geral é $\text{Na}(\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_8)\text{--Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$, possuindo de 30% à 50% de sódio e 50% à 70% de cálcio (ALLEONI e MELO, 2009).

O segundo mineral predominante nas amostras é o quartzo (51% a 73,5%), formado por SiO_2 , sendo considerado um dos minerais mais estáveis e menos reativos das rochas basálticas.

As amostras III e IV apresentaram também, teores consideráveis de auginita (6 a 13%), outro aluminossilicato de polimerização em cadeia (filamentos), da família dos piroxênios, com fórmula geral $(\text{Ca,Na})(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+},\text{Al})(\text{SiAl})_2\text{O}_6$. De acordo com Alleoni e Melo, 2009, a augita é susceptível ao intemperismo liberando assim, seus constituintes no solo.

A amostra II apresentou uma boa concentração de feldspato alcalino (15%), cuja fórmula química é KAlSi_3O_8 . Estes plagioclásios apresentam relativa susceptibilidade ao intemperismo. Também, a amostra III apresentou uma quantidade representativa de esmectita (10%), um argilominerais expansivos, que

adsorvem água e possuem elevadas capacidades de troca catiônica (CTC de 80 a 200 cmol.kg^{-1}). De acordo com Alleoni e Melo (2009), as esmectitas são geradas pela alteração de feldspatos plagioclásios, sua fórmula química é $(1/2\text{Ca,Na})_{0,7}(\text{Al,Mg,Fe})_4[(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4,n\text{H}_2\text{O}$.

A presença de todos estes minerais suscetíveis ao intemperismo é um bom indicativo de que as amostras possui capacidade de liberação de macro e micronutrientes para o solo, o que é confirmado pelos resultados obtidos no estudo de capacidade de troca catiônica (CTC) apresentados no item 5.1.3.1.

5.1.2.2 Fluorescência de raios-X

A análise de fluorescência de raios-X apresentou os resultados na forma de óxidos simples (Tabela 9) predominantes nas amostras.

Tabela 9: Principais elementos representados através de seus óxidos.

Óxidos	Amostras			
	I (%)	II (%)	III (%)	IV (%)
Al_2O_3	13,21	13,14	13,66	12,95
Bário	0,07	0,07	0,06	0,06
CaO	3,94	3,54	2,65	3,92
Fe_2O_3	6,99	6,86	7,52	6,98
K_2O	3,58	3,75	3,26	3,52
MgO	1,42	1,39	1,16	1,48
MnO	0,12	0,12	0,19	0,13
Na_2O	3,34	3,19	2,65	3,25
P_2O_5	0,27	0,25	0,23	0,26
SiO_2	65,1	66,0	63,8	65,1

De acordo com os resultados demonstrados na Tabela 9, todas as amostras são compostas principalmente por SiO_2 , apresentando teores acima de 60% deste óxido, provavelmente, proveniente do quartzo que está presente nas

amostras estudadas. Este mineral é resistente ao intemperismo e dificilmente libera seus cátions para o meio.

O óxido de alumínio (Al_2O_3) é outro composto que possui concentrações consideráveis em todas as amostras analisadas, este óxido sofre intemperismo em solos ácido, liberando alumínio para o meio, que pode precipitar na forma de hidróxido de alumínio (ALLEONI e MELO, 2009) que é, praticamente insolúvel em água. Este fato é importante devido ao alumínio ser tóxico para as plantas e inibidor do crescimento e desenvolvimento das raízes, pois altera a adsorção de água e nutrientes (MALAVOLTA, 2006).

Outro óxido presente em quantidades apreciáveis, em todas as amostras, é o óxido de ferro, apresentando teores entre 6,86 e 7,52%. Este óxido é proveniente do processo intemperismo por oxidação dos minerais que contém ferro na sua estrutura cristalina (ALLEONI e MELO, 2009). É importante salientar que este óxido é insolúvel no meio aquoso, o que é fundamental, pois o excesso de ferro pode causar problemas de crescimento nas plantas e necrose de suas folhas (MALAVOLTA, 2006).

Os óxidos de cálcio, sódio e potássio apareceram nas amostras com teores próximos a 3% e os demais óxidos analisados representam menos de 2% do total das amostras. Todos estes óxidos sofrem a ação do intemperismo por hidrólise e são facilmente disponibilizados para o solo (ALLEONI e MELO, 2009), fornecendo assim macro e micronutrientes importantes para o crescimento das plantas.

5.1.2.3 Espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS)

Os resultados obtidos nas medidas de espectrometria de massas, mostraram que as amostras de rocha são compostas principalmente por alumínio e ferro. Estes resultados concordam com os dados obtidos nas medidas de fluorescência de raios-X que indicaram a presença de óxidos destes elementos em maior quantidade nas amostras, possivelmente, provenientes da labradorita, auginita, feldspato e da esmectita. As Tabelas 10 e 11 apresentam estes dados.

Tabela 10: Concentração dos principais macronutrientes que constituem as amostras.

Macronutrientes	Amostras			
	I	II	III	IV
	(%)	(%)	(%)	(%)
Alumínio	12,50	8,30	19,30	5,20
Cálcio	1,08	0,72	0,58	0,75
Ferro	29,00	30,50	36,70	26,20
Fósforo	0,10	0,10	0,088	0,106
Magnésio	0,29	0,29	0,29	0,27
Sódio	3,99	2,23	1,36	1,19
Potássio	0,34	0,17	0,16	0,09

Tabela 11: Concentração dos principais micronutrientes que constituem as amostras.

Micronutrientes	Amostras			
	I	II	III	IV
	(mg.L⁻¹)	(mg.L⁻¹)	(mg.L⁻¹)	(mg.L⁻¹)
Boro	4,00	3,00	3,00	2,00
Cobalto	45,50	7,30	26,50	7,30
Cobre	51,05	49,15	70,16	49,90
Enxofre	< 200	< 200	< 200	< 200
Manganês	388	351	1,08	381
Molibdênio	0,35	1,24	0,67	0,90
Níquel	3,20	4,10	5,50	2,90
Zinco	48,40	48,60	57,30	44,40

Estes dados demonstraram que as partículas minerais em estudos apresentam em sua composição uma série de macro e micronutrientes citados na literatura (MALAVOLTA, 2006) como sendo extremamente importantes para o

desenvolvimento e manutenção da vida vegetal, demonstrando uma possibilidade importante de aplicação na rochagem. Estes dados, são complementados pelos estudos de disponibilidade de nutrientes em meio aquoso no item 5.1.4.1.

5.1.3 Caracterização físico-química

5.1.3.1 Capacidade de troca catiônica (CTC)

Os resultados da capacidade de troca catiônica (CTC) estão descritos na Figura 14.

