

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**POTENCIAIS REMINERALIZADORES DE SOLOS COMO
FONTES ALTERNATIVAS PARA A PRODUÇÃO AGRÍCOLA
NA REGIÃO AMAZÔNICA**

Paulo Roberto Rodrigues Benevides Filho
Geólogo

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**POTENCIAIS REMINERALIZADORES DE SOLOS COMO
FONTES ALTERNATIVAS PARA A PRODUÇÃO AGRÍCOLA
NA REGIÃO AMAZÔNICA**

Discente: Paulo Roberto Rodrigues Benevides Filho

Orientador: Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus de Jaboticabal, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

B465p

Benevides Filho, Paulo Roberto Rodrigues

Potenciais remineralizadores de solos como fontes
alternativas para a produção agrícola na região amazônica /
Paulo Roberto Rodrigues Benevides Filho. -- Jaboticabal, 2023
45 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Thiago Assis Rodrigues Nogueira

1. Geologia. 2. Adubos e fertilizantes. 3. Sustentabilidade. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial dessa pesquisa

Os agrominerais estudados poderão impactar regionalmente as estratégias de cultivo por meio da remineralização dos solos das comunidades adjacentes aos empreendimentos minerários, subsidiando o desenvolvimento da região por meio da geração de empregos e maior oferta de alimentos de consumo básico, com diminuição da dependência por insumos agrícolas externos ao eixo Manaus – Boa Vista, no Norte do Brasil.

Potential impact of this research

The agrominerals studied may have a regional impact on cultivation strategies through the remineralization of soils in communities adjacent to mining projects, subsidizing the development of the region through job creation and a greater supply of basic nourishment, with a decrease in dependence on agricultural inputs outside the Manaus – Boa Vista axis, in northern Brazil.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: POTENCIAIS REMINERALIZADORES DE SOLOS COMO FONTES ALTERNATIVAS PARA A PRODUÇÃO AGRÍCOLA NA REGIÃO AMAZÔNICA

AUTOR: PAULO ROBERTO RODRIGUES BENEVIDES FILHO

ORIENTADOR: THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciencias da Producao Agricola / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA
Data: 06/07/2023 19:19:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA (Participação Virtual)
Departamento de Ciência Florestal / FCA UNESP Botucatu

Documento assinado digitalmente
gov.br LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA
Data: 08/07/2023 19:35:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ MARQUES JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Ciencias da Producao Agricola / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE MARQUES JUNIOR
Data: 11/07/2023 10:58:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 06 de julho de 2023

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Paulo Roberto Rodrigues Benevides Filho, nascido em 13 de novembro de 1989, ingressou na Universidade Federal da Bahia, no curso de Geologia em 2009. Durante a graduação foi bolsista pela Capes no Grupo de Estratigrafia e Teórica e Aplicada (GETA/UFBA), entre 2011 e 2013, desenvolvendo projetos de estratigrafia nas Bacias do São Francisco e do Recôncavo, área na qual realizou seu Trabalho Final de Graduação em setembro 2013. Em novembro do mesmo ano assumiu o cargo de Pesquisador em Geociências no Serviço Geológico do Brasil (SGB), em Manaus, capital do Amazonas, desenvolvendo projetos de mapeamento geológico nos Estados do Amazonas, Roraima e Mato Grosso, tendo trabalhado também com mapeamento de solos na região periurbana de Manaus e no norte de Minas Gerais nos projetos das Cartas Hidrogeológicas de Manaus e da Bacia do Verde Grande (MG). Desenvolveu estudos na temática de Agrominerais ao longo da BR-174, Rodovia que conecta Manaus e Boa Vista, tendo publicado o Informe de Recursos Minerais intitulado Avaliação do Potencial Agromineral do Brasil: eixo Manaus - Boa Vista, trabalho este, que subsidia o presente texto. Em março de 2023, foi transferido para a Superintendência de Salvador do SGB, onde exerce suas atividades atualmente.

*Only as a warrior can a man survive the path
of knowledge because the art of the warrior
is to balance the terror of being a man with
the wonder of being a man.*

Don Juan Matus

AGRADECIMENTOS

À Superintendência de Manaus, ao CPRM/SGB como um todo e ao Governo Federal, pela iniciativa de fomentar e pesquisar os agrominerais de forma pioneira, executando entre outros projetos, o projeto Agrominerais do Brasil: Eixo Manaus – Boa Vista, no qual foram obtidos os dados desenvolvidos no presente texto. Especialmente, agradeço à Magda Bergmann, Andréa Sander e Alessandra Blaskowski, colegas que trabalham incansavelmente pelo desenvolvimento dos agrominerais.

Ao LAMIN Manaus e Belém, especialmente aos colegas Larissa Torrezani, Bruno Del Rio Calvo e Marcelo Vasquez, pelo auxílio na preparação e realização das análises aqui utilizadas.

Aos responsáveis técnicos pelos empreendimentos minerários, Pedreira EBAM, Pedreira Samauma e Pedreira Granada Mineração, que gentilmente nos receberam e contribuíram imensamente com, além das amostras, informações sensíveis sobre o processo produtivo que contribuíram com este trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Unesp, Câmpus de Jaboticabal e a todos os professores e funcionários, pela estrutura, oportunidades e conhecimentos transmitidos. Os conhecimentos adquiridos por meio da instituição fizeram de mim um profissional muito mais completo e capaz.

Ao Grupo de Estudos em Nutrição, Adubação e Fertilidade do Solo (GENAFERT), na figura do meu orientador, Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira, exemplar profissional, de uma generosidade imensa, sem o qual eu não estaria aqui hoje.

Por fim, agradeço a minha família, principalmente, a minha esposa Marina e ao meu filho Bento Jorge, sem vocês nada disso faria sentido.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Panorama Geral e Histórico.....	4
2.2 Agrominerais: Eficácia e Aplicações.....	6
2.3 Solos e Agricultura na Amazônia.....	8
3 MATERIAL E MÉTODOS	9
3.1 Pedreiras e Rochas	9
3.2 Amostragem	11
3.3 Análises Químicas	11
3.4 Análises Petrográficas	12
3.5 Análises Granulométricas.....	14
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4.1 Suíte Água Branca (Pedreira EBAM / PB-01).....	14
4.2 Formação Apoteri (Pedreira Granada Mineração / PB-10).....	18
4.3 Grupo Iricoumé (Pedreira Samauma / PB-05).....	20
4.4 Considerações Litoquímicas e Potencial Agromineral.....	22
5 CONCLUSÕES.....	28
REFERÊNCIAS.....	29

POTENCIAIS REMINERALIZADORES DE SOLOS COMO FONTES ALTERNATIVAS PARA A PRODUÇÃO AGRÍCOLA NA REGIÃO AMAZÔNICA

RESUMO – A demanda por fertilizantes minerais é cada vez maior em razão do aumento da produção mundial de alimentos. Nos Estados do Amazonas e de Roraima, devido a distância dos grandes centros produtores, torna-se difícil a aquisição de fontes minerais convencionais utilizadas na agricultura. Nestas regiões, para manter a segurança alimentar, são necessárias fontes alternativas de fertilizantes. Todavia, ainda são incipientes pesquisas que identificaram agrominerais regionais com viabilidade agrônômica para serem comercializados e utilizados na forma de pós de rocha silicática (PRS) como remineralizadores do solo. Objetivou-se, com a presente pesquisa, caracterizar três importantes Unidades de Interesse Agrogeológico no eixo Manaus/Boa Vista na região Amazônica no Brasil: 1) Pedreira da Empresa Brasileira de Agregados Minerais (EBAM): quartzo monzonitos da suíte Água Branca parcialmente potassificados, 2) Pedreira Granada Mineração: basaltos da formação Apoteri e 3) Pedreira Samauma: riolitos do Grupo Iricoumé. Foram realizadas amostragens, seguidas de análises químicas para a determinação de macro e micronutrientes, além de elementos potencialmente tóxicos; análises petrográficas para caracterização mineralógica e análises granulométricas nos pós coletados nas pedreiras. Os resultados evidenciaram que o pó de rocha da Pedreira EBAM atende às normas estabelecidas pela legislação brasileira, possui também baixos teores de elementos potencialmente tóxicos e apenas 15% de quartzo, indicando boa segurança na utilização desse PRS, além de grande disponibilidade de material já britado, para o qual ainda não há comercialização. Na Pedreira Granada Mineração, o PRS também possui características necessárias para sua classificação como um remineralizador de solos. Os basaltos dessa Pedreira, além de não terem cristais de quartzo, são constituídos, cerca de 10%, por cavidades diktitaxíticas. Por meio de análises de EDS foi possível determinar que as mesmas são preenchidas com argilominerais do grupo da clorita (2:1), ricos em Mg, além de cristais de plagioclásio albitizados e alterados. Por meio de análise de DRX foi possível apontar a presença de minerais do grupo das esmectitas outro argilomineral 2:1. Na Pedreira Samauma, apesar do PRS não se enquadrar como um remineralizador, possui mais de 5% de K₂O e 77% de matriz afanítica, o que poderia resultar numa mais fácil liberação de K e Si abundantes para o sistema solo-planta. Por meio de análises de granulometria a laser foi possível tecer algumas considerações a respeito da ação do processo de britagem em litotipos tão distintos e, por fim, caracterizar e classificar os prospectos de maior interesse para a rochagem na Amazônia.

Palavras-chave: agromineral; pó de rocha silicática; segurança alimentar; sustentabilidade

POTENCIAL SOIL REMINERALIZERS AS ALTERNATIVE SOURCES FOR AGRICULTURAL PRODUCTION IN THE AMAZON REGION

ABSTRACT – The demand for mineral fertilizers has increased over the years. In the states of Amazonas and Roraima, it is challenging to acquire conventional fertilizers used in agriculture due to the distance from the large producing centers. In these regions, alternative fertilizers are needed to maintain food security. However, research in agrominerals of silicate rock powders (SRP) is still incipient. The objective of this research is to characterize three important Units of Agrogeological Interest in the Manaus / Boa Vista axis in the Amazon region in Brazil: 1) EBAM Quarry: quartz monzonites from the Água Branca suite, partially potassified, 2) Granada Mining Quarry: basalts from the Apoteri formation, and 3) Samauma Quarry: riolites from the Iricoumé Group. Samplings were carried out, followed by chemical analyzes for determining macro and micronutrients, in addition to potentially toxic elements; petrographic analyzes for mineralogical characterization and granulometric analyzes of the powders collected in the quarries. The results showed that the EBAM quarry rock powder meets the standards established by Brazilian legislation; it also has low levels of potentially toxic elements and only 15% of quartz, indicating good safety in the use of this SRP, in addition to the great availability of material already crushed, for which there is still no market. At Granada Mineração quarry, SRP also has the necessary characteristics to classify as a soil remineralizer. The basalts have about 10% of diatexitic cavities. Through EDS analysis, it was possible to determine that they are filled with clay minerals from the chlorite group (2:1), rich in Mg, in addition to albitized and altered plagioclases. Through XRD analysis, it was possible to point out the presence of minerals from the smectite group, another 2:1 clay mineral. At Pedreira Samauma, although SRP does not qualify as an agromineral, it has more than 5% K₂O and 77% aphanitic matrix, which could result in a more accessible release of abundant K and Si to the soil-plant system. Using laser granulometry analysis, it was possible to make some considerations about the effects of the crushing process in such different lithotypes and, finally, to characterize and classify the prospects of greatest interest for “rochagem” in the Amazon.

