

Rochas basálticas para rejuvenescer solos intemperizados¹

Basalt rocks to rejuvenate weathered soils

Suzi Huff Theodoro²

Andréa Sander³

Diego Felipe Mosquera Burbano⁴

Gustavo Rosa Almeida⁵

Resumo

O Brasil é um país de imensa geodiversidade, o que lhe garante um papel relevante no setor mineral internacional. Dentro desse vasto patrimônio, algumas rochas, além de serem fontes de diversos bens minerais, são aptas para uso como fertilizantes. Essa nova rota tecnológica, denominada rochagem, prevê que determinadas rochas, que são ricas em macro e micronutrientes, convertem-se em insumos agrícolas capazes de incrementar os níveis de fertilidade, melhorando a produção e a qualidade nutricional dos alimentos, bem como reduzindo custos de produção. Este trabalho tem o objetivo de apresentar os benefícios do uso de rochas basálticas (ricas em Ca⁺², Mg⁺² e, eventualmente, K), disponíveis especialmente na região sul. Para ratificar essa possibilidade, dados secundários foram utilizados. Tais dados derivam de uma pesquisa que testou agronomicamente um tipo de basalto que ocorre no município de Estância Velha (RS). A conformação geoquímica dessas rochas e os resultados agrônômicos indicam um grande potencial dos basaltos para alterar a fertilidade do solo.

Palavras-chave: Basaltos. Remineralizadores de solo. Fertilidade.

Abstract

Brazil is a country with huge geodiversity, which ensures it a distinguished position in the international mineral sector. Within this vast heritage, some rocks, besides being sources of various types of ores, are suitable for use as fertilizers. This new technological route, known as stonemeal technology, establishes that some rocks, which are rich in macro and micronutrients, can become agricultural inputs capable of increasing fertility levels, improving the production and nutritional quality of food, as well as reducing costs. This work has the objective of presenting the benefits of the use of basaltic rocks (rich in Ca⁺², Mg⁺² and, eventually, K), available especially in the southern region. To ratify this possibility, secondary data were used. Such data come from a research that agronomically tested a type of basalt that occurs in the municipality of Estância Velha (RS). The geochemical conformation of these rocks and the agronomic results indicate a great potential for basalts to alter soil fertility.

Keywords: Basalts. Soil remineralizer. Fertility.

1 Pesquisa elaborada com o apoio da INCOPEL (Indústria de Pedras Ltda.), Estância Velha, RS, Brasil, que forneceu informações, laudos e amostras.

2 Doutora em Desenvolvimento Sustentável e geóloga pela Universidade de Brasília (UNB), Brasília, DF, Brasil. Professora do PPG em Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável na UNB. <https://orcid.org/0000-0003-4659-269X>. E-mail: suzitheodoro@unb.br

3 Mestre em Geoquímica e Petrologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, geóloga pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS. Professora do Curso de Geologia na UNISINOS. <https://orcid.org/0000-0002-3638-4304>. E-mail: andrea.sander@cprm.gov.br

4 Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural pelo Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural pela UNB. Engenheiro Agropecuário pela Universidade de Cauca, Popayán, Colômbia. <https://orcid.org/0000-0001-5818-5229>. E-mail: diegpipe84@hotmail.com

5 Mestrando em Geologia pelo Programa de Pós-Graduação no Instituto de Geociências e geólogo pela UNB. <https://orcid.org/0000-0002-5338-0241>. E-mail: geol.rosag@gmail.com

Artigo recebido em 08.09.2020 e aceito em 12.04.2021.



1 Introdução

O Brasil é um País privilegiado em muitos aspectos. Possui uma imensa diversidade biológica, incluindo uma extensa floresta tropical; detém as maiores reservas hídricas do planeta; dispõe de uma geodiversidade igualmente vasta que originou solos que suportam uma grande variedade de agroecossistema e, ainda, conta com grandes reservas minerais e de petróleo.

Apesar dessas vantagens, o Brasil tem tido um papel pouco relevante na geopolítica global, já que se tornou um *player* que tem o papel de provedor de produtos minerais e agrícolas semiprocessados ou primários (FRISCHTAK; BELLUZZO, 2014). O Brasil exporta *commodities* agrícolas (soja, milho, algodão, cana-de-açúcar, café, laranja etc.) e importa fertilizantes solúveis, em especial aqueles de base NPK (ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS, 2019), utilizados para garantir a adubação dos solos. O País explora jazidas de ferro, nióbio, níquel, ouro, rochas ornamentais entre outros bens minerais e compra tecnologias que utilizam esses insumos (BRASIL, 2020).

Ao longo de dezenas ou mesmo centenas de anos, o Brasil tem exportado esses produtos (agrícolas e minerais) que são responsáveis por uma parte considerável de seu Produto Interno Bruto (PIB), o equivalente, em média, a cerca de 31,6% do PIB nacional (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2020). Apesar disso e, conforme mostrado por inúmeras publicações de institutos de pesquisa brasileiro (IBGE, IPEA etc.), o Brasil não consegue fazer uma distribuição equitativa dos recursos, auferidos da exportação desses bens, para a sua população, uma vez que grande parte deles acaba concentrado em poder de poucas empresas do setor mineral (muitas multinacionais) e de um reduzido grupo de empreendimentos agroindustriais.

Pode-se dizer, portanto, que a distribuição das riquezas, geradas pela exploração dos fartos recursos minerais e produção agrícola, não têm sido justa, agravando um problema que aflige gerações de brasileiros e que está relacionado à desigualdade social, a qual é mais visível na área rural (MELGAREJO, 2013). Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019), 25% dos proprietários de terras possuem 74% das áreas de produção agrícola nacional. De outro lado, 75% de estabelecimentos agrícolas são de agricultores familiares que detêm os restantes 26% das áreas de produção. Ainda que haja diferenças entre o perfil de produção desse último grupo, a

maioria dos estabelecimentos possui menos de 10 hectares e não tem acesso aos fertilizantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019) porque esses estão se tornando crescentemente mais caros. O mercado dessas fontes de insumos é controlado por pouco mais de meia dúzia de países, sendo que o Brasil não participa da formação dos preços (MANNING; THEODORO, 2020).

Entre outras ações de caráter estrutural, encontrar saídas para esse impasse é uma necessidade, para que seja possível mudar o perfil social, produtivo e econômico no Brasil. Nesse sentido, nos últimos anos, os agricultores têm buscado novas práticas de produção, que sejam mais baratas, menos impactantes do ponto de vista ambiental e que garantam produtividades compatíveis com seus esforços.

A agricultura orgânica e agroecológica tem ganhado adeptos a cada ano, em especial, porque os consumidores têm tido maiores preocupações com questões relacionadas à saúde e à preservação ambiental e, também, porque é um nicho de mercado em ascensão no mundo. Essa forma de produção está prevista na Lei nº 10.831/2003 (BRASIL, 2003) que regulamenta a produção de produtos orgânicos e que proíbe o uso de fertilizantes solúveis. Tal impedimento fortalece as práticas baseadas no uso de insumos disponíveis local ou regionalmente.

Entre as opções disponíveis, destaca-se o uso de rochas moídas, conforme prevê a tecnologia da rochagem, que tem como principal pressuposto a adição de determinados tipos de rochas moídas ao solo, como forma de fornecer macro e micronutrientes, o que altera a sua fertilidade (CARVALHO *et al.*, 2018; LEONARDOS; FYFE; KRONBERG, 1976, 1987; THEODORO *et al.*, 2013). Considerando a imensa diversidade de rochas disponíveis em todas as regiões do País, pode-se pressupor que não faltarão insumos para fortalecer essa forma de produção. Ainda que não exista uma política pública nacional que induza o uso de pós de rocha ou remineralizadores de solo, conforme estabelecido pela Lei nº 12890/2013 (BRASIL, 2013), a facilidade de seu uso e aplicação, a ampla oferta de diferentes materiais, os preços potencialmente menores do que os insumos solúveis e os bons resultados produtivos começam a conquistar agricultores de diversos perfis produtivos, incluindo aqueles ligados ao agronegócio.