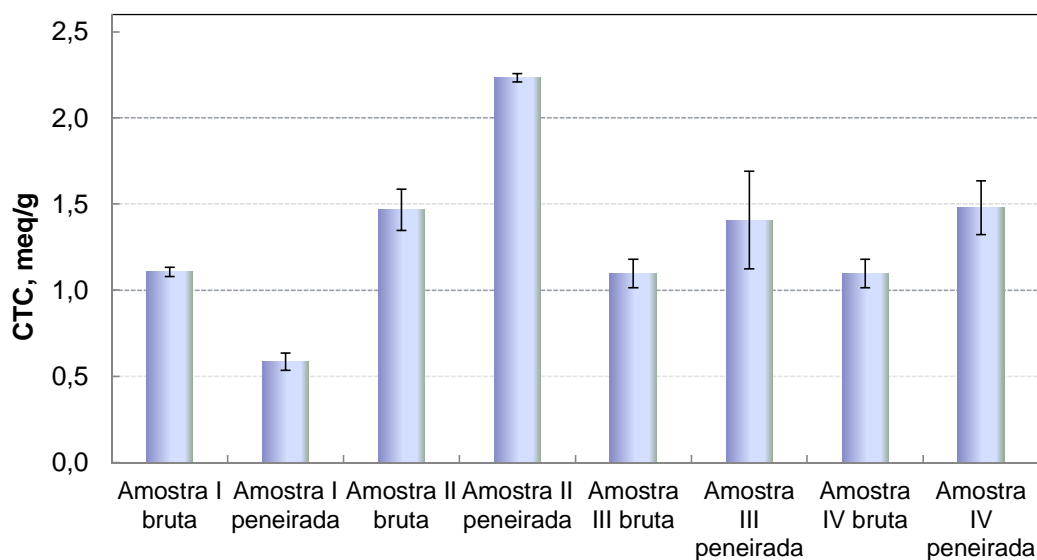


Figura 14: Capacidade de troca catiônica (CTC) das partículas minerais de basalto. Condições experimentais: T: 25 °C; t_{contato} : 24 h, [partículas]: 100 mg.L⁻¹ V: 50 mL. Erro exp.: $\pm 0,02$ meq NH₄⁺ . g⁻¹ (0,30 mg NH₃-N . g⁻¹).

Neste caso, foi possível observar que as amostras peneiradas em peneira ASTM 200 apresentaram maior capacidade de troca catiônica quando comparada às amostras brutas. Esses resultados sugerem que para a utilização em rochagem é mais indicado o uso de amostras com tamanhos de partículas menores, pois estas possuem maior capacidade de troca de nutrientes com o solo, possivelmente devido à maior área superficial disponibilizada.

No entanto, na amostra I foi observada uma exceção, pois a amostra peneirada apresentou menor valor de CTC que a amostra bruta. Este fato pode ter sido ocasionado pela separação, através do peneiramento, de uma fração mineral que contribui de forma significativa para a troca de cátions, como por

exemplo, a heulandita, uma zeólita e a esmectita, um argilomineral, ambos com alta capacidade de troca catiônica que fazem parte da composição mineral das amostras de basalto (ALLEONI e MELO, 2009).

Na Tabela 12 estão descritos os resultados obtidos para a estimativa de capacidade de troca catiônica (CTC) considerando as amostras como um solo.

Tabela 12: Valores teóricos de capacidade de troca catiônica (CTC) das partículas de basalto.

	Amostras			
	I	II	III	IV
CTC (cmol_c/dm³)	8,79	8,95	11,60	9,49

Observando os resultados apresentados na Tabela 12 pode-se dizer que as amostras analisadas apresentaram valores baixos de capacidade de troca catiônica, pois valores considerados bons variam de 100 a 300 cmol_c/dm³ (EMBRAPA, 1999).

Entretanto, embora estes valores teóricos de CTC tenham sido baixos, é importante ressaltar que estes foram calculados a partir das concentrações somente de íons de cálcio, magnésio, potássio, sódio, manganês e acidez (H+Al), não considerando outros íons importantes para a CTC, de modo que os dados da Figura 13 comprovaram plena reprodutibilidade do comportamento de troca iônica das amostras e demonstraram preponderância sobre o método estimado. Assim, estes resultados obtidos no primeiro procedimento (Figura 13) indicaram um bom comportamento de disponibilidade de cátions para as amostras e podem ser considerados mais representativos, pois consideram todos os íons possíveis de serem trocados com o meio e não apenas alguns como no segundo procedimento.

5.1.3.2 Potencial zeta

A Figura 15 mostra os valores médios de potencial zeta das amostras em função do pH do meio.

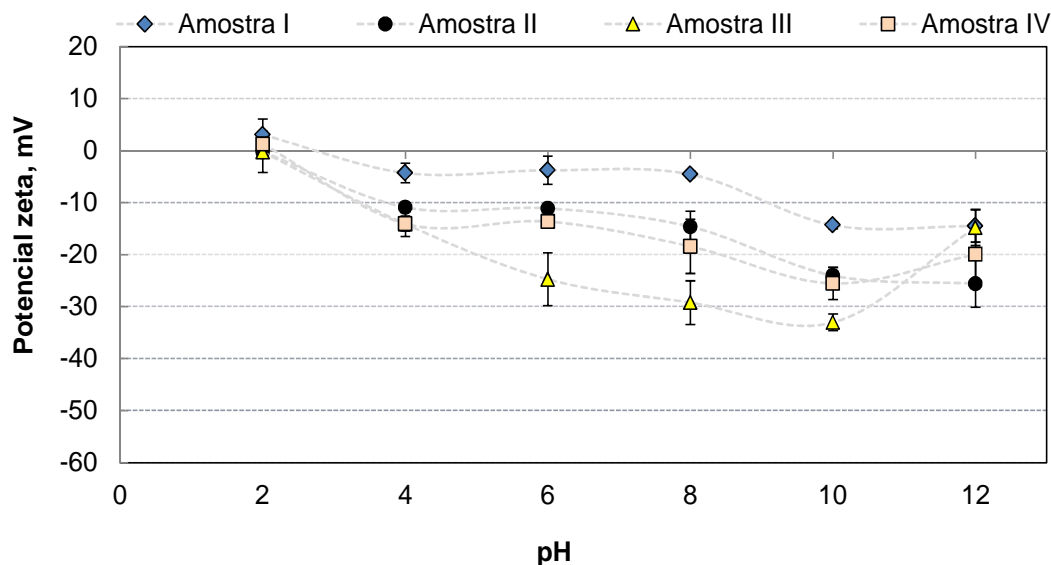


Figura 15: Potencial zeta das amostras de basalto em função do pH do meio. Condições experimentais: [partículas]: 10^{-3} mol.L⁻¹, T: 25 °C. Erro exp.: $\pm 0,7$ mV.

Estes resultados (Figura 15) demonstraram que as partículas minerais apresentaram uma densidade de carga negativa em toda a faixa de pH estudada, sendo o ponto isoelétrico próximo de pH 2 para todas as amostras. Estas cargas superficiais podem ser originadas no intemperismo por hidrólise, no qual há a adsorção de H⁺ e OH⁻ na superfície dos minerais, causando posteriormente a liberação de íons presentes na amostra para o meio (ALLEONI e MELO, 2009). Estas cargas, também podem ter origem na quebra de ligações próximas à margem da unidade estrutural, liberando assim os cátions para o meio e deixando a superfície coberta por ânions. E por fim, pode ser devido à substituição isomórfica na estrutura cristalina por ânions AlO⁻ e SiO₂²⁻, todas estas características são importantes para a utilização do material em rochagem (BONATO et al., 1998).

Estes resultados indicam um potencial de adsorção de cargas positivas na superfície das partículas, tais como íons H⁺, demonstrando a possibilidade de correção de acidez de solos, assim como ocorre na técnica de calagem. Além disto, é possível sugerir que a formação destas cargas superficiais negativas requerem cátions de compensação para equilíbrio da estrutura cristalina, permitindo fenômenos de troca iônica a partir da liberação (troca) destes íons nutrientes para o meio, sendo estes posteriormente absorvidos pelas espécies vegetais.