Keywords: agromineral; rock dust; food security; sustainability

LISTA DE ABREVIATURAS

AM – Amazonas
BSE – Backscattered Eletron
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTC – capacidade de troca catiônica
DRX – Difração de Raio - X
EDS – Energy Dispersive Spectrometry
EPTs – Elementos Potencialmente Tóxicos
FRX – Fluorescência de Raios-X
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICDD-PDF – International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File
ICP-MS – Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente
ICP-OES – Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PB-01 – Amostras coletadas nas Pedreiras EBAM
PB-05 – Amostras coletadas na Pedreira Samauma
PB-10 – Amostras coletadas na Pedreira Granada Mineração
PRS – Pó de rochas silicáticas
RR – Roraima
RV – Revolução Verde
SGB – Serviço Geológico do Brasil
UIA – Unidade de Interesse Agromineral

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Localização das Pedreiras abordadas. PB-01 representa os quartzos monzonitos da Pedreira EBAM, no município de Pres. Figueredo, PB-05 representa os riolitos da Pedreira Samauma. A norte de Boa Vista-RR. No ponto PB-10, estão os basaltos da Pedreira Granada Mineração10

Figura 2. Estação PB-01 - Amostras coletadas na Pedreira EBAM (PB-01) em (A) amostra de quartzos monzonito; em (B) lâmina delgada de quartzos monzonito ao microscópio; em (C) quartzos monzonito potassificado; em (D) lâmina delgada de quartzos monzonito potassificado ao microscópio; em (E) amostra de diabásio; em (F) lâmina delgada de diabásio ao microscópio.....15

Figura 3. Estação PB-01 - Cristal de feldspato investigado pelo EDS e gráfico evidenciando zonação normal do cristal, com plagioclásio no centro e K feldspato nas bordas. (cps = contagem por segundo).....17

Figura 4. Estação PB-10 - Em (A) frente de lavra na Pedreira Granada; em (B) amostra de basalto; em (C) lâmina delgada de basalto ao microscópio; em (D) cavidades diktitaxíticas destacadas ao microscópio sob luz normal; em (E) imagem do MEV em lâmina delgada de basalto da Fm. Apoteri com as mineralogias dos pontos, onde hem - hematita, chl - clorita / corrensita, px - piroxênio e ab - albita; em (F) cavidades diktitaxíticas destacadas ao microscópio sob luz polarizada.....19

Figura 5. Laudo com o resultado da análise de difratometria de raios-X, realizada na amostra PB-10B pelo Laboratório LAMIN-MA. Amostra contém predominantemente Plagioclásio. Frações moderadas de Piroxênio. Frações pequenas de Clorita/Esmectita.....20

Figura 6. Estação PB-05 - Em (A) foto da amostra coletada; em (B) lâmina delgada sob o microscópio.....21

Figura 7. Resultado da análise de DRX realizada na amostra PB-05A. Amostra contém predominantemente Quartzo, Feldspato Potássico e Plagioclásio. Frações pequenas de Caulinita e Esmectita21

Figura 8. Teores relativos a SB ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$) e K_2O obtidos por meio das análises químicas dos PRS prospectados nas Pedreiras, em comparação à IN 05/2016.....24

Figura 9. Teores de alguns minerais encontrados nas lâminas de rocha das Pedreiras EBAM (PB-01A, PB-01B e PB-01C), Samauma (PB-05A) e Granada Mineração (PB-10A e 10B).....24

Figura 10. Granulometria à laser das amostras de pó de brita coletadas nos empreendimentos previamente peneiradas à 1 mm26

INTRODUÇÃO

Para garantia de segurança alimentar e o equilíbrio dos ecossistemas são necessárias estratégias agroecológicas e práticas conservacionistas na restauração de ambientes degradados e manutenção da qualidade do solo (Keesstra et al., 2016). A produção de alimentos visando a erradicação da fome no mundo é uma das metas estabelecidas dentre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que fazem parte da chamada “Agenda 2030” da Organização das Nações Unidas (ONU, 2022). O papel de destaque do Brasil em relação à ODS 2 (acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e a melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável), decorre principalmente de sua área cultivada, clima e da disponibilidade futura de terras para a agricultura.

Sabe-se que os nutrientes extraídos anualmente pelas colheitas são os principais responsáveis pelo pleno desenvolvimento e ganhos de produtividade das plantas. Entretanto, em solos tropicais, na maioria das vezes, a disponibilidade desses elementos é insuficiente ou inadequada (Swoboda et al., 2022). Estima-se que existe globalmente um significativo hiato, em que apenas metade do potássio (K) retirado dos solos é repostado por meio de fertilizantes, sendo, a produção deste, dominada quase que exclusivamente por cinco países do hemisfério norte (Rússia, Canadá, Alemanha, Bielorrússia e China) que produzem mais de 80% do K distribuído globalmente (Manning, 2015). Tal fato gera dependência do mercado brasileiro na importação de fertilizantes minerais, causando insegurança na oferta desses produtos. Em 2020, a produção nacional de fertilizantes foi de 6,3 milhões de toneladas, enquanto foram importadas 32,8 milhões de toneladas dos mesmos produtos para suprir as necessidades do país (ANDA, 2021). Na ausência do fornecimento dos fertilizantes minerais pode haver comprometimento e até mesmo inviabilizar a produtividade agrícola, afetando globalmente a oferta de alimentos. Ademais, os fertilizantes “modernos” ou de eficiência aprimorada, fabricados para a utilização em solos de clima temperado, por serem muito solúveis, são rapidamente lixiviados nos solos tropicais, que geralmente possuem baixa reatividade (Manning e Teodoro, 2020).

Uma forma alternativa de melhorar a qualidade do solo e manter o adequado desenvolvimento das lavouras é a utilização de pós de rocha silicática (PRS), também conhecidos como agrominerais. A correção de solos com pós de rocha é uma técnica

milénar utilizada até hoje na agricultura moderna, a exemplo do calcário e rochas fosfatadas (Van Straaten, 2007). O intemperismo das rochas silicatadas é um dos processos geoquímicos fundamentais para a formação do ambiente do planeta e a fonte primordial de todos os nutrientes minerais presentes no solo (Swoboda et al., 2022).

Nos últimos anos, a pesquisa com agrominerais ganhou novo fôlego. No contexto dos solos tropicais os PRS vêm obtendo resultados expressivos, principalmente no Brasil, onde o movimento da “rochagem” levou a institucionalização da utilização dos PRS. Os remineralizadores de solo foram introduzidos como uma categoria de insumo agrícola no Brasil pela Lei 12.890, de 10 de dezembro de 2013, e as especificações dos materiais a serem utilizados foram consolidadas na instrução normativa IN 05/2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2016).

Os remineralizadores constituem um grande potencial para suprir a agricultura de forma complementar e em sinergia com os insumos já utilizados. O Plano Nacional de Fertilizantes 2050 projeta um cenário de grande relevância dos remineralizadores de solo na agricultura, com a viabilização de projetos de pesquisa e desenvolvimento importantes até 2025 nessa área; utilização em larga escala de remineralizadores até 2030, atingindo por fim, em 2050, a consolidação da cadeia de produção de remineralizadores, tornando-se referência no tema e diminuindo significativamente a dependência do país pela importação de fertilizantes. Hoje a produção, com 25 produtos registrados, é estimada em 1 milhão de toneladas por ano e as projeções para 2050 são de atingir a marca de 10 mil produtos registrados, com a produção de 18 milhões de toneladas por ano (Brasil, 2021).

Pesquisas que vem sendo conduzidas, principalmente no Brasil, tem buscado explorar a aptidão dos PRS na produção de grãos em grandes sistemas de monocultura, o que pressupõe que os teores de PRS utilizados devem ser compatíveis com a capacidade técnica de incubação de centenas, por vezes, milhares de hectares, o que acarreta na aplicação de quantidades relativamente pequenas de PRS por hectare. Doses comumente utilizadas nesses casos giram em torno de 4–6 t ha⁻¹ (Swoboda et al., 2022). Entretanto, é necessário salientar que isso significa que para cada kg de solo, considerando apenas os 20 cm superficiais serão aplicados cerca de 2 g de PRS, valores bastante modestos que ainda assim tem apresentado eficiência agrônômica e aumento de produtividade em diversos casos.

No cinturão verde próximo à Manaus, por exemplo, é comum o cultivo protegido de hortaliças com alto valor agregado. Esses cultivos têm entre 0,1–0,5 ha de área. Dessa forma, levando em conta a proximidade dos PRS prospectados nesse trabalho e do modelo de produção agrícola, os mesmos poderiam ser testados em quantidades muito mais expressivas e ainda assim ter viabilidade logística e econômica.

Os compostos então gerados por meio da adição de grandes quantidades de PRS ao solo certamente apresentarão algum dinamismo em seu comportamento textural, pois o PRS adicionado ao horizonte superficial e reativo do solo começa a transformar-se em argilominerais ricos em sílica, com elevada superfície específica e partículas de tamanho argila (Krahl, 2020). Tais transformações promovem a liberação dos elementos químicos que formam esses minerais primários (e.g., Ca, Mg, K, Fe, Si) que, em sua forma iônica, passam a ser os nutrientes na solução do solo aumentando a saturação por bases (SB), a capacidade de troca catiônica (CTC) e diminuindo a acidez no mesmo. Experimentos com pó de basalto demonstram melhora significativas nesses parâmetros utilizando basalto moído em doses entre 1 e 100 t ha⁻¹ (Gillman et al., 2002; Melo et al., 2012; Hanisch et al., 2013; Alovisei et al., 2017, 2020). Já foram comprovados os efeitos positivos de diversos PRS promovendo mudanças na reação do solo, no fornecimento de nutrientes, no pH e SB dos solos, além de alterar os aspectos físicos e biológicos (Colin et al., 2017; Krahl, 2020).

Os remineralizadores possuem solubilidade lenta e gradual devido à alteração intempérica dos minerais presentes nos pós de rocha. Por outro lado, em experimento conduzido em laboratório, foi constatada a liberação de teores de K e Na de pós de rochas, na ordem, de 5 a 10 vezes mais alto em ácido cítrico do que em ácido acético ou água (Ribeiro et al., 2016), demonstrando que os ácidos orgânicos, presentes em abundância no horizonte superficial do solo, rico em matéria orgânica, tem importante papel no intemperismo químico e liberação de nutrientes pelos fragmentos minerais nos pós de rocha. Alguns estudos já evidenciaram os efeitos da colonização de grupos específicos de bactérias em fases minerais distintas, consolidando o termo “mineralosfera” à medida que são demonstradas as diferenças entre tipos e diversidade de bactérias na superfície dos fragmentos de alguns minerais e do solo em geral, promovendo o intemperismo e contribuindo com a liberação de nutrientes para as plantas (Uroz et al., 2012; Uroz, et al., 2015).

O Brasil é um país com grande diversidade de terrenos geológicos que representa um elevado potencial para utilização de PRS como remineralizadores de

solos (Cola e Simão, 2012). Com isso, a prospecção de rochas próprias para uso na agricultura deve considerar recursos disponíveis regionalmente, sendo uma forma de diminuir os custos da produção agrícola, além de promover a mitigação de passivos ambientais. Neste contexto, objetivou-se com o presente estudo, realizar a caracterização química e mineralógica de rochas disponíveis no contexto da BR-174, rodovia que interliga Manaus (AM) e Boa Vista (RR), duas importantes capitais da região. Nos municípios cortados por essa rodovia vivem aproximadamente 2,9 milhões de pessoas, correspondendo a 59% da população dos Estados de Roraima e do Amazonas (IBGE, 2021). Assim, o principal enfoque foi a caracterização de materiais já britados das Pedreiras destinadas à construção civil, presentes na área, cujos finos de britagem podem ser pesquisados para o desenvolvimento de remineralizadores de solos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Panorama Geral e Histórico

É difícil precisar quando se inicia a relação entre a agricultura e os agrominerais. A pesquisa científica com pós de rocha finamente moídos, baseada no conceito de “Pães de Pedra” se inicia no século 19 com Missoux (1853, 1954) Hensel (1890, 1894) entre outros (van Straaten, 2002). Julius Hensel (1844–1903) publicou em 1894 sua obra intitulada *Brot aus Steinen, durch mineralische Durgung der Felder*, conhecida mundialmente como “*Bread from Stones*” ou “Pães de Pedra” em português. Um pequeno livro que além de conceitos a respeito da remineralização com PRS traz relatos e experiências de cientistas e agricultores contemporâneos que se beneficiaram com as técnicas pregadas por Hensel. Essa publicação pode ser, por sua relevância, considerada a letra inaugural da ciência dos agrominerais, um campo de estudo que, desde essa época até os dias atuais, desperta muitos questionamentos e uma oposição ferrenha de setores poderosos, como ressalta Sebastião Pinheiro em prefácio na tradução de 2003 da obra para o português (Hensel, 2003).

Um novo período de trabalhos práticos e conceituais com PRS na agricultura recomeça com Keller e colaboradores a partir de 1948 seguido pelos trabalhos de

Fyfe e colaboradores a partir de 1981; Leonardos e colaboradores a partir de 1987; e Chesworth e colaboradores a partir de 1982 (van Straaten, 2002)

O desenvolvimento dos agrominerais e sua pesquisa foram eclipsados nas décadas de 1960 a 1990 pelos ganhos produtivos proporcionados pela “Revolução Verde” (RV). Entre os anos 1960 e 2008 a humanidade mais que dobrou sua população e ainda assim foi capaz de triplicar sua produção de cereais aumentando em apenas 30% as áreas cultivadas (Wik, Broca e Pingali, 2008). Apesar de a RV ter contribuído para a diminuição da pobreza em geral, contribuído com a redução da fome e com a diminuição da conversão de milhares de hectares de terra em cultivos, a intensificação dos mesmos e a intensa sofisticação das técnicas e insumos aplicados não contribuíram substancialmente para a redução da pobreza nas regiões marginais, além disso, as consequências indesejáveis relacionadas ao uso da água, degradação dos solos e contaminações por agentes químicos utilizados na RV tem sérios impactos ambientais, e os efeitos na redução da produtividade já são sentidos desde meados da década de 1980 (Pingali, 2012).