Dentre essas fontes minerais, destacam-se, por sua ampla distribuição geográfica (presentes em toda região sul, parte do sudeste e centro-oeste), as rochas basálticas que ainda possuem ocorrências menores

em outras partes do País. Os basaltos são rochas silicáticas de origem vulcânica, com granulação fina (com grãos inferiores a 1 mm) a afaníticas, com teores de SiO₂ em torno de 45 – 55%, e seus minerais mais comuns são os feldspatos (principalmente plagioclásio), piroxênios, além de material vítreo (HARTMANN, 2014). Portanto, devido a sua composição mineralógica, são uma excepcional fonte de Ca⁺², Mg⁺², Fe, Si e, eventualmente, K, além de uma série de micronutrientes. Por tais características, os materiais derivados dessas rochas possuem alto potencial para o uso como remineralizadores de solo, podendo atender, ao menos em parte, a demanda por fertilizantes para a agricultura brasileira. Somando-se a essa possibilidade, deve-se destacar que o Brasil conta com uma grande quantidade de pequenas e médias empresas que exploram basaltos para fins de uso na construção civil ou para a pavimentação de rodovias (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2017). É importante mencionar que uma parte dos materiais derivados desse tipo de exploração, pode se converter em remineralizadores, desde que atendam às normativas estabelecidas para essa finalidade.

Considerando tais oportunidades e demandas, a presente pesquisa tem como principal objetivo apresentar os benefícios do uso de rochas basálticas, bem como divulgar o seu potencial para remineralizar os solos. O uso de basaltos moídos favorece o aumento da fertilidade dos solos, o que resultará em produções mais seguras do ponto de vista ambiental e nutricional, além de ser um mecanismo mais acessível para um maior número de produtores que terão acesso a fontes de materiais nacionais, possivelmente, mais baratos. Neste artigo, serão usados dados secundários acerca dos principais aspectos relacionados à gênese e à distribuição dos basaltos. Para ilustrar esse potencial, serão apresentados parte dos resultados obtidos em uma pesquisa, desenvolvida na Universidade de Brasília, onde Burbano (2020) comparou os efeitos de rochas basálticas trituradas (derivadas de uma pedreira, localizada no município de Estância Velha, RS). Complementarmente, são abordadas as possibilidades relativas ao sequestro de CO₂ atmosférico, a partir do uso de basaltos.

2 Rochagem e remineralizadores

O uso de rochas moídas já era proposto desde o século XIX, por Julios Hensel. Seu livro “Pães de Pedra” sintetiza as ideias de que, ao se acrescentar esse material geológico ao solo, estaria sendo garantida a fertilidade e, portanto, a nutrição adequada para

obtenção de plantas de melhor qualidade. Mas, nesse mesmo período, Justus von Liebig defendia que o solo precisava de apenas alguns poucos nutrientes essenciais para garantir o incremento na produção. Para ele, a resposta das plantas dependeria do aporte de determinados elementos químicos concentrados para garantir o seu desenvolvimento. Essa teoria, conhecida como “lei do mínimo”, impulsionou a criação e a difusão das formulações NPK na forma concentrada, especialmente, a partir do início do século XX, o que permitiu a abertura do mercado de fertilizantes no mundo (ROCHA, 2006).

No Brasil, as ideias de Hensel começaram a ser replicadas, a partir dos anos de 1950, por Ilchenko (1955) e Guimarães (1955). Na década de 1970, Leonardos, Fyfe e Kronberg (1976), Leonardos e Fyfe (1978) e, nas décadas de 1980/90, Fyfe (1981), Kronberg, Leonardos e Fyfe (1987), entre outros, continuaram sugerindo o uso de pó de rocha para aumentar a fertilidade dos solos lateríticos do País. Iniciativas de caráter mais empírico também foram conduzidas em Santa Catarina (prof. Knapik) e em Sergipe (Glauco Andrade). Porém, tais sugestões não encontravam eco, porque os preços dos fertilizantes e seu acesso eram facilitados por políticas públicas governamentais, implementadas com a finalidade de fortalecer o modelo da revolução verde, iniciada na década de 1960. Mais recentemente (final dos anos de 1990 e início do século XXI), o tema ganhou força devido à ascensão dos preços dos fertilizantes e ao aumento com problemas ambientais, gerados pelo uso intensivo de fertilizantes solúveis. As investigações desenvolvidas por diversos pesquisadores (ALMEIDA; SILVA; RALISCH, 2006; CARVALHO, 2012; CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2017; FERNANDEZ, 2008; KNAPIK, 2005; RAMOS *et al.*, 2020; SILVEIRA *et al.*, 2010, THEODORO, 2000; THEODORO; LEONARDOS, 2006a, 2006b, 2005, entre outros) mostram que essa alternativa tecnológica é cada vez mais adequada para o Brasil, em função do seu perfil agrícola e devido à ampla oferta de materiais geológicos.

Esses estudos indicam que entre as práticas ou rotas tecnológicas disponíveis, a rochagem pode ser considerada como base para alterar a fertilidade, pois tem como principal função auxiliar na restituição dos constituintes minerais lixiviados ou exauridos pelo uso excessivo ou pelo tempo, de forma que se obtenham produções de alimentos de melhor qualidade, a custos mais baixos e atendendo aos princípios da segurança alimentar (CARVALHO, 2012; CARVALHO

et al., 2018; THEODORO; LEONARDOS, 2015; VAN STRAATEN, 2007).

Theodoro *et al.* (2013) mencionam que o uso de rochas moídas facilita a reestruturação física dos solos, já que um intervalo (*range*) granulométrico diverso (entre 0,3 a 4,0 mm) permite uma melhor circulação dos fluidos entre os espaços porosos, facilitando a sua aeração. Igualmente importante, é o fato de que as rochas têm potencial para alterar a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (CARVALHO, 2012), uma vez que seus constituintes minerais podem ser alterados para materiais secundários - como argilominerais 2:1, tais como os do grupo das esmectitas, vermiculitas e ilitas (MELAMED; GASPAR; MIEKELEY, 2009). Esses argilominerais comportam-se como “esponjas” que armazenam e liberam os fluidos ricos em cátions como: potássio, fósforo, cálcio, magnésio entre outros macros e micronutrientes, de forma gradual e em uma velocidade compatível com a assimilação pelas plantas (THEODORO *et al.*, 2013).

Os resultados dos estudos, acima mencionados, e a alta demanda por fertilizantes, facilitaram a sanção da Lei nº 12.890/2013 (Lei dos remineralizadores) que alterou e inseriu os remineralizadores como um fertilizante na Lei nº 6.894/1980 (BRASIL, 1980). Ficou estabelecido nessa legislação que:

Remineralizador é um material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo, por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo (BRASIL, 2013).

Posteriormente, de acordo com Theodoro (2019), o governo editou o Decreto nº 8.384/2014 (BRASIL, 2014) que regulamentou a Lei e, em 2016, o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2016) editou a Instrução Normativa (IN) 05 que “estabeleceu as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores destinados à agricultura” Desde então, vem se buscando registrar uma série de tipos de rochas, destinadas ao uso agrícola. Ainda de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, já são cerca de 20 produtos registrados, entre os quais se destacam os basaltos, xistos, kamafugitos, fonolitos, gnaisse e serpentinitos.