5.1.4 Comportamento das partículas minerais de basalto em meio aquoso

Como já mencionado anteriormente, as características nutricionais das rochas não podem ser avaliadas somente a partir de sua análise elementar ou de seus óxidos, pois as análises elementares mostram apenas a existência e teores dos elementos de interesse, mas não demonstram a quantidade que será disponibilizada para o solo. Devido a este fato, é importante a realização de estudos que verifiquem o potencial de disponibilidade de macro e micronutrientes das amostras estudadas.

5.1.4.1 Disponibilidade de nutrientes para rochagem

Os resultados obtidos nos ensaios de disponibilidade de nutrientes para o meio aquoso estão descritos na Tabela 13.

Tabela 13: Concentração de macro e micronutrientes (agronutrientes) disponibilizados pelas amostras para o meio aquoso.

Nutrientes	Amostras			
	I	II	III	IV
Alumínio (%)	0	0	0	0
Cálcio (%)	0,1	0,11	0,12	0,12
Magnésio (mg.L ⁻¹)	1,0	1,1	2,2	0,9
Manganês (mg.L ⁻¹)	3,0	2,0	6,0	2,0
Fósforo (mg.L ⁻¹)	>100	>100	>100	>100
Potássio (mg.L ⁻¹)	152	59	104	76
Boro (mg.L ⁻¹)	0,2	0,2	0,2	0,2
Cobre (mg.L ⁻¹)	8,4	4,0	2,2	4,8
Enxofre (mg.L ⁻¹)	1,4	1,3	139	1,8
Zinco (mg.L ⁻¹)	1,6	1,7	1,9	1,8
Argila (%)	12	6	51	6

Conforme os resultados demonstrados na Tabela 13, embora as amostras possuam altos teores de óxido de alumínio, detectados no estudo de

fluorescência de raios-X, este elemento não é liberado para o meio aquoso. Este fato é extremamente positivo, devido ao alumínio ser tóxico para os vegetais, causando principalmente a redução do seu crescimento (MALAVOLTA, 2006).

O estudo também mostrou que os elementos como fósforo e potássio são facilmente liberados para o meio aquoso. Neste caso, o fósforo apresentou concentrações acima de 100 mg.L^{-1} para todas as amostras indicando que o material seria capaz de auxiliar no crescimento dos vegetais, na floração e na formação de sementes (MALAVOLTA, 2006).

No caso do potássio a amostra I apresentou a maior concentração (152 mg.L^{-1}), seguida pela amostra III (104 mg.L^{-1}) e IV (76 mg.L^{-1}), sendo a amostra II a que apresentou o menor valor (59 mg.L^{-1}). Segundo Malavolta (2006), este nutriente é importante para regular a perda de água pelas plantas e aumentar sua tolerância à seca.

A amostra III mostrou um teor elevado de enxofre (139 mg.L^{-1}), de acordo com Malavolta (2006) este nutriente é importante para a formação de aminoácidos e vitaminas necessárias para o desenvolvimento dos vegetais.

Os demais nutrientes podem ter apresentado baixos teores de disponibilidade em meio aquoso, devido ao pouco tempo de contato das amostras com o meio extrator, pois conforme estudos realizados por Theodoro, Leonardos e Almeida (2010) as rochas podem levar anos para liberar seus nutrientes para o meio.

Tabela 14: Concentração de macronutrientes disponibilizados para o meio aquoso em ácido cítrico.

Nutrientes	Amostras			
	I (mg.L^{-1})	II (mg.L^{-1})	III (mg.L^{-1})	IV (mg.L^{-1})
Alumínio	0,43	0,41	0,40	0,39
Ferro	346,0	130,0	126,0	278,0
Sódio	0,20	0,20	0,20	0,20
Potássio	5,40	3,60	1,90	1,10

Os dados obtidos em meio aquoso de ácido cítrico comprovaram a indisponibilidade de alumínio para o meio, caracterizando uma grande vantagem destas partículas para aplicação na rochagem.

As concentrações de potássio disponibilizadas neste estudo foram inferiores as extraídas no procedimento anterior, isto pode ter acontecido devido ao tipo de solução extratora utilizada. No primeiro procedimento foram usado ácidos fortes (HCl e H₂SO₄) que provocam maior dissolução dos componentes minerais das amostra e no segundo procedimento foi utilizado um ácido fraco (ácido cítrico) que possui menor capacidade de dissolução dos componentes da rocha.

Estes dados também mostraram que a amostra I disponibilizou uma concentração (346 mg.L⁻¹) mais elevada de ferro para o meio concordando com os dados anteriores. Este elemento é necessário para a fotossíntese das plantas (MALAVOLTA, 2006). Embora a literatura (SPOSITO, 1989), já tenha citado alguns dados que mostram que o teor ideal deste nutriente no solo deve estar na faixa de 25.000 a 40.000 mg.L⁻¹, as concentrações apresentadas no presente estudo demonstram a possibilidade desta disponibilidade para o solo, bem como considera que maiores concentrações podem ser obtidas em períodos de contato maiores do que aqueles aplicados durante os estudos.

Através dos resultados obtidos nas análises de disponibilidade de nutrientes foi possível observar que as amostras possuem a capacidade de disponibilizar todos os seus agronutrientes importantes para as plantas. Ainda, embora alguns teores pareçam baixos, acredita-se na possibilidade de disposição em longos períodos e/ou utilização de maiores proporções partículas/solo para rochagem.

5.1.4.2 Modificação do pH para calagem

O meio contendo com pH naturalmente 5,6, após o contato com amostra I apresentou um valor de pH de 7,70 (Erro exp.: ± 0,01). Já com as amostras II e IV, o pH foi para 8,60 (Erro exp.: ± 0,01), e com a amostra III, 6,70 (Erro exp.: ± 0,01). Estes valores de pH demonstraram um fato muito positivo no uso destas partículas de basalto para a rochagem, pois é possível que estas não agravassem

as condições normalmente ácidas dos solos da região serrana, onde seriam empregados para rochagem.

Adicionalmente, estes resultados demonstram que, em todos os casos, o pH aumentou, sugerindo que possivelmente em contato com o solo, estas partículas possam neutralizar uma fração ácida do mesmo ao longo do tempo de exposição. Esta elevação no valor do pH pode ser atribuída às quantidades de CaO e de MgO presentes nas amostras, conforme demonstrado no item 5.1.2.2, pois de acordo com Knapik (2005), a elevação do pH de seus estudos envolvendo mudas de *Prunus sellowii* submetidas à adubação convencional e alternativa com pó de basalto, foi decorrente das maiores quantidades de Ca e Mg adicionadas ao substrato pelo pó de rocha.

Estes dados também concordam com estudos de Welter (2010) que utilizou pó de basalto para o plantio de açaí na Amazônia. Neste caso, o autor utilizou $8,24 \text{ g.Kg}^{-1}$ de pó de basalto com 0,05 mm de granulometria e demonstrou um aumento do pH do substrato de 4,8 para 5,6 em 120 dias. Silva (2011) também utilizou pó de basalto na agricultura em diferentes concentrações (10, 20, 50 e 100 t.ha^{-1}), obtendo um aumento médio do pH de 5,5 para 6,1. Segundo Stevenson e Cole (1999), este incremento no pH é uma característica importante do pó de rocha, pois esta alcalinização pode estimular a atividade microbiológica e diminuir as perdas de potássio por lixiviação, devido à formação de cargas negativas (QUAGGIO, 2000).