A solução para tais problemas passa pela construção de pontes de conhecimento entre os cientistas e a sociedade em todo o planeta. Desde a década de 1990 começam a florescer iniciativas nesse sentido, como a Declaração de Veneza de 1987 e a ECO-92, Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento no Rio de Janeiro, que marcam o retorno de uma simbologia poderosa: o arquétipo ecológico e uma atitude fraterna com relação à natureza. Extinguindo espécies irmãs e tentando modificar seus habitats e a cadeia alimentar, o ser humano se torna consciente de que ele próprio poderia ser extinto (Leonardos et al., 2000). Nesse contexto mais integrado e holístico ganham novo fôlego as pesquisas a respeito dos agrominerais.

A agrogeologia pode ser definida como geologia a serviço da agricultura. Um estudo dos processos geológicos que influenciaram a distribuição e formação dos solos, além da aplicação de materiais geológicos em sistemas florestais e de cultivo com o objetivo de manter e aumentar a produtividade, assim aumentando os benefícios sociais, ambientais e econômicos. Uma ciência transdisciplinar que combina o conhecimento dos agricultores, cientistas e engenheiros, a fim de determinar as necessidades dos solos, reconhecer e caracterizar os materiais geológicos que supram essas necessidades e os processos de transformação necessários para a concentração e disponibilização desses nutrientes para as plantas.

Esse processamento deve ter um nível apropriado e refletir o nível tecnológico econômico da localidade onde será disponibilizado e utilizado (van Straaten, 2002).

Alguns dos principais problemas enfrentados nessa seara são a segmentação e segregação das diferentes disciplinas, o que dificulta a transdisciplinaridade e o problema da influência política e comercial, que financia os projetos científicos em favor de seus interesses próprios que não necessariamente são os da população ou do planeta. Um exemplo desse fenômeno é a agricultura de monocultura em larga escala, de forte dependência tecnológica para obtenção de insumos industrializados transferida pela RV para a América Latina, sem levar em consideração os conhecimentos ancestrais, justiça social ou mesmo a natureza dos solos tropicais (Leonardos et al., 2000). No Brasil, desde os anos 1990 e, particularmente, no início do século 21, o interesse no uso de PRS como remineralizadores de solos aumentou levando ao surgimento do movimento da “rochagem”. Esse movimento foi impulsionado pela necessidade de alternativa para nutrição dos cultivos devido a grande dependência do Brasil por insumos importados, as consequências ambientais de seu uso e os preços internacionais cada vez mais altos. No Brasil, 76% das terras agricultáveis estão cultivadas com commodities como cana-de-açúcar, soja, milho, algodão, café e arroz, sendo que essa grande quantidade de terra corresponde a apenas 10% das propriedades rurais, enquanto os outros 90% das propriedades correspondem à apenas 24% das terras cultivadas, geralmente, com produtos para o consumo interno como milho, feijão, mandioca e hortaliças. Este setor é dominado por pequenos produtores que encontram severas dificuldades ao acesso a fertilização tradicional, devido ao seu elevado custo (Manning e Theodoro, 2020).

Dessa forma, fica claro que o Brasil tem um importante papel no mercado internacional de commodities, no entanto, sua relevância e seu sucesso são ameaçados por sua dependência dos insumos externos para continuar sua produção. Os esforços combinados dos pesquisadores, junto a empresas governamentais, ministérios e agências de fomento levaram a organização dos primeiros eventos internacionais com essa temática além da legislação e posterior normatização (IN 05/2016 MAPA) dos parâmetros exigidos para os agrominerais no Brasil (Manning e Theodoro, 2020).

2.2 Agrominerais: Eficácia e Aplicações

Os fertilizantes minerais convencionais são muito solúveis em água e contêm altas concentrações de nutrientes que estão disponíveis para as plantas de forma imediata. Mas, cabe ressaltar que, exceto por fertilizantes de base nitrogenada, praticamente todos os outros são originados de rochas processadas quimicamente (van Straaten, 2002). Há cerca de 170 anos atrás Sir J. B. Lawes desenvolveu o superfosfato por meio do tratamento de rochas apatíticas com ácido sulfúrico, inaugurando assim a indústria dos fertilizantes artificiais. O produto promoveu o aumento da produtividade de grãos cultivados nos podzóis de climas temperados. Esse sucesso deveu-se ao bom balanceamento dos outros nutrientes disponíveis no solo, a adsorção pelas reativas argilas 2:1, pelas zeólitas e pela farta matéria orgânica nesse tipo de solo. Outras condições benéficas foram a desfavorabilidade à precipitação dos insolúveis fosfatos de ferro e alumínio além das chuvas bem distribuídas ao longo do ano. É fácil deduzir que nenhuma dessas características é encontrada usualmente nos ambientes tropicais lateríticos (Leonardos et al., 2000).

A liberação de nutrientes na forma de elementos químicos por meio do intemperismo de minerais primários é um dos processos fundamentais que controla o meio ambiente no planeta, sendo assim a principal fonte de nutrientes para o solo. No entanto, a eficiência dos PRS depende do arranjo de uma série de fatores, como a espécie das plantas, tipo de rocha, mineralogia, tamanho das partículas, quantidades aplicadas, associação com microrganismos do solo (Swoboda et al., 2022).

Um importante legado está sendo construído no Brasil, por meio da organização de eventos sobre o tema e a reunião dos cientistas de todo o mundo na área. Os trabalhos realizados nesse contexto demonstram uma série de resultados positivos no uso de PRS como remineralizadores de solos como: diminuição de até 80% nos custos com fertilização; efeitos residuais persistentes por até cinco anos; aumento da fertilidade e da produtividade em relação à fertilização tradicional; aumento do desenvolvimento radicular; maior humidade do solo; maior biomassa das plantas e maiores colheitas; aceleração de alguns ciclos produtivos; ausência de contaminação e eutrofização das águas graças à solubilidade gradual; possibilidade de uso na agricultura orgânica (Manning e Theodoro, 2020).

De forma sucinta, para que um pó de rocha seja considerado um remineralizador de solo, é necessário que o mesmo apresente as seguintes características: 9% em soma de bases (Ca, Mg e K); pelo menos 1% desses 9% em K; menos de 25% de sílica livre, o que na prática significa o teor do mineral quartzo

na rocha; limite para teores de elementos potencialmente tóxicos (EPTs); teores mínimos declaráveis para os outros macro e micronutrientes além de exigências a respeito do tamanho das partículas (MAPA, 2016).

2.3 Solos e Agricultura na Amazônia

Nos últimos anos tem havido um aumento substancial da infraestrutura e dos investimentos no desenvolvimento de agricultura em larga escala, induzidos pelo aumento da demanda interna e externa por *commodities* agrícolas como, por exemplo, soja e carne, com o consequente aumento da demanda por fertilizantes. Todavia, nem todos os produtores experimentaram os efeitos desse desenvolvimento, principalmente os pequenos produtores. Estes são responsáveis pela maior parte da produção de gêneros de subsistência como milho, arroz e mandioca, um papel importante que está em risco ao longo prazo pela depleção nutricional do solo nessas propriedades (Morello et al., 2018).

Os solos da Amazônia, por sua vez, são caracterizados pela baixa disponibilidade de nutrientes, formados majoritariamente por caolinita e areia, graças ao intemperismo intenso. Uma compilação de 3.340 amostras de solo nas mais diversas condições (floresta primária e secundária, pousio, policultura e monocultura) analisadas na Embrapa em Manaus entre 1975 e 2005, apresenta um panorama detalhado a respeito desses solos. O pH desses solos na média foi de 4,4, no qual 96,46% das amostras são classificadas como pH baixo ou muito baixo. A maioria absoluta das amostras que registraram pH acima de 5,4 são provenientes das regiões de baixada próximo aos grandes rios ou de sítios arqueológicos denominados terra preta de índio. A matéria orgânica apresentou uma grande variação, 0,07–8,77g kg⁻¹, sendo que 53,30% dos solos foram classificados nas classes alta e muito alta. O fósforo variou entre 0,06–271 mg dm⁻³, onde 82,73% dos solos tinham menos que 5,4 mg dm⁻³. As amostras com altos teores de fósforo também são provenientes de planícies de inundação e terras pretas de índio. O potássio variou entre 0,01–2,3 cmol_c dm⁻³ com média de 0,09 cmol_c dm⁻³, no qual 75,89% das amostras são classificadas como teores baixos e muito baixos de K. Calcio e magnésio trocáveis juntos apresentaram variação entre 0,02–22,4 cmol_c dm⁻³ onde a maioria, 88,39% e 74,33% dos valores foram menores que 1,17 e 0,46 cmol_c dm⁻³ para Ca e Mg trocáveis respectivamente, sendo classificados como teores baixos a muito baixos. A respeito

da acidez potencial, CTC e saturação por bases foi identificado que 68,51% e 81,24% das amostras apresentaram acidez potencial e alumínio livre em níveis considerados tóxicos para a maioria dos cultivos. Verificou-se que, 76,55% das amostras apresentaram saturação por alumínio maior que 50%. A CTC apresentou correlação positiva com o alumínio trocável e negativa com o pH, evidenciando que é a matéria orgânica e não as argilas é a responsável pela fertilidade do solo nesse contexto. Por fim, o estudo conclui que os solos no Estado do Amazonas são carentes de todos os macronutrientes analisados necessitando de correção da acidez e adubação para a maximização da produção (Moreira e Fageria, 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Pedreiras e Rochas

Este trabalho é o desenvolvimento de um projeto iniciado no Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Nesse projeto, foi realizado um trabalho de prospecção de Unidades de Interesse Agromineral (UIAs) no contexto da BR-174, rodovia que liga as Capitais Manaus - AM e Boa Vista – RR. Como resultado desses esforços, foram coletadas e analisadas 60 amostras em 36 estações diferentes e posteriormente os dados obtidos foram divulgados por meio do Informe de Recursos Minerais nº 28 do SBG (Benevides Filho e Blaskowski, 2022). Entre todas as rochas estudadas três prospectos chamaram atenção por seus atributos químicos, mineralógicos e logísticos. Os três empreendimentos estudados ficam a margem ou próximos a BR-174 na região Amazônica (Figura 1).

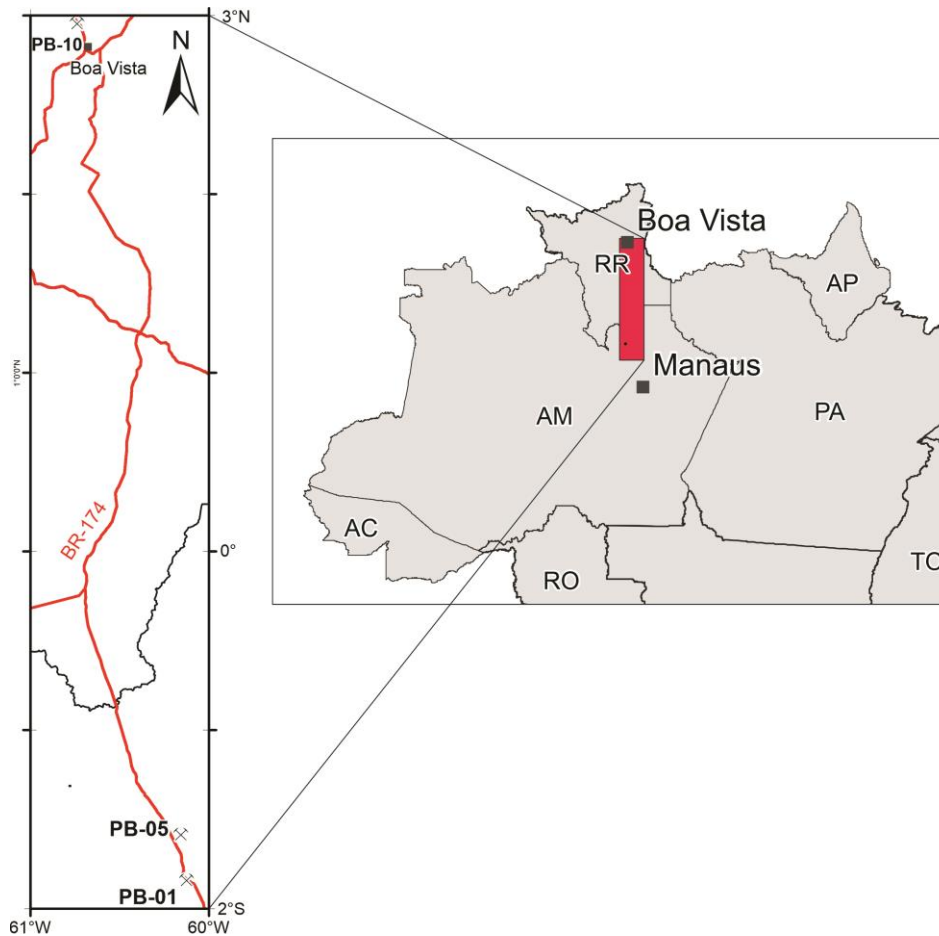


Figura 1. Mapa de Localização das Pedreiras abordadas. PB-01 representa os quartzo monzonitos da Pedreira EBAM, no município de Pres. Figueiredo, AM, PB-05 representa os riolitos da Pedreira Samauma. A norte de Boa Vista-RR. No ponto PB-10, estão os basaltos da Pedreira Granada Mineração