Outro uso de remineralizadores, e em especial dos basaltos, que tem despontado recentemente, refere-se ao seu potencial como mecanismo de sequestro de

carbono (CO₂) atmosférico. Washbourne *et al.* (2015) sugerem que o uso de materiais ricos em CaO e MgO potencializam a captura de CO₂, durante o processo de intemperismo de silicatos e carbonatos de Ca e Mg, ampliadas por reações com o dióxido de carbono atmosférico (CO₂), captado nos processos naturais de fotossíntese, o que tenderia a aumentar a alcalinidade local. Dadas as condições certas, parte do CO₂ dissolvido precipitaria como minerais de carbonato secundários no solo. Lefebvre *et al.* (2019); Beerling *et al.* (2020), Kelland *et al.* (2020) corroboram essas possibilidades e mencionam a possível formação de micro agregados (ou novas fases minerais) como responsáveis por essas reações (CHURCHMAN *et al.*, 2020). Na mesma linha, Soares (2018) também lembra que o uso de remineralizadores favorece o crescimento das espécies de árvores, inseridas em sistemas agroflorestais. Para crescerem, as árvores precisam, entre outras demandas nutricionais minerais, de carbono (captado pela fotossíntese). Na sua pesquisa, esse autor mediu a taxa de crescimento de árvores (em um sistema agroflorestal), em um determinado período, e calculou a taxa de CO₂ capturado.

Tais observações estão em acordo com o que propõe Goreau (2015) que menciona pelo menos três possibilidades para facilitar a adsorção do excesso de CO₂ atmosférico, quais sejam: (i) o uso de *biochar* (carvão vegetal); (ii) uso de remineralizadores e (iii) o (re)florestamentos que podem acelerar ainda mais processo de captura do CO₂. Quando essas três combinações agem de forma conjunta, o resultado é rápido e eficaz. Segundo esse autor, o solo é o local, onde se pode estocar e armazenar o excesso de CO₂ de forma a prevenir impactos severos futuros do aquecimento global.

Porém, para se estimar a eficiência dos remineralizadores, é fundamental a compreensão de que o uso ou o estímulo à liberação de nutrientes faz parte de um conjunto de estratégias, relacionadas ao manejo da fertilidade dos agroecossistemas. Deve-se ter em mente que essa possibilidade não se configura como uma fonte de nutrientes, prontamente disponível, que tem o objetivo de substituir os fertilizantes industriais de alta solubilidade (CARVALHO *et al.*, 2018; THEODORO; LEONARDOS, 2015) ou capturar CO₂ (BEERLING *et al.*, 2020). É importante, ainda, destacar que existem alguns condicionantes para o uso de rochas moídas, quais sejam: (i) o material deve conter quantidades apreciáveis de macronutrientes (a presença de micronutrientes também é desejável e importante); (ii) o material não deve possuir

contaminantes; (iii) o material deve estar disponível na própria região (caso contrário, o custo do transporte inviabiliza sua aplicação) e (iv) o material não pode conter elementos potencialmente tóxicos (EPT), em quantidades acima do estabelecido na legislação, que regulamenta o assunto (THEODORO, 2019).

3 Rochas Basálticas: uma imensidão de oportunidades

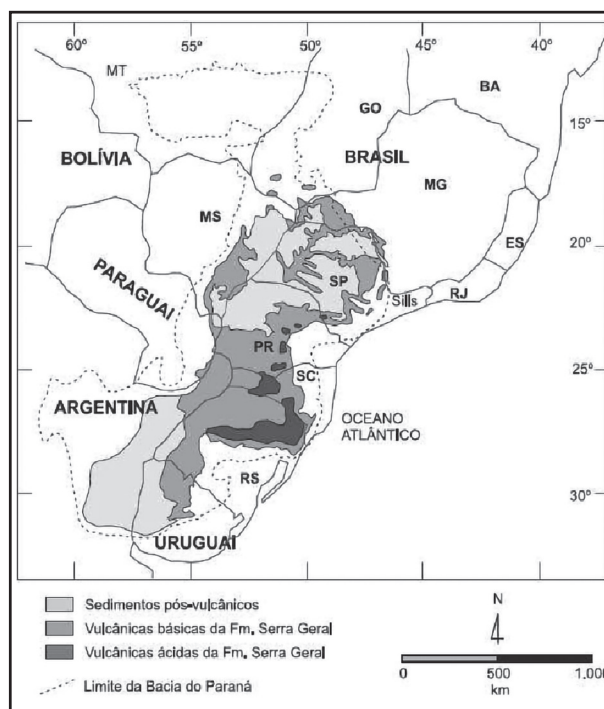
O evento magmático que estabeleceu o Grupo Serra Geral (GSG) foi de grandes proporções e constituiu a Província Magmática Paraná-Etendeka (PMPE), devido à sua ocorrência também em território africano (FRANK; GOMES; FORMOSO, 2009). Na América do Sul, Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina comportam 95% de sua área total, com os outros 5%, no continente Africano (PINTO; HARTMANN; WILDNER, 2011). Essa província é considerada uma das maiores LIPs (grandes províncias ígneas) do mundo. A figura 1 mostra a distribuição da Província Magmática Paraná-Etendeka na América do Sul, conforme Machado *et al.* (2005).

As LIPs são oriundas de grandes eventos magmáticos, ocorridos em ambiente continental, também conhecidas como províncias continentais de platô (do inglês continental *flood-basalts provinces* - CFB), e se caracterizam pela erupção de grandes volumes de basalto, em curtos períodos de tempo, estando associadas a *riftes* e a rupturas continentais (PEATE *et al.*, 1990).

A PMPE está associada com a ruptura do Gondwana e abertura do Oceano Atlântico, durante o Cretáceo Inferior (PEATE; HAWKESWORTH; MANTOVANI, 1992), cobrindo, com uma sucessão de derrames, praticamente toda a Bacia do Paraná. Da mesma forma, são recorrentes uma rede de diques (que cortam a seção sedimentar) e múltiplos níveis de *sills* concordantes com o acamamento sedimentar da Formação Botucatu (MILANI *et al.*, 2007).

A duração do evento magmático que gerou a PMPE e a sua idade ainda são discutidas por diversos autores. Mincato (2000) estimou que todo o evento teve uma duração de 3,5 Ma, com ápice em 132 Ma, ocorrendo entre 133,9 e 130,3 Ma. Datações $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, recentemente obtidas, utilizando a técnica de *laser incremental heating*, realizadas por Thiede e Vasconcelos (2010), indicam que a extrusão do magma ocorreu há 134 Ma e que a duração de todo o vulcanismo foi menor que 1,2 Ma. Segundo Bellieni *et al.* (1986), as rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral (GSG) são divididas em: basaltos (90%), rochas intermediárias (7%) e rochas ácidas (3%).

Figura 1 - Modelo simplificado da distribuição da Província Magmática Paraná-Etendeka (PMPE), na América do Sul



Fonte: Machado *et al.* (2005, p. 6).

Com relação à composição química dessas rochas vulcânicas, Chmyz (2011) destaca que 90% dos derrames são de origem predominantemente básica, com teores de sílica entre 45% e 52%, e 10% do volume são de natureza intermediária a ácida, com mais de 52% de sílica. Diferentes tipos de rochas compõem o GDG. Bellieni *et al.*, (1986) afirmam que aproximadamente 97% das rochas são dos tipos basaltos e andesitos basálticos toleíticos e apenas 3% são do tipo dacitos e riolitos.