5.1.5 Estimativa da aplicação das partículas de basalto na agricultura

Os estudos da estimativa de aplicação de partículas de basalto na rochagem demonstraram um desenvolvimento satisfatório para a cultura de milho. A Figura 16 mostra os recipientes onde foi realizado este plantio.

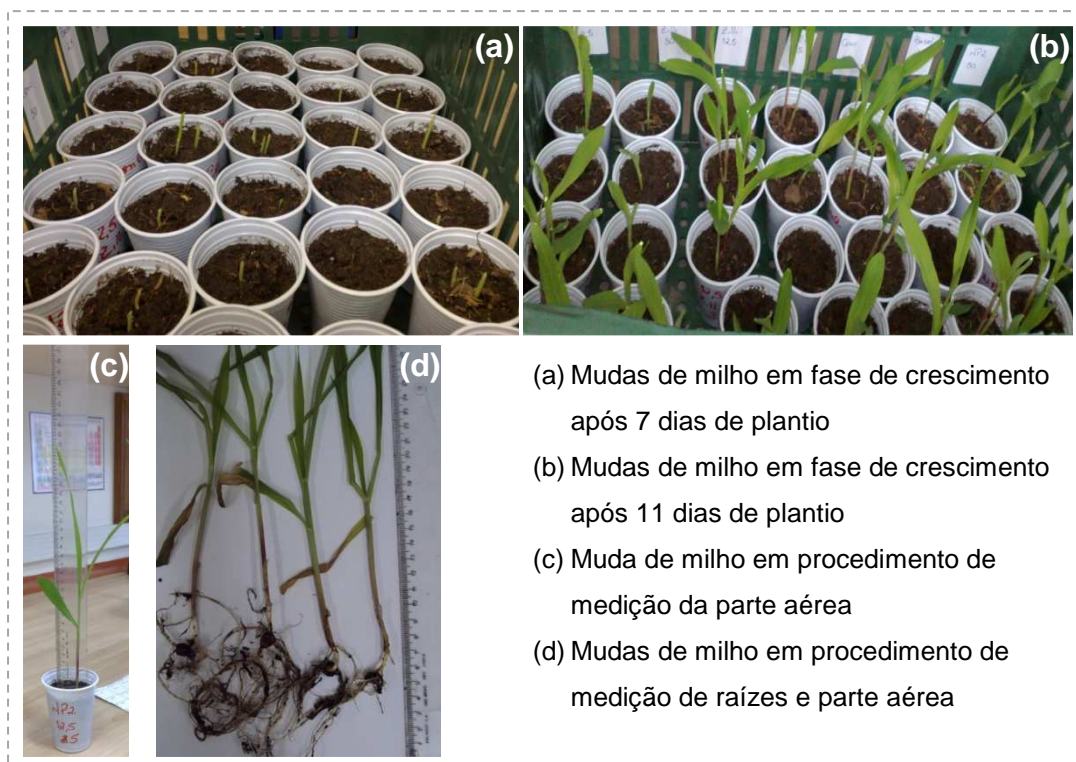


Figura 16: Mudanças de milho investigadas na estimativa de aplicação das partículas minerais de basalto na rochagem.

As Figura 17, 18 e 19 mostram os resultados obtidos para o tamanho da parte aérea (Figura 16.a) das mudas de milho.

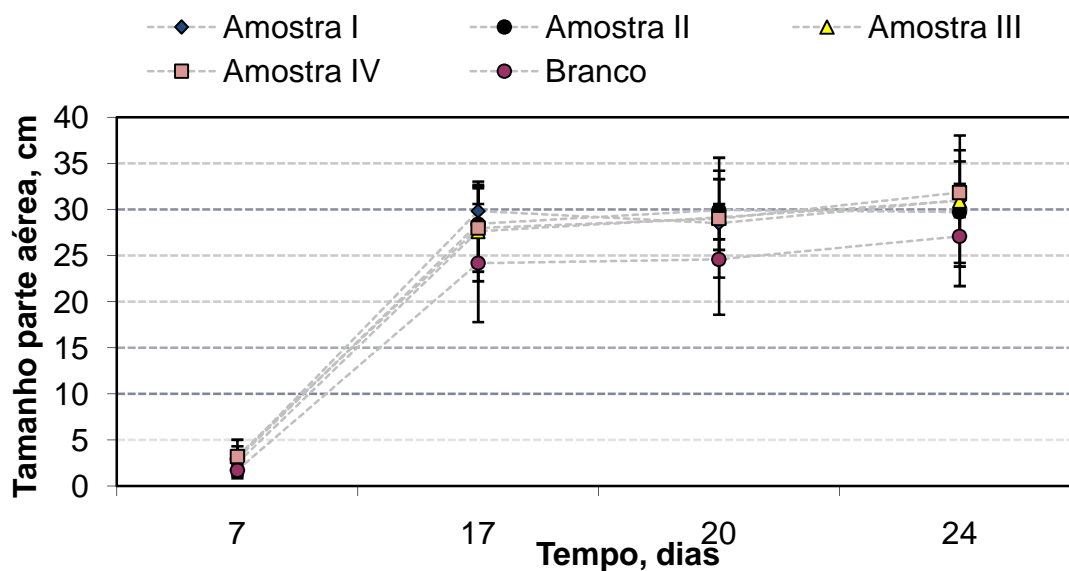


Figura 17: Tamanho da parte aérea vegetal em função do tempo utilizando uma concentração de $2,5 \text{ g/kg}_{\text{solo}}$ de partículas minerais.

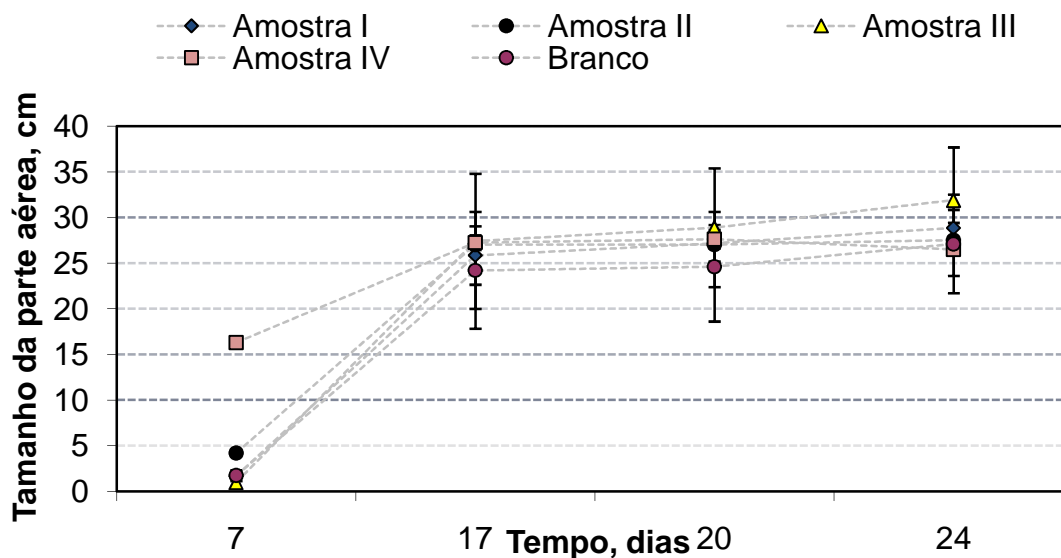


Figura 18: Tamanho da parte aérea vegetal em função do tempo utilizando uma concentração de 12,5 g/kg_{solo} de partículas minerais.