A Pedreira EBAM (PB-01) encontra-se na margem Oeste da BR-174 a cerca de 150 km de Manaus, no município de Presidente Figueiredo, AM (Figura 1). A brita produzida é empregada nos setores da construção civil e pavimentação de estradas. Produz desde rachão (150 a 100 mm) até o pó de brita (menor que 4 mm), seu principal produto é a brita zero (5 a 13 mm). Atende principalmente ao mercado de Manaus produzindo mensalmente cerca de 27.000 m³ de material nas seguintes proporções: 35% de brita zero, 20% de brita 1 (13 a 20 mm), 40% de pó de brita, 5% de bica corrida (fino de britagem que é descartado em granulometria < 30mm), salvo excepcionalidades. A Pedreira vende toda sua produção de brita 0 e 1, mas o pó de brita e a bica corrida, por suas características geotécnicas inferiores, atribuídas ao excesso de ferro, possuem pouca aplicação e demanda na construção civil, mas compõem 45% do resultado do processo de britagem, de forma que o material se acumula nos pátios formando pilhas de “rejeito”. As estimativas, em abril de 2019, das

quantidades de estoque eram da ordem de 100 mil m³ de bica corrida e 125 mil m³ de pó de brita.

A Pedreira da Granada Mineração (PB-10), antiga Boa Vista Mineração, é a segunda maior Pedreira visitada pelo projeto, ficando atrás apenas da Pedreira da EBAM. Sua produção consiste basicamente em pó de brita, brita zero e brita 1, e é utilizada majoritariamente em usinas de asfalto de Roraima, mas também atende ao mercado de construção civil na região. A Pedreira tem capacidade operacional para processar cerca de 11 mil m³ de rocha mensalmente e sua operação de britagem resulta em 50% de brita 1, 30% de brita 0 e 20% de pó de brita. Em março de 2019, o estoque da Pedreira era de aproximadamente 25 mil m³, entretanto, todas as frações têm mercado e praticamente não há rejeito na Pedreira.

A Pedreira Samauma (PB-05) está localizada a Leste da BR-174, a cerca de 190 km de Manaus. A Pedreira produz desde o pó de brita até brita 2, mas geralmente opera processando 5000 m³ por mês de rocha e seu processo de britagem resulta em 50% de brita 1, 30% de brita 0 e 20% de pó de brita. Todas as frações produzidas atendem ao mercado local e não existem descartes de finos de britagem disponíveis.

3.2 Amostragem

Nas Pedreiras foram coletadas uma série de amostras e informações: i) amostras das rochas de materiais expostos na frente de lavra, sempre levando em consideração a representatividade de cada litotipo e sua contribuição para o pó resultante da mistura das diferentes rochas aflorantes; ii) amostras de pó de brita, com cerca de 500 gramas para realização de análises litoquímicas, devidamente homogeneizadas e quarteadas; e, iii) questionário socioeconômico realizado com encarregados e/ou responsáveis técnicos nas unidades, a fim de levantar informações relevantes ao estudo, como produção mensal, processo de cominuição, equipamentos utilizados, volume comercializado nas diferentes frações, aplicações do material, mercado consumidor, volume de rejeito na planta, entre outras informações que fossem relevantes em cada caso particular.

3.3 Análises Químicas

Nas rochas e nos PRS, foram avaliados os elementos químicos constituintes (macro e micronutrientes e/ou metais pesados) a fim de verificar o potencial agromineral dos materiais pesquisados, considerando a norma brasileira para remineralizadores de solos, IN 05/2016 do MAPA.

As análises realizadas foram: 1) fusão por tetraborato de lítio e leitura por Fluorescência de Raios-X (FRX), para a obtenção dos óxidos maiores e perda ao fogo, com objetivo principal de dosar os macronutrientes (cálcio, magnésio, potássio e fósforo), além de outros elementos de interesse para pesquisa (silício, alumínio, cromo, sódio, manganês e ferro). Para a análise foi utilizada 0,5 g de amostra, a mesma passa por uma fusão em máquina automática com tetraborato de lítio e então é realizada a leitura da pastilha fundida por espectrofotômetro de RX modelo Magix da Panalitical; 2) análise química para dez elementos traços, com foco em metais base, por meio de abertura por quatro ácidos e leitura por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES – 5300, Perkin Elmer) e espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS – Nexion, Perkin Elmer), com o objetivo de definir os teores dos micronutrientes cobalto, cobre, molibdênio, níquel e zinco, além dos metais pesados, cádmio e chumbo. Para essa análise são utilizadas 0,25 g de amostra nas quais é realizada a decomposição por meio de abertura por digestão com HCl, HNO₃, HClO₄ e HF; 3) análise de nove elementos traço voláteis com afinidade geoquímica com o ouro por meio da digestão por água régia e quantificação por ICP-OES/ICP-MS, com o objetivo de definir os teores de arsênio e mercúrio (elementos potencialmente tóxicos – EPTs), nessa análise é realizada a decomposição de 0,25 g da amostra por meio de abertura por água régia (HCl e HNO₃).

3.4 Análises Petrográficas

As análises petrográficas tiveram como intuito a descrição das litologias e caracterização das fases minerais, com foco na identificação de minerais com condição de abertura cristalina e suas feições de alteração e dissolução. A petrografia é a principal ferramenta na determinação estatística dos teores de cristais ou grãos quartzo (sílica livre) que compõem as rochas. Um dos principais fatores de avaliação das aptidões de um PRS para a remineralização é justamente o teor de sílica livre, sendo este limitado a 25% da composição total da rocha para a utilização da mesma

como um agromineral (MAPA, 2016). A determinação dos teores de sílica livre foi realizada por meio de contagem modal dos minerais nas lâminas das rochas, adotando uma malha regular de 2 mm, o que permitiu uma contagem de cerca de 250 pontos por lâmina.

Nas rochas vulcânicas, onde é difícil definir a assembleia mineral a partir da petrografia, devido ao tamanho diminuto dos cristais, foi utilizada a técnica da Difractometria de Raios-X (DRX). As análises foram realizadas em Difratorômetro de Raios-X modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da Panalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de raios-X cerâmico de ânodo de Cu ($K\alpha_1$ 1,5406 Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kv. O detector utilizado é do tipo RTMS, Pixel/1D. A aquisição de dados foi feita com o *software X'Pert Data Collector*, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o *software X'Pert HighScore* versão 3.0d, também da Panalytical. Foram utilizadas as seguintes condições de análise: Voltage (kV): 40; Current (mA): 40; Scan range ($^\circ 2\theta$): 5-70 (MA) e 5-50 (RJ); Step size ($^\circ 2\theta$): 0,02; Scan mode: Continuous; Counting time (s): 50; Divergence slit: Slit Fixed $1/2^\circ$; Mask Fixed 10mm; Anti-scatter slit Name: 5,7mm. A identificação dos minerais é feita por meio da comparação do difratograma obtido com padrões (fichas) do banco de dados do International Center for Diffraction Data - Powder Diffraction File - ICDD-PDF.

As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas em um microscópio modelo LS15 da Zeiss. O material foi analisado ou imageado usando filamento de Tungstênio no modo de alto vácuo ($< 3,0 \cdot 10^{-5}$ mPa). As lâminas delgadas polidas foram cobertas por uma película de Cr de 20 μ m de espessura usando uma metalizadora em alto vácuo. As imagens de elétron retroespalhado (*Backscattered Eletron* - BSE) dos minerais e texturas do quartzo monzonito e do basalto foram obtidas com voltagem de aceleração de 20 kV, corrente de chegada entre 100 e 120 pA, com uma distância de trabalho de 8,5 mm e ampliações entre 60 e 2500 vezes. As análises da composição química dos minerais foram por espectrometria por dispersão de energia (*Energy Dispersive Spectrometry* - EDS) de raios-X em um detector X-Act SSD 10 mm² da *Oxford Instruments*. Os resultados analíticos foram adquiridos a uma distância de trabalho de 8,5 mm, com voltagem de 20 kV e corrente de chegada de 700 pA a 4,2 nA para manter uma taxa de contagem de saída de cerca de 2000 cps, tanto nas análises pontuais quanto nos perfis de elementos. Os resultados obtidos foram padronizados por espectros de energia de

padrões do programa AZTec da *Oxford Instruments*. No tratamento, os resultados com desvio padrão acima de 10% da concentração do elemento foram descartados do cálculo da composição dos minerais, podendo esse estar presentes nos minerais em baixas concentrações como impurezas no retículo cristalino ou marcar incipiente alteração secundária dos minerais analisados. Também podem representar elementos espúrios do mineral encaixante que foram detectados devido à forte intensidade e elevada espessura do feixe incidente de elétrons. A classificação dos minerais foi feita com consulta dos percentuais dos elementos e fórmulas minerais no *Mineralogy Database*.

3.5 Análises Granulométricas

As amostras foram submetidas à análise granulométrica utilizando um granulômetro a laser Mastersizer 2000 com dispersor Hydro 2000MU. As amostras são previamente peneiradas para separar a fração maior que 1 mm. Como meio dispersante para as análises é utilizada água de torneira.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Suíte Água Branca (Pedreira EBAM / PB-01)

A suíte Água Branca é caracterizada na literatura como uma série granítica expandida composta predominantemente por monzogranitos apresentando alguma variação, entretanto, até termos dioríticos. As rochas dessa unidade são granitoides tardicolisionais de natureza cálcio-alcálica de alto-K, de idade orosiriana e, associadas ao vulcanismo Iricoumé, compõem grande parte do embasamento na região de ocorrência (Valério et al., 2006). O aspecto geral da rocha é de um granitoide médio a grosso isotrópico inequigranular, classificada como quartzo monzonito (PB-01A), representando 60% da frente de lavra (Figura 2A).

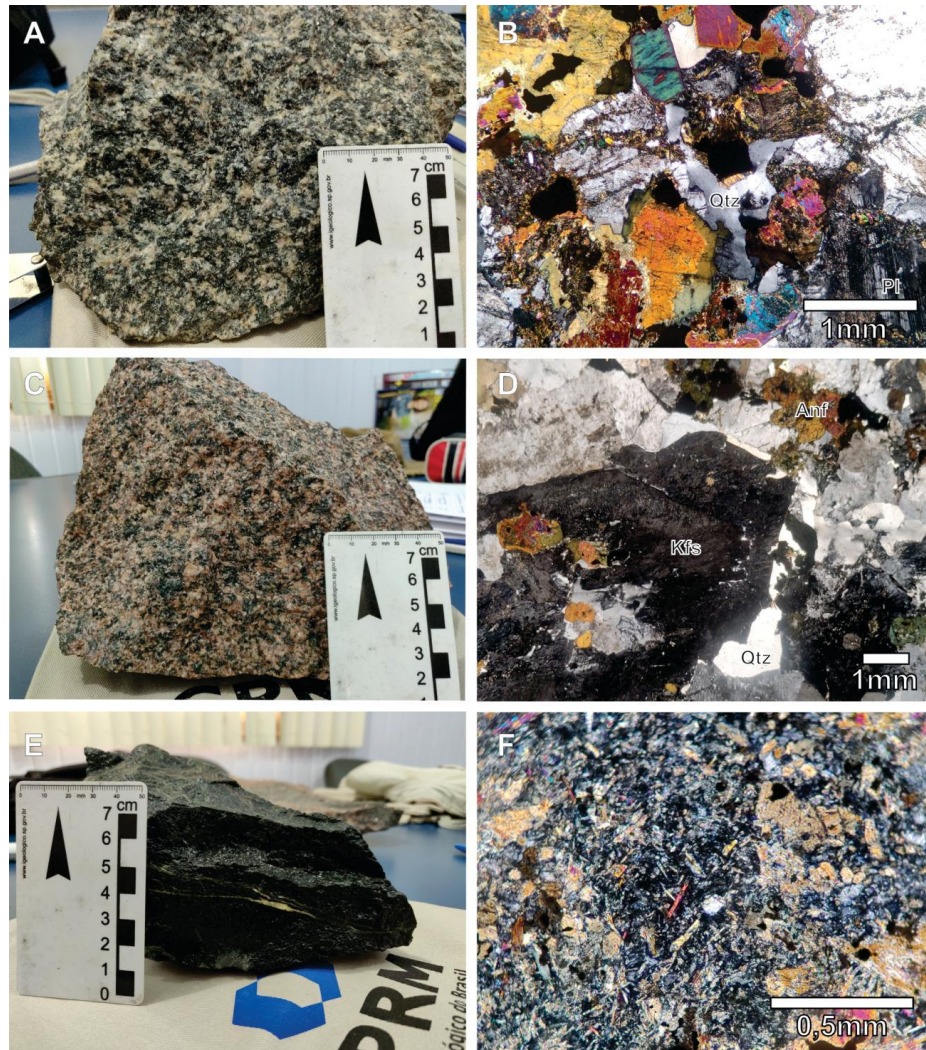


Figura 2. Estação PB-01 - Amostras coletadas na Pedreira EBAM (PB-01) em (A) amostra de quartzo monzonito; em (B) lâmina delgada de quartzo monzonito ao microscópio; em (C) quartzo monzonito potassificado; em (D) lâmina delgada de quartzo monzonito potassificado ao microscópio; em (E) amostra de diabásio; em (F) lâmina delgada de diabásio ao microscópio.