Estudos de Bellieni *et al.* (1984) e Mantovani *et al.* (1985) propuseram classificações, conforme a composição litoquímica das rochas, sendo possível considerar uma divisão dos basaltos em dois grandes grupos, com base nos conteúdos de TiO_2 : basaltos alto Ti (HTiB > 2%), sendo eles os tipos de magma Urubici, Pitanga e Paranapanema; e basaltos baixo Ti (LTiB < 2%) e baixos teores de Ba, La, Ce, Zr e Y, sendo eles os tipos Gramado, Esmeralda e Ribeira. Mais recentemente, Wildner *et al.* (2006) postularam a divisão do GSG em sete formações, sendo elas: Jaguarão; Alegrete; Esmeralda; Paranapanema; Caxias; Chapecó; Gramado e Várzea do Cedro.

Outros autores propuseram classificações diferenciadas para os diversos tipos de magma, reconhecidos na província ígnea, dentre eles, destaca-se a proposta

de Rossetti *et al.* (2018) que revisa e atualiza a litoestratigrafia da Província Ígnea Paraná-Etendeka, definindo unidades estratigráficas que podem ser reconhecidas em um quadro regional, permitindo correlações e fornecendo informações, para a compreensão da sua evolução, ao longo do tempo. Os autores apontam que pilha de lava, com baixo teor de TiO_2 , é formada por pacotes de lava heterogêneos, os quais foram divididos em quatro formações. A Formação Torres (FT) é caracterizada por campos de fluxos *pahoehoe*, quimicamente mais primitivos, com o teor de MgO , alcançando 5%. Essas lavas repousam sobre os arenitos eólicos da Formação Botucatu e representam o início da atividade vulcânica. A Formação Vale do Sol (FVS) agrupa andesitos basálticos de morfologia *rubbly pahoehoe*, empilhados verticalmente, que, composicionalmente, apresentam teores de SiO_2 , superiores a 51% e, MgO , inferior a 5% em peso. Tais lavas cobrem os basaltos da primeira unidade, ao longo do eixo do Sinclinal de Torres e estendem-se para sudoeste, representando fluxos de lava máficos mais volumosos.

Sobre as lavas básicas da Formação Vale do Sol se sobrepõem os dacitos e riolitos da Formação Palmas (FP), nas áreas central e oriental, sendo que os mesmos repousam diretamente sobre as lavas da Formação Torres, no Oeste. As unidades ácidas foram colocadas como domos de lava e fluxos de lava tabular generalizados. A Formação Esmeralda (EF) é a unidade estratigráfica superior e é formada por um campo de fluxo *pahoehoe* basáltico, colocado durante a fase de declínio da atividade vulcânica da sequência de lava de baixo TiO_2 . Os sedimentos intercalados às lavas são preservados em toda a pilha de lava e foram depositados, durante os períodos de quiescência da atividade vulcânica e representam marcadores estratigráficos importantes, como o contato entre as Formações Torres e Vale do Sol.

4 Rochas basálticas aflorantes em Estância Velha (RS)

Neste trabalho serão consideradas as rochas provenientes da Formação Serra do Sol, expostas e lavradas por uma pedreira, localizada no município de Estância Velha, região metropolitana de Porto Alegre (RS). Nesse local, a espessura do derrame superior a 70 m, a composição andesito-basáltica e o teor de MgO , revelado na litoquímica, sugerem que essas rochas estejam relacionados a essa formação, embora não se tenha observado a brecha de crosta superior de derrame que caracteriza a morfologia *rubbly-pahoehoe*.

Apoiados nos resultados de diversos autores que desenvolveram suas pesquisas sobre o pó de rochas basálticas, Bergmann *et al.* (2013) e Hartmann (2014) afirmam que as rochas que compõem essa formação são bastante aptas à remineralização de solos. Por tais potencialidades, há cerca de dois anos, essas rochas vêm sendo pesquisadas, para que se possa averiguar o seu desempenho como um insumo agrícola.

Para ilustrar esse potencial, aqui, usaremos os dados produzidos na pesquisa de Burbano (2020), desenvolvida na Universidade de Brasília, onde o autor efetuou testes agrônômicos com essas rochas, utilizando três culturas agrícolas em sistema rotacional, mas com foco na avaliação do desempenho da quinoa. O autor comparou o desempenho das rochas basálticas (fácies inferior) com outros insumos (NPK e Composto Orgânico) ou a mistura do basalto+Composto Orgânico e parcelas Controle.

As rochas, utilizadas na pesquisa de Burbano (2020), representam um derrame andesito-basáltico que está exposto, na frente de lavra da empresa de mineração, que detém o direito de lavra da jazida, para fins de exploração e comercialização de brita, para fins de exploração e comercialização de brita, entre outros agregados, para construção civil, destinados a obras como: túneis, estradas rododiferroviárias, pontes, terraplanagens, entre outras. A cava possui a forma alongada (370m por 260m) e seis bancadas circuncêntricas com aproximadamente 15m de altura.

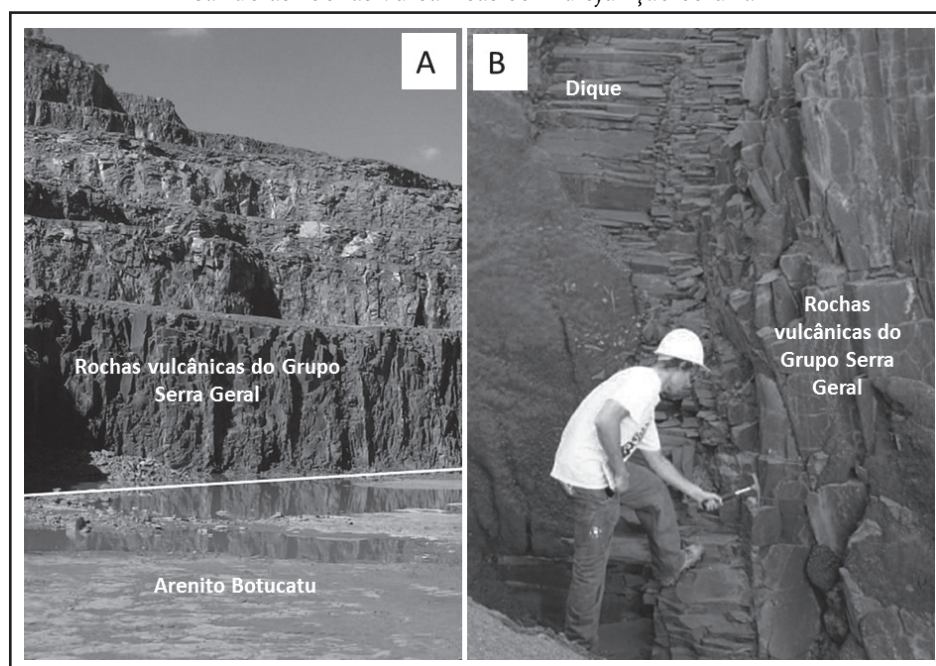
A rocha predominante é uma vulcânica melano-crática de coloração cinza escura a esverdeada, com textura fanerítica fina a afanítica, por vezes porfirítica, localmente com amídalas e vesículas, preenchidas por quartzo, calcedônia, calcita e zeolitas. As estruturas predominantes são as disjunções colunares verticais e, subordinadamente, horizontais. Além disso, a frente de lavra está cortada por diques de espessura métrica, com forte disjunção horizontal, possivelmente de composição andesítica. A base dos derrames, marcada por uma brecha no piso da pedreira, no contato com o arenito da Formação Botucatu, constitui a superfície limitante de aproveitamento da lavra (figura 2). Já a porção superior lavrada é composta por rocha de granulação fina, com amídalas de diversos tamanhos (milimétricas até 3 cm) preenchidas por material leitoso, dispostos em forma de fibras (preferencialmente zeolitas e argilominerais como esmectitas).