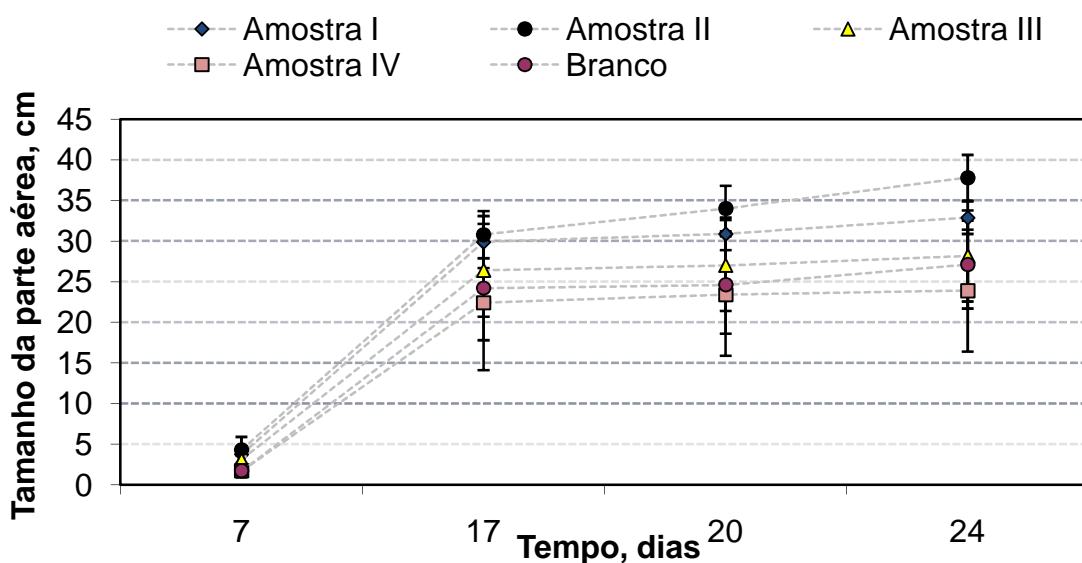


Figura 19: Tamanho da parte aérea vegetal em função do tempo utilizando uma concentração de 50 g/kg_{solo} de partículas minerais.

Considerando os resultados demonstrados na Figura 17 foi possível observar que todas as plantas que receberam concentrações de partículas de basalto tiveram o crescimento superior ao branco. Estes resultados são condizentes com o estudo realizado por Theodoro e Leonardos (2006), no qual os autores observaram um aumento nos teores de macro e micronutrientes nos cultivos que receberam partículas minerais, os quais permaneceram com teores

maiores aos das parcelas que não receberam o pó, mesmo após cinco anos da implantação do experimento.

Na Figura 18 os resultados mostram que os vegetais cultivados utilizando partículas minerais tiveram um desenvolvimento mais rápido em comparação com aqueles que não receberam as partículas de basalto. Já na Figura 19 foi possível observar que com doses mais altas de partículas de basalto a diferença no crescimento das plantas fica mais acentuada, em relação às diferentes amostras utilizadas, demonstrando que para o cultivo de milho a amostra II apresentou melhores resultados de desenvolvimento vegetal.

Na Tabela 15 são mostrados os resultados obtidos na análise de massa seca das raízes das mudas de milho. O branco apresentou valor médio de 1,19% de massa seca das raízes.

Tabela 15: Valores médios de massa seca das raízes. Erro exp.: $\pm 0,02$.

Concentração (g_{partículas}/kg_{solo})	Amostras			
	I (%)	II (%)	III (%)	IV (%)
2,5	1,20	0,55	1,31	0,42
12,5	0,74	0,37	1,28	0,16
50	1,60	0,20	0,12	0,75

Os resultados apresentados na Tabela 15 demonstram que a amostra I apresentou maior teor de massa seca nas raízes que a amostra IV, indicando que as raízes das plantas cultivadas com partículas da amostra I absorveram mais água que as cultivadas com a amostra IV. Este fato é importante e, pois reflete o potencial de desenvolvimento das plantas na presença destas partículas. Um comparativo dos dados também confirma o menor desenvolvimento vegetal quando a amostra IV foi utilizada

Os resultados obtidos para a massa seca da parte aérea das mudas de milho são descritos na Tabela Tabela 16. Na análise do branco foi obtido o valor médio de 2,44% de massa seca da parte aérea.

Tabela 16: Valores médios de massa seca da parte aérea. Erro exp.: $\pm 0,02$.

Concentração (g_{partículas}/kg_{solo})	Amostras			
	I (%)	II (%)	III (%)	IV (%)
2,5	1,26	3,00	2,28	0,69
12,5	1,34	0,03	2,47	0,03
50	2,30	1,71	0,28	2,12

O tamanho das raízes das mudas de milho está descritos na Tabela 17. O branco realizado apresentou tamanho médio de raiz de 22,80 cm.

Tabela 17: Valores médios de tamanho das raízes.

Concentração (g_{partículas}/kg_{solo})	Amostras			
	I (cm)	II (cm)	III (cm)	IV (cm)
2,5	12,50 ($\pm 9,57$)	24,75 ($\pm 12,10$)	20,60 ($\pm 6,63$)	17,00 ($\pm 7,93$)
12,5	21,33 ($\pm 8,55$)	35,00 ($\pm 6,10$)	33,50 ($\pm 12,80$)	8,00 ($\pm 7,07$)
50	18,00 ($\pm 8,16$)	18,38 ($\pm 5,62$)	4,25 ($\pm 1,77$)	21,70 ($\pm 8,62$)

Os resultados apresentados na Tabela 17 demonstraram que este parâmetro não é o mais adequado para avaliar o desempenho da utilização das partículas de basalto no cultivo de milho, pois ele ocasiona altos desvios padrão por ser um parâmetro que depende também das propriedades biológicas das sementes.

Na Tabela 18 são apresentados os resultados obtidos para os diâmetros do colo das mudas de milho. O branco apresentou 0,46 cm de valor médio para o diâmetro do colo.

Tabela 18: Valores médios de diâmetro de colo.