Nas zonas de cisalhamento e/ou fraturamento a mesma torna-se avermelhada. Esse efeito foi atribuído à percolação de fluidos hidrotermais que promoveram potassificação que abrange 35% da frente de lava e é representada pela amostra classificada como quartzo monzonito potassificado (PB 01B) (Figura 2C). Nas falhas e fraturas associadas ao processo depositam-se veios de calcita e óxidos.

Estimados em 5% na frente de lava estão diques e xenólitos de material máfico fanerítico fino de cor escura e tom esverdeado, representados pela amostra PB-01C, classificada como diabásio (Figura 2E). Em geral, o resultado do processo de britagem é a mistura desses três litotipos, tendo resguardadas suas proporções na frente de lava.

Em lâmina (Figura 2B), o quartzo monzonito (PB-01A) apresenta-se relativamente alterado, é possível observar uma grande disseminação de vênulas com alteração de sericita e epidoto no espécime. Cerca de 80% do K feldspato encontrado na lâmina apresenta forte zonação concêntrica, com exsolução de albita (pertita) e considerável nível de sericitização por vezes controlada pela zonação composicional ou se desenvolvendo ao longo das linhas de exsolução da pertita. Cristais de microclina com geminação tartan e pouco ou nenhum intemperismo são geralmente pequenos e raros. A fase plagioclásio foi determinada majoritariamente pela presença de geminação polissintética e, portanto, pode estar subestimada em relação ao K feldspato. Os máficos são representados em sua maioria por núcleos de ortopiroxênios e clinopiroxênios manteados por anfibólio e presença de alguma biotita e clorita associadas. Por fim é notável, utilizando-se o aumento de 400x a presença de pequenos cristais de apatita prismáticos dentro dos cristais de feldspatos além de aglomerados anédricos de epidoto. É importante ressaltar que os teores de quartzo identificados na amostra que representa a maior parte da lavra (PB 01A) estão em torno de 15% (Figura 2B).

Por meio da Eletroscopia por Energia Dispersiva (EDS) foi possível determinar que os plagioclásios na lâmina PB-01A são predominantemente labradorita e andesina com teores de Ca e Na bastante próximos. Os K feldspatos por sua vez são pertíticos, formados por intercalações de ortoclásio e albita (potássio e sódio). Alguns cristais apresentam zonação com plagioclásio no núcleo e manteamento de K feldspato o que denota sequência de cristalização normal da rocha (Figura 3).

Os piroxênios são augitas que tem pouco ou nenhum alumínio em sua composição sendo mais ricas em Fe e Ca do que em Mg. O principal mineral portador de P identificado tem composição compatível com minerais do grupo da apatita, em pequenos cristais de 0,01 mm inclusos nos feldspatos. Os minerais opacos são majoritariamente óxido de ferro com algum teor de titânio e manganês. Em vênulas cortando o plagioclásio os cristais são muito pequenos e difíceis de caracterizar, entretanto a EDS identificou composições químicas compatíveis com esfalerita (ZnS), epidoto (Ca e Fe) e sericita (K), minerais comumente associados a essas feições.

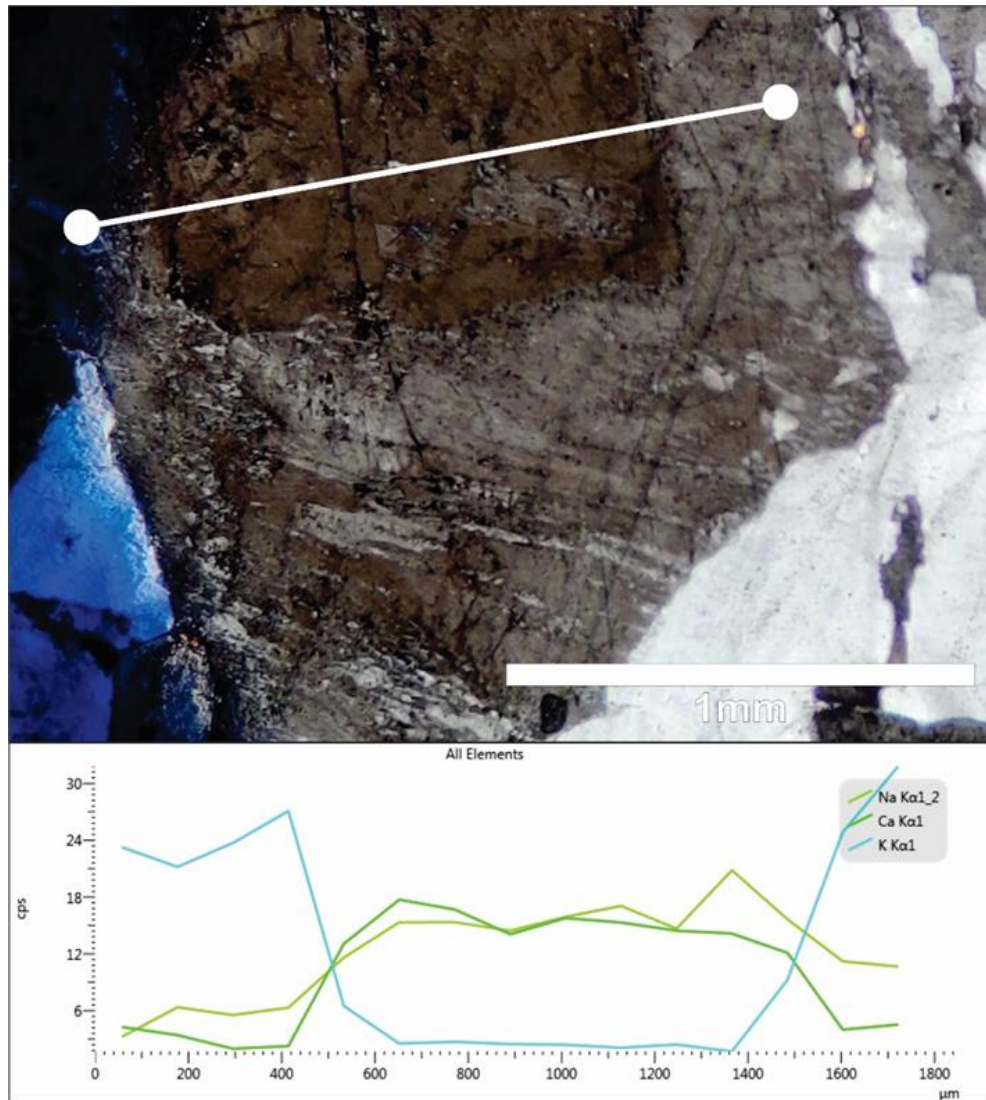


Figura 3. Estação PB-01 - Cristal de feldspato investigado pelo EDS e gráfico evidenciando zonação normal do cristal, com plagioclásio no centro e K feldspato nas bordas. (cps = contagem por segundo).

A amostra de quartzo monzonito potassificado (PB-01B) guarda semelhanças com o quartzo monzonito (PB-01A). Todavia, nestas, os feldspatos com geminação polissintética (PI), são muito mais raros. A lâmina também apresenta menos vênulas e uma menor sericitização em relação à primeira. Tudo isso se deve provavelmente ao evento de potassificação hidrotermal. Não foram identificados aqui núcleos vestigiais de ortopiroxênio ou clinopiroxênio e os máficos predominantes são anfibólios (Figura 2D). Os teores de quartzo observados em lâmina são inferiores aos do quartzo monzonito (PB-01A).

A amostra de diabásio (PB-01C) apresenta um avançado grau de alteração e é composta por ripas e fenocristais de plagioclásio altamente sericitizados, alguns pequenos núcleos de piroxênios também muito degenerados, imersos em matriz

afanítica, que parece formada por minerais secundários, provavelmente sericita, actinolita, epidoto e opacos, além de algum quartzo e biotita (Figura 2F).

4.2 Formação Apoteri (Pedreira Granada Mineração / PB-10)

A Formação Apoteri é composta por derrames e diques de basaltos toleíticos continentais associados ao contexto da Província Magmática do Atlântico Central - CAMP no Rifte do Tacutu, um aulacógeno de direção NE-SW que se desenvolveu no final do triássico e início do jurássico (Pinto et al., 2017).

Na Pedreira a frente de lavra é composta unicamente por basaltos maciços faneríticos finos de coloração cinza escura, muito fraturados, isotrópicos, exceto por ocasionais vênulas de espessura milimétrica de coloração branca, formadas por calcita majoritariamente. Disjunções colunares centimétricas observadas nesse local, caracterizariam uma zona central de derrame (Bergman e Holanda, 2014) (Figuras 4A e 4B).

Em lâmina delgada a rocha encontra-se muito alterada provavelmente por algum evento hidrotermal, o que afetou as propriedades óticas dos minerais dificultando sua identificação. É possível observar as ripas de plagioclásio muito alteradas. As análises de DRX indicam presença de minerais do grupo das esmectitas e pequenos cristais de birrefringência média a alta de piroxênio, envoltos numa massa de minerais de alteração, além de minerais opacos (Figura 4C). A rocha é levemente porfírica, com fenocristais de plagioclásio de até 1 mm de comprimento. Uma característica notável e comum desses basaltos são cavidades diktitaxíticas preenchidas por argilominerais isotrópicos de textura afanítica e cor verde (Figuras 4D e 4F). Essas cavidades chegam a compor cerca de 10% do volume da rocha e são originadas a partir da concentração de elementos voláteis durante a cristalização das fases anidras, sendo por fim preenchidas por microcristais de argilominerais do grupo das esmectitas (Bacon, 1986; Walker, 1993; Goff, 1996; Bergmann e Holanda, 2014; Fornero, 2018). Pontos investigados pelo EDS dentro dessas cavidades diktitaxíticas em rochas da Formação Apoteri demonstraram composição compatível com os minerais do grupo da clorita (corrensita), ricos em ferro e magnésio. Por meio do EDS foi possível descobrir que o Ca existente na rocha foi encontrado majoritariamente nos piroxênios, provavelmente augitas, ricas também em ferro e magnésio. Alguns dos opacos na rocha também foram investigados e são compostos majoritariamente por

ferro, mas possuem algum teor de titânio (Figura 4E) (Benevides Filho e Blaskowski, 2022).