Conforme consta na metodologia, descrita na pesquisa realizada na Universidade de Brasília, antes da implantação dos testes agrônômicos, foram realizados estudos para a identificação, a caracterização

e a avaliação do potencial dessas rochas, tais como: fluorescência de Raios X e petrografia, além das análises de fertilidade. O autor informa que a composição química média das rochas atende ao disposto na Instrução Normativa nº 05/2016 (BRASIL, 2016), do Ministério da Agricultura, Pecuária e

Abastecimento, no que se refere à soma de bases (SB) (K_2O , CaO , MgO) que, nesse caso, apresenta uma média (obtida, a partir de quatro amostras) de 13,23%. (tabela 1). A análise modal, revelada pela petrografia, mostrou que a SiO_2 livre (na forma de quartzo) atende ao estabelecido na mesma IN 05.

Figura 2 - (a) Frente de lavra da pedreira de Estância Velha (RS), evidenciando o contato entre o arenito da Formação Botucatu e os vulcanitos do Grupo Serra Geral; (b) Dique vertical, com orientação 340°, atravessando as rochas vulcânicas com disjunção colunar



Fonte: Wojahn (2011).

Tabela 1 - Média (%) do conteúdo nos principais componentes silicáticos das amostras de basalto da Formação Torres, analisados por Fluorescência de Raios X (FRX) (Valores assinalados em *itálico e sublinhados* identificam a Soma de Base)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	P_2O_5	Na_2O	Ti_2O	MnO	LOI
56,8	14,4	9,8	<u>6,92</u>	<u>3,91</u>	<u>2,5</u>	0,27	2,68	1,29	0,15	0,53

Fonte: Incopel Indústria e Comércio de Pedras (2016).

Ainda, baseando-se em dados secundários (relatório interno da pedreira de Estância Velha), foi confirmado por análises petrográficas, que essas rochas basálticas (andesito-basaltos) possuem uma coloração preta acinzentada, estrutura isotrópica, com fenocristais subcentimétricos de plagioclásio e piroxênio, imersos em matriz fina, a microcristalina. Ao microscópio petrográfico, observou-se que a rocha é porfírica, com fenocristais de plagioclásio e, raramente, clinopiroxênio, imersos em matriz fina, a microcristalina, com intemperismo incipiente (figura 3). A matriz possui coloração marrom claro que,

por vezes, apresenta finos cristais de plagioclásio de até 0,3 mm, sendo minerais opacos (magnetita e ilmenita) onipresentes, identificado por DRX. Parte da matriz resulta da devitrificação do vidro original, constituinte mais comum das rochas vulcânicas, perfazendo em torno de 32,4%, seguido de plagioclásio (30%), clinopiroxênios (22,2%), argilominerais (6,6%), minerais opacos e quartzo (tabela 2).

Foi observado que cristais de plagioclásio (An_{38-46} - andesina) com dimensões (aproximadas), acima de 0,8 mm de comprimento, apresentam-se, em geral, com microfraturas preenchidas

por argilominerais. A densidade de microfraturas e substituição por argilominerais é variável, porém há uma tendência crescente com o aumento do tamanho do cristal.

Tabela 2 - Características gerais da rocha basáltica utilizada como remineralizador

Mineral	Porcentagem (%)
Matriz	32,4%
Plagioclásio	30%
Clinopiroxênio	22,2%
Argilominerais (esmectitas)	6,6%
Magnetita	5,0%
Ilmenita	3,2%
Quartzo	0,6%

Fonte: Os autores (2021).

Foi observado que existem dois tipos de clinopiroxênios, sugerindo pela paragênese, augita e/ou titanogaugita e/ou ferroaugita e/ou augita subcálcica e/ou ferroaugita subcálcica. Na contagem de pontos, os diferentes piroxênios foram marcados como clinopiroxênio. As análises de Difractometria de Raios-X realizadas detectaram, além dos constituintes cristalinos plagioclásio, augita e ilmenita, o argilomineral saponita (figura 3).

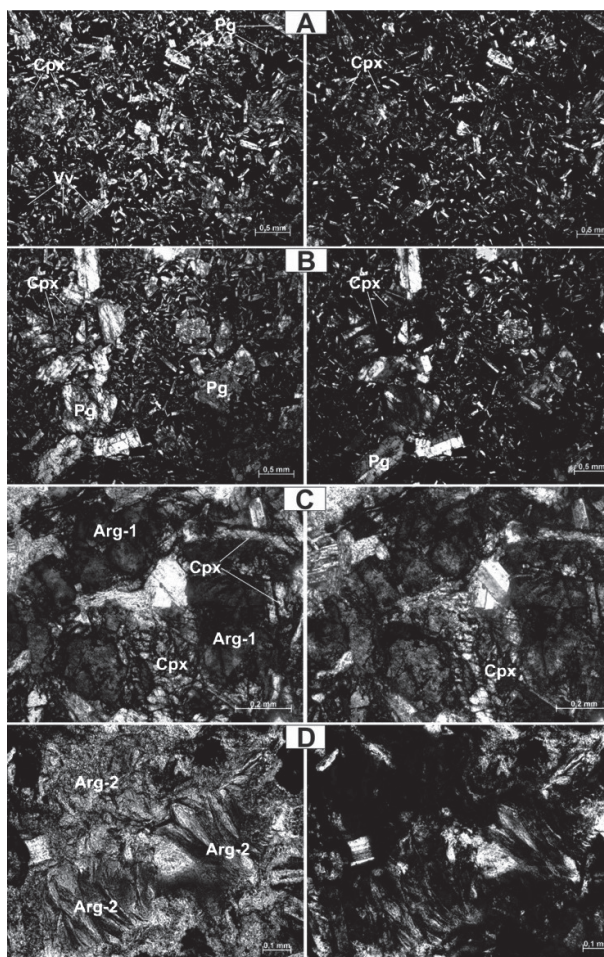
A partir das características texturais e mineralógicas descritas, o laudo sugere que as amostras pertençam a mesma unidade estratigráfica vulcânica, apesar das pequenas variações faciológicas de escala centimétrica. A presença de matriz fina a microcristalina, plagioclásios e clinopiroxênios sugere que esse tipo de material geológico tende a se comportar de forma adequada para a remineralização de solos, conforme havia sido sugerido por Bergmann *et al.* (2013) e Hartmann (2014), especialmente porque esses constituintes costumam ser bastante intemperizáveis.

Do mesmo modo, os argilominerais caracterizados com saponita, ampliam a capacidade de troca catiônica (CTC) e aumentam a retenção de umidade no solo. A matriz microcristalina seria o primeiro material a ser solubilizado, seguido dos piroxênios, plagioclásio e argilominerais. (WHITE; BUSS, 2013). Além disso, devido à presença dos minerais ricos em cálcio e magnésio, essas rochas podem auxiliar, de forma eficiente, na neutralização do pH, agindo de forma semelhante ao processo de calagem. Em princípio, favoreceriam a captura de CO₂, conforme proposto por Churchman *et al.* (2020) e Beerling *et al.* (2020).

É importante destacar que a metodologia de avaliação agrônômica, conduzida por Burbano (2020),

considerou um delineamento experimental com cinco tipos de tratamentos e quatro repetições, em condições semicontroladas. Foi utilizado o equivalente a 17 t ha⁻¹ de remineralizador e 40 t ha⁻¹ do Composto Orgânico. O desenvolvimento das culturas foi acompanhado, ao longo de um ano, e os parâmetros químicos do solo foram avaliados ao final do experimento. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente, por meio de análise de variância (ANOVA), e os parâmetros químicos do solo, através do índice de seleção de Mulamba-Mock.