Concentração (g_{partículas}/kg_{solo})	Amostras			
	I (cm)	II (cm)	III (cm)	IV (cm)
2,5	0,45 (± 0, 05)	0,43 (± 0,04)	0,48 (± 0,06)	0,46 (± 0,03)
12,5	0,47 (± 0,03)	0,52 (± 0,07)	0,44 (± 0,08)	0,51 (± 0,06)
50	0,50 (± 0,06)	0,47 (± 0,05)	0,46 (± 0,04)	0,49 (± 0,07)

Observando os valores da Tabela 18, foi possível perceber que não houve variação com a utilização ou não das partículas de basalto no cultivo das mudas de milho, isto pode ser devido ao curto tempo do experimento, pois o crescimento do diâmetro do colo dos vegetais depende diretamente da disponibilidade de nutrientes do solo e como demonstrou o estudo realizado por Theodoro, Leonardos e Almeida (2010), as rochas podem disponibilizar ao solo macro e micronutrientes importantes, mas estes nutrientes não são disponibilizados prontamente como no caso dos fertilizantes industriais de alta solubilidade, eles são liberados lentamente no solo ao longo de anos.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem estabelecer as seguintes conclusões:

1. As amostras dos resíduos de rochas de basalto, produzidas em operações de britagem do distrito mineiro do município de Nova Prata - RS, possuíram uma estrutura cristalina com predomínio de labradorita (73,5% para a amostra I, 51% para a amostra II, 52% para a amostra III e 61% para a amostra IV) e quartzo (9% para a amostra I, 19% para a amostra II, 15% para a amostra III e 13% para a amostra IV), a augita nas amostras I, III e IV (6%, 12%, 13%, respectivamente), o feldspato alcalino nas amostras I e II (5%, 15%, respectivamente) e a esmectita nas amostras I, II e III (3%, 7%, 10%, respectivamente). Na determinação dos óxidos por fluorescência de raios-X as amostras mostraram valores médios de 65% de SiO_2 , de 13,2% de Al_2O_3 , de 7,1% de Fe_2O_3 , de 3,5% de CaO , de 3,5% de K_2O e de 3,1% de Na_2O .
2. As amostras estudadas apresentaram valores médios de umidade de 0,34%, de massa específica $2,67 \text{ g/cm}^3$ e área superficial de $45 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ para as amostras brutas e de $69 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ para as amostra peneiradas em peneira ASTM 200. Adicionalmente, a capacidade de troca catiônica das amostras foram $1,31 \text{ meq.g}^{-1}$, respectivamente indicando que as amostras possuíram capacidade de disponibilizar cátions para o solo, proporcionando assim a troca de nutrientes com o meio e confirmando seu potencial para utilização como petrofertilizantes. Complementarmente, o potencial zeta das partículas mostrou uma densidade de cargas superficiais negativas com um ponto isoelétrico em, aproximadamente, pH 2, para todas as amostras. Estes dados indicam uma boa propensão para adsorção preferencial de íons H^+ , podendo viabilizar as correções de pH do meio.
3. Os estudos de disponibilização de nutrientes em meio aquoso demonstraram que as amostras foram capazes de liberar bons teores de macronutrientes como fósforo ($>100 \text{ mg.L}^{-1}$), potássio (152 mg.L^{-1} para a amostra I, 59 mg.L^{-1} para a amostra II, 104 mg.L^{-1} para a amostra III e 76 mg.L^{-1} para a amostra IV) e o enxofre, no caso da amostra III (139 mg.L^{-1}). As amostras também mostraram a capacidade de liberação de micronutrientes como cobre ($8,4 \text{ mg.L}^{-1}$ para a amostra I, 4 mg.L^{-1} para a amostra II, $2,2 \text{ mg.L}^{-1}$ para a amostra

III e $4,8 \text{ mg.L}^{-1}$ para a amostra IV), manganês (3 mg.L^{-1} para a amostra I, 2 mg.L^{-1} para a amostra II, 6 mg.L^{-1} para a amostra III e 2 mg.L^{-1} para a amostra IV) e zinco ($1,6 \text{ mg.L}^{-1}$ para a amostra I, $1,7 \text{ mg.L}^{-1}$ para a amostra II, $1,9 \text{ mg.L}^{-1}$ para a amostra III e $1,8 \text{ mg.L}^{-1}$ para a amostra IV), importantes para o desenvolvimento vegetal, embora em teores baixos. Outro dado relevante obtido neste estudo foi a indisponibilidade de alumínio para o meio, sendo esta uma grande vantagem por se tratar de um metal tóxico para o desenvolvimento das plantas.

4. O estudo de variação de pH na presença de partículas de basalto demonstrou que todas as amostras elevaram de 5,6 (pH natural) para 7,7 com amostra I; 8,6 com as amostras II e IV e 6,7 com amostra III, indicando que todas apresentam potencial para melhorar as condições de acidez de solos cultiváveis.
5. A estimativa de aplicação de partículas de basalto na rochagem demonstrou um desenvolvimento satisfatório para a cultura de milho realizada, de modo que independente da concentração usada, todos os vegetais apresentaram um desenvolvimento melhor que quando na ausência das partículas de basalto. Também foi possível observar que as culturas que receberam maiores concentrações ($50 \text{ g/kg}_{\text{solo}}$) de minerais cresceram mais rapidamente, sendo a amostra II a que demonstrou melhores resultados no cultivo de milho realizado.
6. Foi possível evidenciar a partir de todos os resultados obtidos nos estudos de caracterização, de disponibilização de nutrientes para o meio aquoso e de aplicação das partículas de basalto na agricultura, que a rochagem a partir de partículas minerais de basalto é uma técnica promissora e viável para aplicação junto à pequenos e médios agricultores que poderão ser beneficiados em termos de produtividade e custos. Da mesma forma, as empresas mineradoras da região de Nova Prata passam a transformar seus resíduos em produtos reduzindo de forma significativa perigos ambientais, bem como custos elevados com disposições finais. Ainda, produtos das pedreiras podem ganhar novos mercados na agricultura, ampliando assim a extensão de mercado de pequenas empresas mineradoras da região.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

1. Avaliação da aplicação das partículas de basalto em campo para cultivo de vários tipos de vegetais, como milho, feijão, hortaliças, soja, videiras, etc.
2. Avaliação e quantificação das concentrações de nutrientes no solo antes e depois a aplicação das partículas de basalto para o cultivo de vegetais.
3. Avaliação das plantas cultivadas utilizando as partículas de basalto em comparação com outras que não receberam a petrofertilização.
4. Estudos da aplicação de partículas de basalto misturadas com material orgânico, para verificar se há a potencialização da liberação de nutrientes, como sugere a literatura.
5. Avaliação econômica dos benefícios para ambos os setores (mineral e agricultura).