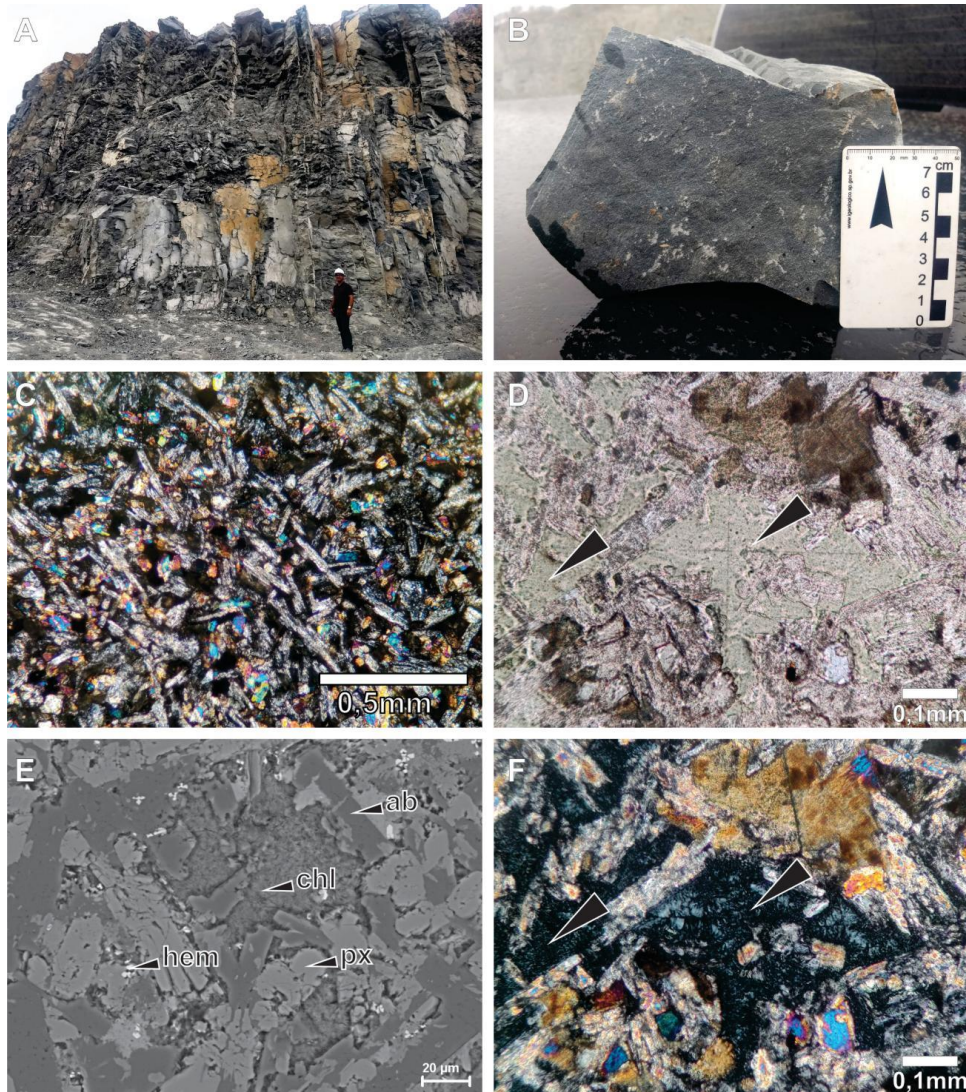


Figura 4. Estação PB-10 - Em (A) frente de lavra na Pedreira Granada; em (B) amostra de basalto; em (C) lâmina delgada de basalto ao microscópio; em (D) cavidades diktitaxíticas destacadas ao microscópio sob luz normal; em (E) imagem do MEV em lâmina delgada de basalto da Fm. Apoteri com as mineralogias dos pontos, onde hem - hematita, chl - clorita / corrensite, px - piroxênio e ab - albita; em (F) cavidades diktitaxíticas destacadas ao microscópio sob luz polarizada.

O difratograma da amostra PB-10B (Figura 5) apresenta picos que indicam a presença de minerais do grupo da esmectita, clorita e vermiculita. Essa informação corrobora com a hipótese de que as cavidades diktitaxíticas estão preenchidas com minerais dessa família. Os plagioclásios alterados, por sua vez, não apresentaram qualquer teor de cálcio, sendo compostos apenas por sódio, alumínio, silício e

oxigênio (Benevides Filho e Blaskowski, 2022), o que indica haver ocorrido algum processo de albitização dessa fase, sendo seu principal constituinte o mineral albita (Na), provavelmente parcialmente alterado à esmectita. Esses minerais são de grande valor para a rochagem, por serem argilas pouco intemperizadas e possuírem uma maior superfície específica, o que contribui positivamente para o aumento da CTC do solo.

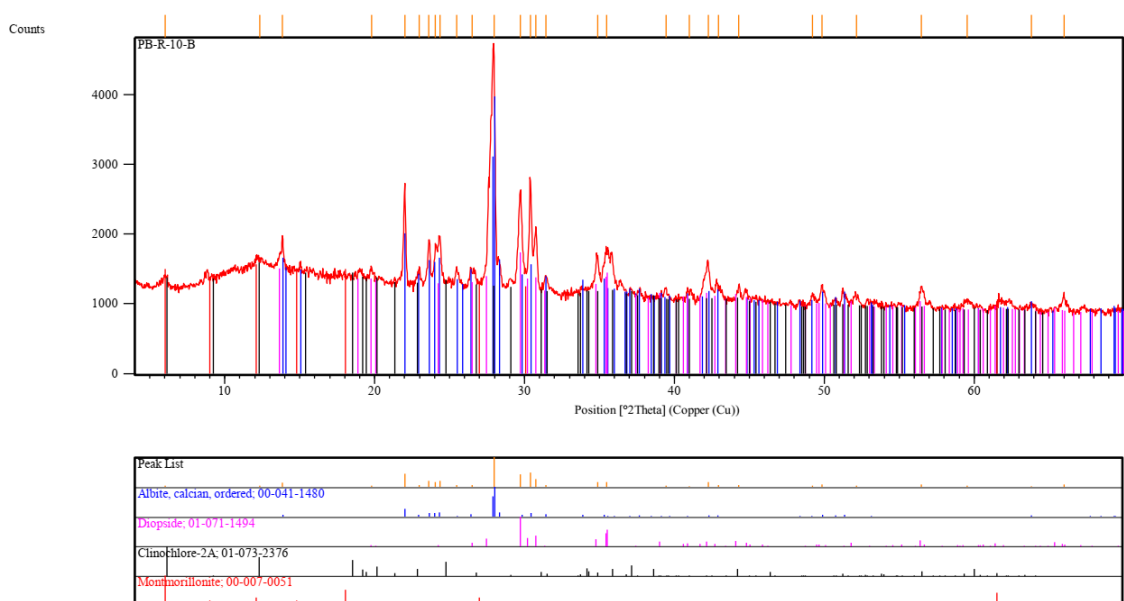


Figura 5. Laudo com o resultado da análise de difratometria de raios-X, realizada na amostra PB-10B pelo Laboratório LAMIN-MA. Amostra contém predominantemente Plagioclásio. Frações moderadas de Piroxênio. Frações pequenas de Clorita/Esmectita.

4.3 Grupo Iricoumé (Pedreira Samauma / PB-05)

O Grupo Iricoumé é constituído por uma série de rochas efusivas ácidas à intermediárias de idade orosiriana que afloram no escudo das Guianas e apresentam notável estado de preservação. Na literatura são descritos desde riolitos, riodacitos e traquitos félsicos até basaltos andesíticos além de tufos e ignimbritos (Pierosan et al., 2011; Marques et al., 2014).

A rocha na frente de lava é uma vulcânica porfírica de matriz afanítica e coloração rosa acinzentada com venulações milimétricas de coloração esverdeada, os fenocristais de quartzo arredondados com cerca de 2 mm e os fenocristais de feldspato prismáticos de até 4 mm, apresentam coloração esbranquiçada (Figura 6).

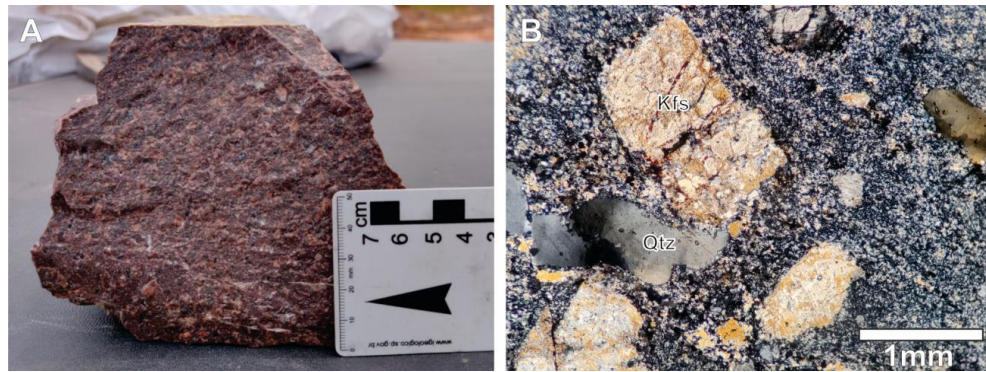


Figura 6. Estação PB-05 - Em (A) foto da amostra coletada; em (B) lâmina delgada sob o microscópio.

Em lâmina delgada é possível notar em detalhe a matriz afanítica e félsica da rocha. Observou-se, também, o avançado grau de intemperismo dos fenocristais de K feldspato e plagioclásio, além de estimar, pela contagem modal, que apenas 3% da rocha é composta por fenocristais de quartzo e que a mesma é composta quase que 80% por matriz afanítica (Figura 6B). Foram identificadas vênulas preenchidas por material afanítico de coloração verde forte, o que indica presença de epidoto microcristalino.

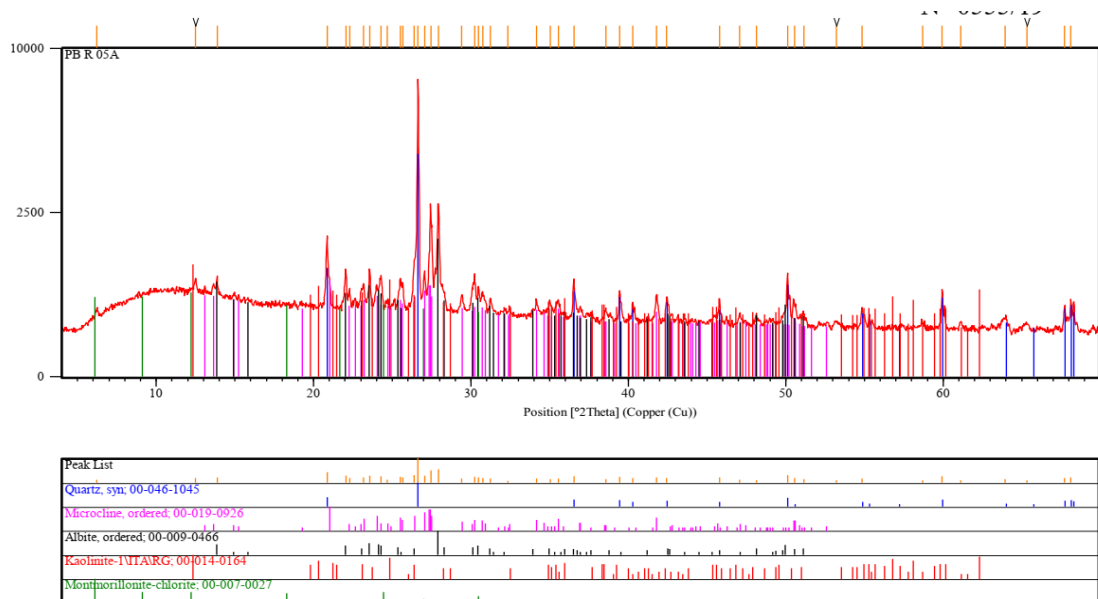


Figura 7. Resultado da análise de DRX realizada na amostra PB-05A. Amostra contém predominantemente Quartzo, Feldspato Potássico e Plagioclásio. Frações pequenas de Caulinita e Esmeclita

A realização de análises de DRX complementares a petrografia auxiliou numa melhor caracterização da mineralogia da amostra (Figura 7). Assim como nas amostras da Formação Apoteri, não foi identificada a sericita como mineral de

alteração e sim, pequenas frações de caulinita e esmectita, além de quartzo, feldspato potássico e plagioclásio.

4.4 Considerações Litoquímicas e Potencial Agromineral

As análises litoquímicas realizadas e expressas na Tabela 1, demonstram os teores obtidos para macronutrientes, micronutrientes e elementos potencialmente tóxicos nas amostras de rocha e PRS coletados nas Pedreiras. Os PRS estão representados pela amostra E, no caso da Pedreira EBAM (PB-01) e pelas amostras C nas Pedreiras Granada (PB-10) e Samauma (PB-05). A comparação entre os materiais e o normatizado na IN 05/2016 do MAPA é representado na Figura 8.

Os resultados demonstram que as amostras dos PRS coletados nas Pedreiras EBAM e Granada (PB-01C e PB-10C) atendem integralmente aos critérios químicos da norma para remineralizadores de solos (MAPA, 2016), apesar de algumas amostras de rocha provenientes dessas duas Pedreiras, individualmente, não atenderem a algum parâmetro da norma. Por exemplo, os quartzos monzonitos potassificados (PB-01B), que não atendem aos 9% de SB, ou nos basaltos (PB-10 A e B), onde os teores de K_2O são inferiores a 1%. Na Pedreira Samauma (PB-05), os valores de SB estão muito abaixo do normatizado, entretanto, esse material apresenta os mais expressivos teores de K_2O entre os estudados. Todos os materiais apresentam teores declaráveis de sílica e ferro. Novamente, destacam-se os materiais da EBAM e Granada que apresentam também teores declaráveis de manganês. É importante ressaltar que, o teor de cobalto no PRS da Pedreira Granada (PB-10C), está próximo do teor declarável normatizado.