Figura 3 - Fotomicrografias a nicóis paralelos e cruzados, mostrando textura porfírica (A e B) e argilominerais (C e D). As abreviações “Cpx”, “Pg” e “Arg”, referem-se a clinopiroxênio, plagioclásio e argilomineral, respectivamente



Fonte: Os autores (2021).

Os resultados produtivos da pesquisa revelaram que as duas primeiras culturas (feijão e rúcula) obtiveram os melhores resultados produtivos, no

tratamento com NPK. Para as etapas fenológicas da cultura principal (quinoa), o estudo revelou que houve diferenças importantes, desde os dias de formação da panícula, até a maturação fisiológica, sendo o tratamento T2 apresentou a maior precocidade. Porém, a produção do grão (número de grãos por panícula – GUE) que é o elemento mais esperado, teve o melhor rendimento médio no tratamento T4 (Remineralizador+Composto

Orgânico). A tabela 3 mostra os resultados dos seis parâmetros fitotécnicos (ou variáveis de rendimento), quantificados na pesquisa. Averiguou-se que, em cinco deles, as médias mais expressivas ocorreram nos tratamentos que continham remineralizadores. Para a maior parte das variáveis consideradas, não foi possível encontrar diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, à exceção para o rendimento da cultura.

Tabela 3 - Valores médios para os parâmetros fitotécnicos: altura de plantas (AP, em cm), comprimento da panícula (CP, em cm), largura da panícula (LP, em cm), peso de mil sementes (PM, em g), produção de massa seca (MS, em g) e número de grãos por panícula (GUE)

Código	Tratamento	AP	CP	LP	PM	MS	GUE
T0	Controle	112,88a	13,22a	3,58a	1,52b	151,25a	13,75c
T1	Composto Org	117,53a	<u>17,98a</u>	3,97a	2,30a	171,25a	20,00bc
T2	NPK	121,33a	16,30a	3,84a	2,32a	228,75a	27,50abc
T3	Remineralizador	<u>124,72a</u>	15,46a	<u>4,00a</u>	<u>2,69a</u>	228,75a	33,75ab
T4	Remine + CO	119,95a	15,17a	3,94a	2,58a	<u>230,00a</u>	<u>38,75a</u>
Média geral		119,28	15,63	3,87	2,28	202,00	27,75
CV%		5,5	16,99	14,05	10,62	20,58	29,46

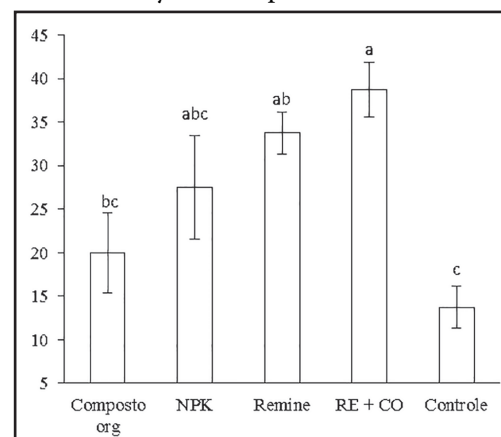
OBS: *Médias seguidas pelas mesmas letras, em cada coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (Valores assinalados em *itálico* e sublinhados indicam maiores médias)

Fonte: Burbano (2020).

A partir dos resultados, o autor informa que, apesar das médias apresentarem diferenças (destacadas em *itálico* e sublinhados na tabela 03), elas não foram captadas pelas análises estatísticas univariadas, ainda que, conforme o autor destacou, houvessem diferenças claras como, no caso do parâmetro, “altura da planta”. Ele alerta, ainda, que a variabilidade entre os tratamentos e suas repetições é um fator restritivo na sensibilidade das análises estatísticas, em que pese a observação de que ocorreu diferenças de até 12 centímetros entre as médias do tratamento T0 (Controle) e o tratamento T3 (Remineralizador). No que se refere ao peso (massa) de grãos (GUE), o indicador mais importante dos parâmetros analisados, constatou-se diferenças que estão diretamente vinculadas à produtividade da quinoa. Para esse parâmetro, as análises estatísticas revelaram diferenças significativas entre os tratamentos, sendo que T4 (R + CO) mostrou-se superior aos demais, com um incremento de 65 %, em relação ao tratamento Controle; de 49 % em relação ao T1; de 30 % ao T2 e de 13 % relativamente ao T3. Tais incrementos obtidos nos tratamentos que continham os remineralizadores (T3 e T4), em relação aos demais, indicam que, provavelmente, esse remineralizador influenciou positivamente na produtividade,

quando comparados àqueles que não continham esse insumo (T0, T1 e T2). Essa diferença é mostrada graficamente (figura 4) e reflete um dos mais expressivos resultados obtidos por Burbano (2020).

Figura 4 - Massa de grãos da quinoa nos tratamentos Composto Orgânico Legenda: Composto Orgânico (Composto Org); fertilizante químico (NPK); remineralizador (Remine); remineralizador+Composto Orgânico (RE+CO); Controle. Médias seguidas pelas mesmas letras, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade



Fonte: Burbano (2020).

Tabela 4 - Índice de Mulamba-Mock (multivariado) para os parâmetros matéria orgânica e disponibilidade de P, K, Mg, B, Mn e Cu no solo. Médias seguidas, na coluna, por um * diferem entre si pelo teste de Dunnett a 5 % de probabilidade de erro

Tratamentos	Índice Mulamba -Mock	Erro padrão do experimento
Controle	49,75	6,76
Composto Org	87,83 *	6,76
RE + CO	85,13 *	6,76
Remineralizador	81,38 *	6,76
NPK	70,25 ns	6,76

Fonte: Burbano (2020).

Outro resultado importante, refere-se às mudanças nos níveis de fertilidade do solo, após um ano em que pese o fato de que os resultados obtidos, na grande maioria das análises estatísticas, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro, não tenham mostrado evidências de diferenças significativas entre os tratamentos. O autor optou pela realização de uma análise multivariada, utilizando-se o Índice de Mulamba-Mock, considerando as médias de MO, P, K, Mg, B, Mn e Cu no solo, já que dos 13 parâmetros avaliados (P, K, Ca, Mg, S, CTC, MO pH, B, Zn, Fe, Mn e Cu), as seis maiores médias foram verificadas no tratamento T3. Nessa análise, foi possível encontrar diferenças entre os tratamentos com Remineralizador, Remineralizador + Composto Orgânico e somente Composto Orgânico, em relação aos tratamentos Controle e NPK (tabela 4).

Os resultados, obtidos na pesquisa realizada na Universidade de Brasília, confirmam as hipóteses apresentadas por Bergmann *et al.* (2013) e Hartmann (2014), uma vez que mostram que o uso de remineralizadores, derivados das rochas basálticas, combinados ou não com fontes orgânicas, mostrou-se eficaz para fertilizar. Além disso, o estudo mostrou que os pós de rocha possuem um efeito residual de mais longo prazo, quando comparados aos fertilizantes solúveis.