REFERÊNCIAS

- ANDA. **Associação Nacional para Difusão de Adubos**. 2012. Disponível em: <http://www.anda.org.br>. Acesso em: 10 set 2012
- ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O. **A simple method for the characterization of clay minerals by X-ray diffraction**, Universidade do Vale do Paraíba, UNIVAP, 2002.
- ALLEONI, L. R. F.; MELO, V. F. **Química e Mineralogia do Solo**. SBCS, Viçosa, 2009.
- ALMEIDA, F. F. M. Síntese sobre a Tectônica da Bacia do Paraná. In: Simpósio Regional de Geologia. **Atas...**, São Paulo, SBG, 1981.
- ALMEIDA, J. A.; ALMEIDA, K. A. de; MAFRA, A. L. Saprólito de basalto com zeólitas como fonte de nutrientes as plantas. In: Reunião de fertilidade do solo e nutrição de plantas, 26., Lages, 2004. **Resumos...** Lages: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1 CD (Resumos/FSNP), 2004.
- AMPARO, A. Farinha de rocha e biomassa. **Agroecologia Hoje**. Botucatu, n. 20, p.10-12, ago./set. 2003.
- ANDREOLI, C.V. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura e sua influência em características ambientais no agrossistema**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 278 p. 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457/86: amostra de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181/84 Solo: análise granulométrica conjunta**. Rio de Janeiro, 1984.
- BARBOSA, F.L.M.; GURMENDI, A.C. **Economia mineral do Brasil**. Brasília: DNPM. 278 p., 2002.
- BARRETO, S. B. **A farinha de rochas MB-4 e o solo**. 1998. Disponível em: www.mibasa.com.br.x. Acesso em 20 set 2012.
- BERGMANN, M.; HOFF, R.; THEODORO, S. H. Rochagem: Viabilizando o uso sustentável dos descartes de mineração no Distrito Mineiro de Ametista do Sul (DMAS), RS. In: **I Congresso Brasileiro de Rochagem**, 2009, Planaltina: Anais ..., EMBRAPA, 2011.
- BLUM, W.E.H.; HERBINGER, B.; MENTLER, A.; OTTNER, F.; POLLAK, M.; UNGER, E.; WENZEL, W.W. Zur Verwendung von Gesteinsmehlen in der Landwirtschaft. In: **Chemisch-mineralogische Zusammensetzung und Eignung von Gesteinsmehlen als Düngemittel**. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde, 152: 421-425, 1989.

BOLLAND, M.D.A.; BAKER, M.J. Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.56, p.59-68, 2000.

BONATO, C. M.; RUBIN FILHO, C. J.; MELGES, E.; SANTOS, V. D. Nutrição mineral de plantas. Material Didático. Engenharia Agrônômica. Universidade de Maringá. Maringá, Paraná, 103 p. 1998.

BONNET, B. R. P.; ANDREOLI, C. V.; QUEIROZ, S. M. P.; FERNANDES, F. Reciclagem agrícola do lodo de esgotos: impactos ambientais potenciais e monitoramento no Estado do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Defesa do Meio Ambiente, 4, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Clube de Engenharia / UFRJ, v. 1. p. 63-72. 1995.

BRADY N. C.; WEIL R. R. **The nature and properties of soils**. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, 12th ed., 881 p. 1999.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios / Britagem, Peneiramento e Moagem**. Primeira edição, v. 3, Signus Editora, São Paulo, 2003.

CHICOTA, R. **Avaliação no campo de um TDR segmento para determinação da umidade do solo**. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 100 p. 2003.

CONCEIÇÃO, J. C. J.; ZALAN, P. V.; WOLF, S. Mecanismo, evolução e cronologia do rift Sul-Atlântico. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, vol. 2, 1988.

CORDANI, U. G.; NEVES, B. B. B.; FUCK, R. A.; PORTO, R.; THOMAZ FILHO, A.; CUNHA, F. M. B. Estudo Preliminar de integração do pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. **Ciências e Técnica do Petróleo**, Petrobrás/Cenpes/Sintep, Seção Exploração do Petróleo, Rio de Janeiro, n. 15, 1984.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: sistema de informações geográficas-SIG**. Escala 1:1.000.000. Brasília: CPRM, Programa Geologia do Brasil, 1 CD-ROM, 2004.

DEKKER, M. **Powder technology handbook**. 2nd ed. Edited by Keishi Goton, Hiroaki Masuda and Ko Higashitani, 1997.

DE ALMEIDA, E.; DA SILVA, F. J. P. Transição agroecológica de sistemas produtivos familiares no Sul do Paraná e Planalto Norte Catarinense – O relato da experiência com o pó de basalto; In: I Congresso Brasileiro de Rochagem, 2009, Planaltina. **Anais ...**: EMBRAPA, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, p. 171-222. 1999.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; KLANT, E. Basalto moído como fonte de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.1, p.11-20, 1998.

FERNANDES, M. M. **Viabilidade agrônômica do uso do rejeito de garimpos do Distrito Pegmatítico de Araçuaí, MG**. Tese de Doutorado, IGC/UFMG, 172 p. 2008.

FERREIRA, E. R. N. C.; ALMEIDA, J. A.; MAFRA, A. L. Pó de basalto, desenvolvimento e nutrição do feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) e propriedades químicas de um Cambissolo Húmico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 8, p. 111 - 121, 2009.

FURLAN, F.; COSTA, M.; COSTA, L. A.; MARINI, D.; CASTOLDI, G.; SOUZA, J.; PIVETTA, L. Substratos alternativos para produção de mudas de couve em sistema orgânico. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v.2, n.2, p.1689, 2007.

GARDNER, W. H. Water content. In: KLUTE, A. (Ed). **Methods of soil analysis I: Physical and mineralogical methods**. Madison: Soil Science Society of America, cap. 21, p. 493-544, 1986.

GILLMAN, G.P., BUEKKETT, D.C.; COVENTRY, R.J. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effects ion soil cation chemistry. **Australian Journal of Soil Research**, Montpellier, v.39, p. 799-811, 2001.

GILLMAN, G.P., The effect of crushed basalt scoria on the cation exchange properties of a highly weathered soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p.465-468, 1980.

GOMES, C. B. **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia**, Edgard Blücher, São Paulo, 1984.

HARLEY, A. D.; GILKES, R.J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. In: **Agroecosystems - Formerly Fertilizer Research**. No 56, p.: 11- 36, 2000.

HUNTER, R. J. **Zeta potencial in colloid science: principles and applications**. London: Academic Press, 1981.

INOCENCIO, M. F.; NOVELINO, J. O.; PAIM, L. R.; GUTIERREZ, R. S. Efeito da aplicação de basalto triturado nas características químicas de amostras de solo do estado de mato grosso do sul. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.22, n.4, p.145-151, out.-dez. 2009.

IRAMINA, W.S.; TACHIBANA, I. K.; SILVA, L. M. C.; ESTON, S. M.; Identificação e Controle de Riscos Ocupacionais em pedreira da região metropolitana de São Paulo. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, p. 503-509, dez 2009.

KÄMPF, N.; STRECK, E. V.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. do; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, RS: EMATER/RS/UFRGS, 2002.

KÄMPF, N. CURI, N., MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: ALLEONI, L. R. F.; MELO, V. F. **Química e Mineralogia do Solo**. SBCS, Viçosa, 2009.

KAUTZMANN, R. M., TOSCAN, L., SABEDOT, S. O rejeito da mineração de basalto no nordeste do Estado do Rio Grande do Sul: diagnóstico do problema. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 4, p.657-662, 2007.

KHATOUNAIN, C. A., **A reconstrução ecológica da agricultura**. Botucatu: Agroecológica, 348 p. 2001.

KIEHL, E. J. **Manual de Compostagem**: maturação e qualidade do composto. 3. ed. Piracicaba: E. J. Kiehl, 171p. 2002.

KNAPIK, J. G. Utilização do pó de basalto como alternativa a adubação convencional na produção de mudas de *Mimosa scabrella* e *prunus sellowii*. 2005. 163p. (Dissertação de mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LEVINSON, A.A. **Introduction to exploration geochemistry**. Applied Publ. Ltd. Wilmette, Illinois, USA, 614p. 1974.

LIMA, R. M. F.; QUIRINO, L. Efeito da adsorção de amina no potencial zeta da hematita e do quartzo. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, 56(1): 45-49, jan. mar. 2003.

LINHARES, S; GEWANDSZNAJDER, F. **Biologia**. 1ª ed. São Paulo. Editora Ática, v. único, 2008.