Em relação ao PRS da Pedreira Samauma (PB-05C), considera-se que rochas afaníticas são mais suscetíveis à liberação de nutrientes ao sistema solo-planta, tendo em vista que o rápido resfriamento da matriz vulcânica não permite a organização de retículos cristalinos coesos e bem desenvolvidos o que resulta na textura fina das fases minerais observada nesse litotipo. Isso facilitaria os processos alteração intempérica do solo sobre os constituintes desse material. Esse fato, associado aos baixos teores de sílica livre, representados pelos cristais de quartzo (Figura 9), e os elevados teores de K_2O , dão relevância ao prospecto, apesar do mesmo não atender a norma para remineralizadores de solo (MAPA, 2016).

Tabela 1. Caracterização química das amostras coletadas nas Pedreiras EBAM (PB-01A, PB-01B, PB-01C e PB-1E), Samauma (PB-05A e PB-05C) e Granada Mineração (PB-10A, PB-10B e PB-10C).

Amostra	CaO	K ₂ O	MgO	SB	P ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	As	Cd	Hg	Pb	Mn	Ni	Co
	%							mg kg ⁻¹						
PB 01A	4,28	3,29	2,69	10,26	0,41	60,3	8,57	<1	0,65	<0,01	27,5	1239	24,8	20,0
PB 01B	1,91	4,96	0,68	7,55	0,18	66,2	5,00	2	0,22	<0,01	32,9	852	2,7	5,6
PB 01C	8,56	1,63	9,16	19,35	0,36	47,4	11,6	<1	0,14	<0,01	7,9	1781	190,8	49,3
PB 01E	3,89	3,5	2,1	9,49	0,38	61,0	7,50	1	0,14	0,01	20,1	1084	14,0	15,4
PB-10A	7,91	0,85	5,26	14,02	0,17	52,9	8,47	<1	0,08	<0,01	3,5	1471	44,3	44,7
PB-10B	7,98	0,71	5,23	13,92	0,18	53,3	8,61	<1	0,08	<0,01	4,0	1394	46,3	45,0
PB-10C	8,49	1,14	5,3	14,93	0,17	53,5	8,47	<1	0,11	<0,01	4,9	1394	49,0	45,4
PB-05A	0,78	5,35	0,22	6,35	0,03	73,5	1,88	<1	0,12	0,02	23,7	542	2,2	1,4
PB-05C	0,80	5,2	<0,1	6	0,03	74,3	1,90	2	0,23	0,03	22,7	619	0,9	1,3
Legislação ⁽¹⁾		≥ 1	-- ⁽²⁾	≥ 9	≥ 1	≥ 0,05	≥ 0.1	< 15	< 10	< 0,1	< 200	≥ 1000	≥ 50	≥ 50

⁽¹⁾ Em negrito estão destacados os valores que cumprem a instrução normativa do MAPA (2016).

⁽²⁾ Não estabelecido.

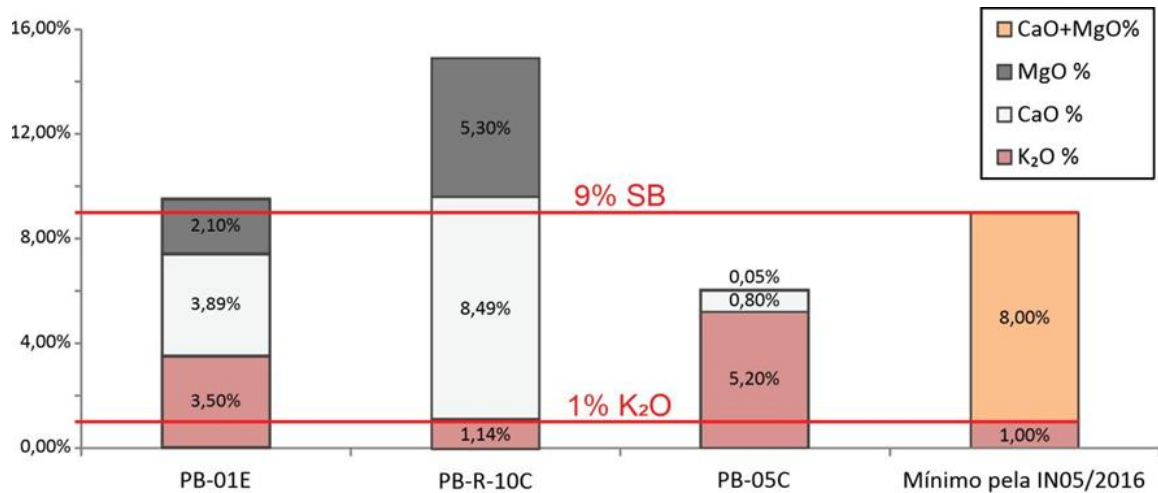


Figura 8. Teores relativos a SB (CaO + MgO + K₂O) e K₂O obtidos por meio das análises químicas dos PRS prospectados nas Pedreiras, em comparação à IN 05/2016

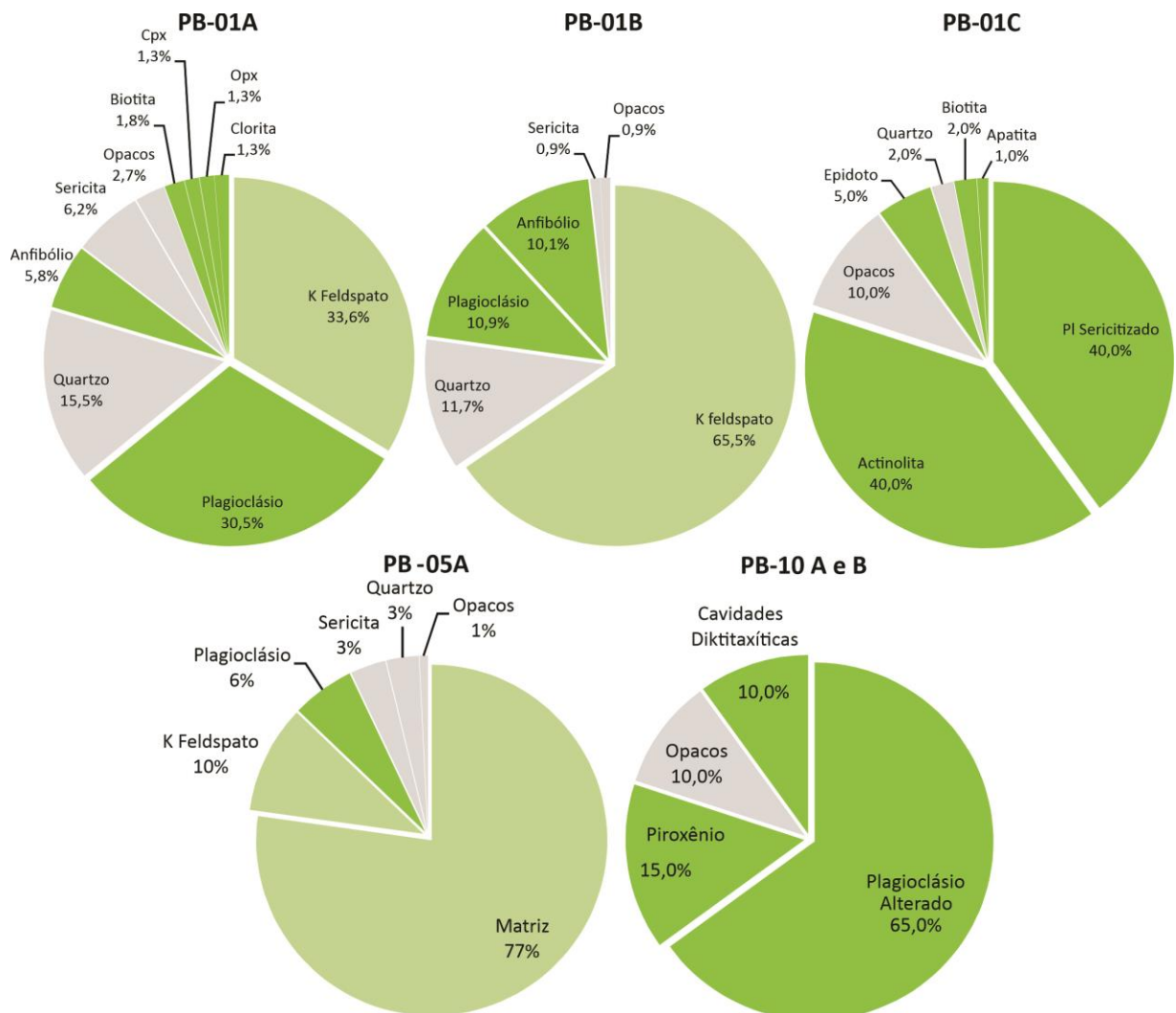


Figura 9. Teores de alguns minerais encontrados nas lâminas de rocha das Pedreiras EBAM (PB-01A, PB-01B e PB-01C), Samauma (PB-05A) e Granada Mineração (PB-10A e 10B)

As amostras na Pedreira EBAM apresentaram teores de quartzo (sílica livre) abaixo de 15,5% (Figura 9), bastante inferiores aos 25% máximos estabelecidos pela norma para remineralizadores de solos (MAPA, 2016), além de detectar a presença de apatita mineral portador de P (importante macronutriente de plantas) e de minerais de alteração (epidoto e sericita) que evidenciam a susceptibilidade das rochas ao intemperismo.

Nas rochas da Pedreira Granada (Figura 9), não foram encontrados quartzo ou K feldspato (minerais de difícil abertura cristalina) nas amostras, que são formadas em sua ampla maioria por plagioclásio e piroxênio o que é muito positivo para sua aplicação como remineralizador. Além disso, foram caracterizadas 10% de cavidades diktitaxíticas em sua composição modal. Isso também tem um impacto positivo para a rochagem, pois essas cavidades estão preenchidas por argilas (categoria 2:1) que possuem grande capacidade de troca catiônica (CTC) o que contribui para a melhora da retenção de nutrientes nos solos.

Em estudo agronômico de incubação de PRS conduzido com as rochas da Formação Apoteri (Granada Mineração) em um Latossolo Amarelo Distrófico desenvolvido sobre a Formação Boa Vista, com doses variando entre 0 a 96 t ha⁻¹, moídas em granulometria menor que 0,053 mm, foi observado que houve aumento dos valores de pH, saindo de 4,8 para 5,5, na dose de 50 t ha⁻¹, além da diminuição da acidez potencial e importantes incrementos nos teores de Ca, Mg, Zn e Cu no solo (Melo et al., 2012.). Os autores concluíram que pó da rocha basáltica pode ser utilizado como uma fonte alternativa de nutrientes visando a correção e adubação de espécies cultivadas.

As análises granulométricas dos PRS (PB-01E; PB-10C; PB-05C) demonstraram, consistentemente, que uma parte inferior a 2% desses PRS apresenta-se na fração argila. A fração silte é representada por percentuais que variaram entre 0,41–11%; areia fina 4–20%; sendo o restante, 80–95% representado pela fração areia grossa. É importante salientar que a metodologia utilizada em laboratório para determinar a granulometria do PRS, difração de raio laser, em muito difere do método tradicionalmente utilizado para texturar solos (pipetagem). Porém, as diferenças entre a granulometria a laser e a pipetagem na fração areia são desprezíveis (Qiu et al., 2021). Esses resultados evidenciam que tais pós, produzidos nesse tipo de empreendimento, podem ser classificados como de baixa reatividade, funcionando como reserva de liberação lenta de nutrientes devido a sua baixa

superfície específica (Brady e Weil, 2013). A cominuição desses fragmentos em frações menores e mais reativas dependeria do emprego de técnicas de moagem, o que potencializaria substancialmente sua reatividade. Entretanto, os custos relativos à moagem devem ser levados em consideração.

Em todos os empreendimentos abordados nesse estudo a britagem é realizada em dois estágios; no estágio inicial são utilizados britadores de mandíbula e, no secundário, britadores cônicos, de modo que é possível estabelecer algumas relações a respeito do efeito da britagem sobre as diferentes rochas estudadas (Figura 10).