5 Conclusão

As rochas basálticas de ampla ocorrência no Brasil, que constituem a Província Magmática Paraná-Etendeka, estão associadas à ruptura do continente Gondwana e à abertura do Oceano Atlântico, durante o Cretáceo Inferior e cobrem praticamente toda a Bacia do Paraná. Cerca de 90% dos derrames são de origem preferencialmente básica, com teores de sílica entre 45% e 52%. Por sua ampla extensão espacial e composição química de natureza mais básica (CaO, MgO e baixo conteúdo em quartzo) têm o potencial

de converterem-se em uma grande fonte de insumos para a agricultura. Soma-se a isso, a presença abundante de matriz fina, até mesmo vítrea, o que facilita a dissolução da rocha e contribui com a liberação de cátions para a nutrição vegetal.

Esse trabalho discutiu as possibilidades de uso das rochas, presentes no Grupo Serra Geral. Para além das suas características litoquímicas e mineralógicas, foram apresentados dados secundários, obtidos em uma pesquisa, desenvolvida na Universidade de Brasília, que testou o seu potencial agrônomo. Esses dados mostraram que se trata de um basalto andesítico, que atende as especificações definidas pela IN 05/2016, do MAPA, no que se refere ao conteúdo da soma de bases (K₂O, CaO e MgO) e na proporção de sílica livre (na forma de quartzo).

Os dados, obtidos nos testes agrônômicos da mesma pesquisa, mostram que houve mudanças no perfil de fertilidade dos solos, após um ano da implantação dos experimentos, onde foi possível verificar que ocorreram diferenças no conteúdo das médias de seis macro e micronutrientes (P, K, Mg, Mo, B, Mn e Cu) dos 13 principais parâmetros avaliados (P, K, Ca, Mg, S, CTC, MO pH, B, Zn, Fe, Mn e Cu) no tratamento T3 (remineralizador). A análise multivariada (verificada pelo Índice de Mulamba-Mock) mostrou diferenças entre os tratamentos com Remineralizador, Remineralizador+Composto Orgânico e somente Composto Orgânico, em relação aos tratamentos Controle e NPK. Para além disso, as análises estatísticas revelaram que o peso (massa) de grãos (GUE) da cultura da quinoa (que reflete diretamente na produtividade) mostrou-se com diferenças significativas entre os tratamentos, sendo que T4 (Remineralizador+Composto Orgânico) foi superior aos demais tratamentos.

Tais resultados fortalecem as indicações que apontam o potencial das rochas basálticas como importantes materiais para a remineralização de

solos e abrem perspectivas, para que novas pesquisas confirmem ou até encontrem resultados ainda mais promissores para culturas agrícolas que já estejam perfeitamente adaptadas aos diferentes agroecossistemas presentes no Brasil.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, E.; SILVA, F. J. P.; RALISCH, R. Powdered rock to revitalise soils. **LEISA Magazine**, v. 22, n. 4, 2006.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. 2019. Disponível em: http://anda.org.br/wp-content/uploads/2020/02/Principais_Indicadores_2019.pdf. Acesso em: 19 fev. 2020.

BEERLING, D. J. *et al.* A potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. **Nature**, v. 583, p. 242-248, 2020. DOI: 10.1038/S41586-020-2448-9.

BERGMANN, M. *et al.* Basaltos amigdalóides à zeólitas da formação Serra Geral da Bacia do Paraná: potencial para uso agrônômico. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2., 2013, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2013. p. 168-180.

BELLIENI, G. *et al.* Low-pressure evolution of basalt *sills* from bore-holes in the Paraná Basin, Brazil. **Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen**, v. 33, p. 25-47, 1984. DOI: 10.1007/BF01082300.

BELLIENI, G. *et al.* Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from Paraná plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationship. **Journal of Petrology**, v. 27, p. 915-944, 1986. DOI: 10.1093/petrology/27.4.915.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa Nº 5/2016, de 10 de março de 2016**. 2016. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106. Acesso em: 22 abr. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Boletim do setor mineral**. 2020. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes/boletim-do-setor-mineral>. Acesso em: 17 maio 2020.

BRASIL. Presidência da República. **Lei Nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980**. Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências. 1980. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/1980-1988/L6894.htm. Acesso em: 22 abr. 2020.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto Nº. 8.384, de 29 de dezembro de 2014**. Regulamenta a Lei Nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. 2014. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2014/decreto/D8384.htm. Acesso em: 22 abr. 2020.

BRASIL. Presidência da República. **Lei Nº 10.831 de 23 de dezembro de 2003**. Dispõe sobre a agricultura orgânica e dá outras providências. 2003. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/1980-1988/L6894.htm. Acesso em: 22 abr. 2020.

BRASIL. Presidência da República. **Lei Nº 12.890/2013, de 10 de dezembro de 2013**. Altera a Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980. 2013. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12890.htm. Acesso em: 22 abr. 2020.

BURBANO, D. F. M. **Uso de rocha basáltica como remineralizador de solo em sistema de rotação de cultivos com quinoa**. 2020. 69 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural) - Universidade de Brasília, Planaltina, 2020.

CARVALHO, A. M. X. **Rochagem e suas interações no ambiente do solo: contribuições para aplicação em agroecossistemas sob manejo agroecológico**. 2012. 129 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

CARVALHO, A. M. X. *et al.* Rochagem: o que se sabe sobre essa técnica? *In*: CARDOSO, I. M.; FÁVERO, C. **Solos e agroecologia**. Brasília: Embrapa, 2018. p. 101-128.

CHMYZ, L. *et al.* Petrografia e geoquímica de rochas vulcânicas ácidas do tipo palmas aflorantes nas proximidades dos municípios de Palmas e General Carneiro (PR). *In*: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 7., Maringá, 2011. **Anais [...]**. Maringá: UniCesumar, 2011.

CHURCHMAN, G. J. *et al.* Clay minerals as the key to the sequestration of carbon in soils. **Clays and Clay**