LOUREIRO, F.E. L; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. **Fertilizantes, agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo, teoria e prática**. 2ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002. 182 p.

MACHADO FILHO, L.; SILVEROL, A. C. Utilização de pó de granito e manto de alteração de piroxenito para fertilização de solos. **Rev. Bras. Agroecologia**, vol.2, n.1, 2007.

MADUREIRA FILHO, J.B.; ATENCIO, D.; McREATH, I. Minerais e rochas: Constituintes da Terra sólida. In: TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo, Oficina de Textos, p.27-42. 2003.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: CERES, 631p. 2006.

MARTIN, H.W. SPARKS, D.L. **Kinetics of nonexchangeable potassium release from two Coastal Plain soils**. Soil Sci. Soc. Am. J., 47:885-887, 1983.

MELAMHED, R.; GASPAR, J.C.; MIEKELEY, N. **Pó de rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentável**. In: LAPIDO LOUREIRO, F.E.; MELAMHED, R. **Fertilizantes e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

MELO, V.F.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; NOVAIS, R.F. FONTES, M.P.F. **Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto**. R. Bras. Ci. Solo, 19:165-171, 1995.

METCALF. EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and reuse**. 4 th ed. Revisão de George Tchobanoglous, Franklin Burton e David Stensel. New York: Mc Graw-Hill, 2003.

MICHELIN, C. R. L. **Sequência de formação das cavidades no basalto e seu preenchimento com zeolitas, arenitos, ágatas e ametista: Derrame Miolo, São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul, 2007**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

NICHELE, E. R. **Utilização de pó de rochas no desenvolvimento e nutrição do feijão comum (*Phaseolus vulgaris*)**. Dissertação de mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Estadual do Estado de Santa Catarina - UDESC, Lages, 65p. 2006.

NOVELINO, J.O. et al. Características químicas de dois latossolos de Dourados-MS, submetidos a aplicação de po de basalto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 25, **Anais...** Vicosa-MG, 1995.

OSTERROHT, M. V. 2003. Rochagem Para Quê? **Revista Agroecologia Hoje**, Botucatu, nº 20, p. 12-15. Ago/set 2003.

PEDREIRA SARGON. Produtos. Disponível em:
<http://www.pedreirasargon.com.br/produtos.htm>. Acesso: 20 set 2012.

PRESS, F. et al. **Para entender a Terra**. 4a ed. Tradução de MENEGAT, R. et al. Porto Alegre: Bookman, 656p. 2006.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, v. 1, 111 p. 2000.

ROISEMBERG, Ari; VIERO, Antônio Pedro. O vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, Michael; DE ROS, Luiz Fernando (org.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2002.

STEVENSON, F. J.; COLE, M. A. **Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients**. New York: John Wiley, v. 1. 427 p. 1999.

SHOEMAKER, H.E.; Mc LEAN, E.O.; PRATT, P.F. Buffer methods for determining lime requirement of soil with appreciable amounts of extractable aluminium. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, vol.25, 1961.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de Análise Instrumental**, Porto Alegre, Bookman, 628 p. 2002.

SONG, S.K. HUANG, P.M. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. **Soil Science Society of America Journal**, n. 52, p. 383-390. 1988.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 345p. 1989.

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

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

TEDESCO, M.J., GIANELLO, C., BISSANI, C., et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Depto de Solos da UFRGS, Boletim Técnico n.5, 174 p. 1995.

TEIXEIRA, A. M. S.; SAMPAIO, J. A.; GARRIDO, F. M. S.; MEDEIROS, M. E.; Technological Characterization of Serpentinite rock from Andorinha (Bahia/Brazil). **The Minerals, Metals & Materials Society – Extraction & Processing**, 1, 293 p. 2010.

THEODORO, S.H. LEONARDOS, O.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Brasília, v. 78, p. 721-730, 2006.

THEODORO, V. C. de A.; ALVARENGA, M. I. N.; GUIMARÃES, R. J.; MOURÃO JUNIOR, M. Carbono da biomassa microbiana e micorriza em solo sob mata nativa e agroecossistemas cafeeiros. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 147-153. 2003.

THEODORO S.H.; LEONARDOS, O.H.; FONSECA, R. Rochagem: uma construção do link entre a mineração e a agricultura. **Congresso Brasileiro de Geologia**, Pará, 2010.

THEODORO, S. H. LEONARDOS, O. Rochagem: uma questão de soberania nacional. In: **XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica**. Gramado, RS, 2011.

THEODORO, S. H. LEONARDOS, O. H. DUBOIS, A. M. Rochagem e compostagem: uma forma ambientalmente correta de recuperar e fertilizar áreas degradadas. In: Suzi Huff Theodoro SH (Org.). **Conflitos e Uso Sustentável dos Recursos Naturais**. Rio de Janeiro, Garamond, p.85-102, 2002.

THEODORO, S. H. **Fertilização da terra pela terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural**. Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília (CDS/UnB). Brasília, 2000.

THEODORO, S. H. Rochas para plantas: o resgate de uma produção alimentar sadia. Anais do II SUFFIB – **Seminário: O uso da fração Fina da Britagem**, Cuchierato et. al. (eds).CD_ROM. São Paulo, 2005.

THEODORO, S.H. LEONARDOS, O.H **Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution**. Academia Brasileira de Ciências. Anais. Rio de Janeiro/RJ. vol.78 n.4, 2006.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H.; DE ALMEIDA, E. Mecanismos para disponibilização de nutrientes minerais a partir de processos biológicos; In: I Congresso Brasileiro de Rochagem, 2009, Planaltina: **Anais...** EMBRAPA, 2010.

TOLEDO, P. P.; BERTOLINO, L. C.; SILVA, A. A. S.; SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. Verdete da região de cedro de Abaeté (mg) como fonte alternativa para potássio, **Geociências**, v. 30, n. 3, p. 345-356, UNESP, São Paulo, 2011.

VAN DEN HUL, H.J.; LYKLEMA, J. Determination of specific surface areas of dispersed materials. Comparison of the negative adsorption methods with some other methods. **Journal of the American Chemical Society**. V. 90, n.12, p. 3010-3015, 1968.

Van STRAATEN, P. **Agrogeology - The use of Rocks for Crops**. Univ. of Guelph, Guelph, Ontario, Canada, 440 p. 2007.

VEIGA, M. A. M. S. **Determinação de Elementos Traços por AAS e ICP-MS Após Extração no Ponto Nuvem, Usando Dietil-Ditiofosfato Como Agente Quelante**, Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, 2000.

von FRAGSTEIN, P.; PERTL, W. & VOGTMANN, H. Verwitterungsverhalten silikatischer Gesteinsmehle unter Laborbedingungen. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 151, p. 141-146, 1988.

WENDLING, I.; GATTO, A. **Substratos, adubação e irrigação na produção de mudas**. Aprenda Fácil, Viçosa, 166 p. 2002.

WELTER, M. K. **Doses de pó de basalto no desenvolvimento inicial de mudas de fruteiras nativas da Amazônia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Roraima. Boa Vista, 2010.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. In: Simpósio Sul Brasileiro de Geologia. **Atas...** vol. 1, Curitiba: SBG, 1987.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. (eds): **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**, PETROBRÁS/SEREC/CEN-SUD, Rio de Janeiro, 1990.