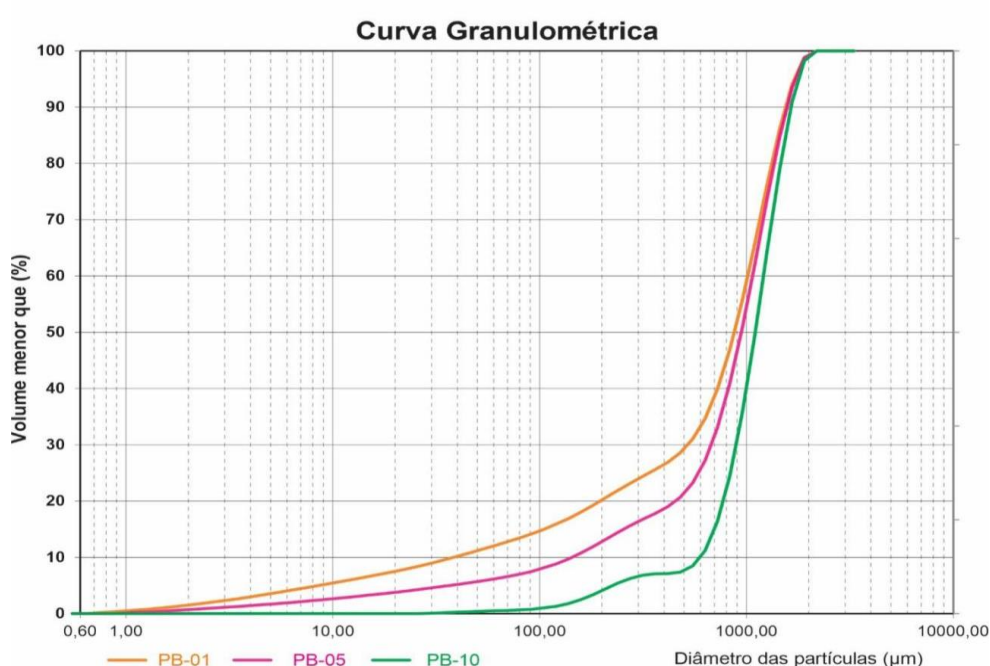


Figura 10. Granulometria à laser das amostras de pó de brita coletadas nos empreendimentos previamente peneiradas à 1 mm

Nota-se que as menores partículas identificadas pelas análises granulométricas foram geradas pela britagem das rochas que, de modo geral, tinham maior granulometria (PB-01). O basalto, rocha de granulometria mais fina, por sua vez (PB-10), quando britado gerou a curva granulométrica mais condensada e fragmentos maiores. O pó proveniente dos quartzos monzoníticos (PB-01) apresentou fragmentos a partir de 0,6 μm de diâmetro, além de 1,5% de argila e 11% de silte por textura. O pó do basalto apresentou seus menores fragmentos na medida de 26 μm, portanto, não possui fragmentos tamanho argila, além de apresentar menos de 0,5% de fragmentos na fração silte. Para a amostra de riolito porfirítico (PB-05), observou-se um comportamento intermediário.

Na rocha fanerítica com cristais maiores, o processo de cominuição promove o estilhaçamento dos cristais, resultando na geração de fragmentos tamanho silte e argila. O quartzo monzonito da Pedreira da EBAM é formado, majoritariamente, por cristais de 1 mm (1000 μm) de diâmetro ou maiores, 64% destes, feldspatos com até 6 mm de diâmetro. O riolito, por sua vez, possui cerca de 16% de fenocristais de feldspato com tamanho de 0,5mm ou maior imersos em uma matriz microcristalina coesa. No basalto, grandes fenocristais são muito raros e a maior parte de sua granulometria tem tamanhos entre 0,1 e 0,3 mm (100–300 μm) de diâmetro. Foi possível observar um acentuado aumento seguido por um patamar delineado pela curva granulométrica de PB-10C nesses valores (100–300 μm). Esse comportamento e a ausência de fragmentos nas frações silte e argila no pó do basalto indicam que o processo de cominuição está promovendo a separação entre os diferentes cristais da rocha e não o estilhaçamento dos mesmos no caso do basalto.

O estilhaçamento dos cristais e diminuição da granulometria à níveis silte e argila são promovidos mais contundentemente por processos de moagem, diferentes dos de britagem, já conhecidos no universo dos agrominerais, como técnicas de mecanoativação (Ciceri et al., 2019).

5 CONCLUSÕES

Os PRS estudados apresentam características químicas, físicas e mineralógicas que viabilizam seu uso na agricultura. Todavia, apenas os pós de rocha provenientes das Pedreiras EBAM (PB-01) e Pedreira Granada (PB-10) apresentaram teores de nutrientes, metais pesados e minerais adequados para serem enquadrados como remineralizadores de solo. O pó de rocha da Pedreira Samauma (PB-05), apesar de não se adequar às normas, possui relevantes teores de K_2O , podendo ser explorado como fertilizante simples. No presente estudo, notou-se haver a existência de logística de extração, britagem e distribuição estabelecidas, além de estarem, os prospectos, localizados em região de fácil acesso, com elevada demanda por insumos agrícolas. A existência de produtos com potencial agromineral já britados e de fácil acesso nesse local poderia contribuir para a diminuição da necessidade por fertilização tradicional exógena à região além de promover uma melhora dos solos e um aumento na produtividade tendo em vista as condições dos solos amazônicos em geral e a escassez dos insumos tradicionais. Por outro lado, cabe ressaltar a necessidade da realização de testes agronômicos com o cultivo de plantas para que tais produtos cumpram as exigências mínimas estabelecidas pela IN 5/2016 do MAPA, sejam registrados e comercializados como remineralizadores de solos.

REFERÊNCIAS

- Alovisi AMT, Taques MM, Alovisi AA, Tokura LK, Silva RS, Piesanti GHL (2017) Alterações nos atributos químicos do solo com aplicação de pó de basalto. **Acta Iguazu** 6:69-79.
- Alovisi AMT, Taques MM, Alovisi AA, Tokura LK, Silva RS, Piesanti GHL, Cassol CJ (2020) Rochagem como alternativa sustentável para a fertilização de solos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental** 9:918-932.
- Bacon CR (1986) Magmatic inclusions in silicic and intermediate volcanic rocks. **Journal of Geophysical Research** 91:6091-6112. <https://doi.org/10.1029/jb091ib06p06091>
- Benevides Filho PRR, Blaskowski AE (Orgs.) (2022). Avaliação do potencial agromineral do Brasil: eixo Manaus - Boa Vista. Manaus: CPRM, 160p.
- Bergmann M, Holanda JLR (2014). Rochagem. In: Holanda JLR. **Geodiversidade do estado de Roraima**. Manaus: CPRM, 252p.
- Brady NC, Weil R (2013). Elementos da natureza e propriedades dos solos. Porto Alegre: Bookman, 684 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento – MAPA. **Instrução Normativa SDA nº 27, de 05 de junho de 2006**. Brasília, DF, 4p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (2021). Anuário estatístico 2021: Setor de transformação de não metálicos. Brasília, DF, 154 p.
- BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos – SAE. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050)**. Brasília, DF, 2021. 195 p.
- Ciceri D, Oliveira M, Stokes RM, Skorina T, Allanore, A (2017) Characterization of potassium agrominerals: Correlations between petrographic features, comminution and leaching of ultrapotassic syenites. **Minerals Engineering** 102:42-57. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.11.016>.
- Cola GPA, Simão JBP (2012) Rochagem como forma alternativa na suplementação de potássio na agricultura agroecológica. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável** 7:15-27.

Colin Y, Nicolitch O, Turpault MP, Uroz S (2017) Mineral types and tree species determine the functional and taxonomic structures of forest soil bacterial communities. **Applied and Environmental Microbiology** 83:1-23. <https://doi.org/10.1128/AEM.02684-16>.

Fornero S, Lobo JT, Freire F (2018) Caracterização faciológica de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas por meio de perfis de imagem microresistiva e acústica: estudo de caso no pré-sal, bacia de Santos. Rio de Janeiro: UFF. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20083.02083>.

Gillman GP, Burkett DC, Coventry RJ (2002) Amending highly weathered soils with finely ground basalt rock. **Applied Geochemistry** 17:987-1001. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00078-1).

Goff F (1996). Vesicle cylinders in vapor-differentiated basalt flows. **Journal of Volcan-ology and Geothermal Research** 71:167-185. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00073-9](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00073-9).

Hanisch AL, Fonseca JA, Balbinot JAA, Spagnollo E (2013) Efeito de pó de basalto no solo e em culturas anuais durante quatro safras, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável** 3:100-107.

Hensel J (2003) **Pães de Pedra**. Canoas: Salles Editora, 78p.

Keesstra SD, Bouma J, Wallinga J, Tittonell P, Smith P, Cerdà A, Montanarella L, Quinton JN, Pachepsky Y, Van Der Putten WH, Bardgett RD, Moolenaar S, Mol G, Jansen B, Fresco LO (2016) The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals. **Soil**, 2:111-128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>.

Leonardos OH, Theodoro SH, Assad ML (2000) Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 56:3-9. <https://doi.org/10.1023/A:1009855409700>.

Manning DAC (2015) How will minerals feed the world in 2050?. **Proceedings of the Geologists' Association** 126:14-17. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2014.12.005>.

Manning DAC, Theodoro SH (2020) Enabling food security through use of local rocks and minerals. **Extractive Industries and Society** 7:480-487. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.11.002>.

Marques SNS, Souza VS, Dantas EL, Valério CS, Nascimento RSC (2014) Contributions to the petrography, geochemistry and geochronology (U-Pb and Sm-Nd) of the Paleoproterozoic effusive rocks from Iricoumé Group, Amazonian Craton, Brazil. **Brazilian Journal of Geology** 44:121-138. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400010010>

Melo VF, Uchôa SCP, Dias FO, Barbosa GF (2012) Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta Amazonica** 42: 471-476. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000400004>

Moreira A, Fageria NK (2009) Soil Chemical Attributes of Amazonas State, Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 40:2912-2925. doi:10.1080/00103620903175371.

Morello TF, Piketty MG, Gardner T, Parry L, Barlow J, Ferreira J, Tancredi NS (2018) Fertilizer Adoption by Smallholders in the Brazilian Amazon: Farm-level Evidence. **Ecological Economics** 144:278-291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.010>.

ONU. Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development (2022) **The 17 goals | Sustainable development**. Genebra: ONU.

Pierosan R, Lima EF, Nardi LVS, Bastos Neto AC, Campos CP, Jarvis K, Ferron JMTM, Prado, M (2011) Geochemistry of Palaeoproterozoic volcanic rocks of the Iricoume Group, Pitinga Mining District, Amazonian craton, Brazil. **International Geology Review** 53:946-979. <https://doi.org/10.1080/00206810903391542>

Pingali PL (2012) Green revolution: Impacts, limits, and the path ahead. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 109:12302-12308. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>.

Pinto VM, Santos JOS, Ronchi LH, Hartmann LA, Bicudo CA, Souza V (2017) Field and geochemical constraints on the relationship between the Apoteri basalts (northern Brazil, southwestern Guyana) and the Central Atlantic Magmatic Province. **Journal of South American Earth Sciences** 79:384-393. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.08.015>.

Qiu WHW, Curtin D, Motoi L (2021) Soil particle size range correction for improved calibration relationship between the laser-diffraction method and sieve-pipette method. **Pedosphere** 31:134-144. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60055-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60055-8).

Ribeiro GM, Almeida JA, Silva L. (2016) Solubilização de fonolito, basalto e olivina melilitito em ácido cítrico e ácido acético. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa Cerrados, p. 39-44.

Swoboda P, Döring TF, Hamer M (2022). Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of the Total Environment** 807:18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>

Uroz S, Kelly LC, Turpault MP, Lepleux C, Frey-Klett P (2015) The mineralo-sphere concept: mineralogical control of the distribution and function of mineral-associated bacterial communities. **Trends in Microbiology** 23:751-762. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2015.10.004>

Uroz S, Turpault MP, Delaruell C, Mareschal L, Pierrat JC, Frey-Klett P (2012) Minerals affect the specific diversity of forest soil bacterial communities. **Ge-omicrobiology Journal** 29:88-98. <https://doi.org/10.1080/01490451.2010.523764>.

Valério CS, Souza VS, Macambira MJB, Galarza MA (2006) Geoquímica e geocronologia Pb-Pb em zircão da suíte intrusiva de colisão no paleoproterozóico da Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Geociências** 36:359-370.

Van Straaten P (2002) Rocks for Crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa. ICRAF: Nairobi, 338p.

Van Straaten P (2007) Agrogeology: The use of rocks for crops. Cambridge: Enviroquest, 426p.

Walker GPL (1993) Basaltic-volcano systems. **Magmatic Processes and Plate Tectonic** 76:3-38.

Wik M, Pingali P, Broca S (2008) Background Paper for the World Development Report 2008 – Global Agricultural Performance: Past Trends and Future Prospects. Washington: World Bank.