- Minerals**, v. 68, n. 2, p. 135-143, 2020. DOI: 10.1007/s42860-020-00071-z.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 3., Pelotas, 2017. **Anais [...]**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2017.
- FERNANDEZ, M. M. **Viabilidade agronômica do uso do rejeito de garimpos do distrito Ppegmatítico de Araçuaí/MG**. 2008. 190 f. Tese (Doutorado em Geologia Econômica e Aplicada) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- FRANK, H. T.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L. Revisão da extensão areal e do volume da formação Serra Geral, Bacia do Paraná, América do Sul. **Pesquisas em Geociências**, v. 36, n. 1, p. 49-57, 2009. DOI: 10.22456/1807-9806.17874.
- FRISCHTAK, C.; BELLUZZO, L. G. Produção de commodities e desenvolvimento econômico: uma introdução. In: BELLUZZO, L. G.; FRISCHTAK, C. R.; LAPLANE, M. (org.) **Produção de commodities e desenvolvimento econômico**. Campinas: UNICAMP, 2014. p. 6-20.
- FYFE, W. S. The environmental crisis: quantifying geosphere interactions. **Science**, v. 213, n. 4503, p. 105-110, 1981. DOI: 10.1126/science.213.4503.105.
- GOREAU, T. J. Global biogeochemical restoration to stabilize CO₂, at safe levels in time to avoid severe climate change impacts to earth's life support system: implications for the United Nations Framework Convention on climate change. In: GOREAU, T. J.; LARSON, R. W.; CAMPE, J. (ed.). **Geotherapy: innovative methods of soil fertility restoration, carbon sequestration and reversing CO₂ increase**. Boca Raton: CRC, 2015. p. 5-57.
- GUIMARÃES, D. **Contribuição ao estudo dos Tufos da Mata da Corda**. Belo Horizonte: Instituto de Tecnologia Industrial de Minas Gerais, 1955. 31 p.
- HARTMANN, L. A. A história natural do Grupo Serra Geral desde o Cretáceo até o Recente. **Ciência e Natura**, v. 36, p. 173-182, 2014. DOI: 10.5902/2179460X13236.
- ILCHENKO, W. Os tufos da Mata da Corda e seu emprego na Agricultura. **Boletim Agricultura**, n. 9-10, p. 39-71, 1955.
- INCOPEL INDÚSTRIA E COMÉRIO DE PEDRAS. **Relatório interno**. Estância Velha, 2016.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Agricultura familiar**. 2019. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3096/agro_2017_agricultura_familiar.pdf. Acesso em: 8 abr. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Painel de indicadores**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/indicadores>. Acesso em: 3 mar. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório anual de atividades: junho 2016 a junho 2017**. Belo Horizonte, 2017.
- KELLAND, M. E. *et al.* Increased yield and CO₂ sequestration potential with the C4 cereal Sorghum bicolor cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. **Global Change Biology**, v. 26, n. 6, p. 3658-3676, 2020. DOI: 10.1111/gcb.15089.
- KNAPIK, J. G. **Utilização do pó de basalto como alternativa à adubação convencional na produção de mudas de Mimosa scabrella Benth e Prunussellowii Koehne**. 2005. 163 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- KRONBERG, B. I.; LEONARDOS, O. H.; FYFE, W. S. The use of ground rocks in laterite systems: an improvement to the use of conventional soluble fertilizers? **Chemical Geology**, v. 60, n. 1-4, p. 361-370, 1987. DOI: 10.1016/0009-2541(87)90143-4.
- LEFEBVRE, D. *et al.* Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: a case study for Sao Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, n. 1, p. 468-481, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.099.
- LEONARDOS, O. H.; FYFE, W. S. Global tectonics and resources for man: minerals and agriculture. **Jornal de Mineralogia**, v. 7, p. 51-58, 1978.
- LEONARDOS, O. H.; FYFE, W. S.; KRONBERG, B. I. Rochagem: método de aumento de fertilidade de solos lixiviados e arenosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., 1976, Ouro Preto. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1976. p. 137-145.
- LEONARDOS, O. H.; FYFE, W. S.; KRONBERG, B. I. The use of ground rocks in laterite systems: an improvement to the use of conventional soluble fertilizers. **Chemical Geology**, v. 60, n. 1-4, p.

- 361-370, 1987. DOI: 10.1016/0009-2541(87)90143-4.
- MACHADO, F. B. *et al.* As rochas intrusivas da formação Serra Geral na porção leste da Bacia do Paraná no estado de São Paulo: aspectos petrográficos e geoquímicos: resultados preliminares. **Revista Geociências**, v. 24, n. 1, p. 5-17, 2005.
- MANNING, D. A. C.; THEODORO, S. H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **The Extractive Industries and Society**, v. 7, n. 2, p. 480-487, 2020. DOI: 10.1016/j.exis.2018.11.002.
- MANTOVANI, M. S. M. *et al.* Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná Continental Flood Basalts of Santa Catarina State (Southern Brazil). **Journal of Petrology**, v. 26, n. 1, p. 187-209, 1985. DOI: 10.1093/petrology/26.1.187.
- MELAMED, R., GASPAR, J. C.; MIEKELEY, N. Pó de rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentável. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R. G.; FIGUEIREDO NETO, J. (ed.). **Fertilizantes agroindustriais e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2009. p. 385-396.
- MELGAREJO, L. Entre a miopia destrutiva e resiliência construtiva: dez anos de transgenia e agroecologia no Brasil. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, v. 6, p. 67-70, 2013.
- MILANI, E. J. *et al.* Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.
- MINCATO, R. L. **Metalogenia dos elementos do grupo da platina na estratigrafia e geoquímica da província ígnea continental do Paraná**. 2000. 172 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, 2000. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/287453>. Acesso em: 6 mar. 2021.
- PEATE, D. W. *et al.* Mantle plumes and flood-basalt stratigraphy in the Paraná, South America. **Geology**, v. 18, n. 12, p. 1223-1226, 1990.
- PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. **Bulletin of Volcanology**, v. 55, p. 119-139, 1992. DOI: 10.1007/BF00301125.
- PINTO, V. M.; HARTMANN, L. A.; WILDNER, W. Epigenetic hydrothermal origin of native copper and supergene enrichment in the Vista Alegre district, Paraná basaltic province, southernmost Brazil. **International Geology Review**, v. 53, n. 10, p. 1163-1179, 2011. DOI:10.1080/00206810903464547.
- RAMOS, C. G. *et al.* Evaluation of soil re-mineralizer from by product of volcanic rock mining: experimental proof using black oats and maize crops. **Natural Resources Research**, v. 29, n. 3, p. 1583-1600, 2020. DOI: 10.1007/s11053-019-09529-x.
- ROCHA, E. J. P. L. **Agroflorestas sucessionais no assentamento Fruta D'anta - MG: potenciais e limitações para a transição agroecológica**. 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- ROSSETTI, L. *et al.* Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná - Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: towards a formal stratigraphical framework. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 355, p. 98-114, 2018. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.05.008.
- SILVEIRA, C. A. P. *et al.* Efeito da combinação de calcário de xisto e calcário dolomítico sobre a produtividade de grãos de dois sistemas de rotação de culturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2010, Brasília. **Anais [...]**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010. p. 215-219.
- SOARES, G. J. **Influência da rochagem no desenvolvimento de sistemas agroflorestais e na captura de dióxido de carbono atmosférico**. 2018. 101 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- THEODORO, S. H. **A fertilização da terra pela terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural**. 2000. 225 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília, 2000.
- THEODORO, S. H. Rochagem o elo para unir o setor mineral e agrícola na construção de um novo paradigma. In: REIS, F. A. G. V.; KUHN, C. E. S. E.; VIEIRO, A. P. **A geologia na construção e desenvolvimento sustentável do Brasil**. São Paulo: FEBRAGEO, 2019. p. 103-104.
- THEODORO, S. H. *et al.* Stonemeal of amazon soils with sediments from reservoirs: a case study

- of remineralization of the Tucuruí degraded land for agroforest reclamation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 85, n. 1, p. 23-34, 2013. DOI: 10.1590/S0001-37652013000100003.
- THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Stonemeal: principles, potential and perspective from Brazil. *In*: GOREAU, T. J.; LARSON, R. W.; CAMPE, J. (ed.). **Geotherapy: innovative methods of soil fertility restoration, carbon sequestration and reversing CO₂ increase**. Boca Raton: CRC, 2015. p. 403-418.
- THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 715-720, 2006a. DOI: 10.1590/S0001-37652006000400008.
- THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 721- 730, 2006b. DOI: 10.1590/S0001-37652006000400007.
- THIEDE, D. S.; VASCONCELOS, P. M. Paraná flood basalts: rapid extrusion hypothesis confirmed by new ⁴⁰Ar/³⁹Ar results. **Geology**, v. 38, n. 8, p. 747-750, 2010. DOI: 10.1130/G30919.1.
- VAN STRAATEN, P. **Agrogeology: the use of rock for crops**. Cambridge: Enviroquest, 2007. 440 p.
- WASHBOURNE, C.-L. et al. Rapid removal of atmospheric CO₂ by urban soils. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 9, p. 5434-5440, 2015. DOI: 10.1021/es505476d.
- WHITE, A. F.; BUSS, H. L. Natural weathering rates of silicate minerals. *In*: DREVER, J. I. (ed.). **Treatise on Geochemistry**. 2th ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. p. 115-155.
- WILDNER, W. et al. 2006. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil, 2006. Escala 1:750000.
- WOJAHN, D. **Parâmetros hidrogeológicos do Sistema Aquífero Guarani na subbacia do Arroio Portão/RS**. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.